

# Classifying Motor Imagery Actions in Electroencephalogram Signals of Older Adults Using Artificial Neural Networks

Ivan Carrillo-Rodríguez, Victoria Meza-Kubo, Luis Pellegrin

Published: 30 November 2024

## Abstract

Brain-computer interfaces (BCIs) have enabled users to control computing applications by measuring brain activity, such as through electroencephalograms (EEGs). These BCIs have the potential to assist individuals with cognitive and motor impairments. However, research on BCIs has shown that their performance can vary among study subjects, particularly in the case of older adults. Cognitive impairment is a natural condition that occurs in older adults, and if left untreated, it can lead to the development of dementia, which, in turn, results in dependency for performing basic daily life activities. This paper presents the results of a preliminary analysis on the use of BCIs to recognize motor imagery of up to five right-hand movements, using a supervised machine learning algorithm. This approach aims to facilitate the interaction of older adults with cognitive stimulation applications, mobility devices, and other tools that improve their quality of life.

## Keywords:

Brain computer-interfaces, older adults, motor imagery, machine learning.

## 1 Introducción

Gracias a los avances en el área de la salud, se ha logrado incrementar la esperanza de vida a nivel mundial. No obstante, esto ha generado otra problemática a nivel poblacional y de salud, ya que la población mayor de 60 años ha ido aumentando gradualmente.

De acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se espera que para el año 2025 el número de personas en el grupo poblacional de 60 años o más alcance los 1,200 millones, y para 2050 se prevé que esta cifra llegue a 2,000 millones de personas [12].

El adulto mayor presenta diferentes problemáticas asociadas a la edad, siendo una de ellas el deterioro cognitivo [17]. La función cognitiva se puede definir como la suma de diversas capacidades

intelectuales que posee una persona, tales como el pensamiento, la memoria, la percepción, la comunicación, el cálculo, la comprensión, la resolución de problemas y la orientación. Cabe mencionar que estas capacidades cambian conforme pasa el tiempo [17], y a este fenómeno se le conoce como deterioro cognitivo.

El deterioro cognitivo [7, 24] es un padecimiento que se presenta en todos los adultos mayores. Esta condición aparece de manera natural y avanza de forma diferente en cada persona. Mientras que en algunos casos el avance es acelerado y el deterioro es notorio, en otros el progreso es muy lento y su presencia no es fácilmente apreciable.

No existe una cura para esta condición, pero hay tratamientos farmacológicos destinados a evitar que el deterioro se acelere, así como intervenciones no farmacológicas, tales como actividades cognitivas, que pueden aplicarse para prevenir la aparición temprana de esta condición o evitar un avance acelerado.

Las actividades de estimulación cognitiva pueden llevarse a cabo de manera tradicional, o emplear diferentes tecnologías para brindar apoyo, sustituyendo la aplicación tradicional por un medio más moderno [4]. Diversos trabajos han implementado programas para estimular cognitivamente a quienes sufren un declive en sus funciones cognitivas [10, 11, 14, 16, 18]. En algunos estudios [2, 4], se emplea la realidad virtual para trabajar la orientación, ya que es una de las funciones cognitivas que se ven afectadas.

Sin embargo, a pesar del incremento de aplicaciones de software destinadas a la estimulación cognitiva, la interacción suele ser una barrera para los adultos mayores, debido a sus características propias que se presentan habitualmente con la edad, tales como la deficiencia visual, la destreza motriz reducida y las dificultades para manejar nuevas tecnologías, entre otras [3, 9].

Con los nuevos avances tecnológicos, se han abierto nuevas formas de interacción; tal es el caso de las interfaces cerebro-computadora (BCI, por sus siglas en inglés de *Brain-Computer Interface*) [20, 23]. En este tipo de interfaces, no importa la condición física que presente el usuario; lo importante es que presente un cerebro saludable, es decir, sin lesiones graves que le impidan emplear comandos mentales.

Los sistemas BCI facilitan la comunicación de manera directa entre un usuario y el dispositivo (*hardware*) o aplicación (*software*) para su interacción o manipulación [5]. Para determinar la intención de uso mediante la actividad eléctrica cerebral registrada se han empleado diversas técnicas [1, 6], como por ejemplo la imaginación motriz [25]

---

Carrillo-Rodríguez I., Meza-Kubo V., Pellegrin L.  
Universidad Autónoma de Baja California  
Ensenada, México.  
Email: {ivan.carrillo, mmeza, pellegrin}@uabc.edu.mx

La imaginación motriz implica que el usuario imagine el movimiento de una parte del cuerpo, como mover un brazo o una pierna, sin realmente realizar el movimiento físicamente. Esta actividad mental genera patrones específicos de oscilaciones cerebrales que se pueden detectar mediante un electroencefalograma (EEG), con la ventaja de no requerir estímulos externos, lo que permite un control más natural y continuo [19].

Se han realizado diversos trabajos en donde se proponen metodologías para llevar a cabo la clasificación de la imaginación motriz [1, 2, 3, 4, 5]. Además, en la literatura se han reportado el uso de diferentes extremidades y sus movimientos para la imaginación motriz. Por ejemplo, en [1, 6] se emplean tres extremidades: mano izquierda, mano derecha y pie. Mientras que [3, 7] emplean cuatro extremidades: mano derecha, mano izquierda, pie y lengua. En cambio, en [8] se identifican puños abiertos o cerrados en ambas manos y pies con movimientos rápidos. En los trabajos de [9, 10] hacen una revisión de investigaciones de movimiento imaginado de manos, pies y lengua; además de trabajos donde únicamente se realiza la ejecución motora y otros donde se realizan las dos tareas (imaginación motora y ejecución motora).

A diferencia de los trabajos revisados, en el presente trabajo se presentan los resultados preliminares de la clasificación de registros EEG de adultos mayores para cinco movimientos imaginados. Dichos movimientos fueron realizados únicamente con la mano derecha: 'Arriba', 'Abajo', 'Izquierda', 'Derecha' y 'Presionar Botón'. Para la clasificación de estos movimientos imaginados se utiliza una red neuronal artificial [8].

## 2 Metodología

### 2.1 Diseño del experimento

Se llevó a cabo una actividad con seis adultos mayores cuya edad promedio fue de 66 años, y una desviación estándar de 7.65. Todas las participantes fueron mujeres. Los criterios de inclusión fueron, además de tener 60 años o más, ser diestros y tener un puntaje mayor a 23 en el Mini Examen de Estado Mental (MMSE) [11, 12].

La actividad llevada a cabo durante el experimento consistió en que las participantes imaginaron que movían la mano derecha en cuatro direcciones diferentes. Para estimular visualmente a las participantes, se utilizó una flecha que se desplegaba en un monitor. La orientación de la flecha indicaba el movimiento a realizar con la mano derecha de manera imaginada. Cada tarea de movimiento imaginado se realizó de manera independiente durante 1 minuto.

Además de estos movimientos imaginados, se les mostró a los participantes un botón, el cual también debían imaginar que lo presionaban con su mano derecha; esta actividad también duró 1 minuto. Los movimientos a registrar durante las actividades mencionadas fueron los siguientes: a la derecha, a la izquierda, hacia arriba, hacia abajo y, por último, la acción de presionar un botón, todos ellos realizados con la mano derecha.

La Figura 1 describe la actividad realizada. Primero se muestra un estímulo neutro durante 5 segundos, posteriormente se activa el marcador y se muestra el estímulo correspondiente al movimiento a realizar de manera repetida durante 6 segundos, finalizado el tiempo se activa el marcador. Esto se repite durante un minuto.

Para poder identificar en los registros EEG la señal correspondiente a los movimientos realizados, se emplean marcadores descritos en la actividad de imaginación motriz.

Existen dos momentos, como se aprecia en la Figura 1: al inicio previo del estímulo, y cuando el estímulo finaliza.

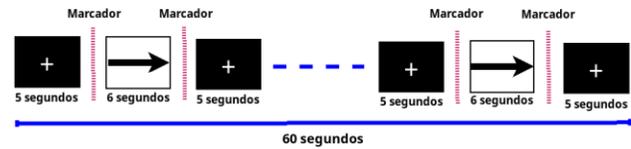


Figura 1: Diagrama de un movimiento de imaginación motriz "hacia la derecha".

### 2.2 Registro de la señal EEG y procesamiento

Para el registro de la actividad cerebral de los adultos mayores, se empleó el dispositivo *Emotiv EPOC* para EEG portátil. El dispositivo cuenta con 14 electrodos distribuidos de acuerdo al sistema 10-20 [15].

Para llevar a cabo el preprocesamiento de las señales de EEG, se realizó la separación de las acciones, tomando en cuenta a marcadores de pausa entre las actividades. Después, una vez que se obtuvieron los registros de cada acción, estos fueron procesados de manera individual. En el diagrama mostrado en la Figura 2, podemos observar cada uno de los procesos realizados para cada registro correspondiente a la acción. A cada uno de los datos obtenidos se le aplicaron las siguientes técnicas para la eliminación de ruido en la señal:

1. Eliminación de la media de los datos.
2. Eliminación de la tendencia lineal de los datos.
3. Aplicación del filtro *Butterworth* de 4to orden, con frecuencias de corte en 0.1Hz a 50Hz.
4. Se aplica la ventana *Hanning*, del mismo tamaño que la frecuencia de muestreo, que fue de 128Hz.

Una vez que el registro correspondiente a un movimiento imaginado se ha procesado, el siguiente paso es obtener un conjunto de características que pueden emplearse para identificar patrones.

Se procesan los registros con la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y se obtiene la potencia de la señal. Con esta característica ya calculada, es posible emplearla para la clasificación de los diferentes movimientos imaginados por parte de los adultos mayores.

### 2.3 Clasificación de acciones de imaginación motriz

Se llevaron a cabo un conjunto de pruebas de clasificación de las acciones de imaginación motriz, empleando un perceptrón multicapa, que es un tipo red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés de *Artificial Neural Network*). Una ANN es una arquitectura que emula el cerebro humano; los elementos de procesamiento son las neuronas artificiales, las cuales son el equivalente a las neuronas biológicas de acuerdo con la función que tienen [13].

Se evaluaron modelos entrenados por la ANN bajo diferentes configuraciones de clases, es decir, iniciando con dos clases y llegando a usar hasta cinco clases, con la intención de revisar la exactitud de la red para clasificar diferentes movimientos imaginados.

Así mismo, se utilizan los registros de participantes de manera incremental. Por ejemplo, cuando se entrena la ANN para dos

clases, se emplean registros de dos participantes, esto para identificar el comportamiento de la ANN de acuerdo con el número de registros por cada movimiento utilizado.

Cada una de las acciones está representada como una matriz de 128x14 datos, los cuales equivalen a 1 segundo de registros EEG para 14 electrodos. Los adultos mayores fueron etiquetados como A1, A2, A3, A4, A5 y A6, lo cual facilita la identificación de los registros.

### 2.3.1 Clasificación de dos acciones (binaria)

Ya que se cuenta con un total de cinco acciones diferentes, se evaluaron dos acciones a la vez para todas las combinaciones posibles. La Tabla 1 muestra un ejemplo de las 17 combinaciones posibles. Para este experimento, se emplearon los registros de dos participantes (identificados como A1 y A2).

El conjunto de datos utilizado para este experimento fue de un total de 128x28 registros, considerando los dos movimientos imaginados.

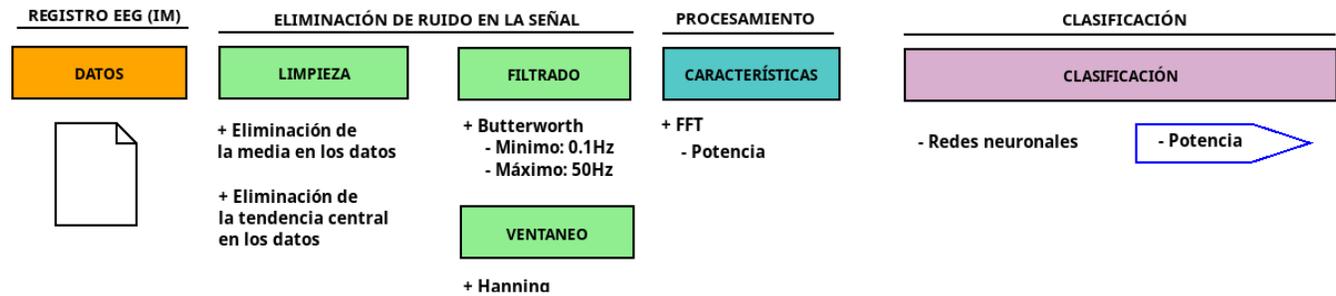


Figura 2: Diagrama del proceso realizado con los registros EEG de imaginación motriz.

Tabla 1: Ejemplo de combinaciones para la clasificación de dos acciones de imaginación motriz.

Arriba	Abajo	Derecha	Izquierda	Botón
Arriba	Abajo	Derecha	Izquierda	Botón
Arriba	Abajo	Derecha	Izquierda	Botón

### 2.3.2 Clasificación multiclase

Para la clasificación de tres acciones de imaginación motriz, al igual que en el caso de clasificación binaria, primero se identificaron las posibles combinaciones a utilizar, dando un total de 11 combinaciones posibles. En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de éstas.

El conjunto de datos utilizado para este experimento fue de un total de 128x42 registros, considerando los tres movimientos imaginados, y se emplearon datos de tres participantes (A1, A2 y A3).

Tabla 2: Ejemplo de combinaciones para la clasificación de tres acciones de imaginación motriz.

Arriba	Abajo	Derecha	Izquierda	Botón
Abajo	Arriba	Derecha	Izquierda	Botón
Derecha	Izquierda	Arriba	Abajo	Botón

La clasificación de cuatro acciones considera cinco combinaciones posibles; algunos ejemplos se muestran en la Tabla 3. El conjunto de datos utilizado para este experimento fue de un total de 128x56 registros, considerando los cuatro movimientos imaginados, y se emplearon datos de cuatro participantes: A1, A2, A3 y A4.

Tabla 3: Ejemplo de combinaciones para la clasificación de cuatro acciones de imaginación motriz.

Arriba	Abajo	Derecha	Izquierda	Botón
Arriba	Abajo	Derecha	Izquierda	Botón

Finalmente, para la clasificación de cinco acciones, se tiene la secuencia completa derecha-izquierda-arriba-abajo-botón. Esta última configuración emplea todos los datos de cinco participantes, teniendo un conjunto de datos de 128x70 registros.

## 3 Resultados

La distribución de los datos para el entrenamiento de la ANN para todas las configuraciones antes descritas fue de 80% para entrenamiento, 10% para validación y 10% para pruebas.

### 3.1 Identificando dos acciones

La arquitectura empleada para la clasificación de dos acciones es mostrada en la Figura 3. La capa de entrada tiene 128 neuronas que recogen la señal completa de un solo electrodo y tiene como salida el número de acciones que se evalúan (dos). Se emplea una sola capa oculta, pero el número de neuronas empleadas para cada par de acciones difiere. Esto es debido a que se llevó a cabo una optimización para el diseño de la ANN.

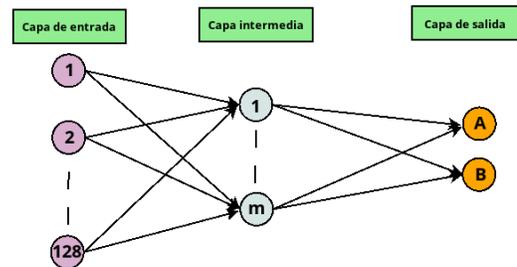


Figura 3: Estructura de la red neuronal para clasificación de dos acciones.

Los mejores resultados de exactitud son reportados para cada par de acciones en la Tabla 4, usando el número de neuronas que alcanzó el mejor resultado para la capa oculta.

Tabla 4: Resultados de clasificación de dos acciones mediante red neuronal.

Evento	# capas	Exacti	Evento	# capas de	Exacti
--------	---------	--------	--------	------------	--------

	de la ANN	tud		la ANN	tud
arriba - abajo	9	100%	abajo - izquierda	16	100%
arriba - derecha	5	100%	abajo - botón	6	100%
arriba - izquierda	6	100%	derecha - izquierda	9	100%
arriba - botón	12	100%	derecha - botón	5	100%
abajo - derecha	23	100%	izquierda - botón	15	100%

De acuerdo con los resultados obtenidos al clasificar únicamente dos acciones, los resultados indican que no importa la combinación de las acciones que se utilice; éstas serán identificadas correctamente por la ANN. Considerando estos resultados, desde la perspectiva del modelo de clasificación, los resultados son excelentes ya que los registros de cada acción son clasificados correctamente al 100% de exactitud.

Dado que al ser solo dos acciones, la tarea de clasificación es más sencilla. No obstante, desde la perspectiva de interacción, esto se limita a solo dos acciones para que el usuario interactúe mediante imaginación motriz con aplicaciones BCI.

### 3.2 Identificando dos acciones

Para la clasificación de múltiples acciones, se adaptó la misma estrategia que en la clasificación binaria (dos acciones). En las Figuras 4-6, podemos observar las arquitecturas empleadas. Todas ellas presentan el mismo número de neuronas en la capa de entrada, y el número de neuronas en la capa de salida corresponde al número de acciones a clasificar.

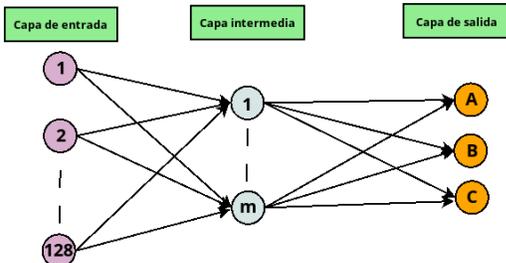


Figura 4: Estructura de la red neuronal para clasificación de tres acciones.

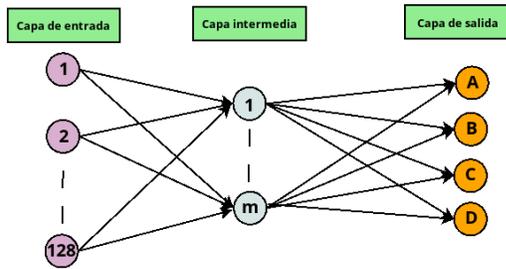


Figura 5: Estructura de la red neuronal para clasificación de cuatro acciones.

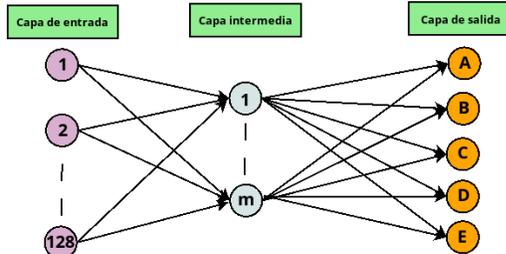


Figura 6: Estructura de la red neuronal para clasificación de cinco acciones.

Por otro lado, las Tablas 5-7 concentran los resultados obtenidos en la clasificación multiclase.

Tabla 5: Resultados de clasificación de tres acciones mediante red neuronal.

Evento	# capas de la ANN	Exactitud (%)
arriba - abajo-derecha	5	83.3
arriba - abajo-izquierda	9	85.7
arriba - abajo-botón	13	73.8
arriba - derecha-izquierda	6	76.2
arriba - derecha-botón	9	73.8
arriba - izquierda-botón	13	78.6
<b>abajo - derecha-izquierda</b>	<b>5</b>	<b>95.5</b>
abajo - derecha-botón	6	90.5
abajo - izquierda-botón	14	92.9
derecha - izquierda-botón	29	90.5

En la clasificación de tres acciones, el mejor resultado de las 10 combinaciones identificadas (resaltado en negrita en la Tabla 5) corresponde a: la combinación abajo-derecha-izquierda, con un 95.5% de exactitud. En relación a la clasificación de dos eventos, es más complejo identificar 3 movimientos imaginados. Con estos resultados, es posible obtener el porcentaje de exactitud mínimo, siendo el 73.8% y el máximo 95.5%.

La combinación de movimientos arriba-derecha-botón, con una capa oculta de 9 neuronas, obtiene un resultado de 73.8%, y la combinación arriba-abajo-botón, con una capa oculta de 13 neuronas genera el mismo resultado. En cuanto a los movimientos que se emplean en ambas clasificaciones, se observa una coincidencia en dos de los tres movimientos siendo estos arriba-botón.

Referente al tamaño de neuronas de la capa oculta, el tener un número grande no garantiza un mejor resultado, un ejemplo de ello es la clasificación del evento (*abajo-derecha-izquierda*) en el cual se emplean sólo 5 neuronas y se tiene una exactitud del 95.5%. Por otro lado, en el evento (*derecha-izquierda-botón*) se emplean 29 neuronas y se obtiene un resultado del 90.5% de exactitud.

Tabla 6: Resultados de clasificación de cuatro acciones mediante red neuronal.

Evento	Capas	Exactitud (%)
arriba-abajo-derecha-izquierda	25	80.4
arriba-abajo-derecha-botón	23	94.6
arriba-abajo-izquierda-botón	9	94.6

arriba- derecha-izquierda-botón	31	91.1
<b>abajo-derecha-izquierda-botón</b>	<b>12</b>	<b>100</b>

Respecto a la clasificación de cuatro acciones, de las cinco combinaciones de acciones identificadas la combinación que mejor resultados genera es arriba-derecha-izquierda-botón con un 100% de exactitud (en negrita en Tabla 6). Considerando que al incrementar las acciones a clasificar la tarea se vuelve más compleja el resultado que se obtiene es muy bueno ya que los cuatro movimientos de imaginación motriz son clasificados correctamente.

De acuerdo a los resultados, la exactitud mínima en la tarea de clasificación fue de 80.4%, para el máximo corresponde a un 100%. La media de la exactitud corresponde al 92.4. Referente a la combinación de movimientos arriba-abajo-derecha-izquierda, con una capa oculta de 25 neuronas da como resultado un 80.4%. Comparando dicho resultado con la clasificación de arriba-abajo-izquierda-botón, este segundo es mucho mejor ya que la capa oculta está conformada por 9 neuronas y se obtiene una exactitud del 94.6%. Los movimientos que se emplean en ambas clasificaciones presentan una coincidencia en tres de los cuatro movimientos siendo estos arriba-abajo-botón.

Por último, en la Tabla 7 se muestra la clasificación de las cinco acciones, además de las mejores obtenidas para las diferentes combinaciones de acciones. Se obtiene un 88.6% de exactitud como resultado de la clasificación con todas las acciones. Podemos inferir de la tabla, que al agregar una acción más para clasificar es posible establecer que la complejidad de la tarea aumenta. Es por ello, que el porcentaje disminuye considerablemente respecto al resultado obtenido al clasificar cuatro o menos acciones.

**Tabla 7: Mejores resultados por clasificación.**

Acción	Capas	Exactitud (%)
derecha-izquierda	9	100
abajo-derecha-izquierda	5	95.5
abajo-derecha-izquierda-botón	12	100
derecha-izquierda-arriba-abajo-botón	13	88.6

### 3.3 Discusión

Mediante diferentes pruebas realizadas con la ANN se logró determinar los parámetros para alcanzar los mejores resultados en la identificación de movimientos imaginados con la mano derecha.

La combinación de los diferentes movimientos permitió establecer aquellas relaciones que ofrecen un mejor resultado en la clasificación. Se entiende que al ir agregando acciones la complejidad de la tarea de clasificación aumenta, es por ello que el porcentaje exactitud puede disminuir considerablemente.

Por el momento no es posible establecer una relación entre los resultados obtenidos vs los movimientos utilizados. En el caso de la clasificación de dos movimientos imaginados, en las 11 combinaciones posibles se obtiene un resultado de exactitud de 100%, esto indica que para esta clasificación un movimiento imaginado no tiene mayor peso sobre otro.

La clasificación de tres movimientos imaginados presenta mayor variabilidad en los resultados obtenidos. Se observa que, en estos resultados, se presenta las combinaciones *arriba-abajo-botón* y *arriba-derecha-botón* con el mismo porcentaje de exactitud de

73.8%, en ambos casos, se repiten dos movimientos *arriba* y *botón*. De igual manera se obtienen los movimientos *abajo-derecha-botón* y *derecha-izquierda-botón* con un 90.5% de exactitud, para este caso los movimientos que se repiten son *derecha* y *botón*.

Finalmente, el mejor resultado *abajo-derecha-izquierda* con un 95.5% de exactitud, este comparte los movimientos *derecha-izquierda* con uno de los resultados de 90.5% mencionado anteriormente.

En la clasificación de cuatro movimientos imaginados, se encontraron dos combinaciones con la misma exactitud de 94.6%: *arriba-abajo-derecha-botón* y *arriba-abajo-izquierda-botón*. Ambas combinaciones comparten los movimientos *arriba-derecha-botón*.

Además, se logró un resultado de 100% de exactitud con la combinación *abajo-derecha-izquierda-botón*. En comparación con los resultados de 94.6%, ambas combinaciones comparten los movimientos *abajo-derecha-izquierda-botón*, por lo que podría influir en la exactitud obtenida.

La siguiente tarea a trabajar en este proyecto es implementar una aplicación BCI con el modelo que alcanzó los mejores resultados obtenidos. Durante la tarea a evaluar se considerarán participantes adultos mayores. Por otro lado, es necesario realizar una prueba de correlación para poder establecer la relación que tienen cada uno de los movimientos considerando que todos ellos se realizan con la mano derecha de manera imaginada, mientras que en la literatura [1, 6, 8, 9, 10] se emplean ambas manos y pies o la lengua para diferenciar los movimientos.

Una de las limitaciones del presente estudio fue emplear únicamente los datos de las FFT, por lo que será necesario realizar las pruebas de clasificación con las otras características estudiadas en la literatura: media de la potencia, varianza y valor de Kurtosis. Estos hallazgos permitirán obtener una mejor comprensión de los resultados en función a las características utilizadas.

## 4 Conclusiones

En este trabajo se presentaron los resultados de la identificación de acciones de imaginación motriz con la mano derecha mediante lectura de señales EEG. Para ello se diseñaron diferentes configuraciones de redes neuronales artificiales para obtener los mejores desempeños que permitan la interacción de aplicaciones BCI con un mayor número de movimientos imaginados.

La Tabla 7 muestra que la identificación de dos movimientos puede ser un proceso más sencillo que la identificación de cinco movimientos. Sin embargo, de acuerdo con los conjuntos de datos utilizados como prueba, fue posible alcanzar un desempeño similar en la identificación de cuatro movimientos.

A pesar de los excelentes desempeños alcanzados por los modelos de redes neuronales artificiales diseñadas, la literatura sugiere que, las señales cerebrales de los adultos mayores pueden ser muy débiles y variadas. Por tanto, como trabajo futuro se pondrán a prueba los modelos con los mejores desempeños, para la interacción con una aplicación BCI.

Se evaluará la aplicación con una muestra mayor de adultos mayores para verificar el desempeño de los modelos. Así mismo, se evaluará la percepción del uso y experiencia de uso de los adultos mayores al utilizar este tipo de interacción.

## 5 Agradecimientos

Se agradece a los adultos mayores que participaron en las actividades que permitieron recabar la información. Este proyecto

fue apoyado por la UABC con el proyecto 3106 de la Convocatoria Interna de Proyectos de Investigación.

## 6 Referencias

- [1] Alom, M. K., & Islam, S. M. R. (2020, November). Classification for the P300-based brain computer interface (BCI). In 2020 2nd international conference on advanced information and communication technology (ICAICT) (pp. 387-391). IEEE.
- [2] Bauer, A. C. M., & Andringa, G. (2020). The Potential of Immersive Virtual Reality for Cognitive Training in Elderly. *Gerontology*, 66(6), 614–623. <https://doi.org/10.1159/000509830>
- [3] Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A. D., Hertzog, C., Nair, S. N., Rogers, W. A., & Sharit, J. (2006). Factors predicting the use of technology: findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychology and aging*, 21(2), 333.
- [4] Gamito, P., Oliveira, J., Morais, D., Coelho, C., Santos, N., Alves, C., Galamba, A., Soeiro, M., Yerra, M., French, H., Talmers, L., Gomes, T., & Brito, R. (2019). Cognitive Stimulation of Elderly Individuals with Instrumental Virtual Reality-Based Activities of Daily Life: Pre-Post Treatment Study. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 22(1), 69–75. <https://doi.org/10.1089/cyber.2017.0679>
- [5] Garro, F., & McKinney, Z. (2020, September). Toward a standard user-centered design framework for medical applications of brain-computer interfaces. In 2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS) (pp. 1-3). IEEE.
- [6] HALTAŞ, K., ERGÜZEN, A., & Erdal, E. (2019, October). Classification methods in EEG based motor imagery BCI systems. In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-5). IEEE.
- [7] Hooren, S. A. H. V., Valentijn, A. M., Bosma, H., Ponds, R. W. H. M., Boxtel, M. P. J. V., & Jolles, J. (2007). Cognitive functioning in healthy older adults aged 64-81: A cohort study into the effects of age, sex, and education. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14(1), 40–54. <https://doi.org/10.1080/138255890969483>
- [8] Kevric, Jasmin, & Subasi, Abdulhamit. (2017). *Comparison of signal decomposition methods in classification of EEG signals for motor-imagery BCI system*. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2016.09.007>
- [9] Kim, S., Yao, W., & Du, X. (2022). Exploring older adults' adoption and use of a tablet computer during COVID-19: longitudinal qualitative study. *JMIR aging*, 5(1), e32957.
- [10] Klimova, B., & Valis, M. (2018). Smartphone applications can serve as effective cognitive training tools in healthy aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9(JAN), 1–4. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00436>
- [11] Lopez-Samaniego, L., Garcia-Zapirain, B., & Mendez-Zorrilla, A. (2014). Memory and accurate processing brain rehabilitation for the elderly: LEGO robot and iPad case study. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 24(6), 3549–3556. <https://doi.org/10.3233/BME-141181>
- [12] Nóbrega, M. do P. S. de S., Freitas, C. M., Jesus, B. G. S. de, Santos, J. C. dos, & Silva, M. S. G. O. da. (2022). COGNITIVE STIMULATION PROGRAMS FOR ELDERLY PEOPLE WITH AND WITHOUT DEMENTIA SYNDROMES SUPERVISED OR APPLIED BY NURSES: INTEGRATIVE REVIEW. En *Cogitare Enfermagem* (Vol. 27). Universidade Federal do Parana. <https://doi.org/10.5380/ce.v27i0.78943>
- [13] Oliveira, J., Gamito, P., Souto, T., Conde, R., Ferreira, M., Corotnean, T., Fernandes, A., Silva, H., & Neto, T. (2021). Virtual reality-based cognitive stimulation on people with mild to moderate dementia due to alzheimer's disease: A pilot randomized controlled trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph18105290>
- [14] Palumbo, V., & Paterno, F. (2021). Micogito: A serious gamebook based on daily life scenarios to cognitively stimulate older adults. *GoodIT 2021 - Proceedings of the 2021 Conference on Information Technology for Social Good*, 163–168. <https://doi.org/10.1145/3462203.3475889>
- [15] Sazgar, M., Young, M. G., Sazgar, M., & Young, M. G. (2019). Overview of EEG, electrode placement, and montages. *Absolute epilepsy and EEG rotation review: Essentials for trainees*, 117-125.
- [16] TORIBIO-GUZMÁN, J. M., VIDALES, E. P., RODRÍGUEZ, M. A. J. V., AGUADO, Y. B., BARTOLOMÉ, M. A. T. C., & FRANCO-MARTÍN, M. A. (2018). Rehabilitación cognitiva por ordenador en personas mayores: Programa gradior. *Aula*, 24(0), 61. <https://doi.org/10.14201/aula2018246175>
- [17] Varela, L. (2004). Características del deterioro cognitivo en el adulto mayor hospitalizado a nivel nacional hospitalized peruvian elderly adults. *Revista Soc. Per. Med. Inter.*, 17, 2. <https://doi.org/10.36393/spmi.v17i2.235>
- [18] Vourvopoulos, A., & Liarokapis, F. (2011). Brain-controlled NXT Robot: Tele-operating a robot through brain electrical activity. *Games and Virtual Worlds for ...* [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5962098](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5962098)
- [19] Vuckovic, A., & Osuagwu, B. A. (2013). Using a motor imagery questionnaire to estimate the performance of a brain-computer interface based on object oriented motor imagery. *Clinical Neurophysiology*, 124(8), 1776-1784.
- [20] Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., Heetderks, W. J., McFarland, D. J., Peckham, P. H., Schalk, G., Donchin, E., Quatrano, L. A., Robinson, C. J., & Vaughan, T. M. (2000). Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(2), 164–173. <https://doi.org/10.1109/TRE.2000.847807>
- [21] Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. En *Clinical Neurophysiology* (Vol. 113, Número 6, pp. 767–791). [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)
- [22] Wolpaw, J. R., Millan, J. D. R., & Ramsey, N. F. (2020). Brain-computer interfaces: Definitions and principles. *Handbook of clinical neurology*, 168, 15-23.
- [23] Zhang, W., Tan, C., Sun, F., Wu, H., & Zhang, B. (2018). A Review of EEG-Based Brain-Computer Interface Systems

Design. *Brain Science Advances*, 4(2), 156–167.  
<https://doi.org/10.26599/bsa.2018.9050010>

[24] Zhang, J. (2019). *Cognitive Functions of the Brain: Perception, Attention and Memory*.  
<http://arxiv.org/abs/1907.02863>

[25] Zuo C., Jin, J., Yin, E., Saab, R., Miao, Y., Wang, X., ... & Cichocki, A. (2020). Novel hybrid brain–computer interface system based on motor imagery and P300. *Cognitive Neurodynamics*, 14, 253-265.



© 2024 by the authors. This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.