

Uso de Simuladores Virtuales en Biología para Desarrollar Competencias Científicas: Revisión Sistemática

Using Virtual Simulators in Biology to Develop Scientific Competencies: A Systematic Review

 **Diana Lorena Herrera Cala**

Grupo de Investigación en Ecología y Conservación de la Biodiversidad (EcoBio)
Maestría en Educación
Facultad de Educación
Universidad Santiago de Cali.
Valle del Cauca, Colombia
diana.herrera10@usc.edu.co

 **Jonathan Pelegrin Ramírez**

Grupo de Investigación en Ecología y Conservación de la Biodiversidad (EcoBio)
Maestría en Educación
Facultad de Educación
Universidad Santiago de Cali.
Valle del Cauca, Colombia
jonathan.pelegrin00@usc.edu.co

Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática sobre el uso de simuladores virtuales (SV) en la enseñanza de la biología en educación secundaria y su contribución al desarrollo de competencias científicas. La investigación se enmarca en la metodología PRISMA 2020 y analiza un total de 42 estudios empíricos publicados entre 2010 y 2025, seleccionados con base en criterios de inclusión relacionados con la temática, el nivel educativo, el rigor científico y el acceso completo al documento. El objetivo consistió en analizar de qué manera el uso de los SV contribuye al desarrollo de las competencias científicas, propuestas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2023a): explicar fenómenos científicamente; construir y evaluar diseños para la investigación científica e interpretar datos y pruebas científicas de manera crítica y; buscar, evaluar y usar información científica para tomar decisiones y actuar. Los resultados se organizaron en tres categorías. La

primera, categorización cuantitativa de los estudios, muestra una creciente producción académica a partir del año 2020, centrada en países desarrollados y con una limitada representación de América Latina. La segunda, análisis del contenido pedagógico, revela una predominancia de simuladores interactivos aplicados al estudio de procesos celulares, fenómenos ecológicos y sistemas fisiológicos, así como una asociación entre el uso de SV y el desarrollo de competencias científicas, especialmente en el diseño experimental e interpretación de datos; también se reportaron beneficios pedagógicos, como el aumento en la motivación, la comprensión conceptual y el mejoramiento del rendimiento académico. La tercera categoría, reflexión crítica, destaca los vacíos en la documentación explícita de las competencias científicas, la baja cobertura de temas como genética o evolución, y la escasa diversidad metodológica y geográfica. Adicionalmente, se identifican barreras como la falta de formación docente, la infraestructura tecnológica insuficiente y la débil integración curricular. A partir de estos hallazgos, se proponen recomendaciones centradas en el fortalecimiento de la formación tecnopedagógica, el diseño didáctico estructurado, la mediación activa del profesorado y la evaluación formativa. Se concluye que los SV son herramientas eficaces para fomentar el aprendizaje significativo y el desarrollo de competencias científicas, siempre que se integren en secuencias pedagógicas estructuradas, contextualizadas y mediadas por el docente. Asimismo, se sugiere ampliar las líneas de investigación, garantizar el acceso equitativo a estas tecnologías y promover políticas educativas que respalden su incorporación en el aula.

Palabras Clave: Simuladores Virtuales, Competencias Científicas, Enseñanza de Biología, Educación Secundaria, Innovación Educativa.

Abstract

This article presents a systematic review on the use of virtual simulators (VS) in biology education at the secondary level and their contribution to the development of scientific competencies. The study is framed within the PRISMA 2020 methodology and analyzes a total of 42 empirical studies published between 2010 and 2025, selected based on inclusion criteria related to thematic focus, educational level, scientific rigor, and full-text availability. The objective was to analyze how the use of VS contributes to the development of the scientific competencies proposed by the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 2023a): explaining phenomena scientifically; constructing and evaluating designs for scientific inquiry and interpreting data and scientific evidence critically; and searching for, evaluating, and using scientific information to make decisions and take action. The findings are organized into three categories. The first, quantitative categorization of the studies, shows a growing academic production since 2020, mostly concentrated in developed countries and with limited representation from Latin America. The second, analysis of pedagogical content, reveals a predominance of interactive simulators applied to the study of cellular processes, ecological phenomena, and physiological systems, as well as a strong association between the use of VS and the development of scientific competencies, particularly in experimental design and data interpretation. Pedagogical benefits such as increased motivation, conceptual understanding, and academic performance were also reported. The third category, critical reflection, highlights gaps in the explicit documentation of scientific competencies, low coverage of topics such as genetics and evolution, and limited methodological and geographical diversity. In addition, barriers were identified, such as insufficient teacher training, inadequate technological infrastructure, and weak curricular integration. Based on these findings, recommendations are proposed, focusing on strengthening techno pedagogical training, intentional instructional design,

active teacher mediation, and formative assessment. It is concluded that VS are effective tools for promoting meaningful learning and the development of scientific competencies, provided they are integrated into structured, contextualized, and teacher-guided pedagogical sequences. Furthermore, it is suggested to expand research lines, ensure equitable access to these technologies, and promote educational policies that support their incorporation into the classroom.

Keywords: *Virtual Simulators, Scientific Competencies, Biology Teaching, Secondary Education, Systematic Review, Educational Innovation*

Introducción

La enseñanza de la biología como disciplina de las Ciencias Naturales, promueve una cultura científica mediante el estudio de los seres vivos, sus interacciones con el entorno y el análisis de problemáticas globales como la sostenibilidad, la conservación ambiental y la salud humana (Hogan y O'Flaherty, 2022). En consecuencia, esta área del conocimiento debe fomentar el análisis de problemas, la explicación de fenómenos y la creatividad en la búsqueda de soluciones, a partir de enfoques científicos basados en el pensamiento crítico, la indagación y la comunicación, con el propósito de desarrollar en los estudiantes una mirada reflexiva, que les permita tomar decisiones informadas y aplicar los principios biológicos para transformar su sociedad (Guerrero y Sjöström, 2024; Labov et al, 2010; Ocando et al., 2020; Rybalko et al, 2020).

Este enfoque formativo es respaldado por la Ley General de Educación (Ley 115 de 1994, art. 5), al señalar que la educación debe fomentar el conocimiento científico y promover una actitud crítica, reflexiva y analítica, orientada a la solución de problemas que contribuyan al progreso del país. De forma complementaria, la Organización de las Naciones

Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2016), destaca el papel de las Ciencias Naturales en el desarrollo de habilidades de investigación y pensamiento científico, las cuales, al integrarse con los conocimientos y actitudes, constituyen pilares esenciales para el desarrollo de competencias científicas.

Desde esta perspectiva, la competencia científica se define como la capacidad observable y medible para interactuar con el mundo natural, identificar problemas, explicar fenómenos y tomar decisiones fundamentadas en el conocimiento científico; esta aptitud junto con habilidades como la búsqueda y síntesis de información, el análisis, el razonamiento y el trabajo en equipo, son primordiales para la comprensión de la ciencia, la construcción del conocimiento y la formación ciudadana (Blanco-López et al, 2015; Chona et al, 2006; Hernández, 2005). Del mismo modo, el Marco de Evaluación de Ciencia PISA 2025, considera estas competencias como un resultado educativo que integra la comprensión y aplicación de conceptos científicos, como la capacidad de tomar decisiones (OCDE, 2023a).

En este marco, la OCDE (2023a) define tres competencias científicas. La primera consiste en explicar fenómenos científicamente, es decir, reconocer, aplicar y evaluar explicaciones sobre fenómenos naturales y tecnológicos, a partir de la integración del conocimiento conceptual, procedimental y epistémico. La segunda se centra en construir y evaluar diseños para la investigación científica e interpretar datos y pruebas científicas de manera crítica, lo cual implica formular preguntas, proponer diseños experimentales, interpretar datos, extraer conclusiones basadas en la evidencia y evaluar la validez de los resultados. Por último, la tercera competencia se orienta en buscar, evaluar y utilizar la información científica para tomar decisiones y actuar, lo que requiere desarrollar una postura crítica de la información disponible, distinguir entre datos confiables y afirmaciones

infundadas, aplicando dicho conocimiento a la resolución de problemas actuales o al desarrollo sostenible.

A pesar de la importancia de estas competencias en la formación científica y ciudadana, los resultados de PISA 2022, evidencian un bajo desempeño en ciencias por parte de un alto porcentaje de estudiantes. En los países miembros de la OCDE, solo el 7% de los estudiantes alcanzó los niveles superiores (5 y 6), mientras que el 43% se ubicó en niveles intermedios (3 y 4); por otro lado, el 25% presentó un desempeño básico (nivel 2) y el 25% restante presentó un nivel menor al 2. Estos resultados reflejan debilidades en la interrelación de conceptos científicos, la formulación de hipótesis, la interpretación de datos, la capacidad para explicar fenómenos o evaluar diseños experimentales complejos; además, los estudiantes con bajo rendimiento suelen limitarse a reconocer conceptos y fenómenos científicos básicos, realizar investigaciones simples con no más de dos variables, seguir instrucciones explícitas e interpretar gráficos de baja complejidad cognitiva (OCDE, 2023b).

Estas deficiencias ponen de manifiesto los problemas que enfrenta la enseñanza de las Ciencias Naturales y resaltan la necesidad de fortalecer estrategias pedagógicas orientadas a la indagación, la explicación de fenómenos y el uso del conocimiento en contextos científicos, con el fin de favorecer el desarrollo de competencias científicas. Entre los factores que obstaculizan dicho desarrollo, se destacan el uso predominante de métodos tradicionales que priorizan la memorización sobre la comprensión analítica, el acceso limitado a recursos educativos, la escasa participación activa de los estudiantes y la utilización de materiales didácticos poco efectivos; todo esto puede dificultar la relación entre procesos complejos, desmotivar a los estudiantes y limitar su curiosidad científica, lo cual afecta negativamente la construcción de aprendizajes significativos (Arteaga y Tapia, 2009; Basulto-González, 2016; Zhu, 2019).

Frente a este panorama, los simuladores virtuales (SV) se presentan como una alternativa tecnológica inmersiva e interactiva, que puede transformar la enseñanza de las ciencias. Estos entornos digitales fomentan la participación activa, la visualización de conceptos y teorías científicas y, promueven la comprensión y aplicación del conocimiento; además, permiten explorar conceptos abstractos, manipular variables y analizar relaciones de causa y efecto en entornos controlados, lo que los convierte en herramientas útiles para la preparación previa al trabajo en laboratorio físico y para el fortalecimiento de habilidades experimentales (Dyrberg et al, 2017; Pang, et al, 2025; Rutten et al, 2012). Por lo tanto, su integración con métodos tradicionales permite la adaptación del aprendizaje a las necesidades del estudiante, promoviendo experiencias transferibles a diversos contextos, mediante estrategias de trabajo efectivas.

El uso de SV en el contexto educativo posibilita la aplicación del conocimiento teórico en entornos simulados, facilitando la comprensión de fenómenos complejos, especialmente cuando la experimentación directa resulta difícil o limitada (Camacho y Medina-Chicaiza, 2022; Cataldi, 2013); además, contribuyen al aprendizaje significativo y al desarrollo de habilidades científicas mediante la exploración activa y la interacción con modelos virtuales (Orrego et al., 2024). Sin embargo, para que estos recursos cumplan su potencial formativo, es imprescindible que los docentes reciban capacitación técnica, se garantice el acceso equitativo a la tecnología y se establezcan procesos de retroalimentación efectivos que optimicen el aprendizaje.

Si bien existen investigaciones que analizan la efectividad de los SV en la enseñanza de las ciencias naturales, muchas se centran en aspectos técnicos o en el aprendizaje de conceptos relacionados con la física o la química, dejando un vacío respecto al papel de los SV en el desarrollo de competencias científicas, especialmente en la enseñanza de la biología.

Ante esta brecha en la literatura académica, resulta pertinente realizar una revisión sistemática, siguiendo los lineamientos del modelo PRISMA 2020, con el propósito de identificar, analizar y consolidar los hallazgos en torno a esta temática. Por lo tanto, la presente investigación busca responder a la pregunta: ¿Cómo contribuye el uso de simuladores virtuales en la enseñanza de la biología al desarrollo de competencias científicas en educación secundaria? En consecuencia, el objetivo general es analizar la contribución del uso de simuladores virtuales en la enseñanza de la biología al desarrollo de competencias científicas en educación secundaria.

A través de esta revisión, se espera sintetizar los beneficios y limitaciones del uso de simuladores en la enseñanza de biología, así como ofrecer recomendaciones prácticas para su integración en el aula. De este modo, este estudio busca contribuir al conocimiento académico, optimizar la enseñanza de las ciencias naturales y proporcionar información para futuras prácticas pedagógicas y políticas educativas relacionadas con la integración de tecnologías digitales en la enseñanza de la biología.

Metodología

La presente revisión sistemática explora y documenta el estado actual del conocimiento sobre el uso de simuladores virtuales (SV) en la enseñanza de biología en la educación secundaria. Se analiza cómo estas herramientas tecnológicas contribuyen al desarrollo de competencias científicas, al tiempo que se identifican los avances actuales, los vacíos en la literatura y las oportunidades de innovación pedagógica en este campo.

El estudio sigue un diseño de revisión sistemática por su capacidad para proporcionar un proceso estructurado, que garantice la replicabilidad y validez de los hallazgos; para ello, se siguieron los parámetros establecidos en la declaración PRISMA 2020 (Preferred

Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el fin de asegurar el rigor en la búsqueda, la selección y la síntesis de los estudios incluidos (Page et al., 2021). La revisión contempla investigaciones publicadas entre 2010 y febrero de 2025, seleccionadas con base en criterios de inclusión y exclusión, rigurosamente definidos, lo cual permite respaldar la pertinencia y calidad de la evidencia analizada.

Criterios de Elegibilidad

Se establecieron criterios de inclusión y exclusión para garantizar la selección de estudios directamente relacionados con el uso de SV en la enseñanza de la biología y su contribución al desarrollo de competencias científicas. Los estudios seleccionados cumplieron con los criterios detallados en la Tabla 1, los cuales consideran el tipo de estudio, el tema central, los resultados evaluados, el nivel educativo, el periodo de publicación, el idioma, la disponibilidad del texto y su indexación en bases de datos académicamente reconocidas.

Tabla 1

Criterios de elegibilidad para la selección de estudios incluidos en la revisión sistemática

Categoría	Criterio de inclusión	Criterio de exclusión
Tipo de estudio	Estudios empíricos (cuantitativos, cualitativos o mixtos), publicados en revistas indexadas.	Opiniones, resúmenes, ensayos, editoriales, notas de conferencias, o publicaciones sin revisión por pares.
Tema central	Estudios sobre el impacto de simuladores educativos en la enseñanza de biología y el desarrollo de competencias científicas.	Estudios que utilicen simuladores en áreas distintas a biología, que no aborden competencias científicas o que se centren exclusivamente en su desarrollo técnico.
Resultados evaluados	Investigación que reporte el desarrollo de competencias científicas específicas:	Publicaciones que no midan ni describan el impacto en competencias científicas.

	indagación, explicación de fenómenos, o uso del conocimiento científico.	
Ámbito educativo	Estudios centrados en la educación secundaria (estudiantes de 11 a 18 años).	Estudios centrados en educación superior, educación preescolar o primaria (excepto si se relacionan directamente con el nivel de educación secundaria).
	Investigaciones sobre simuladores educativos en la enseñanza de biología o disciplinas afines a las ciencias biológicas.	Investigaciones sobre simuladores educativos aplicados a la enseñanza de otras asignaturas diferente a la biología o disciplinas afines a las ciencias biológicas.
Periodo de publicación	Artículos publicados entre 2010 y el 2025.	Artículos publicados antes de 2010.
Idioma	Publicaciones en español o inglés.	Publicaciones en otros idiomas.
Disponibilidad	Estudios con acceso completo al texto o que incluyan información suficiente en el resumen para el análisis.	Publicaciones sin acceso al texto completo o que no brinden información suficiente en el resumen.
Indexación	Estudios publicados en revistas científicas indexadas internacionalmente (Scimago Journal Rank–SJR), en sistemas regionales (Latindex) o en bases especializadas como ERIC.	Artículos no indexados en bases reconocidas ni disponibles en fuentes académicas confiables.

Nota. La tabla presenta los criterios utilizados para incluir o excluir estudios en esta revisión sistemática, agrupados por categoría temática.

Por otro lado, se excluyeron aquellas publicaciones que no cumplieran con estos criterios, tales como opiniones, ensayos, resúmenes o publicaciones sin revisión por pares; también se descartaron investigaciones sobre SV en disciplinas distintas de la biología, que

no evaluarán competencias científicas o que se enfocaran en niveles educativos diferentes a la educación secundaria. De igual forma, se eliminaron los estudios publicados antes de 2010, en idiomas distintos al español o inglés, o sin acceso al texto completo.

Fuentes de Información

La búsqueda de información se realizó en bases de datos académicamente reconocidas, entre ellas Scopus, Taylor & Francis Group, Web of Science y Dialnet; estas fueron seleccionadas por su cobertura de publicaciones indexadas a nivel internacional (Scimago Journal Rank - SJR) y regional (Latindex), con el objetivo de incluir investigaciones relevantes y de alta calidad. Asimismo, se consultó ERIC, por tratarse de una base de datos especializada en educación, y Google Scholar, como complemento para identificar estudios adicionales que cumplieran con los criterios de elegibilidad. La búsqueda cubrió publicaciones en el periodo comprendido entre 2010 y febrero de 2025.

Estrategia de Búsqueda

La estrategia de búsqueda fue específica para cada base de datos, para identificar y seleccionar de forma rigurosa estudios indexados que abordaran el uso de los SV en biología y su contribución al desarrollo de competencias científicas en secundaria. Se utilizaron palabras clave como “Simuladores Educativos”, “Competencias Científicas”, “Enseñanza de Biología” y “Educación Secundaria”.

Para ampliar la cobertura, se aplicaron operadores booleanos (AND, OR), así como sinónimos en español e inglés; por ejemplo, en Scopus se utilizó la fórmula: (“educational simulators” OR “educational simulations”) AND (“scientific competencies” OR “scientific skills”) AND (“biology education” OR “biology teaching”) AND (“secondary education” OR “middle school” OR “high school”). Además, se aplicaron configuraciones avanzadas como

truncamientos (*) y filtros por idioma, tipo de estudio y periodo de publicación. Estas estrategias permitieron refinar los resultados y asegurar la inclusión de estudios pertinentes.

Proceso de Selección de Estudios

El proceso de selección de estudios se desarrolló en cuatro etapas, siguiendo las directrices de la metodología PRISMA 2020: identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión final.

En la primera etapa, se identificaron 865 publicaciones, tras aplicar filtros automáticos por año, idioma, temática y disponibilidad de texto completo; estas se distribuyeron de la siguiente manera: 158 en Scopus, 203 en Taylor & Francis Group, 93 Web of Science, 50 en Dialnet, 11 en ERIC y 350 en Google Scholar. Posteriormente, se depuraron los resultados mediante la lectura de títulos, lo que redujo la muestra a 74 registros; además, se eliminaron 7 estudios duplicados, luego de comparar títulos, autores y años de publicación, obteniendo una muestra de 67 estudios únicos.

En la segunda etapa, se revisaron los resúmenes de los 67 estudios seleccionados, para evaluar su pertinencia frente a los criterios de inclusión, excluyendo 17 por enfocarse en el desarrollo técnico de los SV, sin establecer una conexión pedagógica o por abordar niveles educativos distintos a la educación secundaria; esto redujo la muestra a 50 artículos. Durante la tercera etapa, se evaluó el texto completo de los 50 estudios; 8 fueron excluidos por centrarse en asignaturas diferentes a la biología o ciencias biológicas afines, dejando una muestra final de 42 estudios.

Al final, en la cuarta etapa, los 42 estudios fueron incorporados en la revisión sistemática, ya que cumplían con todos los criterios de inclusión, como estar publicados a partir del año 2010, centrarse en el uso de simuladores educativos en la enseñanza de la

biología o ciencias biológicas y su contribución al desarrollo de competencias científicas; además de aplicarse en el nivel de educación secundaria. La Figura 1, elaborada con base en el diagrama de flujo PRISMA 2020, resume este proceso de selección.

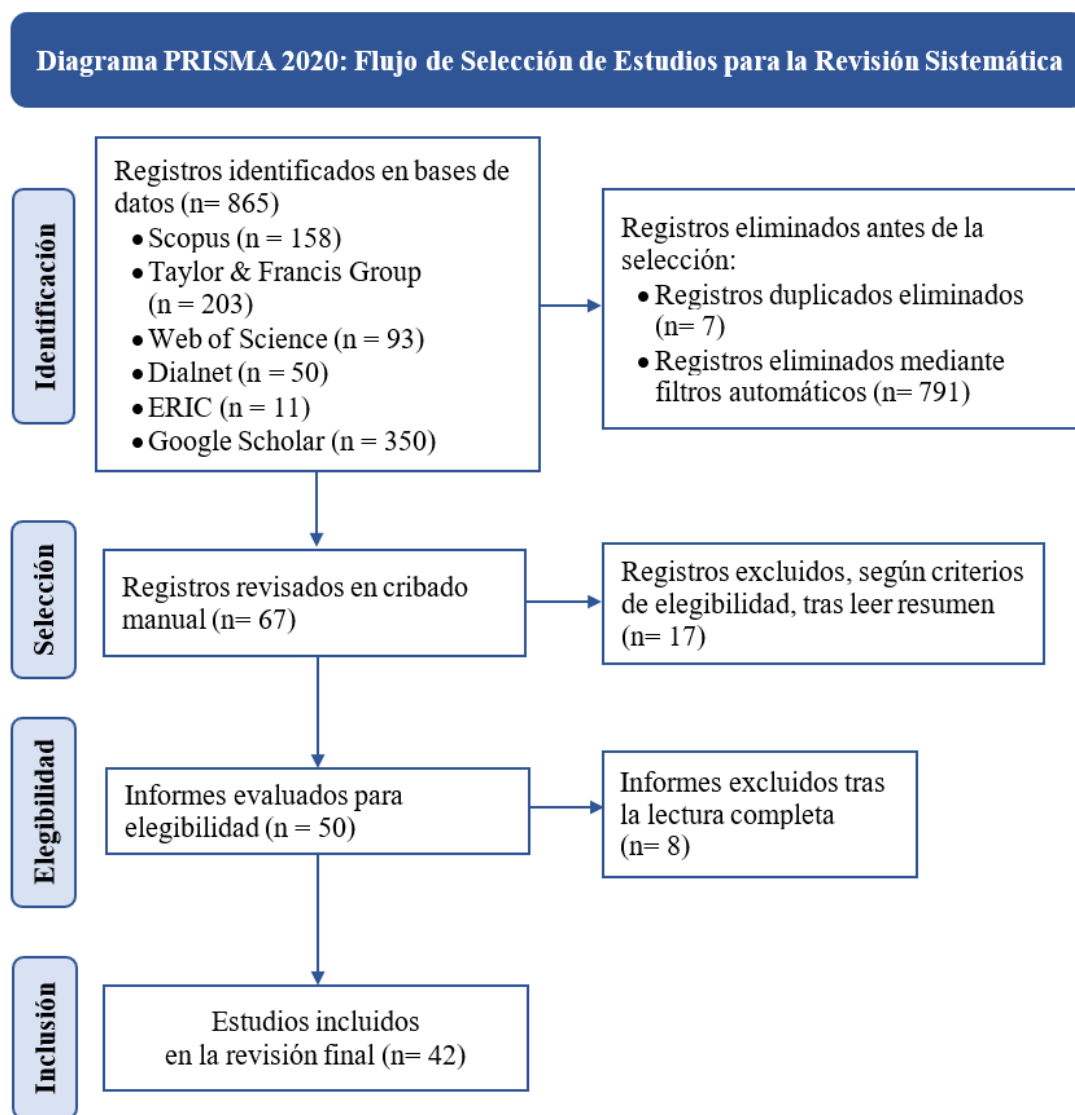
Cabe señalar que, durante la búsqueda se evidenció una alta proporción de estudios centrados en SV en las áreas de física y química, así como una alta concentración en contextos universitarios. Esta situación obligó a aplicar con mayor rigurosidad los criterios de inclusión, priorizando investigaciones enfocadas en contenidos biológicos y población escolar de secundaria.

Proceso de Extracción y Análisis de Datos

La información de los estudios seleccionados fue organizada en la Matriz de Revisión Sistemática diseñada en Google Sheets, con el propósito de estructurar los datos más relevantes y facilitar su análisis, incluyendo variables como: título, autores, país, palabras clave, año, revista, indexación, resumen, objetivo general, metodología, muestra/población, resultados, conclusiones, recomendaciones, competencias o habilidades científicas identificadas, tipo de simulador/nombre, relación con la investigación y DOI/URL. Durante el proceso, se realizaron revisiones cruzadas en distintos momentos para verificar la fidelidad de los datos, corregir posibles errores o inconsistencias e incluir información faltante, fortaleciendo así la consistencia y confiabilidad del análisis.

Figura 1.

Diagrama PRISMA 2020: Flujo de selección de estudios sobre simuladores educativos en biología.



Nota: El diagrama muestra las fases de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de estudios, conforme a la declaración PRISMA 2020. Adaptado de Page et al. (2021), bajo la licencia Creative Commons CC BY 4.0.

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de los artículos seleccionados, junto con su respectiva discusión a la luz de los antecedentes

revisados; para ello, se determinaron tres categorías de estudio. La primera, categorización cuantitativa de los estudios, identifica las tendencias generales en cuanto a su distribución geográfica, temporal y poblacional. La segunda, análisis del contenido pedagógico, explora los tipos de SV utilizados, su contribución al desarrollo de competencias científicas, su impacto pedagógico, los contenidos biológicos abordados, así como las barreras reportadas y las recomendaciones sugeridas para su implementación. Por último, la tercera categoría, reflexión crítica sobre los hallazgos, permite identificar vacíos existentes en la literatura académica y las innovaciones pedagógicas destacadas; además, plantea proyecciones para el fortalecimiento del uso de SV en la enseñanza de la biología.

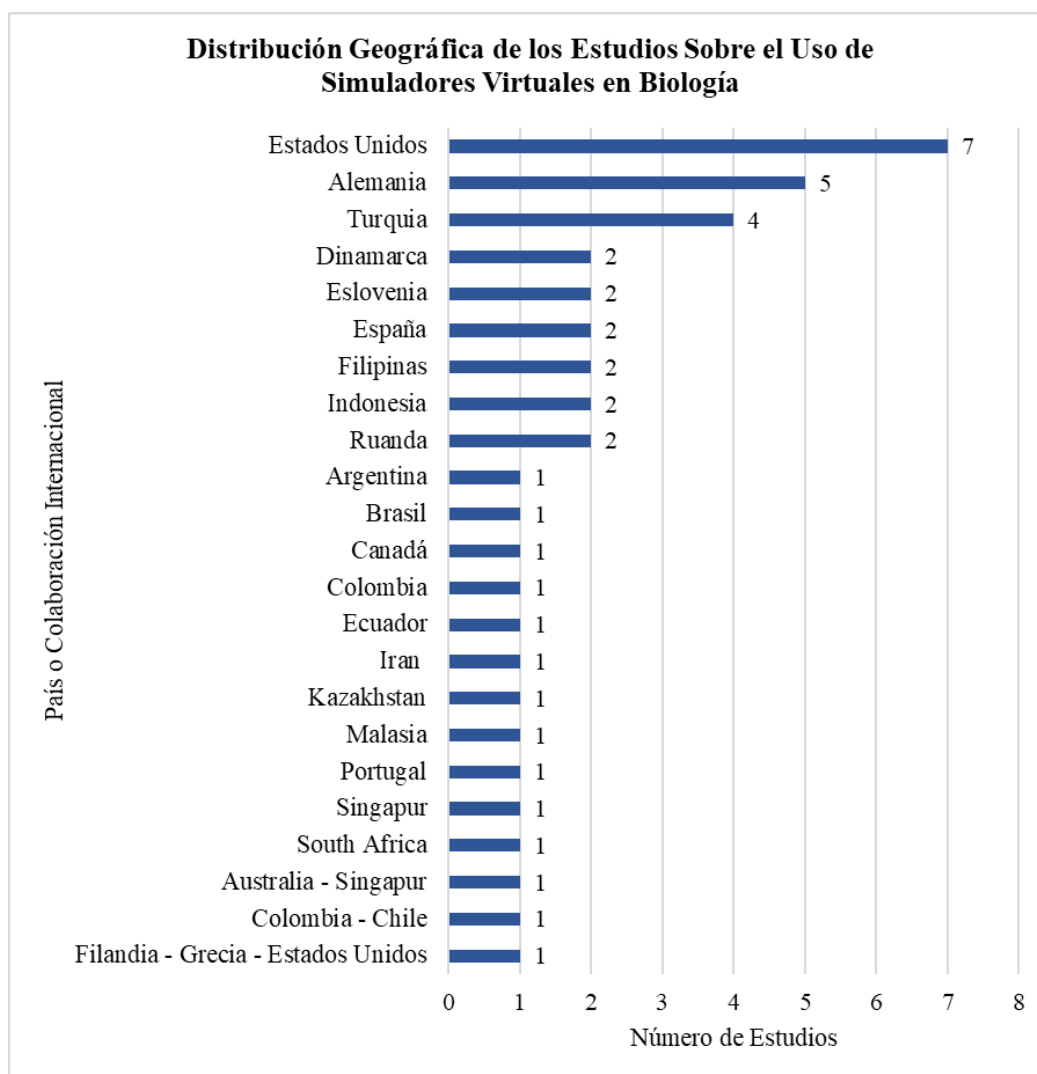
Categorización Cuantitativa de los Estudios

Distribución Geográfica. El análisis geográfico de los 42 artículos revisados muestra una distribución diversa, con investigaciones desarrolladas en 20 países de manera independiente y 3 que corresponden a colaboraciones interinstitucionales entre naciones. La Figura 2 presenta la localización de los estudios sobre el uso de SV en la enseñanza de la biología en educación secundaria.

Estados Unidos lidera la producción científica en este campo con un total de 7 estudios, seguido por Alemania con 5 y Turquía con 4, reflejando tanto su capacidad de acceso a tecnologías educativas, como su interés por integrarlas a contextos escolares. Con una participación moderada, le siguen Dinamarca, Eslovenia, España, Filipinas, Indonesia y Ruanda, aportando cada uno 2 estudios. Por otra parte, se identifican contribuciones individuales de Argentina, Brasil, Canadá, Colombia, Ecuador, Irán, Kazajistán, Malasia, Portugal, Singapur y Sudáfrica, así como colaboraciones internacionales entre Australia y Singapur, Colombia y Chile y, Finlandia, Grecia y Estados Unidos.

Figura 2

Distribución geográfica de los estudios sobre el uso de simuladores virtuales en biología



Aunque el uso de SV en la enseñanza de la biología refleja un interés global, también revela diferencias significativas en términos de producción científica e implementación tecnológica. Los países con mayor desarrollo y sistemas educativos avanzados, tienden a liderar este tipo de investigaciones, posicionándose como referentes en la integración de estas herramientas digitales en el aula (Akpan et al, 2024); en contraste, varias naciones de América Latina y África enfrentan desafíos que limitan la adopción de estas tecnologías, asociadas a una infraestructura tecnológica deficiente, acceso desigual a dispositivos y conectividad, escasa capacitación docente, políticas públicas poco efectivas y restricciones

presupuestales para la innovación educativa (Guzmán Monar et al, 2023; Setyowati et al, 2023; UNESCO, 2023).

Esta disparidad revela un vacío investigativo de tipo geográfico y pone en evidencia las brechas tecnológicas entre regiones (Byukusenge et al, 2023; Ngema y Motlhabane, 2025). Esta situación representa una oportunidad para impulsar políticas públicas orientadas a la democratización del acceso a recursos digitales; además, los contextos educativos con menores recursos podrían beneficiarse de experiencias que hayan demostrado el impacto pedagógico de los SV, adaptándolas a sus propias realidades. Esto permitiría avanzar hacia una educación científica más equitativa y contextualizada, al tiempo que se incentiva la producción de estudios que enriquezcan la literatura académica y evalúen la aplicabilidad de estas tecnologías en distintos entornos educativos.

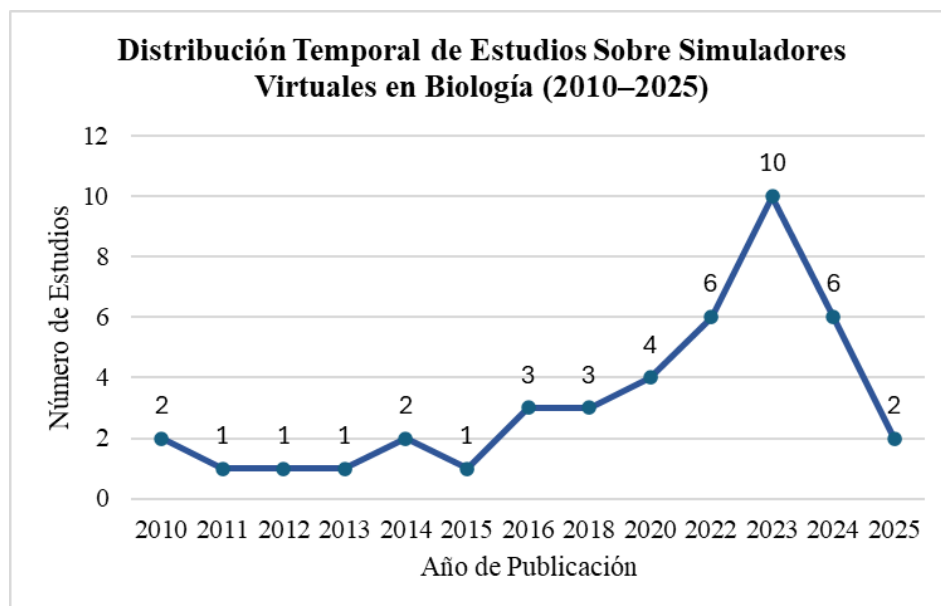
Distribución Temporal. Los estudios revisados revelan un crecimiento progresivo en el interés por investigar el uso de SV en la enseñanza de la biología en educación secundaria. Entre 2010 y 2020, la producción académica fue intermitente y reducida, con un máximo de cuatro publicaciones por año, para un total de 18 estudios; lo cual sugiere que, durante este periodo, el uso de SV en contextos escolares aún era incipiente. A partir del 2022, se observa un incremento sostenido en la producción científica, con 6 estudios ese año y un pico en 2023, con 10 publicaciones, que representan el 23,8% del total. Durante 2024 y lo corrido del 2025, se mantiene este interés, con 6 y 2 estudios respectivamente, a pesar de tratarse de años recientes. La Figura 3 presenta la evolución temporal de las investigaciones.

Este incremento puede asociarse al impacto de la pandemia por COVID-19, que impulsó el uso de tecnologías digitales como los SV para suplir la enseñanza experimental en entornos no presenciales (Akpan et al., 2024; Pozo et al, 2024; Robles Moral y Martínez Ballesteros, 2022). Los bajos índices de publicaciones entre 2010 y 2020 refuerzan la idea de

que este es un campo emergente; además, la tendencia creciente de los últimos 5 años, indica un interés académico sostenido, que podría fortalecerse mediante políticas públicas que promuevan de inversión, la formación docente y el acceso equitativo a tecnologías educativas.

Figura 3.

Distribución temporal de los estudios sobre simuladores virtuales en biología (2010–2025).



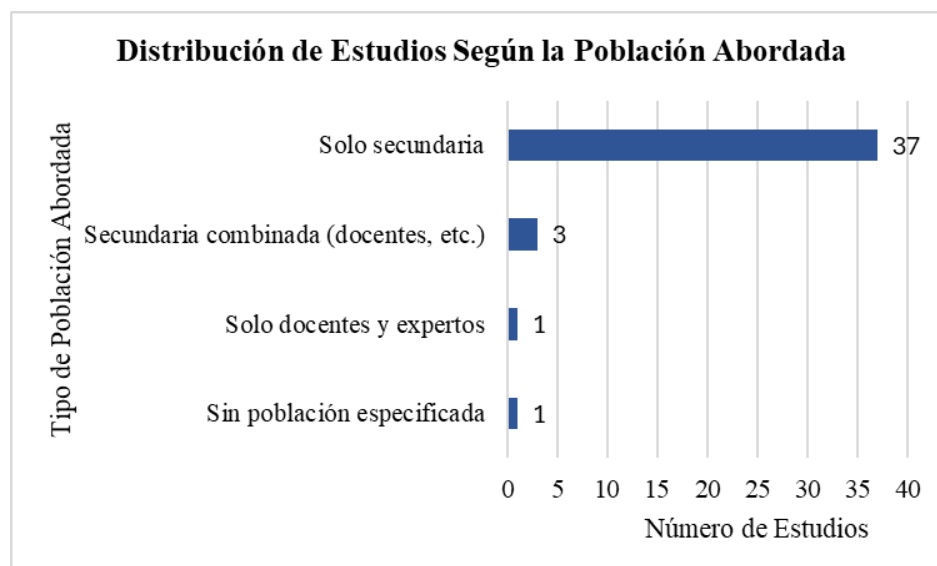
Distribución Poblacional. De los 42 estudios analizados, 37 se centran exclusivamente en estudiantes de secundaria, determinando con claridad el grado de escolaridad, ciclo o edad de los participantes; por otro lado, 3 estudios abordan poblaciones mixtas que incluyen además de estudiantes, docentes, directivos, expertos en educación o estudiantes universitarios; estos trabajos fueron integrados, porque la población de secundaria participó activamente del diseño de intervención y análisis. Adicionalmente, se identificó un estudio centrado en docentes y expertos y, otro que no especifica una población concreta; sin embargo, ambos fueron incluidos por su valor pedagógico y su potencial para enriquecer la comprensión del uso de los SV en contextos educativos.

Esta distribución muestra que la producción académica revisada, no solo aporta datos relevantes sobre el uso de los SV en la enseñanza de biología de secundaria, sino que también visibiliza el interés por explorar su aplicabilidad en diversos niveles y contextos educativos.

La Figura 4 sintetiza gráficamente esta distribución.

Figura 4

Distribución poblacional de los estudios sobre simuladores virtuales en biología en educación secundaria



Análisis del Contenido Pedagógico

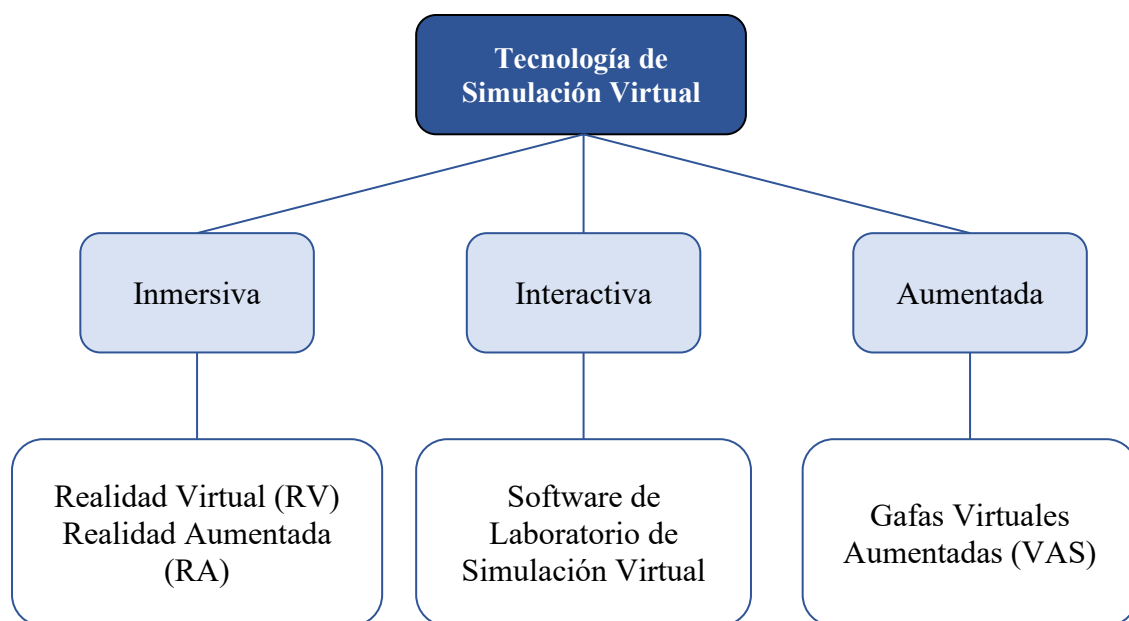
Tipos de simuladores virtuales utilizados. Los estudios incluidos en esta revisión sistemática emplean diversos tipos de SV aplicados a la enseñanza de la biología en educación secundaria. Para clasificar estas herramientas, se adoptaron dos enfoques complementarios que permitieron comprender tanto su estructura tecnológica como su propósito pedagógico.

El primer enfoque propuesto por Pang et al (2025), clasifica los SV según el tipo de entorno de simulación; la Figura 5 presenta esta tipología, que distingue entre simuladores

inmersivos, interactivos y aumentados. La simulación virtual inmersiva proporciona experiencias realistas que involucran los sentidos del usuario, generando una sensación de presencia dentro del entorno simulado, mediante tecnologías como la Realidad Virtual (RV) o la Realidad Aumentada (RA), generalmente a través de visores HMD o gafas especializadas (Rubio-Tamayo et al, 2017). Por su parte, la simulación virtual interactiva permite al usuario intervenir en escenarios digitales, utilizando gestos, comandos de voz o dispositivos de control, enriqueciendo la experiencia en laboratorios virtuales o plataformas educativas (Flórez et al, 2014). Finalmente, la simulación virtual aumentada, combina RA y RV superpuestas sobre espacios físicos reales, empleando dispositivos como auriculares o gafas inteligentes, generando una experiencia contextualizada y multisensorial (Chao et al., 2016; Valarezo-Guzmán et al., 2023).

Figura 5

Clasificación de los simuladores virtuales según el tipo de entorno de simulación



Nota. Tomado y traducido de Pang et al. (2025)

El segundo enfoque, propuesto por Occelli y García Romano (2018), clasifican los SV según su propósito educativo. En primer lugar, se encuentran las simulaciones propiamente

dichas, que representan procesos, sistemas o fenómenos biológicos y facilitan su comprensión mediante la manipulación de variables dentro de modelos estructurados (Bouciguez y Santos, 2010). En segundo lugar, los laboratorios virtuales, simulan experiencias prácticas en entornos digitales, posibilitando el desarrollo de procedimientos experimentales y la aplicación del método científico, especialmente cuando el acceso a los laboratorios físicos es limitado (Sanz Pardo y Martínez Vázquez, 2005). En tercer lugar, los videojuegos educativos, integran contextos científicos simulados con dinámicas y reglas interactivas que fomentan la motivación, el pensamiento estratégico y la resolución de problemas (Jaipal y Figg, 2009). La Figura 6 sintetiza esta clasificación funcional.

Figura 6

Clasificación funcional de los simuladores virtuales según su propósito educativo



Nota. Elaboración propia con base en Occelli y García (2018).

El análisis de los 42 estudios permitió identificar tendencias claras en los tipos de SV empleados y los contenidos biológicos abordados. La Tabla 2, presenta una síntesis representativa que organiza los SV según su tipo, nombre, clasificación tecnológica y funcional, contenido biológico trabajado y autoría académica, permitiendo identificar

patrones de uso y enfoques predominantes en la integración pedagógica de estas herramientas.

Desde el enfoque de Pang et al. (2025), se observa una predominancia de simuladores interactivos, los cuales ofrecen entornos controlados que le permite al estudiante manipular variables, observar procesos, analizar datos y recibir retroalimentación inmediata; este tipo de SV se ha utilizado ampliamente en el estudio de procesos moleculares (como la replicación del ADN, la fotosíntesis o la síntesis de proteínas), sistemas fisiológicos (como el sistema digestivo o el sistema circulatorio), así como en fenómenos ecológicos y evolutivos (Byukusenge et al, 2023, 2024; Cano, 2022; Özcan et al, 2020; Robles Moral y Martínez Ballesteros, 2022).

Tabla 2

Simuladores virtuales representativos utilizados en la enseñanza de la biología en educación secundaria

Tipo de Simulador	Nombre del simulador	Clasificación tecnológica	Clasificación funcional	Contenido biológico abordado	Autoría académica del estudio
Realidad aumentada (AR)	Anatomy 4D	Interactivo	Simulación propiamente dicha	La anatomía y fisiología del corazón El ciclo cardíaco.	Dehghani et al. (2023)
Entorno virtual en 3D	Activeworlds	Aumentado	Simulación propiamente dicha	Genética aplicada (Mendel, grupos sanguíneos, ADN forense)	Annetta et al. (2010)

Simulación 3D de escritorio	Labster	Interactivo	Laboratorio virtual	Técnicas de biología molecular: PCR y electroforesis Normas de bioseguridad.	Haberbosc h et al. (2025)
Simuladores interactivos	EduMedia y PhET	Interactivo	Simulación propiamente dicha	Sistema digestivo y nutrición: función, salud, hábitos, enfermedades	Ríos y Soto (2024)
Realidad virtual (VR)	JOSWAL VR.	Aumentado	Simulación propiamente dicha	Sistema Óseo	Guzmán Monar et al. (2023)
Simulaciones digitales	LabXchange® simulation, DNA Interactive® simulation, y Holt's® simulations.	Interactivo	Simulación propiamente dicha	ADN y expresión génica (estructura, replicación, transcripción, traducción)	Cano (2022)
Juegos móviles simulados.	Beetle Breeders, Invasion of the Beasties, Island Hoppers, y Chomp!.	Interactivo	Videojuego educativo	Genética, evolución y redes tróficas (herencia, adaptación y equilibrio ecológico)	Perry y Klopfer (2014)

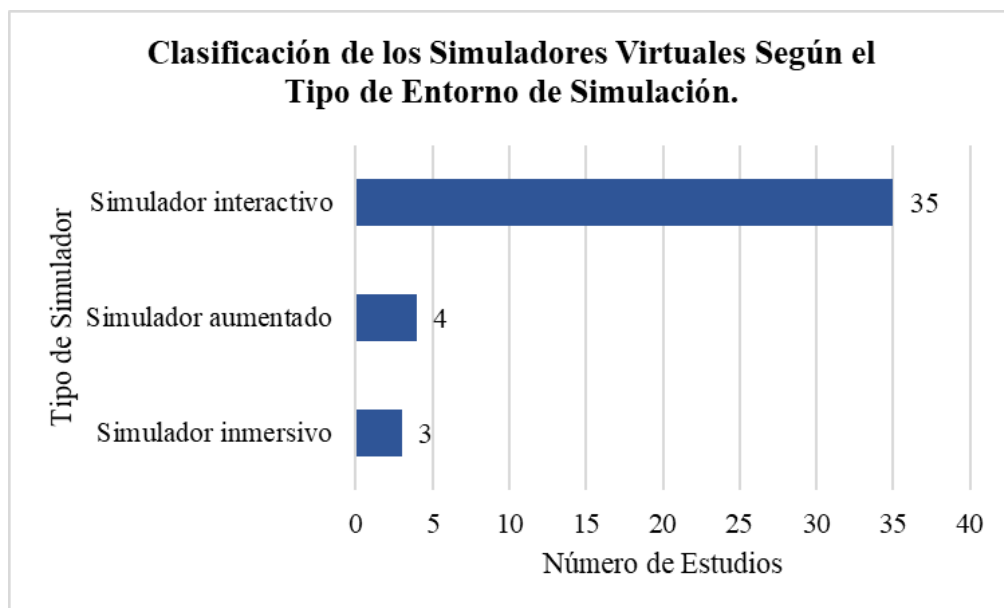
Nota. La tabla presenta una selección representativa de estudios organizados según el tipo de simulador virtual, su clasificación tecnológica y funcional, el contenido biológico abordado y la autoría académica.

Por su parte, los simuladores aumentados, diseñados para dispositivos móviles o aplicaciones de RA, tiene una presencia menos numerosa y se han utilizado para representar contenidos biológicos en entornos físicos, como es el caso de Anatomy 4D (Dehghani et al, 2023), Curiscope Virtuali-Tee (Abella & Rodríguez-Malebrán, 2024). Los simuladores

inmersivos son aún menos frecuentes, debido a sus altos requerimientos tecnológicos, aunque destacan por su potencial para el aprendizaje experiencial, como en el caso de simulaciones de disección cardíaca (Chu et al, 2024); es importante señalar que aunque algunos estudios, como los escenarios evolutivos en aulas inteligentes (Lui y Slotta, 2013) se autodenominan inmersivos, en realidad corresponden a simuladores interactivos o aumentados, ya que no integran tecnologías específicas como los visores de RV. La Figura 7 ilustra la distribución de los simuladores analizados según esta clasificación tecnológica.

Figura 7

Clasificación de los simuladores virtuales según el tipo de entorno de simulación.



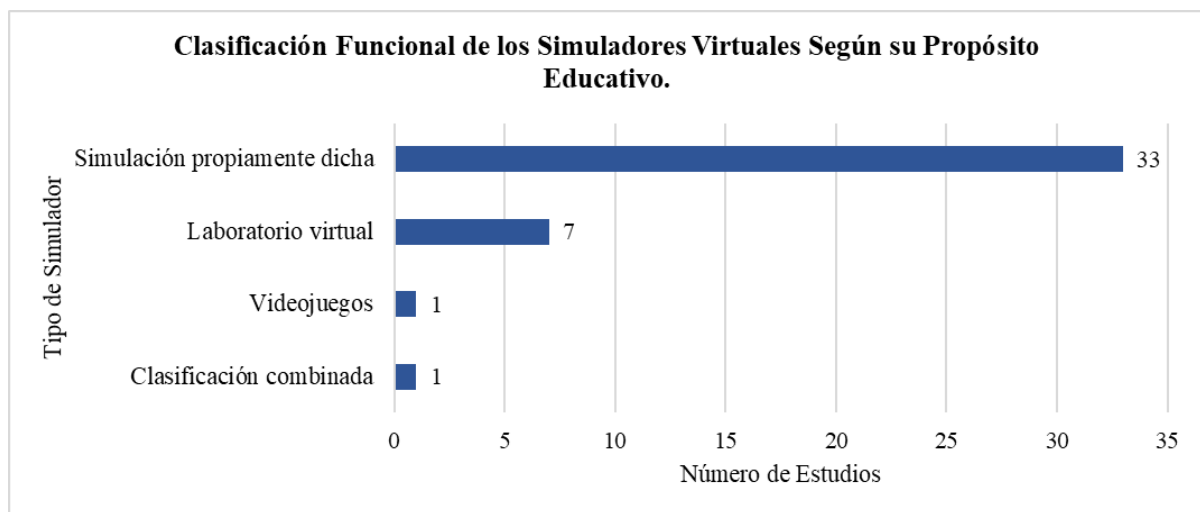
Nota. Elaboración propia con base en la clasificación tecnológica de Pang et al. (2025).

Desde el enfoque funcional de Occelli y García (2018), se identificó un mayor número de simulaciones propiamente dichas; ejemplos de ello, se encuentra en los estudios que emplearon EvoSketch (Fiedler et al, 2018), Sim-Evolution (Cardoso et al, 2020), Simulaciones de Phet (Ríos Muñoz y Soto Araújo, 2024) y plataformas orientadas a visualizar procesos complejos (Becker y Dreesmann, 2023; Efe y Efe, 2011; Wildan et al, 2022). En menor proporción, se encuentran los laboratorios virtuales, como Labster

(Haberbosch et al, 2025), Epidemics2 (Domènech-Casal, 2023) o los v-labs desarrollados en contextos locales (Setyowati et al, 2023). Por último, aunque menos frecuente, aparecen los videojuegos educativos, como Beetle Breeders (Perry y Klopfer, 2014), que han sido empleados para promover la motivación y el aprendizaje aplicado. La Figura 8 resume esta distribución según la clasificación funcional.

Figura 8

Clasificación funcional de los simuladores virtuales según su propósito educativo



Nota. Elaboración propia con base en la clasificación funcional de Occelli y García (2018).

De la misma forma, se identificó una amplia variedad de SV aplicados a la enseñanza de la biología en educación secundaria; la mayoría, se emplean de forma puntual en función de los objetivos pedagógicos y los contenidos específicos de cada estudio. Esta diversidad demuestra que existen simuladores reconocidos y utilizados en más de una investigación, consolidándose como referentes en simulación virtual, debido a su versatilidad y cobertura temática; tal es el caso de PhET (Byukusenge et al, 2023; Özcan et al, 2020; Ríos Muñoz y Soto Araújo, 2024), Labster (Haberbosch et al, 2025), Eureka (Byukusenge et al, 2023, 2024) o DNA Interactive (Cano, 2022; Cano et al 2022).

Por otro lado, se destacan simuladores diseñados con un enfoque temático específico como DH Attack, BAC-O-Meter, Cruzando Moscas, Sim-Evolution, o CellAR, orientados a la enseñanza de contenidos puntuales como el metabolismo del alcohol, la genética mendeliana, la evolución o la estructura celular (Cardoso et al, 2020; Klisch et al, 2012; Robles Moral y Martínez Ballesteros, 2022; Omurtak y Zeybek, 2022; Özeren y Top, 2023). Este tipo de simuladores favorece una comprensión conceptual más profunda en contextos temáticos delimitados.

Estos hallazgos indican que la selección de lo SV no depende únicamente de su popularidad o disponibilidad, sino también de su pertinencia pedagógica, los resultados de aprendizaje esperados, los recursos tecnológicos disponibles y los contenidos biológicos que se desean abordar.

Contribución de los Simuladores Virtuales al Desarrollo de Competencias

Científicas en Educación Secundaria. A continuación, se presenta el análisis sobre cómo el uso de los SV en la enseñanza de la biología contribuye al desarrollo de competencias científicas en educación secundaria. Los hallazgos se organizaron conforme a las tres dimensiones propuestas por la OCDE (2023a): explicar fenómenos científicamente; construir y evaluar diseños para la investigación científica e interpretar datos y pruebas científicas de manera crítica y; buscar, evaluar y usar la información científica para tomar decisiones y actuar.

Explicar Fenómenos Científicamente. Los SV favorecen esta competencia al permitir observar, reconocer, aplicar, interpretar y evaluar fenómenos biológicos complejos mediante experiencias interactivas que integran conocimientos conceptuales y procedimentales. Por ejemplo, en el estudio de Ríos Muñoz y Soto Araújo (2024), se utilizó PhET y EduMedia, para facilitar la observación guiada de fenómenos fisiológicos como la

digestión y la nutrición; de forma similar, Cano (2022) reporta que simuladores como LabXchange y DNA Interactive, promovieron la comprensión conceptual de procesos moleculares complejos como la replicación del ADN y la síntesis de proteínas.

Trabajos como los de Fiedler et al. (2018) y Cardoso et al. (2020), emplearon simuladores específicos para representar procesos evolutivos y de adaptación, fortaleciendo la construcción de explicaciones científicas basadas en la variabilidad, selección natural y el contexto ambiental. Por su parte, estudios como los de Chu et al. (2024), Guzmán Monar et al. (2023), así como el de Omurtak y Zeybek (2022), documentan cómo la realidad virtual y aumentada facilita la visualización de estructuras corporales y fenómenos celulares, favoreciendo la explicación sobre la relación entre su forma y función.

Adicionalmente, trabajos como los de Elangovani e Isamil, (2014), Maimatayeva et al. (2024), Musaeus et al. (2024), Rates et al. (2016), Özeren y Top (2023) y Thompson et al. (2020), así como los reportes de estudiantes sobre *CellAR* y otros simuladores móviles, evidencian avances en la comprensión de procesos como crecimiento celular, la simetría corporal, la interacción sistémica o las dinámicas evolutivas, gracias a la representación visual y manipulable que ofrecen los SV. En este sentido, los SV no solo mejoran la visualización de procesos, sino que también promueven la organización lógica del conocimiento, el razonamiento causal y la argumentación basada en evidencia.

Construir y Evaluar Diseños para la Investigación Científica e Interpretar Datos y Pruebas Científicas de Manera Crítica. Esta competencia implica formular preguntas investigables, diseñar y llevar a cabo investigaciones, recolectar e interpretar datos, evaluar los resultados y establecer conclusiones fundamentadas (OCDE, 2023a). Los SV han demostrado ser una herramienta eficaz para fortalecer estas habilidades, al simular escenarios de experimentación interactiva que reproducen el trabajo científico real.

En los estudios de Byukusenge et al. (2023), Efe y Efe (2011), Haberbosch et al. (2025), Lant et al. (2016), Lestari et al. (2023), Špernjak y Šorgo (2018), al igual que el de Wildan et al. (2022), se reporta el desarrollo de habilidades como la observación, la formulación de hipótesis, el análisis de relaciones causa-efecto y el pensamiento crítico en contextos como la biología molecular, los ecosistemas o la fisiología celular. De forma complementaria, las investigaciones de Becker y Dreesmann (2023); Occelli y García Romano (2018); Pepper et al. (2015); Riess y Mischo (2010); Sousa (2016) y; Stenberdt y Makransky (2023), demuestran cómo los SV permiten diseñar experimentos, tomar decisiones fundamentadas y analizar los resultados experimentales.

A su vez, estudios como los de Abella y Rodríguez-Malebrán (2024); Klisch et al. (2012); Gnidovec et al. (2020); Krüger et al. (2022); Özcan et al. (2020); Ngema y Motlhabane (2025) y; Perry y Klopfer (2014), destacan el uso de entornos digitales que favorecen la manipulación de variables, la interpretación de resultados, la visualización de estructuras complejas y la construcción de modelos mentales, promoviendo la alfabetización científica, la autonomía, la indagación y la reflexión crítica. Además, trabajos como los de Cano et al. (2022) y Setyowati et al. (2023), integran simuladores que apoyan la planeación de experimentos, la evaluación de hipótesis y el análisis riguroso de datos en prácticas relacionadas con la genética y la investigación biológica.

Buscar, Evaluar y Usar la Información Científica para Tomar Decisiones y Actuar.

Esta competencia implica adoptar una postura crítica frente a la información científica, distinguir entre afirmaciones fundamentadas de opiniones infundadas, tomar decisiones y resolver problemas en diversos contextos. En este sentido, los SV ofrecen entornos donde los estudiantes aplican conocimientos, formulan argumentos y desarrollan criterios científicos para actuar.

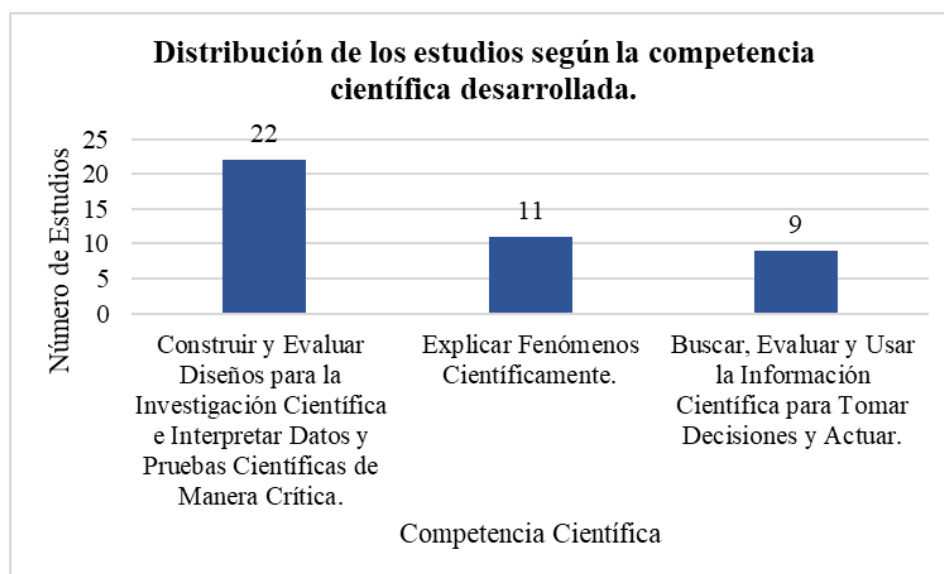
Los estudios de Dehghani et al. (2023) y Annetta et al. (2010), muestran cómo la realidad aumentada y los videojuegos educativos facilitan la interpretación crítica de información sobre la genética, la evaluación de pistas, la integración de datos y la toma de decisiones en contextos biomédicos o investigativos. De forma similar, Ríos Muñoz y Soto Araújo (2024), Guzmán Monar et al. (2023) y Domènech-Casal (2023), demuestran que los SV promueven el razonamiento crítico, la identificación de variables relevantes, la formulación de hipótesis y la evaluación de escenarios en temas como la nutrición, la fisiología o la epidemiología.

Por otro lado, los estudios de Byukusenge et al. (2023), Christopoulos et al. (2023), y Lui y Slotta (2013), destacan que los SV favorecen la construcción de modelos mentales complejos, el análisis de sistemas biológicos dinámicos, la reflexión, la comparación de datos, la argumentación científica y el trabajo colaborativo orientado a la resolución de problemas. Por su parte, Cano et al. (2022), revelan que los SV permiten visualizar procesos abstractos, explorar implicaciones de modelos y evaluar consecuencias, favoreciendo así el pensamiento crítico y la toma de decisiones en el marco del dogma central de la biología molecular.

Estos resultados permiten identificar que la competencia más desarrollada mediante el uso de SV en los estudios analizados es construir y evaluar diseños para la investigación científica e interpretar datos y pruebas científicas de manera crítica (22 estudios); esta predominancia indica que los SV se consolidan como herramientas eficaces que emulan el trabajo científico, permitiendo manipular variables, observar fenómenos, interpretar datos y validar hipótesis. En segundo lugar, se encuentra la competencia explicar fenómenos científicamente (11 estudios), seguida por buscar, evaluar y usar la información científica para tomar decisiones y actuar (9 estudios), como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Distribución de los estudios según la competencia científica desarrollada



Nota. La figura representa la cantidad de estudios revisados que promueven cada una de las tres competencias científicas definidas por la OCDE (2023a).

Si bien es posible establecer asociaciones entre determinados tipos de SV y competencias específicas, como ocurre con los laboratorios virtuales e interactivos que tienden a fortalecer el diseño experimental y la interpretación de datos, también es evidente que muchas de estas competencias se desarrollan de forma integrada (Abella y Rodríguez-Malebrán, 2024; Herrera-Castrillo, 2024; Ríos Muñoz y Soto Araújo, 2024). Por ejemplo, en un mismo entorno virtual, los estudiantes pueden observar un fenómeno, analizar sus variables, interpretar datos y formular explicaciones o tomar decisiones informadas, lo cual reafirma el carácter interdisciplinar y transversal de las competencias científicas en contextos simulados.

Sin embargo, algunos estudios reportan mejoras generales en el aprendizaje o en el uso de SV, pero no explicitan con claridad cuáles competencias científicas se desarrollaron ni cómo fueron evaluadas; esta falta de precisión limita el análisis comparativo entre las

investigaciones y la posibilidad de establecer conclusiones sobre su impacto real. A pesar de ello, los hallazgos permiten afirmar que los SV contribuyen significativamente al desarrollo de las competencias científicas en la educación secundaria, especialmente al fortalecer la capacidad para diseñar investigaciones, interpretar datos y construir explicaciones fundamentadas, en contextos inmersivos, interactivos o aumentados.

Es importante enfatizar que esta contribución se potencia cuando los SV se integran en secuencias didácticas estructuradas, con objetivos definidos, acompañadas de la orientación docente y actividades que fomenten la reflexión. Además, su efectividad depende de factores como el acceso a recursos tecnológicos, la formación del profesorado en metodologías activas y el alineamiento del uso del simulador con los propósitos pedagógicos (Byukusenge et al, 2023; Cano, 2022; Krüger et al. 2022).

Impacto Pedagógico del uso de Simuladores Virtuales. Además de su contribución al desarrollo de competencias científicas, los estudios revisados destacan diversos beneficios pedagógicos asociados al uso de SV en la enseñanza de la biología en educación secundaria. En primer lugar, se reportan mejoras generales en el aprendizaje, lo que evidencia una percepción positiva sobre la efectividad de los SV para facilitar la adquisición de conocimientos científicos (Byukusenge et al, 2024; Setyowati et al., 2023). Esto se complementa con el aumento en la comprensión de fenómenos complejos, gracias a la posibilidad de observar representaciones visuales, interactuar con simulaciones y experimentar con variables de forma segura y significativa (Cano et al 2022; Efe y Efe, 2011).

Asimismo, algunos estudios señalan un mejoramiento en el rendimiento académico de los estudiantes, evidenciado mediante pruebas comparativas antes y después de la intervención con SV (Byukusenge et al, 2023; Cano, 2022); por otro lado, el impacto afectivo

también es relevante, ya que se documenta un mayor interés por la biología, un incremento en la motivación estudiantil y una actitud positiva hacia la ciencia (Omurtak y Zeybek, 2022; Robles Moral y Martínez Ballesteros, 2022). De esta forma, los SV no solo favorecen el desarrollo cognitivo, sino también dimensiones afectivas y actitudinales esenciales para un aprendizaje integral de la biología en contextos escolares.

Contenidos Biológicos Abordados. En el marco de la enseñanza de las ciencias naturales en secundaria, los contenidos biológicos son fundamentales para el desarrollo del pensamiento científico. Esta revisión sistemática permitió identificar y clasificar los temas trabajando a través de los SV en cinco áreas temáticas, tal como se presenta en la Tabla 3: biología celular; ecología y medio ambiente; anatomía y fisiología humana; biología molecular y genética y; evolución y biodiversidad.

Tabla 3

Áreas temáticas abordadas mediante simuladores virtuales en los estudios analizados

Área Temática	Ejemplos de Conceptos Abordados
Biología molecular y genética	Replicación del ADN, transcripción, síntesis de proteínas, herencia mendeliana, mutaciones, expresión génica
Anatomía y fisiología humana	Sistemas digestivo, circulatorio, óseo, nervioso; enfermedades; nutrición; salud y funcionamiento de órganos
Biología celular	Estructura y función de células, transporte celular, división celular, estructura de membranas
Ecología y medio ambiente	Ecosistemas, biodiversidad, cambio climático, servicios ecosistémicos, gestión de residuos, impacto ambiental
Evolución y biodiversidad	Selección natural, adaptación, taxonomía, relaciones entre especies, variación genética, mecanismos evolutivos

Nota. Clasificación de los contenidos biológicos abordados en los estudios, agrupados en cinco áreas.

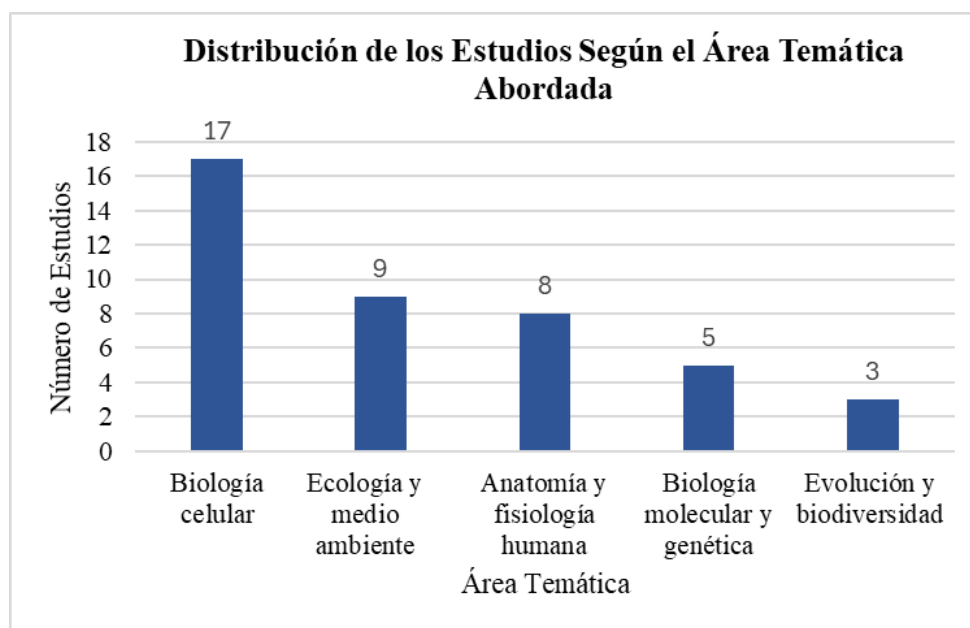
El análisis de los resultados señala que la biología celular fue el área más abordada, con 17 estudios que incluyeron contenidos relacionados con la estructura, función y procesos celulares como la mitosis, el transporte celular, la homeostasis o la interacción entre células; esta frecuencia puede explicarse por la dificultad que representan estos temas para los estudiantes, debido a su carácter abstracto, lo que convierte a los SV en una herramienta eficaz para facilitar su visualización e interpretación (Byukusenge et al., 2023; Ngema y Motlhabane, 2025; Özeren y Top, 2023). En segundo lugar, se encuentra el área de ecología y medio ambiente, presente en 9 estudios, donde los SV fueron utilizados para explorar temáticas como la dinámica de los ecosistemas, la biodiversidad, el impacto ambiental, el cambio climático, el reciclaje y la gestión de residuos, mediante simulaciones que permitieron observar consecuencias a largo plazo o manipular variables ambientales en escenarios controlados (Becker y Dreesmann, 2023; Riess y Mischo, 2010; Stenberdt y Makransky, 2023).

Los contenidos relacionados con anatomía y fisiología humana se identificaron en 8 investigaciones, con un enfoque en los sistemas digestivo, circulatorio, óseo y nervioso; estos estudios favorecieron la comprensión de las estructuras y funciones del cuerpo humano, así como la relación entre salud, alimentación y actividad física (Dehghani et al., 2023; Guzmán Monar et al., 2023; Ríos Muñoz y Soto Araújo, 2024). En cuanto a la biología molecular y la genética, se encontraron 5 estudios, centrados en procesos del dogma central de la biología, (replicación, transcripción y traducción), así como la herencia mendeliana y la resolución de problemas genéticos (Cano, 2022; Annetta et al., 2010); aunque estos temas son esenciales en el currículo de biología, su menor representación sugiere una oportunidad para fortalecer su abordaje mediante SV.

Así pues, la evolución y la biodiversidad fue el área menos representada, con solo 3 estudios, a pesar de su importancia para comprender los mecanismos de cambio biológico y la diversidad de la vida (Cardoso et al., 2020). No obstante, experiencias como las simulaciones inmersivas en EvoRoom (Lui y Slotta, 2013) y el uso de simuladores temáticos como EvoSketch, demuestran su potencial para enriquecer la enseñanza de este campo. Esta distribución de cada área temática en los estudios incluidos se sintetiza en la Figura 10.

Figura 10

Distribución de los estudios según el área temática abordada.



Barreras para la Implementación de Simuladores Virtuales. Aunque los SV ofrecen múltiples beneficios pedagógicos, algunos estudios reportan desafíos que dificultan su implementación efectiva en entornos escolares. Estas barreras, aunque no se presentan en todos los casos, evidencian la necesidad de diseñar estrategias integrales que incluyan no solo la selección de SV pertinentes, sino también condiciones institucionales, pedagógicas y tecnológicas que respalden su uso en la enseñanza de la biología.

Entre las barreras más frecuentes, se encuentra la necesidad de contar con una infraestructura tecnológica adecuada, ya que varios SV requieren dispositivos con buena capacidad de procesamiento, conectividad estable o integración con herramientas de realidad aumentada (Abella y Rodríguez-Malebrán, 2024). Otra dificultad identificada es la formación docente insuficiente, especialmente en el manejo de tecnologías emergentes o entornos de simulación avanzados, lo cual puede limitar el aprovechamiento pedagógico del recurso o generar resistencia frente a su uso (Annetta et al., 2010).

Asimismo, algunos estudios advierten sobre la falta de alineación curricular o escasez de materiales adaptados al nivel educativo, lo que dificulta la integración de los SV dentro de secuencias didácticas estructuradas o con fines evaluativos claros (Cano et al., 2022; Efe y Efe, 2011); también se advierte que si bien los SV mejoran la motivación y la participación estudiantil, pueden generar distracción si no están acompañados de una guía clara o si su diseño no se vincula a objetivos de aprendizaje concretos (Fiedler et al., 2018). Finalmente, algunas investigaciones enfatizan que la efectividad de los SV depende en gran medida del acompañamiento docente, ya que sin mediación pedagógica, espacios de reflexión guiada o retroalimentación oportuna, se reduce el potencial de estas herramientas para favorecer la construcción de aprendizajes significativos (Krüger et al., 2022).

Recomendaciones para la Implementación Efectiva de Simuladores Virtuales. A partir de esta revisión se pudo identificar una serie de condiciones y estrategias que favorecen la implementación pedagógica efectiva de los SV en la enseñanza de la biología en educación secundaria. Estas recomendaciones surgen tanto de las experiencias exitosas reportadas por

los investigadores, como de las barreras señaladas en el proceso de integración de estas herramientas digitales.

Una de las recomendaciones más reiteradas en la literatura, es la formación docente continua, orientada al fortalecimiento de las competencias tecnopedagógicas; los estudios coinciden en que es fundamental capacitar al profesorado no solo en el manejo técnico de los SV, sino también en el diseño de actividades significativas que integren estos recursos dentro de propuestas didácticas con sentido educativo (Ríos Muñoz y Soto Araújo, 2024). Iniciativas como talleres institucionales, comunidades de práctica o acompañamiento entre pares pueden favorecer una apropiación gradual de estas tecnologías.

Otra estrategia clave es el diseño didáctico intencionado, que articule el uso del simulador con objetivos de aprendizaje claros, secuencias estructuradas y criterios de evaluación pertinentes. Los estudios muestran que el uso fragmentado, aislado o meramente demostrativo de los SV reduce su potencial formativo (Dehghani et al., 2023); en cambio, cuando se integran en experiencias de indagación, resolución de problemas o aprendizaje basado en proyectos, se fortalece el aprendizaje activo y significativo (Peffer et al., 2015). Asimismo, se recomienda promover una mediación pedagógica activa por parte del docente, que facilite la interacción del estudiante con el simulador, oriente su reflexión durante el proceso y promueva espacios de socialización y argumentación científica; estrategias como el uso de guías didácticas, preguntas orientadoras, diarios de aprendizaje o discusiones grupales, enriquecen la experiencia virtual y profundizan en la comprensión de los fenómenos abordados (Riess y Mischo, 2010).

La accesibilidad tecnológica y la adaptación contextual también son condiciones esenciales para garantizar la equidad en el uso de SV; esto implica seleccionar simuladores que sean compatibles con los recursos disponibles en la institución, priorizar plataformas

gratuitas o de código abierto, y considerar opciones multilingües, inclusivas o adaptadas a diferentes estilos de aprendizaje (Haberbosch et al., 2025). Esta mirada contextual permite reducir brechas tecnológicas y promover la participación de todos los estudiantes.

Por último, se destaca la importancia de implementar estrategias de evaluación formativa y retroalimentación continua, que valoren tanto los resultados como los procesos desarrollados mediante el uso de SV; el diseño de rúbricas, la autoevaluación y la coevaluación, así como el análisis de evidencias de aprendizaje producidas por los estudiantes, promueven la metacognición y la comprensión profunda (Robles Moral y Martínez Ballesteros, 2022).

En este sentido, el uso efectivo de SV en la enseñanza de la biología requiere más que acceso a recursos tecnológicos; demanda, planificación pedagógica, acompañamiento docente, adecuación contextual y una evaluación que valore el proceso. Solo bajo estas condiciones, los SV pueden convertirse en herramientas de transformación educativa, que potencien el desarrollo de competencias científicas en contextos escolares

Reflexión crítica sobre los hallazgos

Vacíos en la literatura. A pesar del creciente interés en el uso de SV en la enseñanza de la biología, los estudios revisados revelan varios vacíos significativos que limitan la comprensión profunda de su impacto educativo. Uno de los más notorios es la escasa documentación explícita sobre las competencias científicas desarrolladas; si bien muchos estudios reportan beneficios generales en el aprendizaje, la motivación o la comprensión conceptual, pocos detallan qué dimensiones específicas de la competencia científica se promovieron o cómo fueron evaluadas, lo que dificulta establecer comparaciones entre las investigaciones y limita la formulación de conclusiones basadas en evidencia.

Asimismo, se identifica una concentración temática en ciertas áreas del currículo, como la biología celular y la ecología, mientras que otras áreas clave, como la biología molecular, la genética y la evolución, están subrepresentadas, a pesar de su complejidad y relevancia formativa. Esta distribución desigual señala la necesidad de diversificar los contenidos abordados mediante SV, especialmente en aquellos que tradicionalmente presentan mayores dificultades de comprensión para los estudiantes.

Por otra parte, se observa una disparidad geográfica y contextual en la producción académica, pues la mayoría de los estudios se desarrollan en contextos específicos de Europa, Asia o Norteamérica, con escasa representación de países latinoamericanos o africanos, lo que limita la generalización de los hallazgos. Esta brecha evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones contextualizadas, que exploren cómo se adaptan y aplican los SV en distintos entornos educativos, especialmente en regiones con menor acceso a tecnologías digitales.

Además, durante el proceso de búsqueda y selección de los estudios, se constató una mayor concentración de publicaciones sobre SV aplicados a la enseñanza de la física y la química, así como un número considerable de investigaciones centradas en contextos universitarios, especialmente en áreas como la medicina o las ciencias de la salud. Este panorama refleja la escasez de estudios, específicamente dirigidos a la enseñanza de la biología en educación secundaria, lo que resalta la necesidad de continuar fortaleciendo la investigación en este campo educativo.

También, se observa que buena parte de los estudios presenta un enfoque descriptivo más que analítico o evaluativo del uso de SV, centrado en presentar experiencias o percepciones, sin una evaluación rigurosa de resultados de aprendizaje, del desarrollo de competencias científicas o del impacto a largo plazo, abriendo la posibilidad de avanzar hacia

diseños metodológicos con enfoques mixtos, estudios longitudinales y mayor triangulación de datos, con el fin de generar conocimiento aplicable a contextos escolares.

Innovaciones Pedagógicas Destacadas. Los resultados de esta revisión sistemática también destacan experiencias innovadoras, que pueden considerarse referentes valiosos para ser replicados, adaptados o ampliados en otros contextos educativos.

Por una parte, se identifican propuestas que integran estrategias activas de aprendizaje, como el aprendizaje basado en problemas (ABP), la gamificación y las simulaciones inmersivas. Un ejemplo de ello es el estudio de Peffer et al. (2015), que presenta las SCI Simulations, diseñadas para guiar a los estudiantes en la formulación de hipótesis, el diseño experimental y la toma de decisiones a partir de datos simulados; de igual forma, Domènech-Casal (2023) propone el uso de Epidemics2, un simulador gamificado que considera estrategias de control sanitario, combinando modelización y análisis crítico de problemas sociales contemporáneos.

Otra innovación relevante es la integración de entornos aumentados e inmersivos, que permiten a los estudiantes interactuar con representaciones tridimensionales de órganos, procesos o sistemas biológicos, mejorando su comprensión conceptual; tal es el caso del uso de Anatomy 4D (Dehghani et al., 2023) y EvoRoom (Lui y Slotta, 2013), que recrean entornos realistas, donde los estudiantes pueden explorar estructuras internas o simular fenómenos evolutivos complejos. También sobresale el uso de simuladores específicos diseñados por docentes o investigadores para responder a necesidades particulares, como los estudios de Annetta et al. (2010) con el videojuego MEGA, enfocado en la genética forense, o el trabajo de Setyowati et al. (2023), que desarrolla laboratorios virtuales adaptados a su currículo local, reforzando la pertinencia contextual del uso de estas herramientas.

Estas propuestas demuestran que los SV pueden convertirse en mediadores potentes cuando se articulan con metodologías activas, intenciones didácticas claras y un enfoque centrado en la indagación, la visualización y la participación activa del estudiante.

Proyecciones y Desafíos Futuros. Para consolidar el interés por el uso de SV en la enseñanza de la biología en educación secundaria e incrementar su impacto en el ámbito educativo, es necesario abordar diversos desafíos y proyectar nuevas líneas de acción.

Uno de los principales retos, es ampliar el acceso equitativo a estas tecnologías, especialmente en contextos educativos rurales o con limitaciones de infraestructura. La brecha digital continúa siendo una barrera significativa, que restringe el aprovechamiento de los SV, por lo que se requieren políticas públicas que garanticen la conectividad, el equipamiento básico y la disponibilidad de plataformas accesibles, multilingües e inclusivas.

Desde el ámbito investigativo, se proyecta la necesidad de avanzar hacia estudios más rigurosos y comparativos que no solo describan experiencias de aula, sino que evalúen de manera sistemática el impacto de los SV en el aprendizaje, el desarrollo de competencias científicas y la motivación estudiantil. En este sentido, resulta clave implementar diseños metodológicos mixtos y estudios longitudinales, que permitan rastrear procesos de cambio sostenido y determinar la eficacia pedagógica de los distintos tipos de simuladores. Asimismo, se plantea ampliar la cobertura temática de los SV hacia áreas menos exploradas del currículo, como la evolución o la biodiversidad, así como su articulación con problemáticas actuales como el cambio climático, la salud global y la sostenibilidad. Esto permitiría diversificar los contenidos abordados y responder a las demandas formativas de una ciudadanía científica, crítica, ética y comprometida con los desafíos del siglo XXI.

Además, una proyección clave es el fortalecimiento de la formación docente en el uso pedagógico de SV. Más allá del dominio técnico, se requiere acompañamiento continuo en diseño instruccional, evaluación formativa y mediación didáctica, de manera que la integración de estas herramientas en el aula sea reflexiva, contextualizada y alineada con los propósitos formativos de la educación científica.

Conclusión

Los resultados de esta revisión sistemática permiten concluir que el uso de simuladores virtuales (SV) en la enseñanza de la biología contribuye de manera significativa al desarrollo de competencias científicas en educación secundaria. Esta contribución se evidencia en la mejora de la comprensión de fenómenos complejos, el diseño y evaluación de investigaciones, la interpretación de datos y la toma de decisiones fundamentadas, mediante experiencias interactivas, inmersivas o aumentadas que enriquecen los procesos cognitivos, procedimentales y actitudinales del estudiantado.

Se identificó una predominancia de SV interactivos, asociados con una amplia diversidad de contenidos biológicos, principalmente en áreas como la biología celular, la ecología y la fisiología humana. Sin embargo, se identificaron vacíos en el abordaje de temáticas como la evolución y la biología molecular, así como limitaciones en la documentación explícita de las competencias desarrolladas y en la evaluación de su impacto pedagógico a largo plazo.

Los hallazgos también revelan que la efectividad de los SV depende de factores contextuales como la infraestructura tecnológica disponible, la formación docente y la calidad del diseño didáctico. Su implementación resulta más exitosa cuando se integra en secuencias

pedagógicas estructuradas, mediadas por el docente y, orientadas al pensamiento crítico, la indagación y la resolución de problemas.

A partir de estos resultados se recomienda avanzar en futuras investigaciones que incluyan metodologías mixtas, mayor representatividad geográfica y enfoques comparativos, así como promover políticas educativas que garanticen el acceso equitativo a tecnologías digitales, la formación docente continua y la integración curricular de los SV. Todo ello permitirá consolidar su papel como mediadores del aprendizaje científico, con pertinencia pedagógica y compromiso con una educación inclusiva, actualizada y transformadora.

Referencias Bibliográficas

- Abella, S., y Rodríguez Malebrán, M. (2024). Sistemas del cuerpo humano: educación STEAM mediante el uso de la realidad aumentada con estudiantes de secundaria en Colombia y Chile. *Bio-grafía*, 16(Extraordinario).
<https://revistas.upn.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/21769>
- Akpan, I.J., Offodile, O.F., Akpanobong, A.C., y Kobara, Y. M. (2024). A Comparative Analysis of Virtual Education Technology, E-Learning Systems Research Advances, and Digital Divide in the Global South. *Informatics* 11(53).
<https://doi.org/10.3390/informatics11030053>
- Annetta, L. A., Cheng, M. T., y Holmes, S. (2010). Assessing twenty-first century skills through a teacher created video game for high school biology students. *Research In Science & Technological Education*, 28(2), 101-114.
<https://doi.org/10.1080/02635141003748358>
- Arteaga, Y., y Tapia, F. (2009). Núcleos problemáticos en la enseñanza de la biología. *Educere*, 13(46), 719-724. <https://www.redalyc.org/pdf/356/35613218016.pdf>

- Basulto-González, G., Gómez-Martínez, F., y Yero-Ochoa, M. (2016). Una nueva mirada a la enseñanza de la Biología: el enfoque sociocultural-profesional. *Luz*, 15(3), 38-50.
<https://www.redalyc.org/pdf/5891/589166499004.pdf>
- Becker, L., y Dreesmann, D. C. (2023). Simulating Environmental Issues: New Digital Tools to Teach Biology In Silico. *Sustainability*, 15(19), 14325.
<https://doi.org/10.3390/su151914325>
- Blanco-López, Á., España-Ramos, E., González-García, F.J. y Franco-Mariscal, A.J. (2015). Key Aspects of Scientific Competence for Citizenship: A Delphi Study of the Expert Community in Spain. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(2), 164–198.
<https://doi.org/10.1002/tea.21188>
- Bouciguez, M. J. y Santos, G. (2010). Applets en la enseñanza de la física un análisis de las características tecnológicas y disciplinares. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 7(1), 56-74.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3109341&orden=0&info=link>
- Byukusenge, C., Nsanganwimana, F., y Tarmo, A. P. (2023). Enhancing Students' Understanding of Nerve Cells' Structures and Their Symbiotic Functioning by Using Technology-Enhanced Instruction Incorporating Virtual Labs and Animations. *Journal Of Science Education And Technology*, 32(1), 13-25.
<https://doi.org/10.1007/s10956-022-10002-3>
- Byukusenge, C., Nsanganwimana, F., y Tarmo, A. P. (2024). Investigating the effect of virtual laboratories on students' academic performance and attitudes towards learning biology. *Education And Information Technologies*, 29(1), 1147-1171.
<https://doi.org/10.1007/s10639-023-12351-x>
- Camacho, A. G., y Medina-Chicaiza, P. (2022). Simuladores virtuales para la transferencia de conocimientos sobre números enteros. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria*

PENTACIENCIAS, 4(6), 236–246.

<https://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/349>

Cano, J. S. (2022). Development and validation of simulation-based instructional materials on central dogma of molecular biology for senior high school. *International Journal of Technology in Education and Science (IJTES)*, 6(2), 373-387.

<https://doi.org/10.46328/ijtes.368>

Cano, J. S., Olvis, P. R., Disca, B. Y., y Docena, A. F. (2022). Simulation-Based Instructional Materials on Central Dogma of Molecular Biology: Basis in Studying Genetics for Grade 12 Learners. *International Journal Of Technology In Education*, 5(2), 249-268.

<https://doi.org/10.46328/ijte.219>

Cardoso, J., Caetano, D., Abreu, R., Quadros, J., dos Santos, J., Ogasawara, E., y Lignani, L. (2020). Supporting the Learning of Evolution Theory Using an Educational Simulator. *IEEE Transactions On Learning Technologies*, 13(2), 417-424.

<https://doi.org/10.1109/tlt.2019.2911613>

Cataldi, Z., Lage, F. J. y Dominighini, C. (2013). Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza. *Revista de informática educativa y medios audiovisuales*, 10(17), 8-16.

Chao, J., Chiu, J. L., DeJaegher, C. J., y Pan, E. A. (2016). Sensor-augmented virtual labs: Using physical interactions with science simulations to promote understanding of gas behavior. *Journal of Science Education and Technology*, 25(1), 16–33.

<https://doi.org/10.1007/s10956-015-9574-4>

Chona Duarte, G., Arteta Vargas, J., Martínez, S., Ibáñez Córdoba, X., Pedraza, M., y Fonseca Amaya, G. (2006). ¿Qué competencias científicas promovemos en el aula? *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (20), 62-79.

<https://www.redalyc.org/pdf/6142/614265313005.pdf>

- Christopoulos, A., Mystakidis, S., Cachafeiro, E., y Laakso, M. J. (2023). Escaping the cell: virtual reality escape rooms in biology education. *Behaviour & Information Technology*, 42(9), 1434–1451. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2022.2079560>
- Chu, C. E., Cheong, G. S. W., Mishra, A., Wen, Y., Leo, C. H., Yeo, D. J., y Cheong, K. H. (2024). Enhancing Biology Laboratory Learning: Student Perceptions of Performing Heart Dissection With Virtual Reality. *IEEE Access*, 12, 76682-76691. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3394713>
- Congreso de la República de Colombia. (8 de febrero de 1994). Ley General de Educación. [Ley 115 de 1994]. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=292>
- Dehghani, M., Mohammadhasani, N., Ghalevandi, M. H., y Azimi, E. (2023). Applying AR-based infographics to enhance learning of the heart and cardiac cycle in biology class. *Interactive Learning Environments*, 31(1), 185-200. <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1765394>
- Domènech-Casal, J. (2023). Epidemics: Una actividad didáctica gamificada basada en un simulador de gestión sanitaria de epidemias. *Didacticae Revista de Investigación En Didácticas Específicas*, 13, 145-159. <https://doi.org/10.1344/did.2023.13.145-159>
- Dyrberg, N. R., Treusch, A. H., y Wiegand, C. (2016). Virtual laboratories in science education: Students' motivation and experiences in two tertiary biology courses. *Journal of Biological Education*, 51(4), 358-374. <https://doi.org/10.1080/00219266.2016.1257498>
- Efe, H. A., y Efe, R. (2011). Evaluating the effect of computer simulations on secondary biology instruction: An application of Blooms taxonomy. *Scientific Research And Essays*, 6(10), 2137-2146. <https://doi.org/10.5897/sre10.1025>

- Elangovani, T. y Isamil, Z. (2014). The effects of 3D computer simulation on biology students' achievement and memory retention. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 15 (2).
https://www.eduhk.hk/apfslt/download/v15_issue2_files/elangovan.pdf
- Fiedler, D., Tröbst, S., Großschedl, J., y Harms, U. (2018). EvoSketch: Simple simulations for learning random and probabilistic processes in evolution, and effects of instructional support on learners' conceptual knowledge. *Evolution Education And Outreach*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s12052-018-0089-3>
- Flórez Llanos, C. A., Cristancho Sastoque, N. J., y Barón Velandia, J. (2014). Simulación interactiva para la apropiación de la ciencia y la tecnología. *Infancias Imágenes*, 13(2), 176. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.infimg.2014.2.a16>
- Gnidovec, T., Žemlja, M., Dolenc, A. y Torkar, G. (2020). Using Augmented Reality and the Structure–Behavior–Function Model to Teach Lower Secondary School Students about the Human Circulatory System. *Journal of Science Education and Technology*, 29. 774–784. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09850-8>
- Guerrero, G. y Sjöström, J. (2024). Critical scientific and environmental literacies: a systematic and critical review. *Studies in Science Education*, 61(1), 41-87.
<https://doi.org/10.1080/03057267.2024.2344988>
- Guzmán Monar, O. W., Vega Merchán, J. P., y Ulloa Meneses, L. J. (2023). Desarrollo e implementación de aplicación de realidad virtual como soporte a la enseñanza del sistema óseo. *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria*, 9(2), 59–68.
<https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/mikarimin/article/view/3180>
- Haberbosch, M., Deiters, M., y Schaal, S. (2025). Combining Virtual and Hands-on Lab Work in a Blended Learning Approach on Molecular Biology Methods and Lab

Safety for Lower Secondary Education Students. *Education Sciences*, 15(2), 123.

<https://doi.org/10.3390/educsci15020123>

Hernández, C. A. (Octubre, 2005). *¿Qué son las competencias científicas?* Trabajo presentado en Foro educativo nacional. Madrid, España.

http://acofacien.org/images/files/ENCUENTROS/DIRECTORES_DE_CARRERA/I_REUNION_DE_DIRECTORES_DE_CARRERA/ba37e1_QUE%20SON%20LAS%20COMPETENCIAS%20CIENTIFICAS%20-%20C.A.%20Hernandez.PDF

Herrera-Castrillo, C. J. (2024). Desarrollo de competencias a través de prototipos y simuladores en un entorno interdisciplinario de física-matemática. *Revista Oratores*, 20, 78-102. <https://doi.org/10.37594/oratores.n20.1243>

Hogan, D. y O'Flaherty, J. (2022), Exploring the nature and culture of science as an academic discipline: implications for the integration of education for sustainable development. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 23(8), 120-147. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-06-2021-0236>

Jaipal, K., y Figg, C. (2009). Using Video Games in Science Instruction: Pedagogical, Social, and Concept-Related Aspects. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 9(2), 117–134. <https://doi.org/10.1080/14926150903047780>

Klisch, Y., Miller, L. M., Beier, M. E., y Wang, S. (2012). Teaching the Biological Consequences of Alcohol Abuse through an Online Game: Impacts among Secondary Students. *CBE—Life. Sciences Education*, 11(1), 94-102. <https://doi.org/10.1187/cbe.11-04-0040>

Krüger, J.T., Höffler, T.N., Wahl, M., Knickmeier, K. y Parchmann, I. (2022). Two comparative studies of computer simulations and experiments as learning tools in school and out-of-school education. *Instructional Science*, 50, 169–197. <https://doi.org/10.1007/s11251-021-09566-1>

- Labov, J.B., Reid, A.H. y Yamamoto, K. R. (2010). Integrated Biology and Undergraduate Science Education: A New Biology Education for the Twenty-First Century? *CBE—Life Sciences Education* 9(1). 10-16. <https://doi.org/10.1187/cbe.09-12-0092>
- Lant, C., Pérez-Lapeña, B., Xiong, W., Kraft, S., Kowalchuk, R., y Blair, M. (2016). Environmental Systems Simulations for Carbon, Energy, Nitrogen, Water, and Watersheds: Design Principles and Pilot Testing. *Journal of Geoscience Education*, 64(2), 115–124. <https://doi.org/10.5408/14-004.1>
- Lestari, D.P., Supahar, Paidi, Suwarjo y Herianto (2023). Effect of science virtual laboratory combination with demonstration methods on lower-secondary school students' scientific literacy ability in a science course. *Education and Information Technologies* 28, 16153–16175 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11857-8>
- Lui, M., y Slotta, J. D. (2013). Immersive simulations for smart classrooms: exploring evolutionary concepts in secondary science. *Technology Pedagogy And Education*, 23(1), 57-80. <https://doi.org/10.1080/1475939x.2013.838452>
- Maimatayeva, A., Assilbekova, B., Zhumagulova, K., Galymova, N. y Issayev, G. (2024). Influence of practical training based on virtual reality on functional scientific literacy of secondary schoolchildren (in biology). *Education and Information Technologies* <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13229-2>
- Musaeus, L. H., Tatar, D., y Musaeus, P. (2024). Computational modelling in high school biology: A teaching intervention. *Journal of Biological Education*, 58(4), 812–828. <https://doi.org/10.1080/00219266.2022.2118353>
- Ngema, M., y Motlhabane, A. (2025). Virtual labs in life sciences education: A case study of grade 10 learners in selected South African rural schools. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 21(2), em2579. <https://doi.org/10.29333/ejmste/15925>

Ocando, M., Finol, W., y Mavares, T. (2020). La enseñanza de la Biología. Una mirada desde la acción docente. *Omnia*, 24(1), 11-26.

<https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/omnia/article/view/32700>

Ocelli, M. y García Romano, L. (2018). Las simulaciones en la enseñanza de la biología. *Docentes Conectados* 1(1), 3-16.

<https://docentesconectados.unsl.edu.ar/index.php/dc/issue/view/6>

Omurtak, E. y Zeybek, G. (2022). The effect of augmented reality applications in biology lesson on academic achievement and motivation. *Journal of Education in Science, Environment and Health (JESEH)*, 8(1), 55-74.

<https://doi.org/10.21891/jeseh.1059283>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2016). *Aportes para la enseñanza de las ciencias naturales*.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244733>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2023).

Global Education Monitoring Report Summary 2023: Technology in education: A tool on whose terms? https://www.unesco.org/gem-report/sites/default/files/medias/fichiers/2023/07/Summary_v5.pdf#:~:text=A%20global%20review%20estimated%20that,org%20has

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (2023a). *Marco de evaluación de ciencia de PISA 2025*. https://pisa-framework.oecd.org/science-2025/per_spa/

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (2023b). *PISA 2022 Results The State of Learning and Equity in Education, Volume I*.

https://www.oecd.org/en/publications/pisa-2022-results-volume-i_53f23881-en.html

Orrego Riofrio, M. C., Aimacaña Pinduisaca, C. J, y Urquizo Cruz, E. P. (2024). Simuladores Virtuales en el Proceso de Aprendizaje de las Ciencias Experimentales. *Revista*

científica, dominio de las ciencias, 10(3), 40-56

<https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3916>

Özeren, S y Top, E. (2023). The effects of augmented reality applications on the academic achievement and motivation of secondary school students. *Malaysian Online Journal of Educational Technology, 11(1)*, 25-40.

<http://dx.doi.org/10.52380/mojet.2023.11.1.425>

Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrowe, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S.,... Moher, D. (2021). *PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews*. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>

Pang, S., Lv, G., Zhang, Y., y Yang, Y. (2025). Enhancing students' science learning using virtual simulation technologies: A systematic review. *Asia Pacific Journal of Education*. <https://doi.org/10.1080/02188791.2024.2441676>

Peffer, M. E., Beckler, M. L., Schunn, C., Renken, M., Revak, A. (2015). Science Classroom Inquiry (SCI) Simulations: A Novel Method to Scaffold Science Learning. *PLoS ONE 10(3)*: e0120638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120638>

Perry, J., y Klopfer, E. (2014). UbiqBio: Adoptions and Outcomes of Mobile Biology Games in the Ecology of School. *Computers In The Schools, 31(1-2)*, 43-64. <https://doi.org/10.1080/07380569.2014.879771>

Pozo, J.I., Cabellos, B. y Pérez Echeverría, MdP. (2024) Has the educational use of digital technologies changed after the pandemic? A longitudinal study. *PLoS ONE 19(12)*, 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311695>

Rates, C.A., Mulvey, B.K. y Feldon, D.F. (2016). Promoting Conceptual Change for Complex Systems Understanding: Outcomes of an Agent-Based Participatory

- Simulation. *Journal of Science Education and Technology* 25, 610–627.
<https://doi.org/10.1007/s10956-016-9616-6>
- Riess, W., y Mischo, C. (2010). Promoting Systems Thinking through Biology Lessons. *International Journal of Science Education*, 32(6), 705–725.
<https://doi.org/10.1080/09500690902769946>
- Ríos Muñoz, V., y Soto Araújo, R. (2024). Desarrollo de la competencia científica, explicación de fenómenos naturales, mediado por el uso de simuladores. *Hilos Pedagogía, Innovación y cultura digital*, 1(1), 35-46. <https://doi.org/10.32997/rchicd-2024-5015>
- Robles Moral, F. J., y Martínez Ballesteros, A. (2022). La genética mendeliana de secundaria a través del laboratorio virtual. *EduTec, Revista Electrónica De Tecnología Educativa*, (82), 217–231. <https://doi.org/10.21556/edutec.2022.82.2695>
- Rubio-Tamayo, J. L., Barrio, M. G., y García García, F. (2017). Immersive Environments and Virtual Reality: Systematic Review and Advances in Communication, Interaction and Simulation. *Multimodal Technologies And Interaction*, 1(4), 21.
<https://doi.org/10.3390/mti1040021>
- Rybalko, L., Topuzov, O. y Velychko, L. (2020). Natural science education concept for sustainable development. *E3S Web of Conferences* 166. 1-6
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016610030>
- Rutten, N., van Joolingen, W. R., y van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58. 136–153.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>
- Sanz Pardo, A., y Martínez Vázquez, J. L. (2005). El uso de los laboratorios virtuales en la asignatura bioquímica como alternativa para la aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación. *Tecnología Química*, XXV(1), 5-17.

- Setyowati, A. P., Gunarhadi, y Musadad, A. A. (2023). Development of an inquiry-based virtual laboratory to facilitate biology practicum for high school students. *Multidisciplinary Science Journal*, 6(10).
<https://doi.org/10.31893/multiscience.2024205>
- Sousa, C. (2016). Problem-Based Learning on Cell Biology and Ecophysiology using integrated laboratory and computational activities. *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences* 3(1). 118-132.
<https://doi.org/10.4995/muse.2016.3763>
- Špernjak, A., y Šorgo, A. (2018). Differences in acquired knowledge and attitudes achieved with traditional, computer-supported and virtual laboratory biology laboratory exercises. *Journal of Biological Education*, 52(2), 206–220.
<https://doi.org/10.1080/00219266.2017.1298532>
- Stenberdt, V. A. y Makransky, G. (2023). Mastery experiences in immersive virtual reality promote pro-environmental waste-sorting behavior. *Computers & Education*, 198
- Thompson, M., Wang, A., Bilgin, C.U., Anteneh, M., Roy, D., Tan, P., Eberhart, R., Klopfer, E. (2020). Influence of Virtual Reality on High School Students' Conceptions of Cells. *JUCS - Journal of Universal Computer Science* 26(8): 929-946.
<https://doi.org/10.3897/jucs.2020.050>
- 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](https://doi.org/10.26820/recimundo/7.(1).enero.2023.432-444)
- Wildan, A., Yau, C. D., Ng, E. M. W., Xiao, K., Liew, O. W., y Ng, T. W. (2022). Algae photosynthesis and respiration experimentation with physical and augmented reality modes. *Journal Of Biological Education*, 56(2), 163-173.
<https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1757487>

Zhu, Y. (2019) How Chinese students' scientific competencies are influenced by their attitudes? *International Journal of Science Education*, 41(15), 2094-2112. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1660926>