

Trends in the use of Neurosky Mindwave for the development of Brain Computer Interfaces BCI

Israel Fetecua Soto, Maicol Cárdenas Hernández.

Fundación Universitaria Cafam, Colombia, israel.fetecua@unicafam.edu.co, maicol.cardenash@unicafam.edu.co

Abstract— A systematic review of the literature is developed around the applications of Brain Computer Interface (BCI) devices that use the low-cost Neurosky Mindwave device in the period 2016 - 2021, through the PRISMA method, in the IEEE databases. Explore, ScienceDirect and Pubindex. 65 publications were analyzed and classified into 12 categories, obtaining research trends in education, robotics, well-being in people with motor disabilities, marketing and emotions, Internet of Things (IoT), authentication and software development. The country that contributed the most publications was India and in 2019 the highest number of publications was registered. There is evidence of potential for the use of the MindWave device in applied research and development in the areas described above, given that this is an affordable and economical device.

Keywords —Prisma, EEG, BCI, Neurosky, RSL.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.415>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Tendencias en el uso del Neurosky Mindwave para el desarrollo de Interfaces Cerebro Computador BCI

Israel Fetecua Soto, Maicol Cárdenas Hernández.

Fundación Universitaria Cafam, Colombia, israel.fetecua@unicafam.edu.co, maicol.cardenash@unicafam.edu.co

Resumen– Se desarrolla una revisión sistemática de la literatura en torno a las aplicaciones de dispositivos de Interfaz Cerebro Computador (BCI) que utilicen el dispositivo de bajo costo Neurosky Mindwave en el periodo 2016 - 2021, a través del método PRISMA, en las bases de datos IEEE Explore, ScienceDirect y Pubindex. Se analizaron 65 publicaciones y se catalogaron en 12 categorías, obteniendo tendencias de investigación en educación, robótica, bienestar en personas con discapacidad motora, marketing y emociones, Internet de las cosas (IoT), autenticación y desarrollos de software. El país que más publicaciones aportó fue la India y en el año 2019 se registró el mayor número de publicaciones. Se evidencia una potencialidad del uso del dispositivo MindWave en investigación y desarrollo aplicado en las áreas antes descritas, dado que este es un dispositivo asequible y económico.

Palabras Clave—Prisma, EEG, BCI, Neurosky, RSL.

I. INTRODUCCIÓN

Aunque existen diversas definiciones al respecto de lo que es una Interfaz Cerebro Computador (BCI) [1], se podría decir que en general una BCI, es un dispositivo compuesto de hardware y software que permite generar una interacción entre un objeto físico o virtual y el cerebro de un individuo. Estos dispositivos funcionan a partir de la detección de señales eléctricas o magnéticas del cerebro.

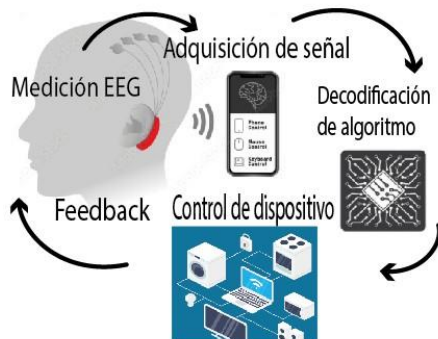


Fig. 1. Principio básico de una BCI.

Las BCI básicamente se pueden clasificar por: la señal que se estudia, la dependencia de interacción con el usuario, el tipo de intervención de los sensores en el cuerpo y la sincronización con el dispositivo.

Tipo de señal.

La actividad cerebral debido al intercambio bioquímico de iones de Na^+ , K^+ , Ca^+ , y Cl^- entre las neuronas generan señales eléctricas y magnéticas, que

ueden detectar [2]. El primer registro de actividad eléctrica cerebral lo realizó Hans Berger en 1929 [3] quien acuñó el término Electroencefalograma (EEG). Es por esto, que podemos afirmar que se pueden medir los potenciales eléctricos y magnéticos del cerebro.

En 1934 Adrian y Matthews, observaron ondas cerebrales humanas a frecuencias que oscilan entre los 10 y 12 Hz, se les denominó ondas α [2], a partir de esta, se han encontrado otras ondas cerebrales que oscilan entre los 0 a 100 Hz, con potenciales de $0,5 \mu\text{V}$ hasta $100 \mu\text{V}$.

Estas ondas se pueden clasificar en: δ (1 a 3 Hz) asociada al sueño profundo, θ (4 a 7 Hz) se observa en estados de somnolencia, con amplitudes menores a $100 \mu\text{V}$. α (7 a 12 Hz) se evidencian cuando se tienen los ojos cerrados, en un estado de relajación. Su amplitud es menor a $50 \mu\text{V}$. μ (8 a 13Hz), la supresión de estas ondas indica actividad de las neuronas motoras. β (12 a 30 Hz), están asociadas con estados de atención y concentración activa, su amplitud usual es menor a los $30 \mu\text{V}$ y su potencia aumenta cuando se ejecuta un movimiento corporal o cuando se observa a alguien hacer un movimiento. Las ondas β se subdividen en: Bajo β (12 a 15 Hz), se asocian a un estado de concentración relajada e integrada y al ritmo sensorio motriz. Medio β (16 a 20 Hz) en este rango se logra estar consciente de uno mismo y del entorno. Alto β (21 a 30 Hz) implica un estado de alerta [4]. Por último, las ondas γ (>30 Hz) se asocian con la corteza somato sensorial y su amplitud es la más baja de todas [5].

Dependencia

La actividad de un dispositivo BCI puede depender de la interacción que se tiene con él, y varía dependiendo del control motor que se necesite para su uso, si este es mayor se dice que el sistema es dependiente como, por ejemplo, las sillas de ruedas que necesitan de ciertos comandos del usuario para su funcionamiento, si el dispositivo no requiere de control motor entonces se dice que es independiente.

Intervención

Existen tres tipos de intervención para capturar las señales eléctricas generadas por el cerebro, estas son: invasivas, semi-invasivas y no invasivas. En las invasivas, los electrodos se instalan en el cerebro, mediante cirugía, las semi-invasivas se instalan entre el cerebro y el cráneo,

mientras que las no invasivas se colocan sobre el cuero cabelludo o la cabeza y se pueden retirar cuando se desee, estos pueden tener electrodos que funcionan con un medio seco o húmedo y pueden ser cableados o inalámbricos.

Sincronicidad

La sincronicidad en un sistema BCI, está relacionada con la pasividad o actividad del dispositivo físico, es decir, en los sistemas sincrónicos, el dispositivo dirige la actividad cerebral a determinados periodos de tiempo, mientras que en los asincrónicos el sistema recibe la información que se genera en el cerebro del sujeto, de esta forma actúa pasivamente en la recepción de señales cerebrales.

Todo dispositivo BCI contiene básicamente los siguientes componentes: censado de la actividad eléctrica cerebral, adquisición de la señal, procesamiento de la señal en: pre-procesamiento, extracción de características, y pos-procesamiento, clasificación, interfaz de control, controlador de dispositivo, dispositivo y medio ambiente operativo [6], [7], en cada una de estas etapas, la tecnología se va desarrollando y existen diversos dispositivos EEG, sensores, algoritmos, métodos de extracción de señales y dispositivos físicos que hacen del campo de las interfaces BCI, un campo en creciente desarrollo.

Existen actualmente diversos dispositivos EEG no invasivos con sensores que van desde 1 hasta 256 electrodos, con costos que oscilan desde los USD \$109 USD, hasta los USD \$ 89.000 USD, y aplicaciones en áreas de medicina, rehabilitación, marketing, educación e ingeniería.[8]

En este estudio nos enfocamos en las aplicaciones BCI desarrolladas durante los últimos 5 años con dispositivos EEG no invasivos, independientes, asincrónicos, de bajo costo, específicamente con el dispositivo Mindwave Mobile (fig. 2) de la empresa Neurosky que salió al mercado en 2011 en USA. El interés en este dispositivo radica en que es: no invasivo, de fácil conexión inalámbrica y es el más asequible del mercado en términos de costo y disponibilidad [8].



Fig. 2. EEG Neurosky MindWave Mobile,[2]

II. MÉTODO

Se desarrolló una revisión sistemática de la literatura (RSL) centrada en 3 bases de datos bibliográficas,

referentes internacionales en investigación, a saber: IEEE Explore, ScienceDirect y Pubindex que es el repositorio de revistas más importante de Colombia. El objetivo principal fue indagar en los usos del Neurosky Mindwave, dado que puede tener un gran campo de acción que probablemente está por explorar.

En esta investigación, se siguió el protocolo de la Revisión Sistemática de la declaración PRISMA [9] definiendo, para el método de búsqueda los siguientes pasos: 1. Definición del objetivo, 2. Pregunta de investigación, 3. Criterios de Inclusión y Exclusión, 4. Definición de palabras clave y operadores booleanos, 5. Elección de bases de datos electrónicas para la búsqueda, 6. Acotación temporal, 7. Extracción de información 8. Revisión de título y abstract bajo criterios de inclusión y exclusión, 9. Elección de artículos, según relevancia y calidad para análisis.

El objetivo de esta revisión fue indagar en las aplicaciones del dispositivo EEG Neurosky Mindwave mobile durante los últimos 5 años en dispositivos BCI, para definir posibles campos de investigación.

Pregunta de investigación.

RQ1. ¿En qué se ha utilizado el Neurosky MindWave para aplicaciones BCI durante el periodo 2016 - 2021?

Responder a esta pregunta nos permitirá ver el panorama de uso de uno de los dispositivos EEG, más asequibles y el más económico del mercado, abriendo una puerta a la investigación y el desarrollo de dispositivos BCI sobre todo en países que no disponen de grandes presupuestos para investigación.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de Inclusión (I), serán el eje central que está alineado con el objetivo y la pregunta de investigación, los criterios de exclusión (E) nos permitirán descartar los documentos que no sean relevantes para efectos de la investigación.

Criterios de inclusión

I1. El documento es un artículo o conferencia

I2. Se cumple I1 y la investigación trata el tema de Interfaces Cerebro Computador y utilizan el Neurosky Mindwave mobile

Criterios de exclusión

E.1. Documentos publicados antes de 2016 y después de julio de 2021

E2. El idioma del documento no es inglés o español

E3. Documentos que no guardan relación con el objetivo de esta investigación

E4. Solo se puede acceder al título y al abstract

E5. El documento no presenta evidencia científica investigativa completa

E6. El documento no se encuentra en el repositorio

E.7. Documento repetido

Definición de palabras clave, operadores Booleanos, bases de datos y acotación temporal

Las palabras clave definidas en todos los buscadores electrónicos fueron: (neurosky mindwave) AND (brain computer interfaces OR bci OR interfaces cerebro computador). Se eligieron los documentos publicados entre 2016 y 2021. Las bases de datos en las cuales se realizó la búsqueda fueron: IEEE Explore, Science Direct y PublindeX.

Extracción de información.

Se codificó y organizó la información para su posterior análisis. En la fig. 3. se muestra el diagrama de flujo de procesamiento bajo el método PRISMA.

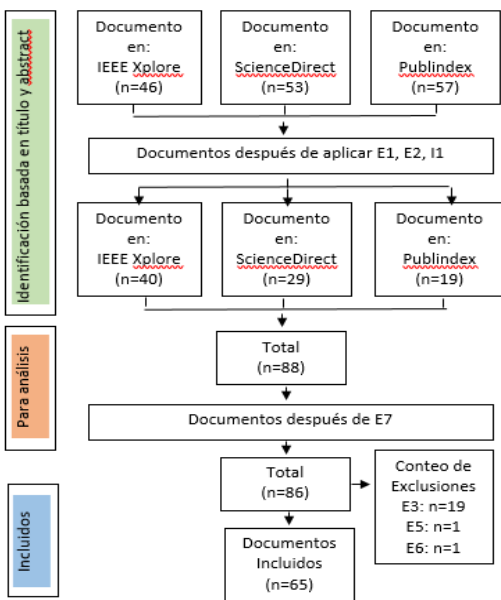


Fig. 3. Diagrama de flujo de análisis y extracción

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron 156 documentos entre artículos y conferencias de los cuales a través del sistema Prisma se seleccionaron y analizaron 65 de ellos.

El análisis en las bases de datos seleccionadas arrojó hallazgos en distintas categorías, no solamente desde el punto de vista de las aplicaciones, sino de los países, las técnicas de investigación, las revistas y conferencias, así como las limitaciones en el campo de investigación.

También se realizó un análisis sobre las publicaciones alrededor de BCI en las cuales se utilizó el Neurosky, para el caso de Colombia y su sistema de publicación de investigación científica PublindeX.

El número de publicaciones por año encontradas en las bases de datos que se estudiaron se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Publicaciones por año.

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Número de publicaciones	3	14	15	19	11	3

Se evidencia una tendencia de crecimiento en las publicaciones entre los años 2016 al 2019, sin embargo, en 2020 y en 2021 se observa una disminución probablemente debido a la pandemia del COVID 19, también debemos tener en cuenta que este estudio incluye publicaciones solamente hasta julio de 2021.

Se encontraron 37 conferencias y 28 artículos en los siguientes sitios de publicación. (fig. 4).

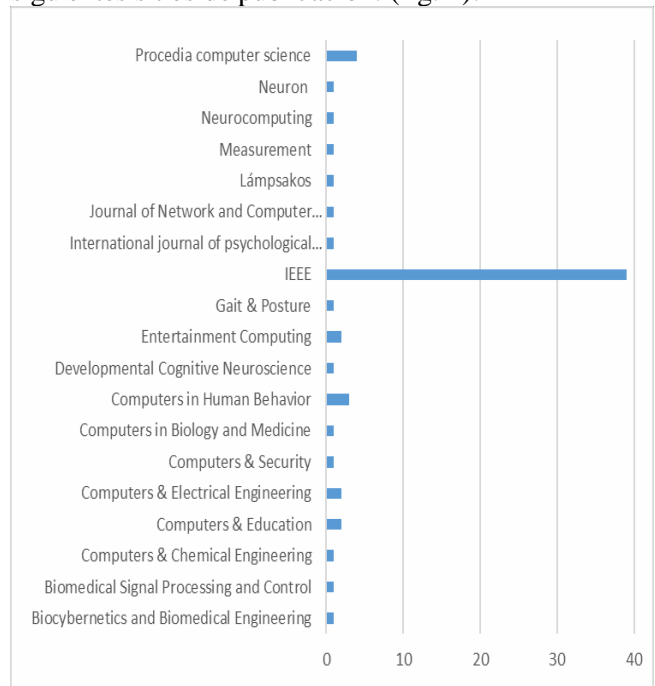


Fig. 4. Principales revistas de publicación.

El número de publicaciones por país se muestra en la Fig. 5. El país que más publicaciones realizó según este estudio, fue la India con un total de 16, seguido de Rumania, China y Brasil, con 4. España, Indonesia, Bangladesh y Taiwan con 3. Por Latinoamérica se encuentran Colombia con 2, México y Ecuador con 1 publicación, cada uno.

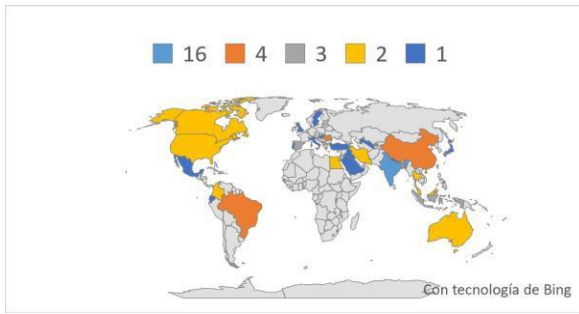


Fig. 5. Número de publicaciones por país

Se observan 18 revistas que son espacios idóneos para publicar investigaciones relacionadas con el tema de interés. Así como el siguiente listado de conferencias anuales que están catalogadas por IEEE y que desarrollaron actividades durante 2021 y algunas ya tiene llamado de papers para los años 2022 y 2023.

Tabla 2. Listado de conferencias.

- International Conference on e-Health and Bioengineering.
- Congreso Ibérico de Sistemas y Tecnologías de la Información.
- International Conference in Software Engineering Research and Innovation
- International Conference for Innovation in Technology
- International Conference on Cognitive Infocommunications
- E-Health and Bioengineering Conference
- International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology.
- Computing in Cardiology
- International Conference on Intelligent Sustainable Systems
- International Conference on Communication Systems & Networks
- Annual Information Technology, Electromechanical Engineering and Microelectronics Conference
- International Conference on Systems and Informatics
- Signal Processing and Communications Applications Conference
- International Conference on Information and Communication Technology for Sustainable Development
- Region 10 Humanitarian Technology Conference
- Región 10 Symposium
- International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques
- International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering
- International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing

- International Conference on Application of Information and Communication Technologies
- TENCON Region 10 conference
- International Conference on Computing, Communication and Security
- International Conference on Communication Systems and Networks
- International Conference on Computing, Power and Communication Technologies

Se organizó la información en 12 categorías emergente, basadas en las palabras clave y el abstract, los resultados se muestran a continuación

Tabla 3. Temáticas de las publicaciones estudiadas

	Publicaciones
Estado del arte	[6], [10], [11], [1], [12],[6],[13],[5]
Discapacidad	[14], [15],[16],[17],[18],[19],[20],[22]
Educación	[23],[24][25],[26],[27],[28],[29],[12],[30],[31],[32],[33],[34]
Emoción	[35],[36],[37],[38],[13]
Ética	[39]
Internet de las cosas (IOT)	[40],[41], [42]
Marketing	[43],[44],[45],[46]
Redes Neuronales	[47],[48],[49],[15], [50]
Robótica	[51],[52],[14],[53],[54],[55],[56], [57]
Señales	[58],[59],[11],[60],[1]
Software	[61],[62],[5], [63]
Video Juegos	[64][65],[66],[67][68]

Educación

Se abordan temáticas tales como: la medición de los niveles de atención en actividades escolares en diversos métodos de enseñanza-aprendizaje [23],[25],[26][28],[31],[33],[24], así como de los niveles de meditación en situaciones de sobrecarga cognitiva [28], de estrés [27] o en presencia de estímulos auditivos externos [29], también en el análisis de niveles de atención y meditación en MOOCs [30] y, en situaciones de sobrecarga cognitiva en procesos industriales [32]. También se encuentra un reporte completo de las tendencias de uso en educación de los dispositivos EEG de bajo costo, describiendo las temáticas que se abordan,

las variables que se miden, los diseños experimentales usados y las limitaciones en este campo [12]. En coherencia con los hallazgos en esta investigación, se postula en [12] que los dispositivos más usados en la investigación en educación son el Neurosky MindWave y el Emotiv Epoch.

Robótica

Allí se encuentran investigaciones relacionadas con el desarrollo de prótesis para pacientes con enfermedades motoras y del sistema nervioso, accionadas por los niveles de atención, meditación o parpadeo en: brazos robóticos [51], pinzas mecánicas [52] y manos robóticas [14]. El análisis del movimiento de músculos extraoculares para controlar la velocidad y el movimiento de un robot Sphero 2.0. [54]. Estudiar los niveles de ondas α y β presentes en la conducción de un automóvil de juguete [53], controlar un motor DC, para aplicaciones en diversas ramas de la ingeniería [55]. Robots diseñados con lego para ayudar en la recuperación de niños con parálisis cerebral [56]. Otras temáticas relacionadas provienen de las tecnologías BCI aplicadas al Internet de las Cosas (IoT), en domótica, donde el usuario puede encender o apagar electrodomésticos [41], o evitar accidentes producidos por los micro sueños, a través de las lecturas de los niveles de atención y las ondas α y θ para generar alarmas a través de Apps de Android [40]

Discapacidad

En rehabilitación física se usa para realizar un seguimiento de los niveles de atención en pacientes que utilizan la bicicleta estática, logrando una reducción notable en el tiempo de recuperación [16] y en procesos de mejora del equilibrio [20]. Su aplicación en softwares que le permiten al paciente con cuadriplejía comunicarse a través del parpadeo, en la elección de encendido de una luz o en la necesidad de tomar agua [17]. En el control de una silla de ruedas [18] y el desarrollo de un software que le permita al paciente acceder a un teclado para comunicarse más eficientemente [19].

Video juegos

El diseño de juegos, para mejorar los niveles de meditación o atención [68], el desarrollo de videojuegos para potenciar la relación entre investigación, academia y sector productivo [65], así como el seguimiento de los niveles de atención en sujetos expuestos a distracciones visuales mientras se encuentran en una partida de un videojuego de tiro y afloje, [66] y en el estudio del juego colaborativo y competitivo en diversas situaciones [67].

Marketing, emoción

Otra línea de estudio, se enmarca en el marketing y el estudio de las emociones, relacionadas también con el Big

data. El estudio de las ondas cerebrales que predominan al vivir una experiencia háptica de sensación de formas y texturas [35], así como el análisis de los gustos de personas con parálisis física, para los cuales los métodos usuales de estudio de tendencias de las redes sociales y multimedia no los cubren [43]. Medir los niveles de atención de los consumidores de cine y películas, permite identificar y caracterizar tendencias y gustos [36], también para analizar los niveles de atención y meditación de usuarios de páginas web en el gobierno de Indonesia, para mejorar sus diseños y aumentar los accesos de consulta [45],[46]. Estudiar los niveles hedónicos a través de la medición de ondas α mientras se utilizan videojuegos y su correlación con los niveles de excitación [37]. Comparar los niveles de atención en tres metodologías distintas de venta para identificar cual es la más eficiente [44]. También se miden las ondas cerebrales en el día a día de una persona durante 103 días y se caracterizan sus estados emocionales en: aburrido, feliz, horrorizado y relajado [38]. Para el análisis de big data en la relación de preferencias de los consumidores en redes sociales, blogs, multimedia, textos o imágenes. Es una nueva herramienta para medir emociones [13].

Señales, software IOT y redes neuronales

Temáticas más técnicas relacionadas con el filtrado de la señal, el mejoramiento del procesamiento y el uso de redes neuronales y softwares permiten optimizar el mecanismo y uso de los dispositivos EEG en diversas aplicaciones BCI. La calibración y puesta a punto del Neurosky Mindwave se estudia en [58], así como su calidad en la recepción de la señal, al compararlo con otro EEG de 19 canales en las mediciones de estados de meditación [59]. Los métodos de filtrado y limpieza de la señal se analizan en [11], [60],[1]. También se estudian las señales EEG, para generar patrones identificables a través de Machine Learning [61]. Una novedad es el uso de estos dispositivos en los métodos de autenticación a partir de las características personales de estados mentales [6]. El desarrollo de software que le permite a las personas con limitaciones físicas, comunicarse [62]. El uso del Mindwave en redes neuronales que permite entender las características de los estados mentales, aprender de ellos, y de esta forma es posible identificar patrones de las señales en movimientos del hemisferio superior del cuerpo [47], o en sistemas de autenticación [48]. En la generación de patrones de movimiento direccionales que le permiten a las personas con limitaciones físicas utilizar más fácilmente las tecnologías BCI para movilizarse [49]. Generar redes neuronales que puedan predecir estados mentales de concentración o meditación y de esta forma

ser aplicadas de manera más eficiente en temáticas de IoT[15].

Ética y estado del arte

Diversos estudios realizan un estado del arte sobre las aplicaciones, desafíos y proyecciones de los dispositivos BCI y de los distintos dispositivos EEG que se utilizan [6], [10], [11], [1], [12],[6],[13],[5]. Así como el uso ético del uso de estos dispositivos [39].

BCI en Colombia Utilizando el Neurosky MindWave

Un detalle importante en esta investigación, fue la búsqueda de información sobre BCI en Colombia donde se utilice el Neurosky Mindwave. La búsqueda se realizó en Pubindex que es el repositorio oficial de investigación del Ministerio de las Ciencias (Minciencias) de Colombia. El resultado arrojó solo 2 artículos aceptados después de PRISMA. Uno de ellos publicado en la revista International Journal of Psychological Research [44] en áreas relacionadas con el marketing y el otro en la revista Lámpsakos [65], relacionada con la educación. Por otra parte, se encuentra que el grupo de automatización industrial de la Universidad Cooperativa de Colombia se hace presente con 2 publicaciones [23], [25] en áreas relacionadas con la educación.

IV. CONCLUSIONES

En esta RSL, podemos evidenciar las principales tendencias de las temáticas que se están abordando en la aplicación y uso del dispositivo Neurosky MindWave, en los dispositivos BCI. Se evidencia una alta incidencia en educación, robótica, bienestar de personas con discapacidades motoras, marketing, análisis de las emociones, domótica y las fronteras del uso de las tecnologías EEG en el desarrollo de autenticación y redes neuronales. Es importante notar que el MindWave, aunque posea solo 1 electrodo, se visualiza como una herramienta potente, confortable, asequible y económica, que se puede usar en un gran número de campos, mostrando altas posibilidades de uso en la vida cotidiana.

Para el caso Colombia, se evidencia una oportunidad de trabajo en diversas líneas de investigación de los dispositivos BCI que usan el MindWave, teniendo en cuenta que éste es un dispositivo de bajo costo, confortable, y confiable para temas de investigación y desarrollo. Sin embargo, no se evidencian muchas publicaciones al respecto, lo que motiva una búsqueda de información en la literatura gris para realizar un levantamiento de información más cercano al desarrollo de las universidades e institutos,

Algunas limitaciones de esta investigación, están relacionadas con las fuentes de búsqueda, dado que se podría ampliar la búsqueda a otras bases de datos, el idioma de publicación, la búsqueda en literatura gris, y los posibles desarrollos de dispositivos BCI con otros EEG de mayor costo y complejidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. A. Ramadan and A. v. Vasilakos, "Brain computer interface: control signals review," *Neurocomputing*, vol. 223, no. August 2016, pp. 26–44, 2017, doi: 10.1016/j.neucom.2016.10.024.
- [2] M. Teplan, "FUNDAMENTALS OF EEG MEASUREMENT," *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW*, vol. 2, no. 2, 2002.
- [3] H. Berger, "Sci-Hub | Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. Archiv Für Psychiatrie Und Nervenkrankheiten, 87(1), 527–570 | 10.1007/BF01797193," *Arch. Psychiatr. Nervenkr.*, 1929. <https://sci-hub.se/10.1007/BF01797193> (accessed Aug. 02, 2021).
- [4] NeuroSky and Inc, "MindWave Mobile: User Guide," 2015. Accessed: Aug. 03, 2021. [Online]. Available: http://download.neurosky.com/support_page_files/MindWaveMobile/docs/mindwave_mobile_user_guide.pdf
- [5] A. Jalaly Bidgoly, H. Jalaly Bidgoly, and Z. Arezoumand, "A survey on methods and challenges in EEG based authentication," *Computers and Security*, vol. 93, p. 101788, 2020, doi: 10.1016/j.cose.2020.101788.
- [6] A. Khosla, P. Khandnor, and T. Chand, "A comparative analysis of signal processing and classification methods for different applications based on EEG signals," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 649–690, 2020, doi: 10.1016/j.bbe.2020.02.002.
- [7] G. G. Gentiletti, C. B. Tabernig, and R. C. Acevedo, "Interfaz Cerebro - Computadora : Estado del arte y desarrollo en Argentina," *Revista Argentina de Bioingeniería*, vol. 13, no. 1, pp. 22–29, 2007.
- [8] N. Jamil, A. Nasreddine, S. Oubhi, and A. Lakas, "Noninvasive Electroencephalography Equipment for Assistive, Adaptive, and Rehabilitative Brain–Computer Interfaces: A

- Systematic Literature Review,” *Sensors*, vol. 21, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21144754>.
- [9] G. Urrutia and X. Bonfill, “PRISMA_Spanish.pdf,” *Medicina Clínica*, vol. 135, no. 11, pp. 507–511, 2010. [Online]. Available: http://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/public/uploads/PRISMA_Spanish.pdf
- [10] A. Lau-Zhu, M. P. H. Lau, and G. McLoughlin, “Mobile EEG in research on neurodevelopmental disorders: Opportunities and challenges,” *Developmental Cognitive Neuroscience*, vol. 36, no. March, p. 100635, 2019, doi: 10.1016/j.dcn.2019.100635.
- [11] J. Minguillon, M. A. Lopez-Gordo, and F. Pelayo, “Trends in EEG-BCI for daily-life: Requirements for artifact removal,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 31, pp. 407–418, 2017, doi: 10.1016/j.bspc.2016.09.005.
- [12] J. Xu and B. Zhong, “Review on portable EEG technology in educational research,” *Computers in Human Behavior*, vol. 81, pp. 340–349, 2018, doi: 10.1016/j.chb.2017.12.037.
- [13] N. J. Shoumy, L. M. Ang, K. P. Seng, D. M. M. Rahaman, and T. Zia, “Multimodal big data affective analytics: A comprehensive survey using text, audio, visual and physiological signals,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 149, p. 102447, 2020, doi: 10.1016/j.jnca.2019.102447.
- [14] O. A. Rusanu, L. Cristea, M. C. Luculescu, and S. C. Zamfira, “Experimental model of a robotic hand controlled by using neurosky mindwave mobile headset,” *2019 7th E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2019*, pp. 6–9, 2019, doi: 10.1109/EHB47216.2019.8970050.
- [15] D. R. Edla, K. Mangalorekar, G. Dhavalikar, and S. Dodia, “Classification of EEG data for human mental state analysis using Random Forest Classifier,” *Procedia Computer Science*, vol. 132, no. Iccids, pp. 1523–1532, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.05.116.
- [16] W. Auccahuasi *et al.*, “Technique for the comparison of concentration and meditation levels in the performance of rehabilitation exercises in bicycle, using virtual reality techniques and brain computer interface,” *2019 7th E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/EHB47216.2019.8970013.
- [17] M. M. Hassan, H. U. Sami, and F. Islam, “EEG Signal Based Cognitive System for Controlling Home Appliances and Generating Speech Command,” *Proceedings of 2019 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2019*, vol. 7, pp. 519–522, 2019, doi: 10.1109/TENSYP46218.2019.8971328.
- [18] A. Maksud, R. I. Chowdhury, T. T. Chowdhury, S. A. Fattah, C. Shahanaz, and S. S. Chowdhury, “Low-cost EEG based electric wheelchair with advanced control features,” *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, vol. 2017-Decem, pp. 2648–2653, 2017, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228309.
- [19] R. Raj, S. Deb, and P. Bhattacharya, “Brain Computer Interfaced Single Key Omni Directional Pointing and Command System: A Screen Pointing Interface for Differently-abled Person,” *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp. 161–168, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07.020.
- [20] Y. T. Y. Cheng, W. W. N. Tsang, C. M. Schooling, and S. S. M. Fong, “Reactive balance performance and neuromuscular and cognitive responses to unpredictable balance perturbations in children with developmental coordination disorder,” *Gait and Posture*, vol. 62, no. July 2017, pp. 20–26, 2018, doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.02.025.
- [21] O. A. Ruanu, L. Cristea, and M. C. Luculescu, “LabVIEW and Android BCI chat app controlled by voluntary eye-blinks using neurosky mindwave mobile EEG headset,” Oct. 2020. doi: 10.1109/EHB50910.2020.9280193.
- [22] D. Harshini, M. Ranjitha, R. Jadon, and Natarajan, “A Single Electrode Blink for Text Interface (BCI),” Nov. 2020. doi: 10.1109/INOCON50539.2020.9298387.
- [23] D. L. Cuesta, A. F. G. Rivera, and J. S. M. Borrero, “Interfaz BCIE (Brain Computer Interface Educational) en Raspberry Pi utilizando sensor neurosky,” *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*, vol. 2020-June, no. June, pp. 24–27, 2020, doi: 10.23919/CISTI49556.2020.9141128.
- [24] J. Katona, T. Ujbanyi, G. Sziladi, and A. Kovari, “Speed control of Festo Robotino mobile robot using NeuroSky MindWave EEG headset based brain-computer interface,” *7th IEEE*

International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2016 - Proceedings, no. CogInfoCom, pp. 251–256, 2017, doi: 10.1109/CogInfoCom.2016.7804557.

- [25] D. J. Lancheros-Cuesta, J. L. R. Arias, Y. Y. Forero, and A. C. Duran, “Evaluation of e-learning activities with NeuroSky MindWave EEG,” *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*, vol. 2018-June, pp. 1–6, 2018, doi: 10.23919/CISTI.2018.8399316.
- [26] P. Promsorn, V. Boonyahotra, and P. Sittiprapaporn, “Spatial abilities improve brain-computer interface performance indexed by electroencephalography,” *ECTI-CON 2017 - 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 34–37, 2017, doi: 10.1109/ECTICon.2017.8096166.
- [27] P. Nagar and D. Sethia, “Brain Mapping Based Stress Identification Using Portable EEG Based Device,” *2019 11th International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2019*, vol. 2061, pp. 601–606, 2019, doi: 10.1109/COMSNETS.2019.8711009.
- [28] J. Eloy, A. R. Teixeira, A. Gomes, and A. J. Mendes, “Understand and characterize mental effort in a programming-oriented task,” *6th IEEE Portuguese Meeting on Bioengineering, ENBENG 2019 - Proceedings*, 2019, doi: 10.1109/ENBENG.2019.8692570.
- [29] G. A. M. Vasiljevic and L. C. de Miranda, “The Effect of Auditory Stimuli on User’s Meditation and Workload in a Brain-Computer Interface Game,” *Interacting with Computers*, vol. 31, no. 3, pp. 250–262, 2019, doi: 10.1093/iwc/iwz014.
- [30] F. R. Lin and C. M. Kao, “Mental effort detection using EEG data in E-learning contexts,” *Computers and Education*, vol. 122, pp. 63–79, 2018, doi: 10.1016/j.compedu.2018.03.020.
- [31] Y. C. Kuo, H. C. Chu, and M. C. Tsai, “Effects of an integrated physiological signal-based attention-promoting and English listening system on students’ learning performance and behavioral patterns,” *Computers in Human Behavior*, vol. 75, pp. 218–227, 2017, doi: 10.1016/j.chb.2017.05.017.
- [32] M. U. Iqbal, B. Srinivasan, and R. Srinivasan, “Dynamic assessment of control room operator’s cognitive workload using Electroencephalography (EEG),” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 141, p. 106726, 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.106726.
- [33] J. C. Y. Sun and K. P. C. Yeh, “The effects of attention monitoring with EEG biofeedback on university students’ attention and self-efficacy: The case of anti-phishing instructional materials,” *Computers and Education*, vol. 106, pp. 73–82, 2017, doi: 10.1016/j.compedu.2016.12.003.
- [34] V. Kompaniets, A. Lyz, and A. Kazanskaya, “An Empirical Study of Goal Setting in UX/UI-design,” Oct. 2020. doi: 10.1109/AICT50176.2020.9368570.
- [35] W. Lawpradit and T. Yooyativong, “The EEG brain signal representation for surfaces and shapes touching behavior with an inexpensive device,” *1st International ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering, ECTI-NCON 2018*, pp. 135–140, 2018, doi: 10.1109/ECTI-NCON.2018.8378297.
- [36] S. K. Sundhara, G. Krishna, N. Bhalaji, and S. Chithra, “BCI cinematics – A pre-release analyser for movies using H2O deep learning platform,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 74, pp. 547–556, 2019, doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.03.015.
- [37] C. L. B. Maia and E. S. Furtado, “Using psychophysiological measures to estimate dimensions of emotion in hedonic experiences,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 71, no. March, pp. 431–439, 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.07.048.
- [38] Y. Dai, X. Wang, P. Zhang, and W. Zhang, “Wearable biosensor network enabled multimodal daily-life emotion recognition employing reputation-driven imbalanced fuzzy classification,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 109, pp. 408–424, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.06.006.
- [39] I. Coates McCall, C. Lau, N. Minielly, and J. Illes, “Owning Ethical Innovation: Claims about Commercial Wearable Brain Technologies,” *Neuron*, vol. 102, no. 4, pp. 728–731, 2019, doi: 10.1016/j.neuron.2019.03.026.
- [40] D. Martinez-Maradiaga and G. Meixner, “Morpheus alert: A smartphone application for preventing microsleeping with a brain-computer-

- interface,” *2017 4th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2017*, vol. 2018-Janua, no. Icsai, pp. 137–142, 2017, doi: 10.1109/ICSAI.2017.8248278.
- [41] M. Nafea, A. B. Hisham, N. A. Abdul-Kadir, and F. K. Che Harun, “Brainwave-controlled system for smart home applications,” *2nd International Conference on BioSignal Analysis, Processing and Systems, ICBAPS 2018*, pp. 75–80, 2018, doi: 10.1109/ICBAPS.2018.8527397.
- [42] T. bin Nasir, M. A. M. Lalin, K. Niaz, and M. R. Karim, “Design and Implementation of EEG Based Home Appliance Control System,” in *2021 International Conference on Information and Communication Technology for Sustainable Development, ICICT4SD 2021 - Proceedings*, Feb. 2021, pp. 445–449. doi: 10.1109/ICICT4SD50815.2021.9396982.
- [43] S. Chopra, A. Aglawe, S. Singh, and A. Ambekar, “paralyzed using Electroencephalogram,” *2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, no. Icnte, pp. 1–7, 2019.
- [44] Y. Muñoz, F. L. Gallego, A. A. Salazar, and M. S. Rodríguez, “Selling of products: The use of single-electrode wireless EEG in consumer behavior,” *International Journal of Psychological Research*, vol. 12, no. 1, pp. 57–65, 2019, doi: 10.21500/20112084.4089.
- [45] P. M. Effendi and T. D. Susanto, “Test of citizens’ physical and cognitive on Indonesian e-government website design,” *Procedia Computer Science*, vol. 161, pp. 333–340, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.11.131.
- [46] T. A. Cahyono and T. D. Susanto, “Acceptance factors and user design of mobile e-government website (Study case e-government website in Indonesia),” *Procedia Computer Science*, vol. 161, pp. 90–98, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.11.103.
- [47] E. Naula, A. F. Garcia, K. Palacio-Baus, L. I. Minchala, A. Vazquez-Rodas, and D. Astudillo, “Evaluating the mindwave headset for automatic upper body motion classification,” *Proceedings - 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2017*, vol. 2017-Novem, pp. 166–173, 2018, doi: 10.1109/INCISCOS.2017.10.
- [48] A. Khalafallah, A. Ibrahim, B. Shehab, H. Raslan, O. Eltobgy, and S. Elbaroudy, “using ELECTROENCEPHALOGRAPHY SIGNALS,” pp. 901–905, 2018.
- [49] B. Adhikari, A. Shrestha, S. Mishra, S. Singh, and A. K. Timalisina, “EEG based Directional Signal Classification using RNN Variants,” *Proceedings on 2018 IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security, ICCCS 2018*, pp. 218–223, 2018, doi: 10.1109/CCCS.2018.8586823.
- [50] A. R. Elshenaway and S. K. Guirguis, “Adaptive Thresholds of EEG Brain Signals for IoT Devices Authentication,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 100294–100307, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3093391.
- [51] D. Bright, A. Nair, D. Salvekar, and S. Bhisikar, “EEG-based brain controlled prosthetic arm,” *Conference on Advances in Signal Processing, CASP 2016*, pp. 479–483, 2016, doi: 10.1109/CASP.2016.7746219.
- [52] R. Prathibha, L. Swetha, and K. R. Shobha, “Brain computer interface: Design and development of a smart robotic gripper for a prosthesis environment,” *2017 International Conference on Networks and Advances in Computational Technologies, NetACT 2017*, no. July, pp. 278–283, 2017, doi: 10.1109/NETACT.2017.8076780.
- [53] A. Mansour and H. T. Ouda, “On the road to a comparative car racing EEG-based signals for mental and physical brain activity evaluation,” *IEMECON 2019 - 9th Annual Information Technology, Electromechanical Engineering and Microelectronics Conference*, pp. 43–48, 2019, doi: 10.1109/IEMECONX.2019.8877037.
- [54] C. Demirel, H. Kandemir, and H. Kose, “Controlling a robot with extraocular muscles using EEG device,” *26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/SIU.2018.8404157.
- [55] W. Zhi-Hao, Hendrick, K. Yu-Fan, C. Chuan-Te, L. Shi-Hao, and J. Gwo-Jia, “Controlling DC motor using eye blink signals based on LabVIEW,” *Proceeding - 2017 5th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering: Smart Innovations for Bridging Future Technologies, ICEEIE 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 61–65, 2018, doi: 10.1109/ICEEIE.2017.8328763.

- [56] A. A. Lins, J. M. de Oliveira, J. J. P. C. Rodrigues, and V. H. C. de Albuquerque, "Robot-assisted therapy for rehabilitation of children with cerebral palsy - A complementary and alternative approach," *Computers in Human Behavior*, vol. 100, pp. 152–167, 2019, doi: 10.1016/j.chb.2018.05.012.
- [57] T. bin Nasir, M. A. M. Lalin, K. Niaz, M. R. Karim, and A. Rahman, "EEG Based Human Assistance Rover for Domestic Application," in *International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques*, 2021, pp. 461–466. doi: 10.1109/ICREST51555.2021.9331224.
- [58] D. Anwar, A. Gupta, V. Naik, and S. K. Sharma, "Detecting meditation using a dry mono-electrode EEG sensor," *2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2017*, pp. 508–513, 2017, doi: 10.1109/COMSNETS.2017.7945444.
- [59] D. Anwar, P. Garg, V. Naik, A. Gupta, and A. Kumar, "Use of portable EEG sensors to detect meditation," *2018 10th International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 705–710, 2018, doi: 10.1109/COMSNETS.2018.8328299.
- [60] S. Kumar, K. Mamun, and A. Sharma, "CSP-TSM: Optimizing the performance of Riemannian tangent space mapping using common spatial pattern for MI-BCI," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 91, pp. 231–242, 2017, doi: 10.1016/j.combiomed.2017.10.025.
- [61] A. H. Ali and R. S. H. Al-Musawi, "Investigating the possibility of using a single electrode brain-computer interface device for human machine interaction by means of cluster analysis," *Al-Sadiq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Techniques Science and Applications, AIC-MITCSA 2016*, pp. 201–206, 2016, doi: 10.1109/AIC-MITCSA.2016.7759936.
- [62] R. I. Chowdhury, A. K. Sun, A. Tamir, C. Shahnaz, and S. A. Fattah, "Brain-drive: A smart driver for controlling digital appliances using cognitive command," *5th IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference 2017, R10-HTC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 851–855, 2018, doi: 10.1109/R10-HTC.2017.8289087.
- [63] A. Ramirez-Noriega, Y. Martinez-Ramirez, S. Jimenez, E. G. Carrillo, and J. E. Sanchez Garcia, "An application programming interface for a brain-computer interface using two neurosky mindwave devices," in *Proceedings - 2020 8th Edition of the International Conference in Software Engineering Research and Innovation, CONISOFT 2020*, Nov. 2020, pp. 140–146. doi: 10.1109/CONISOFT50191.2020.00029.
- [64] J. A. Vela Dávila, J. Velásquez Macías, and M. Veyna Lamas, "Videojuegos basados en BCI (Interface cerebro computadora): Revisión Sistemática Literaria," *Programación Matemática y Software*, vol. 9, no. 2, pp. 10–23, 2017.
- [65] E. J. R. Zapata *et al.*, "Case study of the development of a BCI-based videogame," *Revista Digital Lampsakos*, no. 22, pp. 48–58, 2019.
- [66] G. A. M. Vasiljevic and L. C. de Miranda, "The influence of graphical elements on user's attention and control on a neurofeedback-based game," *Entertainment Computing*, vol. 29, pp. 10–19, 2019, doi: 10.1016/j.entcom.2018.10.003.
- [67] Y. A. Sekhavat, "Collaboration or battle between minds? An attention training game through collaborative and competitive reinforcement," *Entertainment Computing*, vol. 34, no. February, p. 100360, 2020, doi: 10.1016/j.entcom.2020.100360.
- [68] S. Mann *et al.*, "Encephalogram (brain/mind games): Inclusive health and wellbeing for people of all abilities," *2019 IEEE Games, Entertainment, Media Conference, GEM 2019*, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1109/GEM.2019.8811540.