






Potencialidades y limitaciones de la usabilidad de dispositivos EEG en contextos educativos

Potentialities and limitations of the use of EEG devices in educational contexts

-  Dr. Alfonso García-Monge. Profesor Titular, Área de Didáctica de la Expresión Corporal, Universidad de Valladolid (España) (alfonso.garcia.monge@uva.es) (<https://orcid.org/0000-0002-4535-5628>)
-  Dr. Hénar Rodríguez-Navarro. Profesora Titular, Departamento Pedagogía, Universidad de Valladolid (España) (henar.rodriguez@uva.es) (<https://orcid.org/0000-0001-6993-8441>)
-  Dr. José-María Marbán. Profesor Titular, Departamento de Didáctica de las Matemáticas, Universidad de Valladolid (España) (josemaria.marban@uva.es) (<https://orcid.org/0000-0002-6561-6784>)

RESUMEN

Los nuevos dispositivos de electroencefalografía (EEG) inalámbricos permiten realizar registros en contextos fuera del laboratorio. Sin embargo, para su utilización hay que tener en cuenta muchos detalles. En este trabajo, a partir de un estudio de caso instrumental con un grupo de escolares de tercer curso de Educación Primaria, se pretende mostrar algunas potencialidades y limitaciones de la investigación con estos dispositivos en contextos educativos. Se aprecian varios equilibrios en el desarrollo de estas experiencias: entre los intereses y posibilidades de los equipos de investigación y las comunidades educativas; entre la distorsión de la vida en las aulas y las oportunidades de la colaboración entre la academia y la práctica; y entre el presupuesto y la facilidad de preparación de los equipos y la utilidad de los datos recogidos. Entre sus potencialidades encontramos el conocimiento al que permiten acceder sobre diferentes procesos cognitivos y emocionales, y la oportunidad de aprendizaje que suponen los nexos entre investigadores y comunidades educativas. La vida en las aulas se ve interrumpida por este tipo de experiencias, pero ello puede suponer un coste que facilite desarrollos futuros más integrados que beneficien los procesos de enseñanza y aprendizaje.

ABSTRACT

Wireless electroencephalography (EEG) devices allow for recordings in contexts outside the laboratory. However, many details must be considered for their use. In this research, using a case study with a group of third-grade primary school students, we aim to show some of the potentialities and limitations of research with these devices in educational settings. Several balances are apparent in the development of these experiences: between the interests and possibilities of the research teams and the educational communities; between the distortion of life in the classrooms and the opportunities for collaboration between academia and practice; and between the budget and the ease of preparing the equipment and the usefulness of the collected data. Among their potentialities is the knowledge that they allow access to different cognitive and emotional processes, and the learning opportunity represented by the links between researchers and educational communities. Life in the classrooms is interrupted by these types of experiences, but this can be a cost that facilitates more integrated future developments that benefit teaching and learning processes.

PALABRAS CLAVE | KEYWORDS

Neuroeducación, electroencefalografía, mediciones neurofisiológicas, educación primaria, contexto educativo, estudio de caso.

Neuroeducation, electroencephalography, neurophysiological measurements, primary education, educational context, case study.

1. Introducción

El desarrollo de nuevos dispositivos portátiles para el registro de señales electroencefalográficas (EEG) ha abierto la posibilidad de trasladar los estudios sobre la actividad cerebral desde las condiciones de laboratorio a contextos reales. Si aceptamos el carácter situado y culturalmente construido del aprendizaje (Brown et al., 1989) se entenderá el interés de estudiar el funcionamiento cerebral en contextos educativos cotidianos. La complejidad de los procesos cognitivos precisa para su estudio de ambientes en los que se puedan aislar el máximo número de variables. Sin embargo, ello limita la extrapolación de los resultados respecto a condiciones más naturales (Shamay-Tsoory & Mendelsohn, 2019).

El potencial de estos dispositivos, los incipientes estudios en ámbitos educativos, comerciales o artísticos, o la propia publicidad de las empresas que los comercializan, han generado muchas expectativas en investigadores y educadores, pero, como señalan Xu et al. (2022), la viabilidad de usar estos métodos con escolares, incluidos los desafíos técnicos y pragmáticos asociados con la calidad de los datos, no se han abordado suficientemente. La necesidad de desplegar una «neurociencia del mundo real» (Matusz et al., 2019; Shamay-Tsoory & Mendelsohn, 2019) choca con las limitaciones a la hora de desarrollar estudios en contextos educativos (Janssen et al., 2021). Con el fin de analizar las potencialidades y limitaciones del uso de esta tecnología en contextos escolares, planteamos este estudio de caso instrumental cuyos resultados puedan resultar de utilidad a investigadores o educadores que se hayan planteado la utilización de EEG en sus estudios o como apoyo a sus intervenciones educativas.

1.1. Algunos conceptos básicos

Repasaremos brevemente algunos conceptos sobre EEG. Hay diferentes tipos de sensores para recoger los cambios de polaridad (Hajare & Kadam, 2021). No todos son igual de precisos. Básicamente encontramos electrodos húmedos que necesitan algún tipo de sustancia electrolítica que facilite la conductividad (gel o solución salina), aquellos cuyos sensores recogen la señal sin necesidad de preparación (electrodos secos) y los electrodos secos cuya recepción se ve facilitada por un poco de solución (semisecos). Los electrodos húmedos tienen una mejor calidad de señal (Lau-Zhu et al., 2019), pero si el tiempo de recogida de información se prolonga, se pueden ver afectados por la deshidratación del sensor. En general, los electrodos secos reducen los tiempos de colocación del dispositivo, pero su señal puede estar más afectada por artefactos (Shad et al., 2020). Con el posicionamiento de cada electrodo se pretende recoger información de la actividad en el área de ubicación, así, cuantos más electrodos se coloquen en el cuero cabelludo, se podrá obtener una información más detallada de un mayor número de zonas. La calidad de la señal recogida depende también de la frecuencia de muestreo del dispositivo (número de muestras recogidas de una señal continua en un segundo). Una frecuencia de muestreo baja perderá muchos fragmentos de la señal emitida y dificultará su estudio.

La información proporcionada por la señal de EEG se puede estudiar de diferentes maneras. En condiciones de laboratorio con control de los estímulos presentados, se pueden realizar estudios en el dominio del tiempo. En situaciones en las que se realiza una medida prolongada, convendría realizar un análisis cuantitativo de algunas características de la onda. Una forma de cuantificación viene del estudio de las características de la potencia espectral en diferentes bandas de frecuencia con significado funcional (Basar et al., 1999). Los cambios en el espectro de potencias de estas bandas (delta, theta, alfa, beta y gamma), servirían como neuromarcadores de actividades cerebrales específicas. Estos correlatos entre determinadas características de los espectros de frecuencia y diferentes procesos y estados cognitivos o emocionales permitirían orientar el análisis de los datos obtenidos en contextos educativos reales. En la Tabla 1 se presentan algunos ejemplos.

Tabla 1. Correlatos neuronales de algunos procesos mentales		
Estado	Neuromarcadores	Ejemplo de Estudios
Atención	Incremento en las frecuencias beta y gama; disminución en la frecuencia alfa	Grammer et al. (2021)
Acercamiento o rechazo	Asimetría alfa frontal	Coan y Allen (2004)
Activación Emocional	$(\text{BetaF3} + \text{BetaF4}) / (\text{AlfaF3} / \text{AlfaF4})$	McMahan et al. (2015)
Carga cognitiva	Theta/alfa ratio	Antonenko et al. (2010)
Implicación	Ratio beta/theta+alpha	Pope et al. (1995)

Debe entenderse que estos marcadores, generalmente, indican correlación, no causalidad. No se trata de marcadores precisos que identifiquen los procesos cerebrales subyacentes. Cada neuromarcador se ha extraído con una población determinada, un tipo de registro particular, o un procesado y extracción de características específico. Al variar cualquier parámetro (e.g. equipo con el que se recogen los EEG, tipo de situación experimental o contexto, edades de los participantes, tipo de pre-procesado...) pueden variar los significados de esos marcadores.

1.2. EEG en contextos educativos

La accesibilidad a dispositivos EEG de bajo coste ha permitido que en la última década aparezcan algunos estudios indagando en su aplicación en diferentes contextos educativos. En comparación con ámbitos como el marketing o los videojuegos, la investigación es aún limitada (Xu & Zhong, 2018). En la Tabla 2 se presenta una panorámica de trabajos recientes.

Autores	Tema	Muestra	Dispositivo	Procesado
Dikker et al. (2017)	Sincronía cerebral maestro-alumnado y entre alumnado	12 estudiantes (16 a 18 años). Registro simultáneo en contexto naturalista	EEG 14 electrodos (128Hz)	Segmentación de señal continua. Cálculo de la coherencia espectral entre canales y entre participantes
Bevilacqua et al. (2019)	Sincronía cerebral maestro-alumnado y entre alumnado	12 estudiantes de Secundaria (16 a 18 años). Registro simultáneo en contexto naturalista	EEG 14 electrodos (128Hz)	Segmentación de señal continua. Cálculo de la coherencia espectral entre canales y entre participantes
Khedher et al. (2019)	Valoración de la implicación y esfuerzo cognitivo.	15 estudiantes universitarios. Registro individual en condición semi-naturalista	EEG 14 electrodos (128Hz)	Segmentación de señal continua. Densidad espectral de frecuencia. Aplicación del ratio beta/theta+alfa
Dikker et al. (2020)	Variaciones en la potencia y pico de alfa a lo largo de la jornada escolar	22 estudiantes de Educación Secundaria (17-18 años). Registro simultáneo en contexto naturalista	EEG 14 electrodos (128Hz)	Segmentación de datos continuos (electrodos occipitales). Espectros de potencia alfa y picos de frecuencia alfa individuales
Grammer et al. (2021)	Variaciones en diferentes frecuencias según estados de atención	23 estudiantes universitarios. Registro simultáneo por parejas en situación semi-naturalista	EEG 24 canales (250Hz)	Potencia de diferentes frecuencias de una señal continua segmentada
Vekety et al. (2022)	Mejora de la atención plena y funciones ejecutivas	31 escolares (8-12años). Registros individuales	EEG 4 canales (250Hz)	Uso del EEG con una app de retroalimentación para la relajación
Xu et al. (2022)	Análisis de la atención	46 escolares (6-7años). Registros en trios en situación semi-naturalista	EEG 24 canales (250Hz)	Análisis de la densidad espectral de la frecuencia alfa

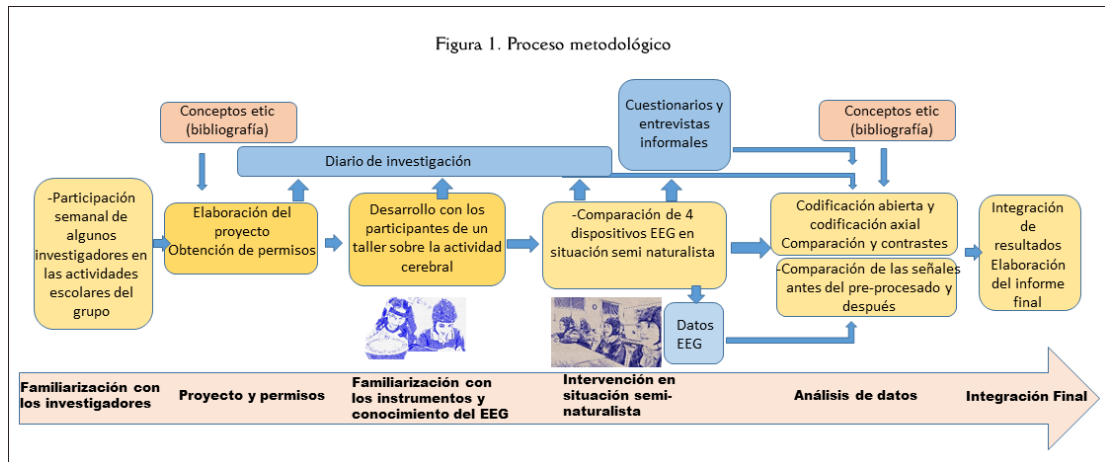
Matusz et al. (2019) proponen tres categorías para definir los enfoques de investigación respecto al grado de «naturalismo»: laboratorio controlado, laboratorio parcialmente naturalista e investigación naturalista. De acuerdo con ello, se aprecia en la revisión de Xu y Zhong (2018) que los trabajos completamente naturalistas aún son escasos. Son pocos los estudios que integran la tecnología EEG en el desarrollo normal de las clases, colocando dispositivos en todos los participantes de forma simultánea.

Dominan los estudios con universitarios. El número de trabajos con escolares es muy reducido. Los tamaños de la muestra son pequeños. Muchos estudios utilizan dispositivos de bajo coste con menos de cinco sensores secos, lo que limita la fiabilidad de los datos. El alto coste de los dispositivos de calidad, sus prolongadas preparaciones, o la accesibilidad a muestras con poblaciones infantiles, podrían ser algunas de las explicaciones a las limitaciones que muestra esta foto fija. En este estudio de caso indagaremos en estos aspectos, analizando las potencialidades y limitaciones del uso de dispositivos EEG en contextos escolares.

2. Material y método

Dado que el propósito es analizar las potencialidades y limitaciones del uso de esta tecnología en contextos escolares, para informar a investigadores o educadores que se hayan planteado la utilización de EEG en sus estudios o como apoyo a sus intervenciones educativas, se ha optado por un estudio de

caso instrumental (Stake, 2010). Desde la ontología constructivista de Stake, los métodos son inductivos y flexibles, el descubrimiento y la interpretación ocurren simultáneamente, se parte de marcos conceptuales iniciales flexibles y el objetivo es la comprensión del fenómeno a través de la interpretación y mediante la disminución de distancia entre investigadores y participantes. El proceso seguido se resume en la Figura 1.



Se partió de los siguientes issues (tensiones):

- Facilidad de uso/calidad del registro.
- Potencial de los datos/posibilidades y limitaciones de aplicación en un contexto educativo.

A partir de estos, se plantearon las siguientes preguntas orientadoras:

- ¿Qué aspectos previos a la intervención hay que tener en cuenta?
- ¿Qué ventajas e inconvenientes tiene cada tipo de dispositivo?
- ¿Cómo viven los participantes estas intervenciones?
- ¿Qué problemas plantea el uso de estos dispositivos en contextos educativos?
- ¿Qué implicaciones éticas tienen estas investigaciones?

2.1. Contexto y participantes

El estudio se ha desarrollado con un grupo de 17 escolares de tercero de Educación Primaria de edades comprendidas entre los 8 y los 9 años (10 niñas y 7 niños) en un centro con el que los investigadores colaboran habitualmente. Los escolares conocían a parte del equipo de investigación ya que realizan con ellos las actividades semanalmente.

El diseño de las tareas escolares sobre las que se realizaron los registros se consensuó con el profesorado del grupo, atendiendo a sus inquietudes. Con el fin de reducir el impacto en los escolares al introducir estos dispositivos en el aula y aprovechar la oportunidad para que el alumnado comprendiera mejor el funcionamiento neuronal, una semana antes de comenzar el estudio, se desarrolló un taller en el que se introdujo al grupo en diferentes aspectos de la actividad cerebral, mediante dispositivos lúdicos de neurofeedback. Para la realización del estudio se contó con el permiso del centro educativo, el consentimiento informado de las familias y la aprobación del Comité Ético de la Universidad.

2.2. Procedimiento

Dada la limitación del número de dispositivos (tres de cada tipo) y con el fin de no interrumpir demasiado en el desarrollo normal de las clases, se optó por una intervención semi-naturalista (Matusz et al., 2019). Para el desarrollo del estudio se utilizó un aula contigua al aula habitual del grupo. El alumnado fue convocado a dicha sala en tríos o parejas. Mientras se les colocaron los diferentes dispositivos se les fueron recordando algunos detalles sobre la recogida de la actividad cerebral a través de EEG explicados en el taller.

Tras colocar los dispositivos y confirmar la recepción correcta de las señales, se realizaron dos tomas de base (2' con los ojos cerrados y 2' con los ojos abiertos mirando a un punto en la parte central de un folio en blanco). A partir del registro del estado de base se recogió la actividad electroencefalográfica del alumnado escuchando diferentes explicaciones sobre aplicaciones de las matemáticas y realizando algunas tareas aritméticas. Tras el uso de cada dispositivo, se solicitó al alumnado que contestara unas preguntas sobre la comodidad del dispositivo, molestias en su preparación e interferencias para atender o realizar las tareas propuestas. Se colocaron los dispositivos en un orden aleatorio con cada grupo de participantes para evitar posibles efectos de acumulación de fatiga. El promedio de duración del registro con cada grupo fue de 48'.

2.3. Instrumentos

Se utilizaron cuatro dispositivos EEG (tres unidades de cada uno de ellos) para comparar sus posibilidades y limitaciones en un contexto escolar:

- Brainlink Pro: diadema de dos sensores de contacto de electrodo seco en la zona frontal. La frecuencia de muestreo es de 512 Hz. La señal es enviada por bluetooth al ordenador en el que se recoge gracias al software Lucid Scribe desde el que puede ser exportada como archivo CSV para el pre-procesado en EEGLab o Medusa.
- Emotiv Epoc: aparato EEG de 14 canales con sensores que precisan solución salina para facilitar la conducción y con una frecuencia de muestreo de 128 Hz. Los sensores están montados en posiciones fijas sobre una estructura de plástico. La señal se manda de forma inalámbrica al ordenador donde es recogida por el software TestBench desde el que puede ser exportada como archivo EDF para su posterior pre-procesado y análisis. Ha sido utilizado en numerosas investigaciones (Williams et al., 2020a).
- Epoc Flex: cuenta con 32 canales con sensores pasivos de Ag/AgCl (EasyCap) montados sobre un gorro de neopreno que permite elegir las posiciones de montaje. La conductividad se facilita por un gel. La frecuencia de muestreo es de 128Hz. El amplificador colocado en el gorro envía de forma inalámbrica la señal al ordenador donde se recoge a través de una aplicación online (Emotiv Pro) desde la que, posteriormente, se pueden descargar los datos en formatos CSV o EDF. En el trabajo de Williams et al. (2020b) se recoge su validación.
- El dispositivo Muse (InteraXon) cuenta con 4 canales de electrodos de contacto secos que recogen datos con una frecuencia de muestreo de 250Hz de la zona frontal y temporoparietal. Las señales, enviadas por bluetooth, pueden ser recogidas en una Tablet gracias a la aplicación Mind Monitor, desde la que se pueden exportar como archivo CSV para su tratamiento posterior. Ha sido validado por algunas investigaciones (Krigolson et al., 2017).

Se recogieron las valoraciones de los escolares participantes a través de un cuestionario y de entrevistas informales. Siguiendo trabajos anteriores (Zerafa et al., 2018), en el cuestionario se les preguntó sobre sus sensaciones durante la colocación de los aparatos (Preparación: «muy larga», «larga», «buena», «muy buena»); la comodidad del dispositivo (Comodidad: «muy incómodo», «algo incómodo», «cómodo», «muy cómodo») y la posible interferencia del mismo en las tareas realizadas (Distracción: «distrae mucho», «distrae algo», «no lo he notado»). Las respuestas al cuestionario pudieron ser matizadas y ampliadas gracias a las entrevistas. También se utilizó un diario de investigación en el que reflejaron aspectos del diseño del proyecto, las tareas y procedimientos, los acuerdos con el profesorado del centro, las entrevistas e intercambios informales con el profesorado y alumnado, así como incidentes críticos, dificultades y detalles en el desarrollo de la experiencia.

2.4. Análisis de datos

Las señales de EEG se compararon antes y después de su pre-procesado con EEGLab. En el pre-procesado se aplicaron filtros IIR Butterworth de paso alto (0,5Hz) y paso bajo (45 Hz), para los datos obtenidos del dispositivo Muse se aplicó, además, un filtro de ranura a 50Hz (los dispositivos de Emotiv integran este filtro para las interferencias de la señal eléctrica en la señal electroencefalográfica). Se limpiaron los datos de artefactos con una primera inspección visual, tras la que se aplicó un algoritmo

de reconstrucción del subespacio de artefactos (ASR) para descartar los canales silenciados más de 5 segundos o con ruido de alta frecuencia de más de 4 desviaciones. Seguidamente, se re-referenciaron los datos mediante el cómputo de la referencia promedio (CAR). Finalmente, se aplicó el análisis de componentes independientes (ICA) y se descartaron los componentes en los que predominaban fuentes no neuronales (artefactos).

Para el análisis de las fuentes cualitativas se realizó una codificación abierta (Glaser & Strauss, 2006) en Atlas.ti, guiada por las preguntas orientadoras, y buscando la multirreferencialidad de los datos (entre tres investigadores). Seguidamente se realizó un análisis teórico de primer orden, construyendo interpretaciones y trasladando códigos descriptivos a categorías teóricas (Shkedi, 2004), apoyados por el contraste de los conceptos con otros autores (Shkedi, 2004). A través de la comparación y contraste entre códigos y con las categorías étic de la bibliografía, los datos se integraron en una codificación axial (Glaser & Strauss, 2006) de la que surgieron las siguientes categorías y tópicos:

- Aspectos organizativos: contactos previos, reducción del impacto, familiaridad con los participantes, colaboración investigadores-docentes, expectativas y reticencias, proyecto, permisos, ruptura de la vida escolar, espacios y tiempos, recursos humanos.
- Posibilidades y limitaciones de los equipos: adaptación a diferentes tallas, tiempo de preparación, calidad de la señal, limitaciones del número de canales.
- Perspectiva de los participantes: expectativas del alumnado, sensaciones en la preparación, comodidad, distracciones de la tarea por el dispositivo, expectativas del profesorado.
- Implicaciones éticas: perturbación/integración vida escolar, oportunidad de aprendizaje, delicadeza de los datos, beneficios.

3. Análisis y resultados

3.1. Aspectos organizativos

Dado que se produce una alteración de la rutina del centro con personas y equipos nuevos, conviene mantener un contacto previo con el centro. En el caso estudiado, tal y como comenta el profesorado implicado, la trayectoria de colaboración entre los investigadores y el centro educativo facilita la apertura de este a nuevas propuestas. En concreto, una propuesta como esta de uso de EEG en el aula puede generar curiosidad y reticencias. En gran parte del claustro, en la mayoría de las familias y en la totalidad del alumnado genera una disposición favorable. Sin embargo, colocar dispositivos asociados con la electricidad, lo patológico o con «el acceso al interior de la mente», crea recelos entre algunos docentes y familias. Por ello hay que explicar en detalle el proyecto. El profesorado reconoce que la apertura a esta explicación se ve facilitada por la confianza generada en colaboraciones previas.

La obtención de los permisos del centro y las familias lleva tiempo y requiere, como se ha mencionado, una explicación detallada y pedagógica del proyecto. En este caso, algunas familias no dieron su permiso. Ello supondría un problema en caso de querer desarrollar proyectos plenamente naturalistas en los que se quisiera incorporar esta tecnología en las aulas convencionales. Este tipo de experiencias supone armonizar horarios y espacios. Las agendas de los centros suelen ser apretadas y resulta difícil disponer de tiempos en los que parte del alumnado pueda salir del aula habitual para realizar otra actividad. Además, no siempre se dispone de un espacio libre en los centros durante el tiempo que dure la recogida de datos. En este caso, la experiencia se fue posponiendo casi dos meses hasta que se encontró una semana propicia.

Por razones éticas y prácticas interpretamos que es interesante un acuerdo con el profesorado del centro del diseño de las pruebas, atendiendo a sus inquietudes y propuesta educativa. De esta manera, la propuesta se ajustará mejor al alumnado y a la programación del docente. La llegada de entre 4 y 8 investigadores al colegio, también supone un impacto en la vida escolar.

La experiencia genera muchas expectativas en el alumnado. En los encuentros semanales durante los meses previos, el alumnado, ilusionado, nos preguntaba constantemente por el momento de «colocar los gorros» y «leer el pensamiento». Algunos preguntaban divertidos si les iba a dar electricidad. Interpretamos que la familiaridad con el alumnado, les permite abrirse y compartir sus inquietudes. Esta familiaridad del alumnado con algunos investigadores repercute también en el estado de los niños y niñas al realizar las pruebas. Comentan los escolares que la confianza les hace estar más tranquilos durante

la instalación de los equipos o el desarrollo de las pruebas. Ello es importante cuando, por ejemplo, se quieren analizar estados de ansiedad frente a las tareas escolares propuestas. Una tensión generada por la incomodidad de la situación experimental podría distorsionar los datos obtenidos.

El alumnado reconoce que el taller previo con actividades lúdicas sobre la actividad cerebral ayudó a generar una disposición favorable hacia los aparatos, interés por el tema, a tranquilizarles sobre los «experimentos», y a conocer y acercarse al equipo de investigación (en el taller intervinieron 9 investigadores e investigadoras que, posteriormente, participarían en la toma de datos). El alumnado señala que el taller les permitió comprender detalles sobre temas que habían estudiado (funcionamiento del sistema nervioso y la actividad neuronal).

La utilización de varios dispositivos EEG de forma simultánea implica muchos recursos humanos. Al menos, una persona por cada dispositivo para colocarlo, sincronizarlo con el ordenador que recibe la señal, controlar la buena conexión a lo largo de la prueba y grabar y guardar las diferentes partes del experimento (la preparación de un dispositivo con más canales se ve facilitada por la intervención de dos personas). Además, es interesante contar con otra persona responsable de los cuestionarios y del desarrollo de las diferentes pruebas propuestas al alumnado, así como una encargada de tomar nota de posibles incidentes y de grabar la experiencia.

Los horarios para la investigación se adaptan a la disponibilidad del alumnado, por tanto, la recogida de información no se da de forma continua y los miembros del equipo de investigación deben pasar horas en el centro que pueden aprovechar para organizar la información, limpiar los dispositivos o preparar la nueva recogida de datos. En todo caso, compaginar la disponibilidad del equipo con los horarios del centro supone otro aspecto limitante.

3.2. Posibilidades y limitaciones de los equipos


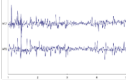
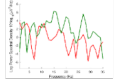

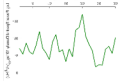

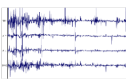

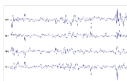
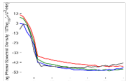

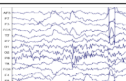
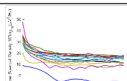
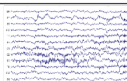
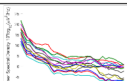


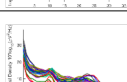

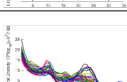
Los dispositivos utilizados presentan un amplio rango de adaptación a las variaciones de tamaños y formas de las cabezas. Brainlink tiene un sistema de cinta móvil con velcro fácilmente ajustable. Los electrodos del Emotiv Eporc están sujetos mediante tiras de plástico duro al cuerpo del dispositivo. Esos brazaletes se adaptan a diferentes formas de la cabeza, aunque hay que verificar que los sensores hacen contacto con las mismas áreas en todos los participantes. Con el Eporc Flex se usaron gorros de dos medidas (talla 50 y 54) según el tamaño de cabeza. La flexibilidad del neopreno hace que se adapte perfectamente. Muse dispone de un arco de plástico regulable que se adapta a un amplio rango de tamaños cefálicos.

El tiempo de preparación varía principalmente en función de la rapidez o problemas que presente la conexión entre el dispositivo EEG y el aparato que reciba la señal. El tiempo de preparación de BrainLink arrojó una media de 2'21" y las mayores demoras se debieron a su emparejamiento vía bluetooth con los ordenadores que recibían la señal. El tiempo medio de instalación del Emotiv Eporc fue de 7'02" y los principales problemas derivaron del contacto con el cuero cabelludo de los sensores en aquellos participantes con pelo rizado o mucha densidad de cabello. También dio problemas la caída de las esponjas que facilitan el contacto o de las terminales de los sensores que se desenroscaban de sus soportes. El Eporc Flex, con 32 canales con gel arrojó una media de preparación de 10'15", pero los mayores retrasos no se debieron a la aplicación del gel ($M=6'56''$), sino a problemas con la conexión inalámbrica o la apertura de la aplicación on-line para la recogida de datos. Finalmente, Muse tuvo una media de 2'45" de preparación, debida especialmente a la búsqueda de un buen contacto en los sensores tras las orejas.

Dado que los dispositivos son inalámbricos, hay que tener la precaución de establecer la conexión entre el EEG y el receptor separando unos aparatos de otros para que no se den errores de reconocimiento. La calidad de la señal registrada varía entre los diferentes dispositivos. En la Tabla 3 se muestra un ejemplo visual de las señales antes del pre-procesado y tras él.

Las señales que registran mayor número de artefactos (distorsión en la señal por otras fuentes como son las producidas por movimientos, parpadeo, pulsaciones o el campo generado por la corriente eléctrica) son las de Muse. La colocación de sus sensores de contacto en la frente y tras los pabellones auriculares hace que se vean muy afectadas por parpadeos y contracciones maxilares. Como se aprecia en la Tabla 3, su espectro de frecuencia es algo inusual, con altibajos en la potencia, muchas diferencias entre canales y potencias elevadas para frecuencias altas.

Tabla 3. Comparación señales de los dispositivos

Dispositivo	Ejemplo de dispositivos en contexto	Ejemplo de señal sin procesar	Ejemplo de espectro de frecuencia sin pre-procesar	Ejemplo de señal pre-procesada	Ejemplo de espectro de frecuencia tras pre-procesado
Brainlink					
Muse					
EmotivEpoC					
EpoC Flex					

El caso de Brainlink es similar. Sus dos sensores de contacto frontales son muy sensibles a los parpadeos y movimientos faciales. De igual forma, el espectro de frecuencia no se asemeja al habitual para ondas EEG.

La mala fijación de los sensores del Emotiv Epoc hace que se recojan bastantes periodos de pérdida de contacto, y resulta muy sensible a los movimientos de la cabeza. El espectro de su señal antes del pre-procesado presenta una imagen más cercana al espectro habitual de una señal EEG. La mejor calidad de señal (menos afectada por artefactos) se da en el Epoc Flex. Su mejor fijación a la cabeza y la mejor conectividad proporcionada por el gel se traducen en un menor número de artefactos.

Durante el pre-procesado, el menor número de segmentos de la señal que hubo que borrar se dio en los registros de Epoc Flex. Ello es importante para poder segmentar posteriormente la señal y realizar diferentes análisis de la actividad frente a las tareas propuestas en la clase. Al aplicar un método automático de rechazo de artefactos (Artifact subspace reconstruction, ASR), varios canales de los dispositivos BrainLink, Muse y Emotiv Epoc fueron suprimidos automáticamente. Dado que se trata de dispositivos con pocos canales, la supresión de alguno no puede ser compensada por interpolación de las medidas en canales cercanos y la pérdida de información impedirá realizar medidas de diferentes procesos mentales.

Utilizando la herramienta ICALabel de EEGLab (muestra la probabilidad de que un componente capte actividad cerebral u otros artefactos), se encontró que los componentes de los registros con BrainLink, Muse y Emotiv Epoc estaban muy afectados por fuentes musculares. Se observa una relación inversa entre tiempo de preparación y cantidad de electrodos, pero la limitación del número de electrodos tiene consecuencias: un menor número de canales y con posiciones fijas no permitirá acceder a muchos correlatos neuronales, y el reconocimiento de fuentes es menos factible o preciso.

3.3. Perspectiva de los participantes

Como se ha señalado, las expectativas del alumnado eran muy altas y tras la experiencia todos quisieron volver a repetirla. Esta actitud es relevante para entender que, posiblemente, tendieran a valorar positivamente los dispositivos. En la Tabla 4 se muestran los resultados de sus respuestas a los cuestionarios sobre sus sensaciones en la preparación, la comodidad de los dispositivos y las posibles distracciones generadas por estos en el transcurso de las tareas. En la tabla se muestran el número de respuestas dadas y los promedios de puntuación.

El alumnado de este caso aguanta con paciencia los preparativos. En algún caso en el que fallaron las conexiones con el ordenador o falló la apertura de la aplicación on-line y el proceso se alargó, sí comentaron que se habían aburrido un poco. Con el Emotiv Epoc, los problemas en la conexión de algunos electrodos en niñas con más densidad de cabello y la recolocación de esponjas de contacto o electrodos, llevan a 4 participantes a valorar la preparación de este dispositivo como larga (3) o muy

larga (1). En el caso del Eloc Flex fueron los problemas de reconocimiento inalámbrico del dispositivo o errores en el acceso a la plataforma de registro de los datos los que alargaron el proceso y llevaron a algunos escolares a calificarlo como muy largo (2) o largo (3).

Tabla 4. Resultados del cuestionario al alumnado sobre sus sensaciones con los dispositivos

BrainLink						
					Media	SD
Preparación	Muy larga: 0	Larga: 0	Buena: 6	Muy Buena: 11	3,647	0,477
Comodidad	Muy incómodo: 0	Algo incómodo: 5	Cómodo: 3	Muy cómod: 9	3,235	0,876
Distracción	Mucho: 0	Algo: 4	No notado: 12		2,75	0,433
Emotiv Eloc						
Preparación	Muy larga: 1	Larga: 3	Buena: 4	Muy Buena: 9	3,235	0,94
Comodidad	Muy incómodo: 0	Algo incómodo: 3	Cómodo: 7	Muy cómodo: 7	3,235	0,729
Distracción	Mucho: 0	Algo: 5	No notado: 12		2,705	0,455
Eloc Flex						
Preparación	Muy larga: 2	Larga: 3	Buena: 1	Muy Buena: 11	3,235	1,112
Comodidad	Muy incómodo: 0	Algo incómodo: 1	Cómodo: 2	Muy cómodo: 14	3,764	0,545
Distracción	Mucho: 0	Algo: 2	No notado: 15		2,882	0,322
Muse						
Preparación	Muy larga: 0	Larga: 1	Buena: 2	Muy Buena: 14	3,764	0,545
Comodidad	Muy incómodo: 0	Algo incómodo: 2	Cómodo: 1	Muy cómodo: 14	3,705	0,665
Distracción	Mucho: 0	Algo: 2	No notado: 15		2,882	0,322

Respecto a la comodidad, en general, las sensaciones fueron buenas. Las molestias registradas vienen de la presión en la frente de los sensores de BrainLink (5 casos); la presión de algunos sensores en la región temporal del Emotiv Eloc (3); cierto picor tras las orejas de Muse (2); y cierta sensación de roce bajo el mentón por la cinta fijadora del Eloc Flex (1 caso). Para evitar malestar por los restos de gel usados en el Eloc Flex, se limpió el cabello con un poco de alcohol y se cepilló posteriormente. Pocos participantes se sintieron distraídos de las tareas por los dispositivos. En algún caso comentaron que estaban pendientes de que no se les moviese el dispositivo (Muse y Emotiv Eloc) o de no moverse ellos para evitar introducir “ruidos” en la señal.

En cuanto a las expectativas del profesorado sobre estas experiencias, esperan con ello conocer detalles sobre la respuesta de su alumnado ante diferentes tareas y los procesos neuronales subyacentes al aprendizaje, así como corroborar sus opiniones sobre cada escolar. En algunos casos tienen mayores expectativas de lo que en la práctica se puede llegar a investigar. Por otra parte, ven que supone un despliegue de medios y personas demasiado grande como para integrarlo en las clases y tienen alguna duda sobre la viabilidad de integrar estos dispositivos en clases convencionales.

3.4. Implicaciones éticas

Los resultados anteriores conllevan una serie de implicaciones éticas. Este tipo de experiencias interrumpen la vida escolar. Para disminuir este posible efecto disruptivo resulta importante integrarlas en la programación y proyectarlas atendiendo a los criterios docentes. Las pruebas no deberían ser muy largas para evitar el cansancio del alumnado, ni entorpecer otras actividades escolares.

Para el alumnado supone una oportunidad para ponerse en contacto con dispositivos, procedimientos y saberes de difícil acceso. Los datos son delicados y asegurar su confidencialidad y seguridad es fundamental. Se trata de datos de señales biológicas de menores y es importante seguir todos los protocolos para la protección de los datos.

Entendemos que el criterio básico para orientar estas experiencias es el del beneficio del menor. Si los resultados de las investigaciones pueden ayudar a los docentes a orientar mejor su práctica educativa y la experiencia enriquece a los participantes, se habrán compensado los inconvenientes. De ahí que los diseños de estas experiencias permitan acceder a información relevante para profesorado y alumnado.

4. Discusión y conclusiones

El objetivo de este estudio de caso fue analizar las posibilidades y limitaciones del uso de dispositivos EEG en contextos escolares, para informar a investigadores o educadores que se hayan planteado la utilización de EEG en sus estudios o como apoyo a sus intervenciones educativas. El desarrollo de estas experiencias implica los intereses de docentes, escolares, familias e investigadores que obligan a una colaboración y al avance en una investigación interdisciplinaria (Katzir & Paré-Blagoev, 2006). Esta

conexión entre investigación y práctica educativa puede ayudar a los académicos a entender mejor la realidad escolar afinando sus preguntas de investigación (Liu & Zhang, 2021), y a la comunidad educativa le puede mostrar el potencial de la investigación sobre el cerebro (Mason, 2009). Ello supone buscar modelos de asociación basados en el análisis de las demandas del profesorado, alumnado y familias (Howard-Jones et al., 2016; Liu & Zhang, 2021) que permitan encajar mejor estas experiencias en la programación educativa. Igualmente, conlleva relaciones de confianza mutua (Liu & Zhang, 2021) forjadas con el tiempo. En todo caso, hay que tener muy en cuenta los costes del despliegue de medios materiales y humanos, así como el ajuste de horarios.

En cuanto a los aparatos, los resultados sobre la adaptabilidad y comodidad de los dispositivos utilizados están en la línea de estudios previos con otros grupos de edad (Zerafa et al., 2018). Igualmente, estudios previos advierten de la sensibilidad al movimiento de equipos como el Emotiv Epoc, pero no así de la sensibilidad de Muse a parpadeos o movimientos faciales (Krigolson et al., 2017). La calidad de los registros con el Epoc Flex van en la línea de estudios previos (Browarska et al., 2021). No se han encontrado referencias a las demoras causadas por los problemas de conectividad o acceso a las plataformas de recogida de datos.

La limitación del número de electrodos de algunos de los aparatos usados es un problema para realizar un modelado de fuentes preciso (Akalın-Acar & Makeig, 2013) y reduce los procesos a estudiar y los análisis posibles (Lau-Zhu et al., 2019). Observando la Tabla 1 sobre algunos posibles correlatos neuronales, se entenderá que con 2 o 4 canales es difícil analizar muchos procesos cognitivos. Para generalizar estos correlatos en torno a un grupo de edad y poder simplificar el número de electrodos, haría falta un proceso en el que, tras un registro con una muestra grande y una cobertura amplia del cuero cabelludo, se pudiera realizar una clasificación de señales (a través de aprendizaje automático o profundo) que permitiese la creación de aplicaciones que clasificaran nuevas señales a partir de datos generados por dispositivos con pocos sensores (Craig et al., 2019).

Más allá de los aspectos organizativos o técnicos, encontramos las implicaciones éticas. Entendemos que la potencialidad de estos trabajos radica en poder beneficiar a los educadores con un mejor conocimiento de los procesos subyacentes a sus propuestas y los efectos de su trabajo, llegando a facilitar situaciones educativas más ajustadas a las características y necesidades del alumnado. Sin embargo, como explican Rose y Abi-Rached (2014) no hay que perder de vista que las neurotecnologías emergentes aumentan el riesgo de utilizar el cerebro como un «recurso biopolítico», promoviendo procesos de optimización y competitividad. Williamson (2018) también advierte de los peligros de la «neurogobernanza» que aspira a «escanear» el cerebro para «esculpir» ciertas capacidades. Es bien conocida la dimensión política de la educación, y convendría tener presentes en este tipo de estudios sus objetivos e implicaciones.

Se establecen, por tanto, varios equilibrios a la hora de desarrollar estas experiencias. Equilibrios entre los intereses y posibilidades de los equipos de investigación y las comunidades educativas; entre la distorsión de la vida en las aulas y las oportunidades de la colaboración entre la academia y la práctica; y entre el presupuesto y la facilidad de preparación de los equipos y la utilidad de los datos recogidos. Actualmente, el coste de los dispositivos y los recursos humanos necesarios limitan la extensión de estas experiencias a situaciones completamente naturalistas, sin embargo, los trabajos en esta dirección permitirán generar un corpus de conocimiento que facilitará aplicaciones futuras, lo cual, unido con la mejora de los sensores y, posiblemente, al abaratamiento de los dispositivos, permitirá su extensión en beneficio de la educación.

Contribución de Autores

Idea, A.G-M.; Revisión de literatura, A.G-M., H.R-N.; Metodología, A.G-M., H.R-N., J.M.M-P.; Análisis de datos, A.G-M., H.R-N., J.M.M-P.; Resultados, A.G-M., H.R-N., J.M.M-P.; Discusión y conclusiones, A.G-M., H.R-N., J.M.M-P.; Redacción (borrador original), A.G-M., H.R-N., J.M.M-P.; Revisiones finales, A.G-M.; Diseño del Proyecto y patrocinios, A.G-M., H.R-N., J.M.M-P.

Apoyos

Departamento de Didáctica de la Expresión Musical, Plástica y Corporal (Universidad de Valladolid), Departamento de Pedagogía (Universidad de Valladolid), Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales, de las Ciencias Sociales y de la Matemática (Universidad de Valladolid).

Referencias

- Akalin-Acar, Z., & Makeig, S. (2013). Effects of forward model errors on EEG source localization. *Brain topography*, 26(3), 378-396. <https://doi.org/10.1007/s10548-012-0274-6>
- Antonenko, P., Paas, F., Grabner, R., & Van-Gog, T. (2010). Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educational Psychology Review*, 22(4), 425-438. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y>
- Basar, E., Basar-Eroglu, C., Karakas, S., & Schürmann, M. (1999). Oscillatory brain theory: A new trend in neuroscience. *IEEE engineering in medicine and biology magazine: the quarterly magazine of the Engineering in Medicine & Biology Society*, 18(3), 56-66. <https://doi.org/10.1109/51.765190>
- Bevilacqua, D., Davidesco, I., Wan, L., Chaloner, K., Rowland, J., Ding, M., Poeppel, D., & Dikker, S. (2019). Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student-teacher dynamics: evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(3), 401-412. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01274
- Browarska, N., Kawala-Sterniuk, A., Zygarlicki, J., Podpora, M., Pelc, M., Martinek, R., & Gorzelanczyk, E.J. (2021). Comparison of smoothing filters' influence on quality of data recorded with the emotiv EPOC Flex brain-computer interface headset during audio stimulation. *Brain sciences*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/brainsci11010098>
- Brown, J.S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational Researcher*, 18, 32-42. <https://doi.org/10.3102/0013189X018001032>
- Coan, J.A., & Allen, J.J. (2004). Frontal EEG asymmetry as a moderator and mediator of emotion. *Biological Psychology*, 67(1-2), 7-50. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.002>
- Craik, A., He, Y., & Contreras-Vidal, J.J. (2019). Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: A review. *Journal of Neural Engineering*, 16(3). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab0ab5>
- Dikker, S., Haegens, S., Bevilacqua, D., Davidesco, I., Wan, L., Kaggan, L., Mcclintock, J., Chaloner, K., Ding, M., West, T., & Poeppel, D. (2020). Morning brain: Real-world neural evidence that high school class times matter. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(11), 1193-1202. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa142>
- Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggan, L., Oostrik, M., Mcclintock, J., Rowland, J., Michalareas, G., Van Bavel, J.J., Ding, M., & Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*, 27(9), 1375-80. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.002>
- Glaser, B., & Strauss, A. (2006). *The discovery of grounded theory*. Aldine Transaction.
- Grammer, J.K., Xu, K., & Lenartowicz, A. (2021). Effects of context on the neural correlates of attention in a college classroom. *NPI science of learning*, 6(1), 15-15. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00094-8>
- Hajare, R., & Kadam, S. (2021). Comparative study analysis of practical EEG sensors in medical diagnoses. *Global Transitions Proceedings*, 2, 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.009>
- Howard-Jones, P.A., Varma, S., Ansari, D., Butterworth, B., De Smedt, B., Goswami, U., Laurillard, D., & Thomas, M.S.C. (2016). The principles and practices of educational neuroscience. *Psychological Review*, 123(5), 620-627. <https://doi.org/10.1037/rev0000036>
- Janssen, T.W.P., Grammer, J.K., Bleichner, M.G., Bulgarelli, C., Davidesco, I., Dikker, S., Jasi ska, K.K., Siugzdaitė, R., Vassena, E., Vatakis, A., Zion-Golumbic, E., & Van Atteveldt, N. (2021). Opportunities and Limitations of Mobile Neuroimaging Technologies in Educational Neuroscience. *Mind, Brain and Education*, 15(4), 354-370. <https://doi.org/10.1111/mbe.12302>
- Katzir, T., & Paré-Blagojev, J. (2006). Applying cognitive neuroscience research to education: The case of literacy. *Educational Psychologist*, 41(1), 53-74. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4101_6
- Khedher, A.B., Jraidi, I., & Frasson, C. (2019). Tracking students' mental engagement using EEG signals during an interaction with a virtual learning environment. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 11(1), 1-14. <https://doi.org/10.4236/jilsa.2019.111001>
- Krigolson, O.E., Williams, C.C., Norton, A., Hassall, C.D., & Colino, F.L. (2017). Choosing MUSE: Validation of a low-cost, portable EEG system for ERP research. *Frontiers in Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00109>
- Lau-Zhu, A., Lau, M.P.H., & Mcloughlin, G. (2019). Mobile EEG in research on neurodevelopmental disorders: Opportunities and challenges. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 36, 100635-100635. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100635>
- Liu, Y., & Zhang, Y. (2021). Developing sustaining authentic partnership between MBE researchers and local schools. *Mind, Brain, and Education*, 15, 153-162. <https://doi.org/10.1111/mbe.12280>
- Mason, L. (2009). Bridging neuroscience and education: A two-way path is possible. *Cortex*, 45(4), 548-549. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.06.003>
- Matusz, P.J., Dikker, S., Huth, A.G., & Perrodin, C. (2019). Are we ready for real-world neuroscience. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(3), 327-338. https://doi.org/10.1162/jocn_e_01276
- Mcmahan, T., Parberry, I., & Parsons, T.D. (2015). Evaluating player task engagement and arousal using electroencephalography. *Procedia Manufacturing*, 3, 2303-2310. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.376>
- Pope, A.T., Bogart, E.H., & Bartolome, D.S. (1995). Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biological Psychology*, 40(1-2), 5116-5119. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05116-3](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05116-3)
- Rose, N., & Abi-Rached, J. (2014). Governing through the brain: Neuropolitics, neuroscience and subjectivity. *The Cambridge Journal of Anthropology*, 32(1), 3-23. <https://doi.org/10.3167/ca.2014.320102>
- Shad, E.H.T., Molinas, M., & Ytterdal, T. (2020). Impedance and noise of passive and active dry EEG electrodes: a review. *IEEE Sensors Journal*, 20(24), 14565-14577. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3012394>
- Shamay-Tsoory, S.G., & Mendelsohn, A. (2019). Real-life neuroscience: An ecological approach to brain and behavior research. *Perspectives on Psychological Science*, 14(5), 841-859. <https://doi.org/10.1177/1745691619856350>
- Shkedi, A. (2004). Second-order theoretical analysis: A method for constructing theoretical explanation. *International Journal of Qualitative Studies in Education*, 17(5), 627-646. <https://doi.org/10.1080/0951839042000253630>

- Stake, R.E. (2010). *Qualitative research: Studying how things work*. Guilford Publications. <https://bit.ly/3J0mmNf>
- Vekety, B., Logemann, A., & Takacs, Z.K. (2022). Mindfulness practice with a brain-sensing device improved cognitive functioning of elementary school children: An exploratory pilot study. *Brain Sciences*, 12(1), 103-103. <https://doi.org/10.3390/brainsci12010103>
- Williams, N.S., McArthur, G.M., & Badcock, N.A. (2020a). 10 years of EPOC: A scoping review of Emotiv's portable EEG device. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.07.14.202085>
- Williams, N.S., McArthur, G.M., De-Wit, B., Ibrahim, G., & Badcock, N.A. (2020b). A validation of Emotiv EPOC Flex saline for EEG and ERP research. *PeerJ*, 8. <https://doi.org/10.7717/peerj.9713>
- Williamson, B. (2018). Brain data: Scanning, scraping and sculpting the plastic learning brain through neurotechnology. *Postdigital Science and Education*, 1, 65-86. <https://doi.org/10.1007/s42438-018-0008-5>
- Xu, J., & Zhong, B. (2018). Review on portable EEG technology in educational research. *Computers in Human Behavior*, 81, 340-349. <https://doi.org/10.1111/mbe.12314>
- Xu, K., Torgimson, S.J., Torres, R., Lenartowicz, A., & Grammer, J.K. (2022). EEG data quality in real-world settings: Examining neural correlates of attention in school-aged children. *Mind, Brain, and Education*, 16(3), 221-227. <https://doi.org/https://doi.org.ponton.uva.es/10.1111/mbe.12314>
- Zerafa, R., Camilleri, T., Falzon, O., & Camilleri, K.P. (2018). A comparison of a broad range of EEG acquisition devices- is there any difference for SSVEP BCIs? *Brain-Computer Interfaces*, 5(4), 121-131. <https://doi.org/10.1080/2326263X.2018.1550710>