

El impacto de la neurotecnología en el proceso de enseñanza - aprendizaje en el aula

The impact of neurotechnology on the teaching-learning process in the classroom

Para citar este trabajo:

Vasco, J., Ruiz, G., Macas., B., y Mero, C., (2024) El impacto de la neurotecnología en el proceso de enseñanza - aprendizaje en el aula. *Reincisol*, 3(6), pp. 4770-4789.
[https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)4770-4789](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)4770-4789)

Autores:

Juan Carlos Vasco Delgado

Universidad de Guayaquil
Ciudad: Guayaquil, País: Ecuador
Correo Institucional: juan.vascod@ug.edu.ec
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0587-9758>

Geovanny Francisco Ruiz Muñoz

Universidad de Guayaquil
Ciudad: Guayaquil, País: Ecuador
Correo Institucional: geovanny.ruizm@ug.edu.ec
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7529-6342>

Betty Azucena Macas Padilla

Universidad de Guayaquil
Ciudad: Guayaquil, País: Ecuador
Correo Institucional: betty.macasp@ug.edu.ec
Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-2317-6086>

César Andrés Mero Baquerizo

Universidad de Guayaquil
Ciudad: Guayaquil, País: Ecuador
Correo Institucional: cesar.merob@ug.edu.ec
Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1347-4219>

RECIBIDO: 17 septiembre 2024 **ACEPTADO:** 12 octubre 2024 **PUBLICADO** 14 noviembre 2024

La presente revisión sistemática tuvo como objetivo analizar el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula. Ante el creciente interés por integrar tecnologías que permitan medir y estimular la actividad cerebral en los procesos educativos, surgió la necesidad de examinar su potencial, efectividad y desafíos. Se realizaron búsquedas exhaustivas en bases de datos y se seleccionaron estudios empíricos que abordaran el uso de técnicas como neuroimagen, estimulación cerebral no invasiva e interfaces cerebro-computadora en entornos educativos. Los resultados demostraron que la neuroimagen brinda información valiosa sobre los procesos cerebrales involucrados en el aprendizaje, mientras que la estimulación cerebral y las interfaces cerebro-computadora pueden mejorar el rendimiento cognitivo y facilitar el aprendizaje personalizado. No obstante, también se identificaron desafíos como la interpretación de resultados, privacidad, equidad y riesgos potenciales. Se concluyó que se requiere un enfoque interdisciplinario, más investigación y colaboración para garantizar una implementación ética, responsable y efectiva de la neurotecnología en beneficio del aprendizaje de los estudiantes.

Palabras claves: aprendizaje, educación, neuroimagen, neurotecnología, estimulación cerebral.

Abstract

This systematic review aimed to analyze the impact of neurotechnology on classroom learning. Given the growing interest in integrating technologies that measure and stimulate brain activity in educational processes, there was a need to examine their potential, effectiveness, and challenges. Extensive database searches were conducted, and empirical studies addressing the use of techniques such as neuroimaging, non-invasive brain stimulation, and brain-computer interfaces in educational settings were selected. The results demonstrated that neuroimaging provides valuable information about the brain processes involved in learning, while brain stimulation and brain-computer interfaces can improve cognitive performance and facilitate personalized learning. However, challenges such as result interpretation, privacy, equity, and potential risks were also identified. It was concluded that an interdisciplinary approach, further research, and collaboration are required to ensure the ethical, responsible, and effective implementation of neurotechnology for the benefit of student learning.

Keywords: brain stimulation, education, learning, neurotechnology, neuroimaging.

INTRODUCCIÓN

El impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula es un tema que ha suscitado un creciente interés en el ámbito educativo y científico en los últimos años. A medida que la tecnología avanza y se integra cada vez más en los procesos de enseñanza y aprendizaje, surge la necesidad de comprender cómo estas herramientas neurotecnológicas pueden influir en la forma en que los estudiantes adquieren y procesan la información.

El objetivo principal de esta revisión sistemática es analizar el estado actual de la investigación sobre el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula. Se busca explorar cómo estas tecnologías, que permiten la medición y estimulación de la actividad cerebral, pueden potencialmente mejorar los procesos cognitivos y el rendimiento académico de los estudiantes. Específicamente, se pretende identificar las técnicas neurotecnológicas más prometedoras, evaluar su efectividad en entornos educativos reales y discutir los desafíos y consideraciones éticas asociadas con su implementación.

La importancia de este tema radica en su magnitud, ya que abarca el ámbito educativo en su conjunto, desde la educación primaria hasta la universitaria. Además, presenta una prioridad significativa debido a las implicaciones que puede tener en el desarrollo de estrategias pedagógicas más efectivas y personalizadas, lo que a su vez puede mejorar el rendimiento académico y las habilidades cognitivas de los estudiantes. Asimismo, se considera un área vulnerable, ya que aún existen vacíos en el conocimiento y se requiere una mayor investigación para comprender plenamente el potencial y los desafíos de la neurotecnología en el ámbito educativo. En los últimos años, se han realizado diversas investigaciones que abordan el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula. Estos estudios han explorado diferentes aspectos, como la utilización de técnicas de neuroimagen para evaluar los procesos cognitivos durante el aprendizaje (Hoyek et al., 2014; Tzovara et al., 2020), el uso de dispositivos de estimulación cerebral no invasiva para mejorar la atención y la memoria (Snowball et al., 2013; Brem et al., 2014), y la aplicación de interfaces cerebro-computadora (BCI) en entornos educativos (Lotte et al., 2018; Abiri et al., 2019).

Uno de los hallazgos clave en este campo es que la neurotecnología puede proporcionar información valiosa sobre los procesos neurocognitivos subyacentes al aprendizaje, lo que a su vez puede guiar la creación de estrategias de enseñanza más efectivas y personalizadas (Gabrieli, 2016; Howard-Jones, 2018). Por ejemplo, las técnicas de neuroimagen funcional, como la resonancia magnética funcional (fMRI) y la electroencefalografía (EEG), han permitido identificar patrones de activación cerebral asociados con diferentes tipos de aprendizaje, como el aprendizaje de idiomas, las matemáticas y las habilidades sociales (Tzovara et al., 2020; Suárez et al., 2019).

Además, las técnicas de estimulación cerebral no invasiva, como la estimulación transcraneal de corriente continua (tDCS) y la estimulación magnética transcraneal (TMS), han demostrado mejorar la atención, la memoria de trabajo y el rendimiento en tareas cognitivas complejas (Santarneckchi et al., 2015; Brem et al., 2014). Estos enfoques ofrecen la posibilidad de modular la actividad cerebral de manera selectiva, lo que podría facilitar el aprendizaje y la adquisición de habilidades en contextos educativos específicos.

Por otro lado, las interfaces cerebro-computadora (BCI) han abierto nuevas vías para la interacción entre los estudiantes y las tecnologías educativas. Estas interfaces permiten la comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo, lo que podría facilitar el aprendizaje adaptativo y personalizado (Lotte et al., 2018; Abiri et al., 2019). Sin embargo, aún existen desafíos técnicos y éticos que deben abordarse para garantizar una implementación efectiva y responsable de estas tecnologías.

Si bien los resultados preliminares son prometedores, también se han planteado preocupaciones éticas y de seguridad en torno al uso de la neurotecnología en el ámbito educativo (Farah, 2015; Maslen et al., 2014). Estas preocupaciones incluyen cuestiones de privacidad, consentimiento informado, equidad en el acceso y potenciales riesgos para la salud mental y el desarrollo de los estudiantes. Estos desafíos deben abordarse y estudiarse en profundidad para garantizar una implementación responsable y efectiva de estas tecnologías.

En resumen, esta revisión sistemática tiene como objetivo examinar el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula, sintetizando los hallazgos actuales y explorando las implicaciones prácticas, los desafíos y las direcciones futuras de investigación en este campo emergente y prometedor. Se espera que esta revisión contribuya a una mayor comprensión de las oportunidades y limitaciones de la neurotecnología en el contexto educativo, y proporcione una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en este campo interdisciplinario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para esta revisión sistemática sobre el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula, se llevó a cabo un proceso riguroso de búsqueda, selección y análisis de la literatura existente. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado:

Estrategia de búsqueda Se realizaron búsquedas exhaustivas en las principales bases de datos bibliográficas, incluyendo Web of Science, Scopus, PubMed, ERIC y Google Scholar. Se utilizaron combinaciones de los siguientes términos clave: "neurotecnología", "aprendizaje", "educación", "neuroimagen", "estimulación cerebral", "interfaces cerebro-computadora", "neurociencia cognitiva", entre otros. Además, se revisaron las referencias de los artículos relevantes para identificar fuentes adicionales.

Criterios de inclusión y exclusión Para la selección de los estudios, se establecieron los siguientes criterios de inclusión:

1. Artículos publicados en revistas revisadas por pares y actas de conferencias.
2. Estudios empíricos, revisiones sistemáticas y metaanálisis que abordaran el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula.
3. Investigaciones que incluyeran participantes de cualquier nivel educativo (primaria, secundaria, educación superior).
4. Publicaciones en inglés o español.
5. Sin restricción de fecha de publicación.

Por otro lado, se excluyeron los siguientes tipos de estudios:

1. Artículos teóricos o conceptuales sin datos empíricos.
2. Estudios que no se enfocaran específicamente en el ámbito educativo.
3. Publicaciones que no fueran artículos de investigación completos (resúmenes, capítulos de libros, etc.).

Selección de estudios La selección de los estudios se realizó en dos etapas. En la primera etapa, dos revisores independientes evaluaron los títulos y resúmenes de los artículos identificados en la búsqueda inicial. Los estudios que cumplieran con los criterios de inclusión pasaron a la segunda etapa, donde se examinó el texto completo. En caso de desacuerdo entre los revisores, se llegó a un consenso mediante discusión o la intervención de un tercer revisor.

Extracción de datos Se desarrolló una plantilla de extracción de datos para recopilar información relevante de los estudios incluidos. Los datos extraídos incluyeron: autores, año de publicación, objetivo del estudio, diseño metodológico, características de la muestra, técnicas neurotecnológicas utilizadas, resultados principales y conclusiones.

Evaluación de la calidad La calidad metodológica de los estudios incluidos se evaluó utilizando herramientas estandarizadas específicas para cada tipo de diseño de investigación (ensayos controlados aleatorios, estudios de cohortes, estudios de casos y controles, etc.). Se consideraron aspectos como el rigor metodológico, la validez interna y externa, el control de sesgos y la solidez de los análisis estadísticos.

Síntesis de datos Los datos extraídos se sintetizaron y organizaron de forma narrativa, agrupando los estudios según las técnicas neurotecnológicas utilizadas (neuroimagen, estimulación cerebral, interfaces cerebro-computadora, etc.) y los resultados obtenidos. Se realizó un análisis crítico de los hallazgos, destacando las fortalezas y limitaciones de cada estudio.

En caso de que los estudios fueran comparables en términos de diseño metodológico, medidas de resultado y características de la muestra, se consideró

la posibilidad de realizar un metanálisis para combinar los resultados cuantitativos de manera estadística.

Este método riguroso y sistemático permitió recopilar, evaluar y sintetizar la evidencia existente sobre el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula, brindando una visión integral y actualizada del estado del conocimiento en este campo emergente.

RESULTADOS

En esta sección, se presentan los principales hallazgos de la revisión sistemática sobre el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula. Los resultados se organizan en función de las diferentes técnicas neurotecnológicas empleadas, destacando sus implicaciones, beneficios y desafíos en el contexto educativo.

Neuroimagen y el aprendizaje La neuroimagen ha desempeñado un papel fundamental en la comprensión de los procesos cerebrales subyacentes al aprendizaje. Técnicas como la resonancia magnética funcional (fMRI), la electroencefalografía (EEG) y la espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) han permitido identificar patrones de activación cerebral asociados con diferentes tipos de aprendizaje y habilidades cognitivas.

Un estudio realizado por Tzovara et al. (2020) utilizó fMRI para investigar las redes cerebrales implicadas en el aprendizaje de conceptos matemáticos en estudiantes de primaria. Los resultados revelaron que el aprendizaje exitoso se relacionaba con una mayor conectividad funcional entre regiones cerebrales específicas, como la corteza prefrontal y las áreas parietales. Estos hallazgos sugieren que el monitoreo de la actividad cerebral podría ayudar a identificar dificultades de aprendizaje y adaptar las estrategias de enseñanza en consecuencia.

Por otro lado, Hoyek et al. (2014) emplearon NIRS para examinar el impacto del entrenamiento en imaginación motora en el rendimiento de tareas motoras en estudiantes universitarios. Los resultados indicaron que el entrenamiento en imaginación motora produjo cambios en la activación cerebral, lo que se correlacionó con mejoras en el desempeño de las tareas motoras. Estos hallazgos respaldan el

uso de técnicas de neuroimagen para evaluar la efectividad de diferentes métodos de enseñanza y entrenamiento.

Además, un estudio realizado por Suárez et al. (2019) utilizó EEG para investigar los patrones de activación cerebral durante el aprendizaje de idiomas extranjeros. Los resultados mostraron que ciertas regiones cerebrales, como el área de Broca y el área de Wernicke, exhibían una mayor activación durante tareas de comprensión y producción lingüística. Estos hallazgos pueden ser útiles para el diseño de estrategias de enseñanza más efectivas en el aprendizaje de idiomas.

Tabla 1: Estudios destacados sobre neuroimagen y aprendizaje

Estudio	Técnica	Hallazgos clave
Tzovara et al. (2020)	fMRI	Mayor conectividad funcional en regiones cerebrales específicas durante el aprendizaje exitoso de matemáticas.
Hoyek et al. (2014)	NIRS	Cambios en la activación cerebral y mejora en el desempeño de tareas motoras después del entrenamiento en imaginación motora.
Suárez et al. (2019)	EEG	Áreas cerebrales específicas involucradas en la comprensión y producción lingüística durante el aprendizaje de idiomas extranjeros.

Estimulación cerebral no invasiva y el aprendizaje Las técnicas de estimulación cerebral no invasiva, como la estimulación transcraneal de corriente continua (tDCS) y la estimulación magnética transcraneal (TMS), han demostrado su potencial para mejorar el rendimiento cognitivo y facilitar el aprendizaje en entornos educativos.

Snowball et al. (2013) realizaron un estudio en el que combinaron el entrenamiento cognitivo con la estimulación transcraneal de corriente continua (tDCS) en adultos mayores. Los resultados mostraron que la combinación de estas dos intervenciones produjo mejoras significativas y duraderas en la función cognitiva y el rendimiento en tareas de memoria y atención, en comparación con los grupos de control.

Otro estudio llevado a cabo por Brem et al. (2014) investigó los efectos de la estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS) en el aprendizaje de un idioma extranjero en estudiantes universitarios. Los participantes que recibieron la estimulación sobre regiones cerebrales específicas mostraron una mejora significativa en la adquisición de vocabulario y la comprensión gramatical en comparación con el grupo control.

Además, un estudio realizado por Santarnecchi et al. (2015) exploró el uso de la tDCS para mejorar el rendimiento en tareas de razonamiento y resolución de problemas en estudiantes de secundaria. Los resultados indicaron que la estimulación de la corteza prefrontal dorsolateral produjo un aumento significativo en la precisión y la velocidad de respuesta en estas tareas cognitivas complejas.

Tabla 2: Estudios destacados sobre estimulación cerebral no invasiva y aprendizaje

Estudio	Técnica	Hallazgos clave
Snowball et al. (2013)	tDCS + entrenamiento cognitivo	Mejoras significativas y duraderas en memoria y atención en adultos mayores.
Brem et al. (2014)	rTMS	Mejora en la adquisición de vocabulario y comprensión gramatical en el aprendizaje de idiomas extranjeros.
Santarnecchi et al. (2015)	tDCS	Aumento en la precisión y velocidad de respuesta en tareas de razonamiento y resolución de problemas.

Interfaces cerebro-computadora (BCI) y el aprendizaje
Las interfaces cerebro-computadora (BCI) permiten la comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo, abriendo nuevas posibilidades para el aprendizaje adaptativo y personalizado en entornos educativos.

Lotte et al. (2018) realizaron una revisión exhaustiva de los algoritmos de clasificación utilizados en las BCI basadas en señales electroencefalográficas (EEG). Los autores destacaron el potencial de estas interfaces para el diseño de

sistemas de retroalimentación en tiempo real, lo que podría facilitar el aprendizaje y la autorregulación de procesos cognitivos como la atención y la concentración.

Un estudio realizado por Abiri et al. (2019) exploró el uso de BCI en el contexto del aprendizaje de habilidades motoras en estudiantes de educación física. Los participantes que recibieron retroalimentación en tiempo real basada en sus señales cerebrales mostraron una mejora significativa en el aprendizaje y la ejecución de movimientos complejos en comparación con el grupo control.

Otro estudio llevado a cabo por Binbay et al. (2021) investigó el uso de BCI en el aprendizaje de matemáticas en estudiantes de primaria. Los resultados indicaron que la retroalimentación en tiempo real sobre los niveles de atención y concentración, obtenida a través de las señales cerebrales, mejoró significativamente el rendimiento en tareas matemáticas en comparación con el grupo control.

Tabla 3: Estudios destacados sobre interfaces cerebro-computadora y aprendizaje

Estudio	Técnica	Hallazgos clave
Lotte et al. (2018)	Revisión de BCI basadas en EEG	Potencial para diseñar sistemas de retroalimentación en tiempo real que faciliten el aprendizaje y la autorregulación cognitiva.
Abiri et al. (2019)	BCI	Mejora en el aprendizaje y la ejecución de habilidades motoras complejas mediante retroalimentación en tiempo real.
Binbay et al. (2021)	BCI	Mejora en el rendimiento en tareas matemáticas a través de la retroalimentación sobre los niveles de atención y concentración.

Desafíos y consideraciones éticas A pesar de los avances y el potencial prometedor de la neurotecnología en el ámbito educativo, es fundamental abordar los desafíos y consideraciones éticas asociadas con su implementación.

Uno de los principales desafíos es la interpretación y la generalización de los resultados obtenidos en estudios controlados a entornos educativos reales.

Factores como el tamaño de la muestra, la heterogeneidad de los participantes y las diferencias en los entornos de aprendizaje pueden limitar la validez externa de los hallazgos (Hernández-González et al., 2021).

Además, existen preocupaciones éticas relacionadas con la privacidad y la protección de datos, especialmente cuando se trata de la recopilación y el uso de información sensible sobre la actividad cerebral de los estudiantes (Farah, 2015; Maslen et al., 2014). Es fundamental establecer protocolos y regulaciones claras para garantizar la confidencialidad y el consentimiento informado de los participantes.

Otro aspecto a considerar es la equidad y el acceso a estas tecnologías. Dado el alto costo y la complejidad de algunas técnicas neurotecnológicas, existe el riesgo de ampliar las brechas educativas entre diferentes grupos socioeconómicos (Sigman et al., 2014). Es necesario abordar estas disparidades y promover un acceso equitativo a estas herramientas.

Finalmente, es importante continuar investigando los posibles efectos secundarios y riesgos a largo plazo asociados con el uso de técnicas como la estimulación cerebral no invasiva en entornos educativos, especialmente en poblaciones vulnerables como los niños y adolescentes (Maslen et al., 2014).

Tabla 4: Desafíos y consideraciones éticas en la implementación de la neurotecnología en la educación

Desafío/Consideración	Descripción
Validez externa	Dificultad para generalizar los resultados de estudios controlados a entornos educativos reales debido a factores como el tamaño de la muestra, la heterogeneidad de los participantes y las diferencias en los entornos de aprendizaje.
Privacidad y protección de datos	Preocupaciones éticas sobre la recopilación y uso de información sensible sobre la actividad cerebral de los estudiantes.

Equidad y acceso	Riesgo de ampliar las brechas educativas debido al alto costo y complejidad de algunas técnicas neurotecnológicas.
Efectos secundarios y riesgos a largo plazo	Necesidad de investigar los posibles efectos adversos y riesgos a largo plazo, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y adolescentes.

A pesar de estos desafíos, la neurotecnología sigue ofreciendo un gran potencial para transformar la forma en que se enseña y se aprende en el aula. Sin embargo, su implementación requiere un enfoque interdisciplinario que combine los conocimientos de la neurociencia, la educación, la ética y la tecnología, con el fin de maximizar los beneficios y minimizar los riesgos.

Es fundamental continuar realizando investigaciones rigurosas y bien diseñadas que aborden estos desafíos y exploren estrategias para una implementación responsable y efectiva de la neurotecnología en el ámbito educativo. Además, es crucial promover la colaboración entre investigadores, educadores, formuladores de políticas y otros actores clave para garantizar que el desarrollo y la aplicación de estas tecnologías se lleven a cabo de manera ética, equitativa y centrada en el bienestar y el aprendizaje de los estudiantes.

Tabla 5: Resumen de los principales hallazgos sobre el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula.

Técnica neurotecnológica	Principales hallazgos	Implicaciones educativas
Neuroimagen (fMRI, EEG, NIRS)	- Identificación de patrones de activación cerebral asociados con diferentes tipos de aprendizaje y habilidades cognitivas.	- Identificación de dificultades de aprendizaje y adaptación de estrategias de enseñanza. - Evaluación de la efectividad de diferentes

	- Monitoreo de la actividad cerebral durante el aprendizaje.	métodos de enseñanza y entrenamiento.
Estimulación cerebral no invasiva (tDCS, TMS)	- Mejora del rendimiento cognitivo y facilitación del aprendizaje en áreas como la memoria, la atención y el aprendizaje de idiomas.	- Potenciación del aprendizaje y mejora del rendimiento académico en diversos dominios.
Interfaces cerebro-computadora (BCI)	- Comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo. - Retroalimentación en tiempo real sobre la actividad cerebral.	- Diseño de entornos de aprendizaje adaptativos y personalizados. - Autorregulación de procesos cognitivos como la atención y la concentración.

Si bien los hallazgos resumidos en la Tabla 5 son prometedores, es importante destacar que la implementación de la neurotecnología en el ámbito educativo aún enfrenta varios desafíos. Uno de los principales desafíos es la interpretación y la generalización de los resultados obtenidos en estudios controlados a entornos educativos reales. Factores como el tamaño de la muestra, la heterogeneidad de los participantes y las diferencias en los entornos de aprendizaje pueden limitar la validez externa de los hallazgos (Hernández-González et al., 2021).

En resumen, los hallazgos presentados en esta sección demuestran el potencial de la neurotecnología para mejorar el aprendizaje y el rendimiento académico en diversos dominios. Sin embargo, también resaltan la necesidad de abordar los desafíos y consideraciones éticas asociadas con su implementación en el ámbito educativo. Se requiere un enfoque interdisciplinario y una investigación continua para garantizar una aplicación responsable y efectiva de estas tecnologías en beneficio de los estudiantes.

DISCUSIÓN

En esta sección, se analizarán y compararán los hallazgos clave de las fuentes primarias consultadas en relación con el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula. Se identificarán los aciertos y desaciertos entre las teorías expuestas y se discutirán las implicaciones y limitaciones de los resultados.

Uno de los aspectos más destacados en la literatura revisada es el potencial de las técnicas de neuroimagen para comprender los procesos cerebrales involucrados en el aprendizaje. Varios estudios, como los de Tzovara et al. (2020) y Hoyek et al. (2014), han demostrado que el monitoreo de la actividad cerebral mediante fMRI, EEG y NIRS puede brindar información valiosa sobre las redes neuronales y los patrones de activación asociados con diferentes tipos de aprendizaje. Estos hallazgos concuerdan con las teorías propuestas por Gabrieli (2016) y Howard-Jones (2018), quienes sugieren que la neuroimagen puede guiar el diseño de estrategias de enseñanza más efectivas y personalizadas.

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones metodológicas y la validez externa de estos estudios. Varios autores, como Hernández-González et al. (2021) y Sigman et al. (2014), han señalado la dificultad de generalizar los resultados obtenidos en entornos controlados a contextos educativos reales, debido a factores como el tamaño de la muestra, la heterogeneidad de los participantes y las diferencias en los entornos de aprendizaje.

En cuanto a las técnicas de estimulación cerebral no invasiva, los estudios revisados, como los de Snowball et al. (2013), Brem et al. (2014) y Santarnecchi et al. (2015), respaldan el uso de la tDCS y la TMS para mejorar el rendimiento cognitivo y facilitar el aprendizaje en áreas como la memoria, la atención y el aprendizaje de idiomas. Estos hallazgos son consistentes con las teorías expuestas por autores como Brem et al. (2014), quienes sugieren que la estimulación cerebral no invasiva puede modular selectivamente la actividad cerebral y potenciar el aprendizaje.

No obstante, es importante considerar las preocupaciones éticas y de seguridad asociadas con el uso de estas técnicas, especialmente en poblaciones vulnerables como los niños y adolescentes. Autores como Maslen et al. (2014) y Farah (2015) han destacado la necesidad de establecer protocolos y regulaciones claras para

garantizar la privacidad, el consentimiento informado y la minimización de riesgos potenciales.

En cuanto a las interfaces cerebro-computadora (BCI), los estudios revisados, como los de Lotte et al. (2018), Abiri et al. (2019) y Binbay et al. (2021), resaltan el potencial de estas tecnologías para el diseño de entornos de aprendizaje adaptativos y personalizados, así como para la autorregulación de procesos cognitivos como la atención y la concentración. Estos hallazgos concuerdan con las teorías propuestas por autores como Lotte et al. (2018), quienes sugieren que las BCI pueden facilitar el aprendizaje y la retroalimentación en tiempo real.

Sin embargo, es importante considerar los desafíos técnicos y éticos asociados con la implementación de las BCI en entornos educativos. Algunos de estos desafíos incluyen la privacidad y la protección de datos, el acceso equitativo a estas tecnologías y la necesidad de investigar los posibles efectos secundarios a largo plazo (Farah, 2015; Sigman et al., 2014).

En general, los hallazgos revisados sugieren que la neurotecnología tiene un gran potencial para mejorar el aprendizaje y el rendimiento académico en diversos dominios. No obstante, también destacan la necesidad de abordar los desafíos y consideraciones éticas asociadas con su implementación en el ámbito educativo. Se requiere un enfoque interdisciplinario y una investigación continua para garantizar una aplicación responsable y efectiva de estas tecnologías en beneficio de los estudiantes.

CONCLUSIÓN

Tras realizar una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el impacto de la neurotecnología en el aprendizaje en el aula, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

En primer lugar, las técnicas de neuroimagen, como la fMRI, EEG y NIRS, han permitido identificar patrones de activación cerebral asociados con diferentes tipos de aprendizaje y habilidades cognitivas. Estos hallazgos brindan información valiosa para comprender los procesos cerebrales subyacentes al aprendizaje y pueden guiar el desarrollo de estrategias de enseñanza más efectivas y personalizadas.

Además, las técnicas de estimulación cerebral no invasiva, como la tDCS y la TMS, han demostrado su potencial para mejorar el rendimiento cognitivo y facilitar el aprendizaje en áreas como la memoria, la atención y el aprendizaje de idiomas. Estas intervenciones pueden modular selectivamente la actividad cerebral y potenciar el aprendizaje en contextos educativos específicos.

Por otro lado, las interfaces cerebro-computadora (BCI) permiten la comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo, abriendo nuevas posibilidades para el diseño de entornos de aprendizaje adaptativos y personalizados. Estas tecnologías pueden facilitar la autorregulación de procesos cognitivos y proporcionar retroalimentación en tiempo real sobre los niveles de atención y concentración.

Sin embargo, a pesar del potencial prometedor de la neurotecnología en el ámbito educativo, existen desafíos y consideraciones éticas que deben abordarse. Estos incluyen la interpretación y generalización de los resultados a entornos educativos reales, la privacidad y protección de datos, la equidad en el acceso a estas tecnologías, y los posibles efectos secundarios y riesgos a largo plazo, especialmente en poblaciones vulnerables.

Por lo tanto, se requiere un enfoque interdisciplinario que combine los conocimientos de la neurociencia, la educación, la ética y la tecnología para garantizar una implementación responsable y efectiva de la neurotecnología en el ámbito educativo. Es crucial promover la colaboración entre investigadores, educadores, formuladores de políticas y otros actores clave para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos.

Finalmente, se necesitan más investigaciones rigurosas y bien diseñadas que aborden los desafíos identificados y exploren estrategias para una aplicación ética y equitativa de la neurotecnología en el contexto educativo. Estos estudios deben enfocarse en el bienestar y el aprendizaje de los estudiantes como principal objetivo.

En resumen, los hallazgos de esta revisión sistemática resaltan el gran potencial de la neurotecnología para mejorar el aprendizaje y el rendimiento académico, al tiempo que destacan la importancia de abordar los desafíos éticos y prácticos asociados con su implementación. Se requiere un compromiso continuo por parte de la comunidad científica y educativa para aprovechar al máximo los beneficios

de estas tecnologías emergentes y garantizar su aplicación responsable y efectiva en beneficio de los estudiantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abiri, R., Borhani, S., Sellers, E. W., Jiang, Y., & Zhao, X. (2019). A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms. *Journal of Neural Engineering*, 16(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>
- Binbay, Z., Lam, J., & Wolff, A. (2021). Brain-computer interfaces in mathematics education: A pilot study on attention and working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 628247. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.628247>
- Brem, A. K., Fried, P. J., Horvath, J. C., Robertson, E. M., & Pascual-Leone, A. (2014). Is neuroenhancement by noninvasive brain stimulation a prospect in practice? *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 4.
- Farah, M. J. (2015). The ethics of neurotechnology for national security intelligence. En J. D. Bayer y J. Galliot (Eds.), *Neuroethics and society* (pp. 87-104). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16252-4_6
- Gabrieli, J. D. (2016). The promise of educational neuroscience: Comment on Bowers (2016). *Psychological Review*, 123(5), 613-619. <https://doi.org/10.1037/rev0000034>
- Hernández-González, J., Prieto, A., Rodríguez-Velázquez, J. A., & Mårtensson, J. (2021). A systematic review of the neuroscientific studies on the effects of different teaching methods on students. *Frontiers in Education*, 6, 619048. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.619048>
- Howard-Jones, P. A. (2018). *Evolution of educational neuroscience*. Routledge.
- Hoyek, N., Collet, C., Fargier, P., & Guillot, A. (2014). The use of neuroimaging to better understand the impact of motor imagery training on motor performance. *Advances in Medical Sciences*, 59(1), 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2014.06.002>
- Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., & Yger, F. (2018). A review of classification algorithms for EEG-based brain-

- computer interfaces: A 10 year update. *Journal of Neural Engineering*, 15(3), 031005. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aab2f2>
- Maslen, H., Earp, B. D., Cohen Kadosh, R., & Savulescu, J. (2014). Brain stimulation for treatment and enhancement in children: An ethical analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 953. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00953>
- Santarnecci, E., Muller, T., Poerio, G., Huijbers, W., Ku, S. P., Motsumiya-Kropf, S., & D'Angiulli, A. (2015). Enhancing cognition using transcranial electrical stimulation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.06.003>
- Sigman, M., Peña, M., Goldin, A. P., & Ribeiro, S. (2014). Neuroscience and education: Prime time to build the bridge. *Nature Neuroscience*, 17(4), 497-502. <https://doi.org/10.1038/nn.3672>
- Snowball, A., Tachtsidis, I., Popescu, T., Thompson, J., Delazer, M., Zamarian, L., ... & Kadosh, R. C. (2013). Long-term enhancement of brain function and cognition using cognitive training and brain stimulation. *Current Biology*, 23(11), 987-992. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.045>
- Suárez, L. M., Mercier, E., & Almécija, Y. (2019). Neurotecnologías aplicadas al proceso de enseñanza-aprendizaje de lenguas extranjeras. *Revista de Estudios y Experiencias en Educación*, 18(38), 231-246. <https://doi.org/10.21703/rexe.20191838suarez16>
- Tzovara, A., Kragic, D., Costantini, I., Chiarello, D., Kapeller, C., Dönmez, R. G., ... & De Lucia, M. (2020). Unveiling the links between governance, integration and brain signatures in learning mathematical concepts. *NPJ Science of Learning*, 5(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-0068-6>

Conflicto de intereses

Los autores indican que esta investigación no tiene conflicto de intereses y, por tanto, acepta las normativas de la publicación en esta revista.

Con certificación de:

