



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Análisis y caracterización de la función cerebral por medio de Pupíloetría, estímulos flash LED y Electroencefalografía

Miguel S. Gómez Díaz, Francisco J. Casillas Rodríguez

**Universidad de Guadalajara
Jalisco, México**

David Asael Gutiérrez Hernández

**Tecnológico Nacional de México,
Campus León
Guanajuato, México**

Resumen

En conjunto con la pupíloetría se plantea el desarrollo del proyecto, orientado a conocer el comportamiento de las señales eléctricas cerebrales, relacionadas con Patrones Lumínicos (PL) generados por un pupílometro digital de bajo costo. Métodos de análisis como el cálculo de la Densidad Espectral de Potencia (DEP), potencias relativas de delta, theta, alfa y beta, Potenciales Evocados Visuales (PEV), técnicas de extracción de características por ventana móvil, y el uso de Técnicas de Aprendizaje Automático (TAU) han sido utilizados. El experimento se aplicó a 17 participantes "sanos" de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECIJG) en Bogotá, Colombia. Dentro de los resultados destacados se encontraron diferencias significativas para el análisis de la actividad inducida entre cada uno de los tipos de PL que se usaron para la estimulación. Para la actividad evocada se pudieron observar resultados similares a los conocidos para el reconocimiento de Potenciales Evocados Visuales (PEV). Y para el uso de Técnicas de Aprendizaje Automático se tuvo un porcentaje de clasificación del 88.3% en la clasificación de 3 clases que hacían referencia al PL que se aplicó, esto puede ser considerado como estados de la función cerebral.

Palabras clave: pupíloetría; EEG; aprendizaje automático

Abstract

In conjunction with pupillometry, the development of the project is proposed, aimed at knowing the behavior of brain electrical signals, related to Light Patterns (PL) generated by a low-cost digital

pupillometer. Analysis methods such as the calculation of Power Spectral Density, relative powers of delta, theta, alpha and beta, Visual Evoked Potentials (VEP), feature extraction techniques by moving window, and the use of Machine Learning Techniques have been used. The experiment was applied to 17 “healthy” participants from the Julio Garavito Colombian School of Engineering in Bogotá, Colombia. Among the outstanding results, significant differences were found for the analysis of the induced activity between each of the types of PL that were used for stimulation. For the evoked activity, results similar to those known for the recognition of Visual Evoked Potentials (VEP) could be observed. And for the use of Automatic Learning Techniques, there was a classification percentage of 88.3% in the classification of 3 classes that referred to the PL that was applied, this can be considered as states of brain function.

Keywords: pupillometry; EEG; machine learning

1. Introducción

La pupila regula la entrada de luz al ojo; a través de la pupilometría se puede medir el tamaño de la pupila y su comportamiento. La pupilometría también ha permitido realizar mediciones de niveles de glucosa, evitando el uso de mecanismos invasivos (Gutiérrez Hernández et al., 2016, Gutiérrez Hernández et al., 2017). En este trabajo se analiza de manera cuantitativa la actividad eléctrica del cerebro asociada a estímulos lumínicos, caracterizar la actividad cerebral con la intención a futuro se puedan buscar posibles relaciones entre dicha actividad y algún estado fisiológico-patológico de los participantes. Las herramientas de ayuda diagnóstica actuales se apoyan en los diferentes avances a nivel de Hardware (nuevos sensores, mejores sistemas de acoplamiento de señal, equipos más sofisticados para la digitalización de señales, entre otros) y a nivel software (nuevos modelos estadísticos-matemáticos como redes neuronales convolucionales, máquinas de soporte vectorial, algoritmos de agrupamiento, entre otros). El presente trabajo de investigación basa su desarrollo en el análisis de señales electrofisiológicas EEG, con el propósito de caracterizar su comportamiento y poder identificar estados (U. Orhan, 2011) o casos a partir de la actividad eléctrica producida por medio estímulos lumínicos.

2. Métodos y materiales

Materiales

Para la estimulación pupilar se utilizó un **pupilómetro digital**, el cual emite patrones lumínicos y monitorea la respuesta pupilar a través de una cámara web de 2 megapíxeles, un arreglo de cuatro diodos led infrarrojos y 4 Diodos Emisores de Luz (LED) (Rojo, verde, azul y blanco) montados en una estructura 3D (Gutiérrez et al., 2013). En la figura 1, se muestra el pupilómetro y su ubicación frente al ojo. El pupilómetro cuenta una luminancia promedio de 34.5 cd/m² (entre 30.14 - 38.75 cd/m²) al emitir un pulso de luz rojo y un porcentaje del contraste de Michaelson de 88.24%, lo que lo hace compatible con los estándares de estimulación para PEV (J. V. Odom et al., 2016).



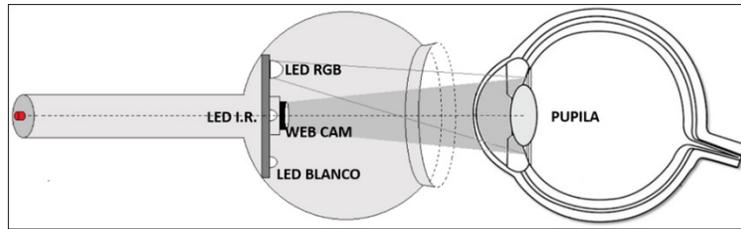


Fig. 1. Pupíloetrómetro digital

Los momentos importantes de la **Respuesta Pupilar a la Luz (PLR)** a destacar dentro de la exploración neurológica por medio del pupíloetrómetro son los siguiente: Línea base, permite conocer el diámetro de la pupila en estado neutro, es decir, con la ausencia de luz, la cabina del pupíloetrómetro permite aislar las fuentes de luz externas. El estímulo, es el tiempo donde la fuente de luz del pupíloetrómetro se presenta en secuencias programadas y en este se puede observar el proceso de constricción pupilar, este momento es interesante para medir la latencia, velocidad, el impacto que evoca la fuente de luz. Y la recuperación, este momento indica la forma en que la pupila nuevamente se adapta a la oscuridad, tratando de recuperar su diámetro inicial. En la figura 2 se pueden observar los momentos grabados por el pupíloetrómetro.

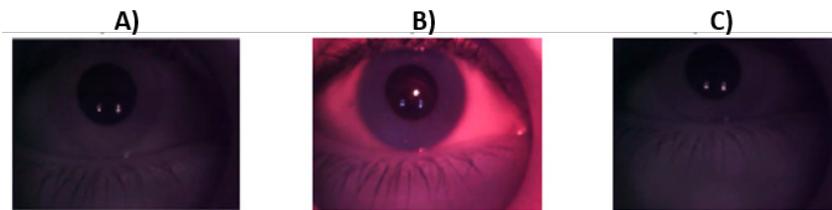


Fig. 2. Momentos

Electroencefalograma (EEG)

Se utilizó g.NAutilus g.LADYBird, que es un sistema de adquisición EEG inalámbrico. Tiene 32 sensores activos, con una resolución de 24 bits y una frecuencia de muestreo de 500 Hz utilizada para este experimento. Adicionalmente cuenta con entradas digitales para señales de sincronización y conexión a otros sistemas. A través de una interfaz de adquisición desarrollada en Matlab se registraron los siguientes electrodos, en una conexión de un solo extremo (montaje referencial) para los participantes: FP1, FP2, AF3, AF4, F7, FZ, F8, FC5, FC1, FC2, FC6, T7, C3, CZ, C4, T8, P7, PZ, P8, PO3 Y PO4.

Configuración de la comunicación entre el pupíloetrómetro y EEG

Se utilizaron los puertos digitales de ambos dispositivos, con la intención de generar pulsos de sincronía que capturen el momento exacto en que se producen los PL. En la figura 3, se muestra el proceso de envío, comunicación y adquisición de datos:

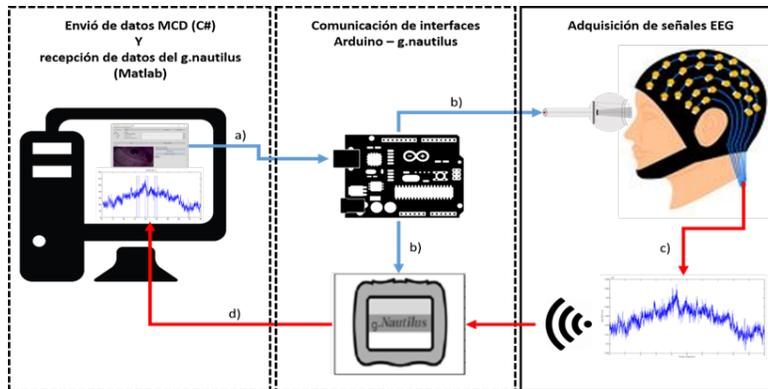


Fig. 3. Diagrama de comunicación en la adquisición de datos

a) El Módulo de Captura de Datos (MCD) envía los pulsos de luz correspondientes al pupilómetro a través del puerto COM del Arduino UNO. **b)** Arduino UNO envía los pulsos eléctricos correspondientes al LED rojo del pupilómetro y este estimula la pupila. **c)** g.Nautilus realiza la adquisición de señales EEG y las envía a través del protocolo wifi al receptor del dispositivo conectado al computador. **d)** El receptor de señales EEG envía los registros de EEG, pulsos de sincronía por medio de una interfaz desarrollada en Matlab. Los patrones lumínicos son series de eventos secuenciados por el MCD, constan de periodos de luz activa y la ausencia de esta. Cada evento de estimulación emitido por el pupilómetro es identificado por el EEG, es decir, se conoce en que segmento de tiempo se ha llevado cada evento, a esto se le conoce como pulso de sincronía.

Procesamiento de las señales EEG y análisis

Para cada patrón de estimulación se ha aplicado un tipo de análisis, en la tabla 1, se presentan los protocolos y los intervalos de estimulación, descanso, tiempo total y tipo de análisis. Previo a la etapa de análisis todos los protocolos cuentan con una línea base inicial de 3 segundos previo a la aparición del estímulo con la intención de estabilizar el diámetro pupilar al entorno controlado de luz por medio de la cabina oscura del pupilómetro.

	Led encendido (s)	Led Apagado (s)	Presentaciones	Tiempo total (s)	Análisis
a)	1	3	1	8	Inducida
b)	10	490	200	96	Evocada
c)	1	3	3	16	Inducida
d)	250	250	200	96	Evocada
e)	0	0	0	60	Línea base

Tabla. 1. Intervalos de duración de PL

La **actividad inducida** analiza señales bloqueadas o definidas en el tiempo, en este caso se estudia la señal durante el tiempo que permanezca el pupilómetro en etapa de estimulación con respecto a una línea base inicial en estado de reposo. Para este análisis se utilizó el cálculo de la Densidad Espectral de Potencia (DEP) propuesto por Welch. El método consiste en dividir los datos de series de tiempo en segmentos (estos pueden estar superpuestos o traslapados), calcula un



periodograma (es una estimación de la DEP) modificado de cada segmento y luego se promedian las estimaciones de la DEP. Este método reduce el ruido de los espectros de potencia estimados a cambio de reducir la resolución de la frecuencia.

La actividad evocada se encuentra sincronizada con el estímulo, tal que los picos y las caídas del estímulo aplicado ocurren en tiempos fijos (latencias) después de los estímulos. En estudios clínicos de potenciales evocados visuales de rutina se identifican normalmente 3 picos con variación sucesiva de la polaridad negativa – positiva – negativa respectivamente, con latencias de los picos de 70 ms, 100 ms y 140 ms. Tal como se muestra en la figura 4.

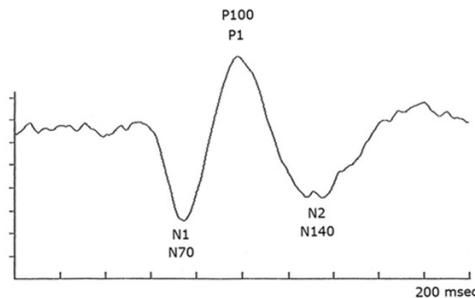


Fig. 4. Forma de PEV típico

La clasificación de la actividad cerebral por medio de TAU se propone para clasificar la función cerebral que se produce de acuerdo al tipo de estímulo aplicado. Posteriormente a la adquisición de las señales de los participantes, se ajusta el tiempo de análisis y las señales son cortadas en los intervalos conocidos, se realiza una reestructuración de las señales obtenidas a través de la concatenación de los canales de cada participante por tipo PL. Para la comparación de TAU para la identificación del protocolo de iluminación se utilizó la aplicación Classification-Learner de Matlab. Donde se ejecutaron todos los algoritmos de clasificación de la misma. Esto con el propósito de identificar la mejor técnica que favorezca a la mejor separación de las clases y modificar en un estudio posterior los parámetros del método con más porcentaje de clasificación. Una vez recortados los segmentos de señal se procede a etiquetar cada base de datos para crear un conjunto de patrones y realizar la clasificación de los mismos. ClassificationLeraner cuenta con distintos tipos de clasificadores. Las características para representar a cada sujeto fueron las siguientes y se ordenaron de la siguiente forma para obtener una matriz de características por cada individuo: Media, Varianza, Asimetría, Curtosis, Actividad de Hjörth, Movilidad Hjörth, Complejidad de Hjörth, Dimensión fractal de Higuchi, media cuadrática, Potencia relativa (PR) de Delta, PR Tetha, PR Alpha, y la PR Beta.

Procedimiento y protocolo

Se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación e Innovación Biomédica (IIBM - I1-309) ubicado en el piso 3 del edificio de laboratorios de ingeniería de la ECIJG, el estudio fue validado por el comité de ética de la ECIJG (acta 004-2018). Este experimento tuvo una duración aproximada de 1 hora y tuvo tres etapas: 1. Preparación, 2. Adquisición y estimulación y 3. Finalización

- **Preparación:** Se colocan los dispositivos EEG y pupilómetro. El pupilómetro (A) es ubicado en el ojo dominante mientras que el otro ojo es ocluido por medio de un parche. (B) El microcontrolador permite emitir las secuencias de estimulación lumínicas y (C) es el sistema de visualización de las señales e imágenes (figura 5).

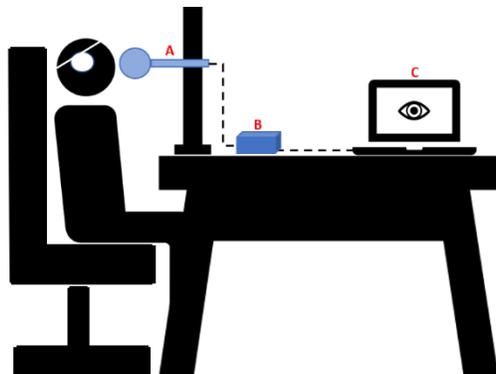


Fig. 5. Ilustración de montaje experimental (equipo-sujeto)

- **Adquisición y estimulación:** El participante se encuentra en una posición cómoda y se procede a aplicar los siguientes pasos de adquisición: (Tabla 2)

Pasos	Tarea	Tiempo de ejecución (minutos)
1	Línea base ojos abiertos	1
2	Oclusión de ojo dominante	3
3	Línea base con pupilómetro (sin estimulación)	1
4	Descanso	1
5	Estímulo a (1era vez)	1
6	Descanso	1
7	Estímulo b (1era vez)	2
9	Descanso	1
10	Estímulo c (1era vez)	1
11	Descanso	1
12	Estímulo d (1era vez)	2
13	Descanso	1
13	Línea base intermedia con pupilómetro (sin estimulación).	1
14	Repetir pasos 4-13	12
15	Línea base final con pupilómetro (sin estimulación).	1
Tiempo aproximado de ejecución		30

Tabla. 2. Intervalos de duración de PL

En la figura 6, se muestra el montaje experimental con cada uno de los elementos de adquisición de datos.

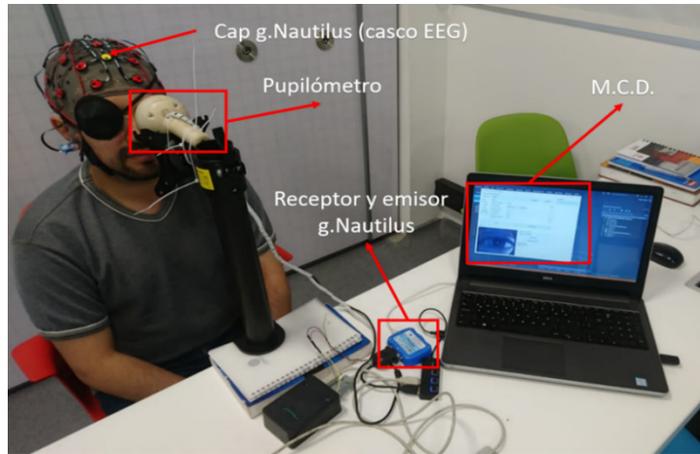


Fig. 6. Montaje de equipo para el experimento.

- **Finalización:** Se retiran los electrodos del EEG y el pupilómetro del participante.

3. Resultados

Análisis de la actividad inducida

Se calculó la DEP, de las líneas base, y los estímulos para observar si existían diferencias en la potencia de la señal con respecto al progreso del experimento por cada canal de EEG. La DEP fue calculada por el método de Welch, teniendo en cuenta los siguientes valores para los parámetros que son necesarios para implementar el método (Tabla 3).

Tamaño de ventana	Porcentaje de traslape	Número de puntos para calcular FFT	Frecuencia de muestreo
2 segundos	50%	1000 puntos	500 Hz

Tabla 3. Parámetros para la implementación del método Welch

Estos valores fueron utilizados para todos los sujetos y en ningún momento hubo variación de ellos.

Participante 1

En la figura 7. se muestra A) la DEP de las líneas base del canal P8 del sujeto 1, donde se ven diferencias visuales significativas entre los valores de potencia producida en las líneas base. Gráficamente se puede ver que existe un aumento en la potencia del canal P8, se puede decir que existe esta diferencia visible ya que el canal se encuentra geométricamente muy cercano al canal Oz perteneciente al lóbulo occipital. Este comportamiento fue similar en el canal PO4 B), con variaciones entre la LB final y LB intermedia. En este canal no se pudo observar una separación espacial tan limpia como la anterior, sin embargo, se nota el aumento en la potencia conforme al orden en que van siendo aplicados los patrones lumínicos en el participante.

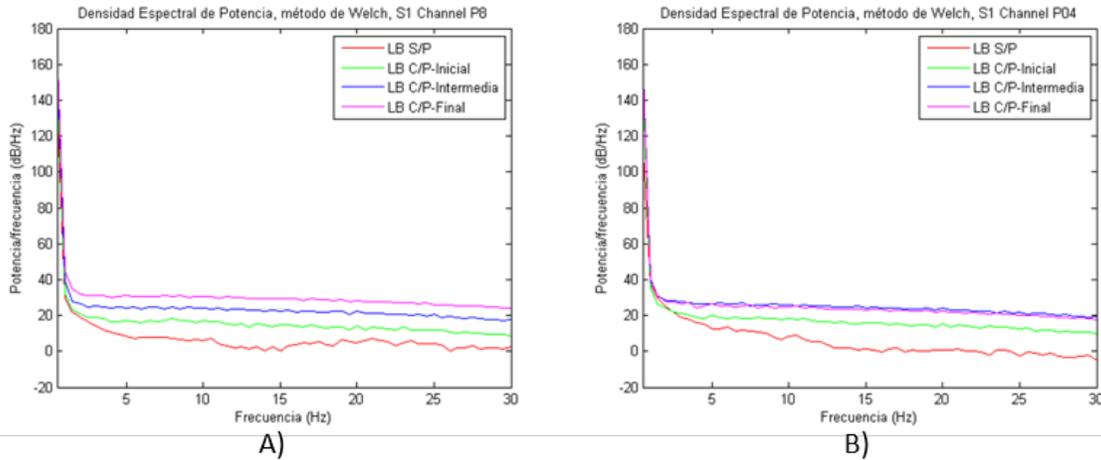


Fig. 7. Densidad espectral de potencia, Participante 1 **A)** Canal P8 **B)** Canal PO4

El análisis de la **actividad inducida** muestra un panorama general en el cambio de la actividad cerebral conforme al proceso de estimulación y los estímulos aplicados a los sujetos de prueba. Se puede observar que en la mayoría (52%) de los sujetos existieron diferencias significativas en los porcentajes de alfa en la mayoría de los canales, con respecto al inicio de la prueba en la medición de la línea base inicial sin pupilómetro y la línea base final con pupilómetro.

Análisis de la actividad evocada

Se puede observar para el sujeto 10, los PVE's se alcanzan a percibir de una manera clara, para el primer pico negativo de N70 en los 4 casos ocurre en un valor aproximado de 0.8 ms, lo cual es válido ya que el siguiente componente P-100 puede aparecer en subida desde los 0.80 ms (T. A. Pasek & J. M. Huber, 2012). En términos generales los PVE's de este sujeto permanecen dentro de los rangos sugeridos por la literatura. En la figura 8, se muestran los resultados del sujeto 10 donde para los valores de ocurrencia en las latencias se tiene un comportamiento similar al del sujeto anterior.

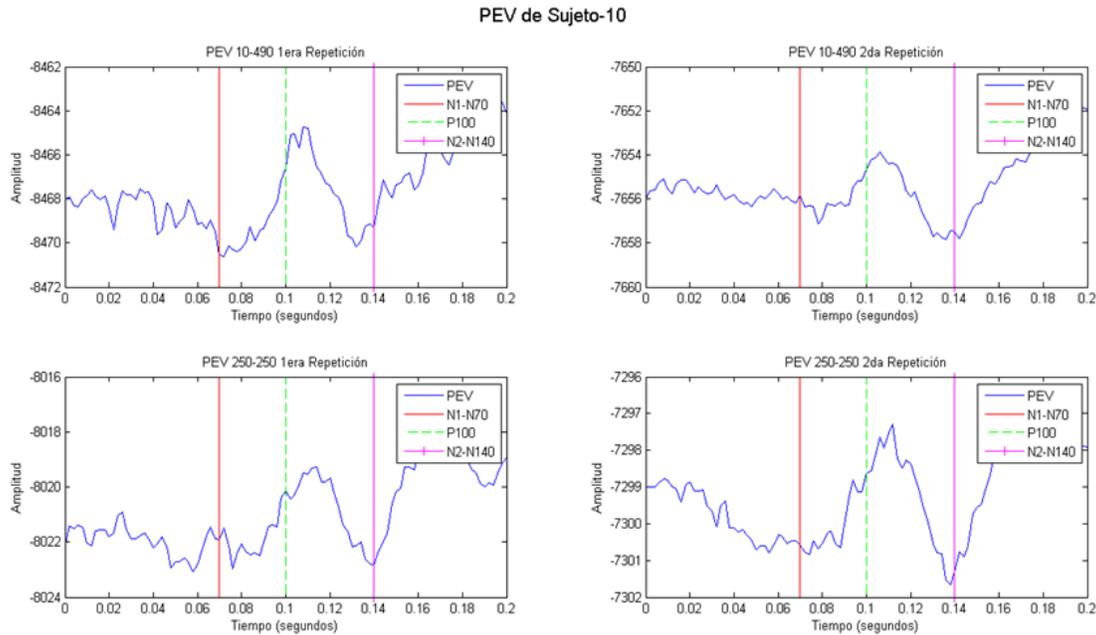


Fig. 8. Potenciales Evocados visuales

El análisis de la **actividad evocada** reside en el conocimiento de los momentos exactos del estímulo, se propone al pupilómetro como un equipo nuevo para la estimulación de PEV's, ya que en conjunto con MCD se tiene la opción de generar múltiples configuraciones para nuevos estudios de la actividad pupilar relacionada con la actividad eléctrica cerebral. Por medio de este dispositivo estimulador fue posible visualizar la respuesta del canal PZ, encontrando que para el 68.75% de las veces que se realizó el análisis, por lo menos en un caso de las 4 repeticiones de los PL para PEV, el participante mostró comportamientos similares a protocolos de estimulación PEV. Lo anterior crea nuevas áreas de oportunidad en el área de análisis de PEV a través de dispositivos de bajo costo y de uso portátil.

Implementación de TAU

Para la implementación de este tipo de análisis se eligen tres conjuntos de las señales previamente adquiridas, estas corresponden a la LB inicial y los protocolos de iluminación a y c. En la tabla 4, se pueden ver los resultados de los algoritmos de clasificación de ClassificationLearner. En total se ejecutaron 21 algoritmos de clasificación con una media en el porcentaje de clasificación del 64.3%, 164,556.64 obs/segundo y un tiempo de entrenamiento de 13,624.9661 segundos (3.7 horas). Existe un 38% de los algoritmos que rebasan el 70% del resultado de clasificación, su velocidad de predicción es baja comparada con la de algoritmos que tienen menor porcentaje de clasificación y el tiempo promedio de entrenamiento es de 4 horas aproximadamente. Para este problema de clasificación el mejor algoritmo fue "Emsemble Bagged Trees", hablando de esta familia de los algoritmos de clasificación que utilizan la mezcla de técnicas para la mejor clasificación se encuentra este. Con un 88.3% este algoritmo tuvo el mejor porcentaje de clasificación.

Algoritmo de clasificación	P. de Clasificación	Vel. De Predicción (observaciones/segundo)	T. de Entrenamiento
Ensemble Bagged Trees	88.3	34,000	21108
KNN (Pesado)	77.5	1,300	20877
KNN	77.1	1,400	17270
KNN (Medio)	74.3	1,300	17385
KNN (Coseno)	73.8	1,400	1618
KNN(Cúbico)	73	46	21002
Maquina de Soporte Vectorial (kernel gaussiano)	71.2	1,600	16256
Tree	70.7	380,000	12 695
KNN (Cuarto)	69.3	1,300	17508
Ensemble Boosted Trees	66.9	110,000	21009
Ensemble RUSBoosted Trees	65.9	110,000	21117
Tree (Medio)	65.7	430,000	10 917
Maquina de Soporte Vectorial (kernel gaussiano medio)	64.3	1,500	16704
Tree (Cuarto)	61.4	1,200,000	13 561
Maquina de Soporte Vectorial (kernel cuadrático)	60.4	2,100	15711
Maquina de Soporte Vectorial (kernel gaussiano cuarto)	58.7	1,300	17153
Ensemble KNN	57.2	10,000	21046
Maquina de Soporte Vectorial (kernel Lineal)	56.8	270,000	12144
Ensemble discriminante lineal	56.3	56,000	21020
Discriminate lineal	55.6	420,000	14 27
Maquina de Soporte Vectorial (kernel cúbico)	40.1	47,000	20755
Discriminate cuadrático	32	540,000	14 811

Tabla. 4. Detalle de los porcentajes, velocidades de predicción y tiempo de entrenamiento para las TAU

4. Conclusiones y agradecimientos

El diseño e implementación del protocolo experimental enfocado en el análisis de señales EEG inducidas por estímulos lumínicos a través de un pupilómetro incidió positivamente en el desarrollo, con la comprensión, cumplimiento del propósito de este trabajo de investigación. Para estudios posteriores se recomienda la utilización de equipos de EEG donde se pueda variar la distancia de los electrodos manualmente ya que a pesar de la veracidad de los datos que provee un equipo como g.Nautilus, es difícil adaptar el equipo a los diferentes tamaños de cabeza de los participantes. Así mismo se inició un proceso de colaboración entre la UDG y el TECNM en México con la realización de estancias de investigación en la ECIJG. Nuestros agradecimientos al Dr. Juan Manuel López López y participantes voluntarios de la escuela. A CONACYT, el Centro Universitario de los Lagos y al ITLeón por sus valiosos recursos en materia de preparación y apoyos múltiples.

5. Referencias

Artículos de revistas

- David Asael Gutiérrez Hernández, Víctor Manuel Zamudio Rodríguez, María Trinidad Galván González, José Gerardo Cárdenas Solís, Sergio Uribe López, Carlos Lino Ramírez (2016). Statistical and Computational Study of the Photomotor Reflex in Diabetic Patients for Recognition of Specific Characteristics. IOS Press, Ambient Intelligence and Smart Environments p.p. 396-404,
- Gutierrez Hernández, D. A., Aranda Ruiz, J. A., & Parra, M. J. (2013). Digital Measurement of the Human Pupil's Dynamics under Light Stimulation for Medical Applications and Research. American Journal of Biomedical Engineering, 143-147.
- T. A. Pasek and J. M. Huber. (2012) "Hospitalized infants who hurt: a sweet solution with oral sucrose.," *Crit. Care Nurse*, vol. 32, no. 1, pp. 61–9.
- U. Orhan, M. Hekim, and M. Ozer, "EEG signals classification using the K-means clustering and a multilayer perceptron neural network model," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 10, pp. 13475–13481, 2011.

Libros

- J. V. Odom et al., "ISCEV standard for clinical visual evoked potentials: (2016 update)," Doc. Ophthalmol., vol. 133, no. 1, 2016.

Memorias de congresos

- David Asael Gutiérrez Hernández, Víctor Manuel Zamudio Rodríguez, María Trinidad Galván González, José Gerardo Cárdenas Solís, Sergio Uribe López, Carlos Lino Ramírez (2017). Analysis of pupillary response after a stimulus of light to generate characteristic groups. International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP). p.p. 1-6.

Fuentes electrónicas

- University of Stanford. (2011). Spectral Audio Signal Processing. Consultado el 3 de junio de 2022 en <http://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/>

Sobre los autores

- **Miguel Salvador Gómez Díaz:** Ingeniero en Sistemas Computacionales, Máster en Ciencias de la Computación, Candidato a doctor en Ciencia y Tecnología (optoelectrónica). miguels.gomez.diaz@gmail.com
- **Francisco Javier Casillas Rodríguez:** Ingeniero en electrónica y Doctor en ciencias ópticas y miembro del Sistema Nacional de Investigadores en México, nivel 1. francisco.casillas@academicos.udg.mx
- **David Asael Gutiérrez Hernández:** Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones, Doctor en física y miembro del Sistema Nacional de Investigadores en México, nivel 1. david.gutierrez@leon.tecnm.mx

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

