



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES – ITBA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

Análisis del rendimiento en el algoritmo de machine learning que emula ondas ERP P300 usado en un experimento con interfaces cerebro computador en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica).

AUTOR: Chavez Montaña, Alexander. (Leg. Nº 506218)

TUTOR: Ramele, Rodrigo

Trabajo final presentado para la obtención del título de especialista en ciencia de datos.

BUENOS AIRES
Segundo cuatrimestre, 2023

A mis dos emes: Macu y Marco.

Tabla de contenido

1. Introducción	... 5
2. Estado del arte	... 6
3. Definición del problema	... 8
4. Justificación del estudio	... 9
5. Alcances del trabajo y limitaciones	... 10
6. Hipótesis	... 11
7. Objetivos	... 12
8. Metodologías a usar	... 13
Técnicas	
Herramientas	
9. Análisis exploratorio de datos	... 15
9.1 La enfermedad.	
9.2 El P300 Speller y el oddball paradigm (paradigma del bicho raro)	
9.3 ¿Qué es un ERP (Event Related Potential)?	
9.4 Los datasets y las señales	
9.4.1 El ERPTemplate	
9.4.2 P300-Dataset	
9.4.2.1 Estructura	
10. Testeo del algoritmo	... 19
10.1 Variación en el tiempo	
10.2 Variaciones en amplitud	
11. Resultados	... 20
12. Referencias-Bibliografía	... 22

Abstract

Este trabajo complementa la investigación previa realizada en los experimentos descritos en el artículo *EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces* [3] en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica): parte del resultado de dicho trabajo fue la de investigar algoritmos de machine learning que emulan ondas ERP P300: tomamos ese trabajo como punto de partida para realizar un análisis exploratorio tanto del objeto de estudio como de las herramientas computacionales disponibles, para luego realizar un abanico de pruebas que arrojen distinta *performance* y nos permitan proponer mejoras en la preconfiguración de dicho algoritmo.

1. Introducción

La electroencefalografía es una de las herramientas clínicas que, a lo largo de las últimas décadas, se ha convertido en uno de los principales métodos para obtener imágenes en tiempo real del comportamiento cerebral de manera no invasiva, portátil y móvil más usado en el ambiente médico [1]. Dentro de la electroencefalografía tenemos un conjunto de ondas con distintas características que varían en sus propiedades físicas como amplitud o frecuencia, como también en el origen y la ubicación en las distintas zonas del cerebro. La onda P300 se obtiene de ubicar un canal en el lóbulo parietal y su comportamiento es reactivo debido a estímulos esperados pero infrecuentes relacionados con actos cognitivos.

La electroencefalografía, sin embargo, está expuesta a alteraciones no deseadas en sus resultados, ya que, por más controlado, preciso y consistente que sea el ambiente donde se realiza el experimento o la toma de muestra, estaremos sujetos a factores fuera de nuestro control. Esta problemática se suele afrontar generando ambientes de pruebas donde se pueda recrear la situación con la mayor fidelidad posible. Los experimentos pasados y éste trabajo integrador se cimentan en la base de datasets sintéticos, artificiales, con los que se simulan respuestas de ondas ERP P300 a partir de electroencefalogramas reales, con resultados previamente conocidos, a fin de trabajar en la performance de algoritmos que logren resultados con mejoras en el tiempo.

Los métodos y los procedimientos cuantitativos para automatizar la decodificación de ondas EEG como la P300 se basa en EEG no invasivo [2]. Sin embargo, los métodos de la decodificación de señales, basadas en detección de formas de onda, y además con algoritmos de machine learning son relativamente escasos.

Se pretende entonces, a través de este trabajo, darle continuidad a la investigación previa realizada en los experimentos descritos en el artículo EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces [3] en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica): en éste trabajo se realiza un análisis exploratorio de electroencefalogramas llamados pasivos; pacientes que participaron del experimento pero desconociendo las reglas de interacción con el *speller*, explicado más adelante en profundidad. En una etapa posterior se “inyectan” potenciales P300 en los lugares donde sabemos de antemano suceden los eventos, y realizamos modificaciones en las propiedades de las ondas que arrojan distinta *performance* para permitirnos obtener mejoras en la preconfiguración del algoritmo.

2. Estado del arte

Los experimentos descritos en el artículo *EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces* [3] sirvieron como base para este proyecto. Si bien es necesario revisar todo el artículo en mención, damos un alcance y limitaciones de este trabajo específicamente capítulo 5; el estado del arte es entonces, el experimento descrito en el artículo.

En el capítulo 3 del artículo; *Materiales y Métodos*, específicamente el punto 3.6; *Protocolo experimental*, dan la información necesaria para enmarcar los detalles del experimento cuyo objetivo central es el de evaluar el rendimiento de los algoritmos que reconocen la forma de onda P300, obtenida después de promediar segmentos de señal.

El rendimiento es evaluado mediante el procesamiento de un conjunto de datos pseudo-reales en dos modalidades, una llamada *pasiva* y otra *activa*, en alusión a la información de la que los pacientes disponen al momento del experimento. ***Las pruebas de rendimiento de este trabajo final integrador complementan las realizadas en la modalidad pasiva, al realizar modificaciones en latencia y amplitud del componente P300 de distintas magnitudes.*** Los experimentos se realizan mediante la evaluación fuera de línea de la identificación del personaje de una aplicación BCI Speller basada en Visual P300.

El paradigma BCI usado en los experimentos del artículo es el Farwell and Donchin P300 Speller[7]. En él, se usa un dispositivo de traducción de pensamientos donde envía comandos a una computadora en forma de letras seleccionadas, similar a escribir en un teclado virtual. El paradigma y el P300 Speller están descritos en el capítulo 9.2 de este trabajo.

La generación de flujo de EEG, es decir, la recopilación de la señal de los pacientes mencionada en el punto 3.6.1 del artículo, describe su estado de salud, la cantidad de pacientes, edad, de acuerdo a las normativas dictadas por la organización mundial de la salud. Incluso la disposición del paciente con respecto al dispositivo y las ubicaciones de los electrodos junto con la referencia, además de los dispositivos utilizados y la frecuencia de muestreo de la onda establecida en 250Hz.

Además, el protocolo experimental está compuesto por una cantidad de ensayos específica con el fin de deletrear una cantidad de palabras con letras predefinidas. Tienen secuencias para la matriz de 6 columnas por 6 filas con intervalos y pausas establecidos.

El preprocesamiento de la señal son las bases para la generación de las ondas que serán el objeto de estudio de este proyecto: se extraen, se filtran para eliminar ruido y también se descartan variaciones que estén por fuera de los parámetros esperados. El experimento dura alrededor de 1400s y el resultado final es una traza EEG con 4200 secciones marcadas donde 3500 de ellos están etiquetados como verdaderos y los 700 restantes como falsos. Esta información, al estar estandarizada, se almacena en formatos preestablecidos que pueden ser usados con la librería de python MNE descrita en el capítulo 8.

En cuanto a la participación de las personas en el experimento, a cuatro de los ocho se les indica que miren pasivamente la pantalla parpadeante sin centrarse en alguna letra en particular. No reciben ninguna información adicional en la pantalla. Ninguno de ellos tiene o tuvo alguna experiencia con un dispositivo BCI. Se entrega un cuestionario al final del

experimento con preguntas sobre cómo se sintió el participante durante el mismo, sin dar más detalles. Los cuatro participantes restantes realizan una tarea de ortografía en la que el monitor de la computadora resalta la letra objetivo, que es la que el sujeto necesita enfocar. A lo largo de la duración de la prueba, la letra objetivo actual se informa en la parte inferior de la pantalla.

La modalidad activa no será tomada en cuenta en este trabajo.

La modalidad pasiva consiste en que, para la mitad de los pacientes, se realiza un ensamblado de la traza EEG final: se toman plantillas reales de un ERP P300 de un conjunto de datos público y se superponen con el la traza EEG generado en dichos pacientes, los cuales fueron aquellos de los que no estaban informados con detalle del experimento.

3. Definición del problema

La continuidad de los proyectos de investigación es vital para obtener avances y mejoras en los resultados de los experimentos. Particularmente, las investigaciones en el tratamiento de señales electroencefalográficas con modelos de machine learning son un campo de estudio relativamente nuevo y con poca disponibilidad de datos, lo que genera obstáculos que impiden realizar experimentos comparativos a gran escala. En el caso de los experimentos descritos en el artículo *EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces* [3] en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica), su continuidad se encontraba pausada por razones ajenas a este documento. Es posible que, una vez reanudada estas investigaciones, se puedan dar saltos posteriores con experimentos comparativos a gran escala.

Dentro del artículo descrito, se usó un algoritmo de machine learning que ensambla electroencefalogramas de pacientes pasivos; pacientes que participaron del experimento desconociendo las reglas de interacción con los equipos, con potenciales P300 en los lugares donde sabemos de antemano que suceden los eventos evocados. Es necesario analizar y testear dicho algoritmo para que la investigación continúe.

El EDA (Análisis Exploratorio de Datos, por sus siglas en inglés) y modificaciones en las propiedades de las ondas obtenidas de ese ensamble nos permitirán ampliar el abanico de resultados que arrojan distinta *performance* en los resultados. Esto permitirá proponer mejoras en la preconfiguración del algoritmo.

4. Justificación del estudio

Se pretende darle continuidad al proyecto de investigación basados en los experimentos descritos en el artículo *EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces* [3] en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica).

Este trabajo final integrador permitirá ampliar la gama de resultados del algoritmo mencionado en este documento. La salida del algoritmo es una onda compuesta por un electroencefalograma y potenciales ERP. Se pretende, modificando las propiedades de dicha onda, ofrecer una gama de resultados que sirvan de complemento para evaluar y proponer mejoras en la *performance* del algoritmo. A priori, y debido a las particularidades del experimento, las nuevas ondas generadas tendrán efectos distintos. No se espera verificar si el comportamiento final sigue siendo el mismo.

5. Alcance del trabajo y limitaciones

Los experimentos realizados en el artículo *EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces* [3] en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica) permiten un sinnúmero de estudios y experimentos posteriores. El presente trabajo está enfocado únicamente al testeo del algoritmo destinado a generar una onda compuesta de manera sintética. Se espera que, con los resultados obtenidos al modificar deliberadamente las propiedades de la onda, podamos tener un espectro de respuestas que nos permitan proponer mejoras para trabajos posteriores.

6. Hipótesis

Se pretende mejorar el rendimiento del algoritmo mediante modificaciones en la latencia y en la amplitud en los experimentos descritos en el artículo *EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain*, específicamente en los EEGs de pacientes pasivos, donde la traza es modificada de manera artificial inyectándole ERP P300.

7. Objetivos

General.

Darle continuidad a los experimentos e investigaciones previas realizadas en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires ITBA, analizando y obteniendo resultados del rendimiento en el algoritmo de machine learning que emula ondas ERP P300 usado en un experimento con interfaces cerebro computador en pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica).

Específicos.

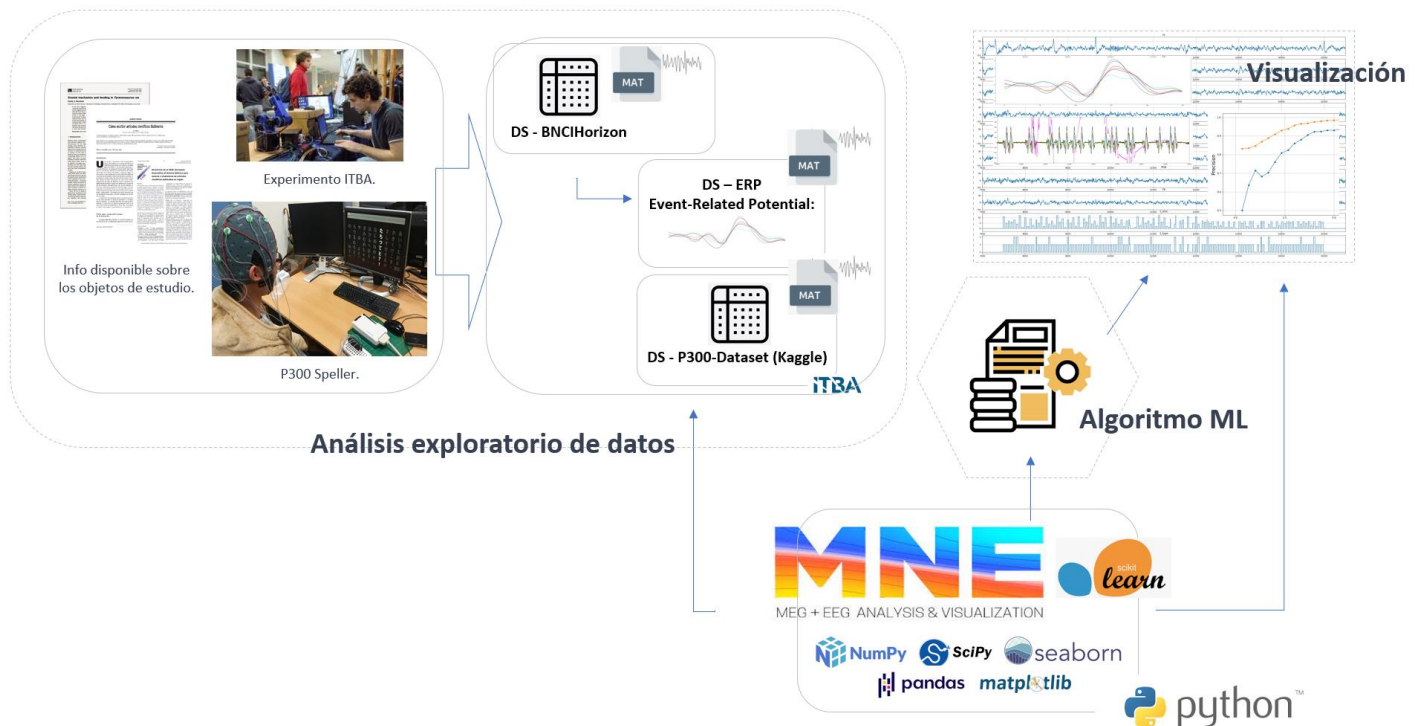
- Realizar un recorrido en la mayor cantidad de información disponible sobre los objetos de estudio: por un lado, el potencial de eventos evocado P300. Por otro, electroencefalogramas de pacientes sanos y pacientes con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica), y por último todo el conjunto de señales que se obtienen producto de una interfaz cerebro computador (BCI por sus siglas en inglés) vinculado a un instrumento de comunicación llamado P300 speller.
- Completar un análisis exploratorio de datos (EDA por sus siglas en inglés) con los datasets usados en los experimentos, a través de las herramientas computacionales disponibles: librerías de python especializadas en el manejo de datos y electroencefalografía.

[BNCI Horizon 2020: 8. Speller P300 with ALS patients \(008-2014\).](#)
[ITBA. P300 dataset of 8 healthy subjects.](#)

- Modificar, en distintos rangos, las propiedades de la onda compuesta de manera sintética y verificar el rendimiento del algoritmo [drugsignal.py](#)

Presentar todos los resultados obtenidos de las modificaciones en las propiedades de la onda compuesta y proponer mejoras en la preconfiguración del algoritmo.

8. Metodologías a usar



La estructura de este trabajo de integrador está pensada en función de los objetivos en el punto anterior. Primero se ofrecerá un análisis exploratorio de datos, no solamente de los datos en sí, sino también del contexto del experimento realizado el ITBA mencionado anteriormente. Este análisis exploratorio contendrá los datasets usados en los experimentos:

- [BNCH Horizon 2020: 8. Speller P300 with ALS patients \(008-2014\).](#)
- [ITBA. P300 dataset of 8 healthy subjects.](#)

En segundo lugar, habrá una descripción de la preparación de los datos para ser modelados, complementado con las herramientas computacionales disponibles: librerías de python especializadas en el manejo de datos y electroencefalografía.

En tercer lugar, se aplicará el modelo con las distintas variaciones en las propiedades de la onda compuesta de manera sintética. Y en cuarto y último lugar, se mostrarán los gráficos de los resultados obtenidos de las modificaciones más representativas en las propiedades de la onda compuesta, acompañados con una propuesta de mejoras en la preconfiguración del algoritmo.

Las herramientas y/o librerías usadas en este proyecto se pueden clasificar en dos; matemáticas y de electroencefalografía, todas concentradas en el lenguaje de programación Python. Los electroencefalogramas que fueron usados son *Matlab files*: archivos de extensión .mat en versiones con funcionalidades de almacenamiento de *arrays* de n dimensiones de hasta 100.000.000 elementos por arreglo y 2^{31} bytes por variable.

Dentro de las librerías matemáticas se encuentran **NumPy** para permitir el manejo de arreglos grandes y multidimensionales, **SciPy** con módulos para optimización , álgebra lineal , integración , interpolación , funciones especiales , FFT , procesamiento de señales e imágenes, entre otros, **Matplotlib** y **Seaborn** para visualización de los datos, y **Pandas** para la manipulación y análisis tanto de los archivos usados como fuentes de datos como para los distintos procesos intermedios en el análisis exploratorio. La librería destinada al machine learning es **Scikit-learn**: dispone de algoritmos de clasificación, regresión y agrupamiento , que incluyen support vector machine, random forest, k -means y DBSCAN. Tiene la versatilidad para interactuar con el resto de librerías mencionadas anteriormente.

Por otra parte se usó la librería **MNE**: permite la exploración, visualización y análisis de datos neurofisiológicos humanos: MEG, EEG, sEEG, ECoG, NIRS, entre otros.

9. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

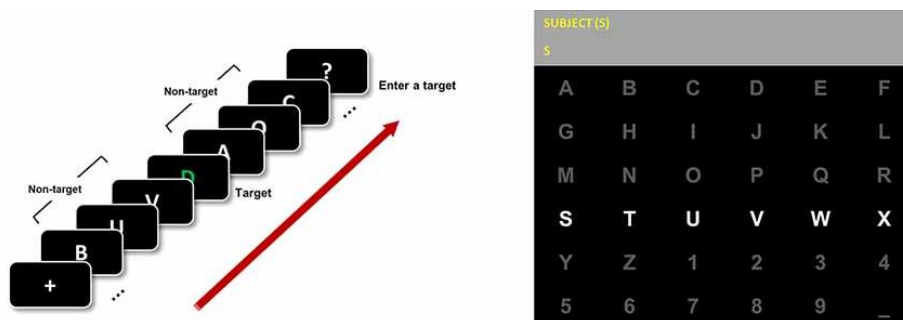
9.1 La enfermedad.

La esclerosis lateral amiotrófica o ELA, es una enfermedad degenerativa de las neuronas en el cerebro, el tronco cerebral y la médula espinal que controlan el movimiento de los músculos voluntarios. En la ELA, las células nerviosas (neuronas) motoras se desgastan o mueren y ya no pueden enviar mensajes a los músculos. Con el tiempo, esto lleva a debilitamiento muscular, espasmos e incapacidad para mover los brazos, las piernas y el cuerpo. La afección empeora lentamente. Cuando los músculos en la zona torácica dejan de trabajar, se vuelve difícil o imposible respirar.

En pacientes con ELA de etapas intermedias y avanzadas, es necesario el uso de dispositivos tecnológicos para la comunicación, como el P300 Speller.

9.2 El P300 Speller y el *oddball paradigm* (paradigma del bicho raro).

El P300 Speller es un dispositivo que conforma uno de las BCI (Brain Computer Interfaces) más usados en este tipo de aplicaciones. Su funcionamiento se acoge al paradigma del bicho raro: al usuario/paciente se le presenta una matriz de caracteres de 6 por 6 (ver figura) de manera intermitente, sucesiva y aleatoria. La tarea del usuario/paciente será enfocar su atención en los caracteres de una palabra prescrita por el investigador; es decir, un carácter a la vez. Cuando éstas contienen el carácter deseado (es decir, una fila particular y una columna determinada) se registra el potencial evocado P300 en el registro del EEC.

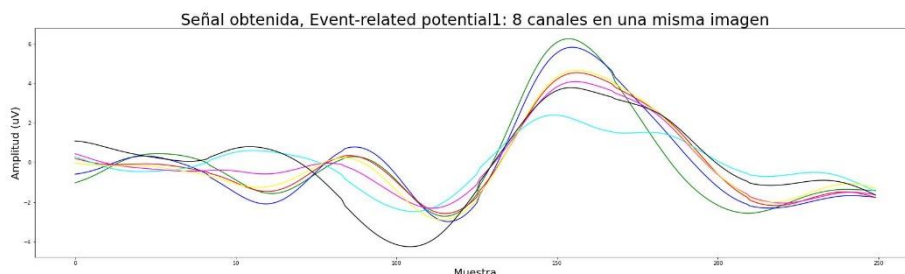


9.3 ¿Qué es un ERP (Event Related Potential)?

De forma paralela, es necesario explicar qué es una señal P300. La palabra *evocada* es clave: en medicina, se refiere a una actividad que puede ser detectada sincrónicamente después de una cantidad específica de tiempo después del inicio de un estímulo. Si estamos a la espera de que un computador nos dé una señal visual y nos la da, en nuestro cerebro ocurre un evento de este tipo. En términos médicos *es una actividad inducida*.

La onda P300 es entonces, una señal en el cerebro con amplitud positiva relacionada con eventos. Para esta investigación, los eventos serán aquellos provocados bajo el *paradigma del bicho raro*: El sujeto detecta un estímulo "objetivo" ocasional en un tren regular de estímulos estándar.

La onda P300 solo ocurre si el sujeto participa activamente en la tarea de detectar los objetivos. Su amplitud varía con la improbabilidad de los objetivos. Su latencia varía con la dificultad de discriminar el estímulo objetivo de los estímulos estándar. Una latencia pico típica cuando un sujeto adulto joven hace una discriminación simple es de 300 ms. En pacientes con capacidad cognitiva disminuida, el P300 es más pequeño y más tardío que en sujetos normales de la misma edad.



El ERP P300 Puede tener una duración de 400ms y su amplitud puede alcanzar los 10µV [4]. Se desconoce el origen intracerebral de la onda P300 y su papel en la cognición no se comprende con claridad. El P300 puede tener múltiples generadores intracerebrales, con el hipocampo y varias áreas de asociación de la neocorteza contribuyendo al potencial registrado en el cuero cabelludo. La onda P300 puede representar la transferencia de información a la conciencia, un proceso que involucra muchas regiones diferentes del cerebro [5].

9.4 Los datasets y las señales.

Ya mencionado anteriormente, los electroencefalogramas que fueron usados son *Matlab files*: archivos de extensión .mat en versiones con funcionalidades de almacenamiento de *arrays* de n dimensiones de hasta 100.000.000 elementos por arreglo y 2^{31} bytes por variable. El dataset de [BNCI Horizon](#), el 008-2014, contiene un grupo completo de potenciales evocados P300 registrados con la interfaz cerebro computador BCI2000[6]. De éste dataset obtendremos el *ERPTemplate*. El otro, el [P300-Dataset](#), está conformado por 8 EEGs de donde se extraerán algunos para realizar las pruebas del algoritmo. Todos los datasets están basados en el paradigma Farwell y Donchin [7] mencionado en el punto 9.2. Las señales usadas en este trabajo serán descritas a continuación:

9.4.1 El ERPTemplate

Si bien la descripción de qué es un ERP está en el punto 9.3, es importante mencionar que éste ERP se extrae artificialmente del dataset de [BNCI Horizon](#) (008-2014) para ser “inyectado” a una señal EEG del [P300-Dataset](#) con el fin de crear una señal sintética que nos permita realizar las modificaciones de latencia y amplitud en donde quede empalmado dicho ERP. El proceso está descrito en el punto 9.5. En el archivo [a analisis ERPTemplate.ipynb](#) hay un análisis más en detalle de la estructura y propiedades de la onda.

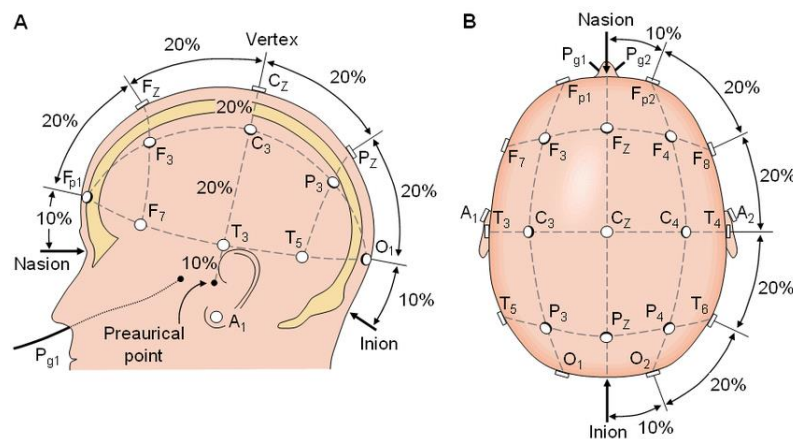
9.4.2 P300-Dataset

El [P300-Dataset](#) está conformado por 8 EEGs distribuidos en dos grupos según la modalidad del experimento: pasivos P300S01,02,03,06 y activos P300S04, 05, 07 y 08. Este trabajo se enfoca en los pacientes pasivos: las trazas de EEG donde se superponen las

pantillas ERP son de los pacientes que **no se enfocan en ninguna letra en particular**. Todo está allí, excepto el componente P300 ERP. Es por esto que se utiliza la información de marcadores para localizar los segmentos verdaderos donde se debería encontrar el P300, y esas ubicaciones de tiempo se utilizan para superponer la forma de onda de ERP extraída.

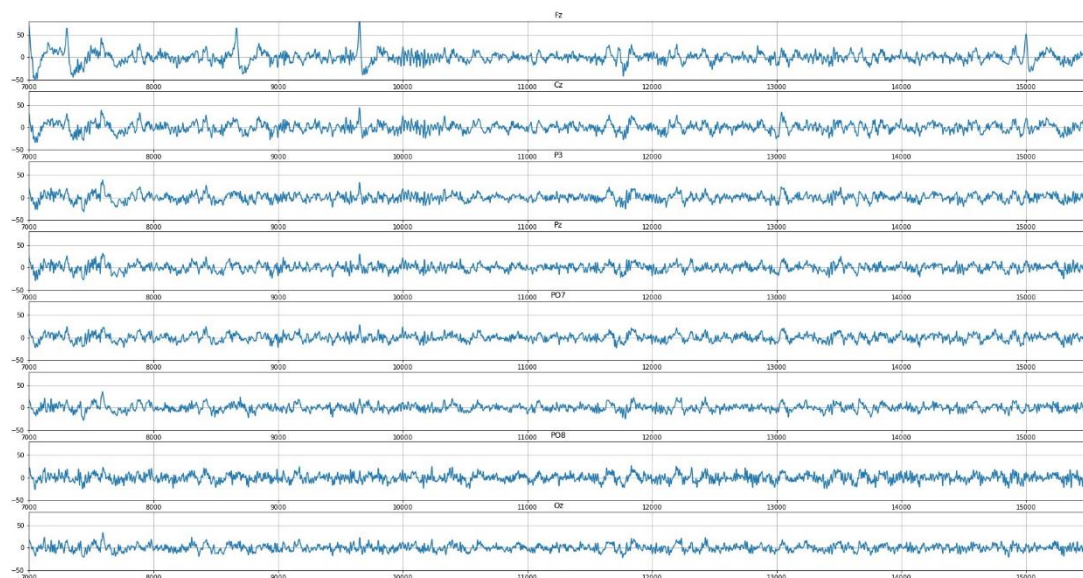
9.4.2.1 Estructura

El electroencefalograma obtenido se puede observar de dos maneras distintas: Una con cada una de sus componentes por separado, y la otra como una sola señal compuesta. Se utilizan en las ubicaciones Fz, Cz, Pz, Oz, P3, P4, PO7 y PO8 según el sistema internacional 10-20 para la colocación de los electrodos extracraneales.

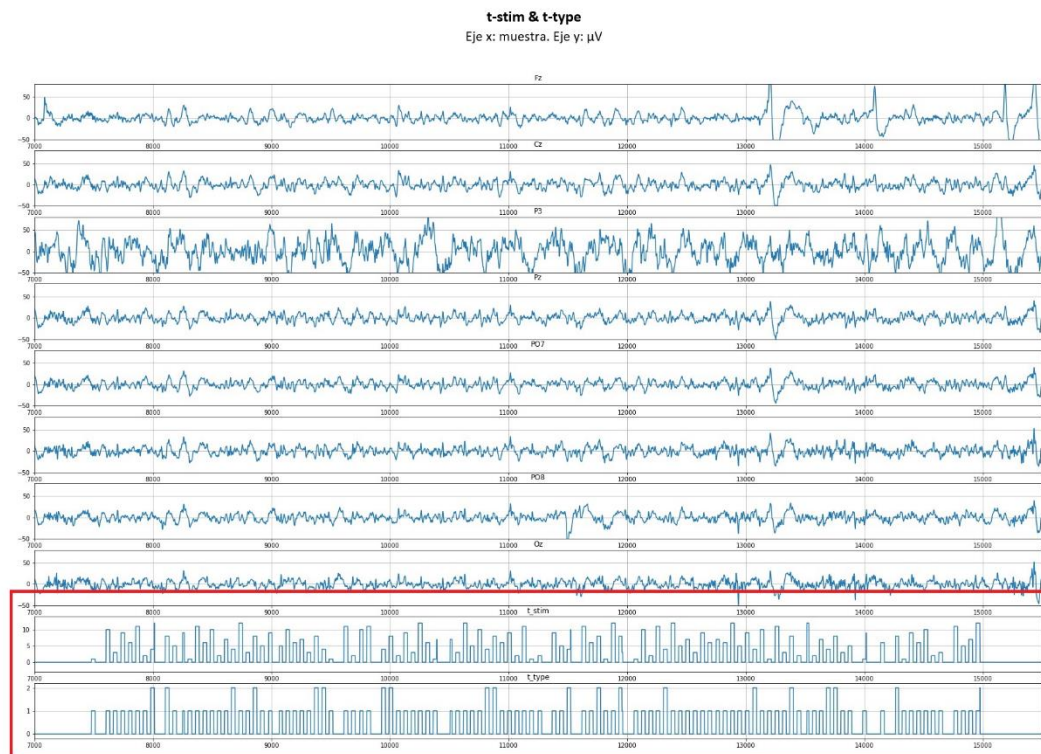


La referencia se establece en el lóbulo de la oreja derecha y la tierra está preestablecida como la posición AFz. La frecuencia de muestreo se establece en 250 Hz. El archivo [a analisis P300XX.ipynb](#) es el análisis de dichas señales.

Componentes de EEG, paciente P300S01: Fz, Cz, Pz, Oz, P3, P4, PO7 y PO8
Eje x: muestra. Eje y: μV



El archivo *.mat* que contiene las señales obtenidas no solamente contiene las señales del electroencefalograma, sino las marcas del experimento. Es con ellas que se identifican dónde se encuentran los tiempos en donde se han mostrado los caracteres.



10. Testeo del algoritmo

Una de las funciones principales de este algoritmo es DrugSignal ([drugsignal.py](#)), permite inyectar el erptemplate en las ubicaciones correctas basado en la información de t_flash.

```
def DrugSignal(signal, t_flash):  
    '''  
    Randomize amplitude and jitter  
    Find the right locations where this should be inserted in the stream  
    Insert the template mantaining the continuity and physiological meaning of the EEG  
    '''  
    for i in range(0,4200):  
        if (t_flash[i,3]==2):  
            signal[t_flash[i,0]-1:t_flash[i,0]+250-1,:] += (erptemplate1*3)  
    return signal
```

10.1 Variación en el tiempo.

Se generaron distintos vectores de distintos tamaños, con variaciones enteras y decimales, que permitieron genera desfase en el tiempo, cuya unidad es muestras.

10.2 Variaciones en amplitud.

Misma metodología que el punto 10.1: se realizaron pruebas con distintos vectores de distintos tamaños, que generaron modificaciones en la amplitud del orden de los micro Voltios.

Los tres códigos trabajados son:

[a Lag&DrugSignal v6 CAS01.ipynb](#),
[a Lag&DrugSignal v6 CAS02.ipynb](#) y
[a Lag&DrugSignal v6 CAS03.ipynb](#).

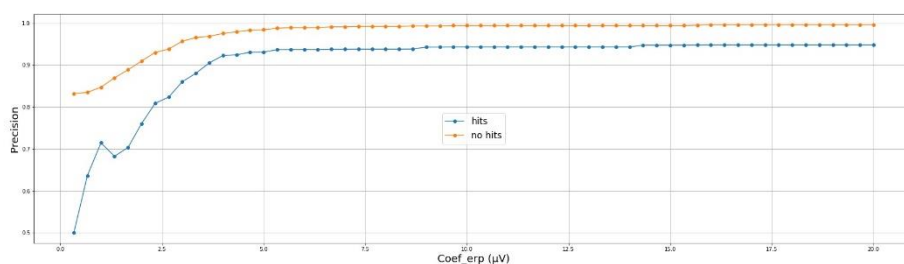
11. Resultados

A medida que se recorren los vectores mencionados, se ejecuta una regresión logística con las métricas de *precision*, *recall* y *f1_score*, tanto para los hit como para los nohit, que son las marcas donde se identifica si hay o no un disparo de P300.

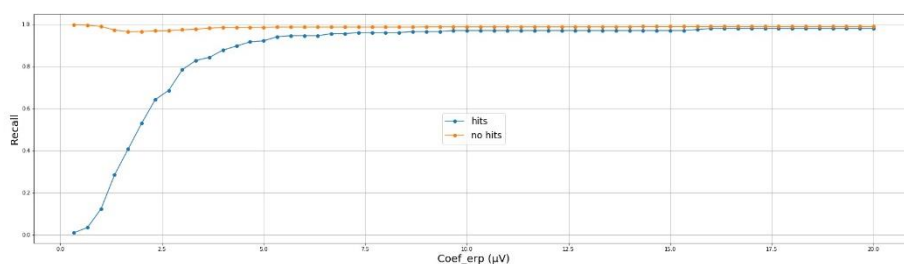
El experimento se realizó con las cuatro señales correspondientes a los pacientes denominados pasivos, arrojando el mismo comportamiento en las modificaciones propuestas en este trabajo.

Para alteraciones en amplitud, y tanto en disparos de hit como en nohit, existen intervalos en donde se mejoran los resultados y que el algoritmo se estabiliza aun cuando se pueda continuar realizando variaciones. Esto sucede porque la amplitud es una característica de la señal que, si bien puede aportar mejoras, los disparos de hit/nohit son fenómenos en la señal *t_flash* que suceden en el tiempo.

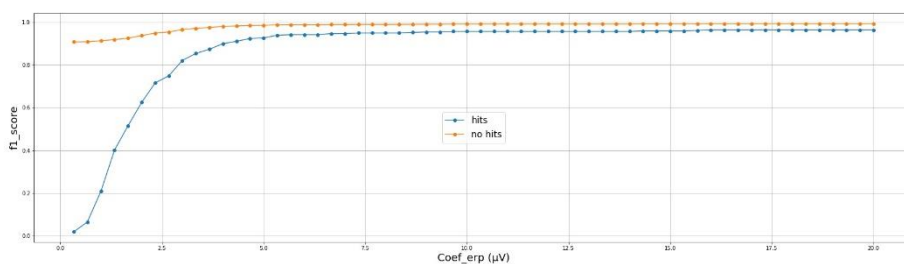
La calidad del modelo, dada por la métrica de precisión, presenta mejoras cuando se varía la amplitud, pero se estanca cuando supera un umbral. La amplitud no afecta los resultados después de los 5 μV .



La proporción de resultados positivos que fueron identificados como tal, también presenta el mismo comportamiento que la precisión, dando mejoras hasta los 5 μV para luego estancarse.

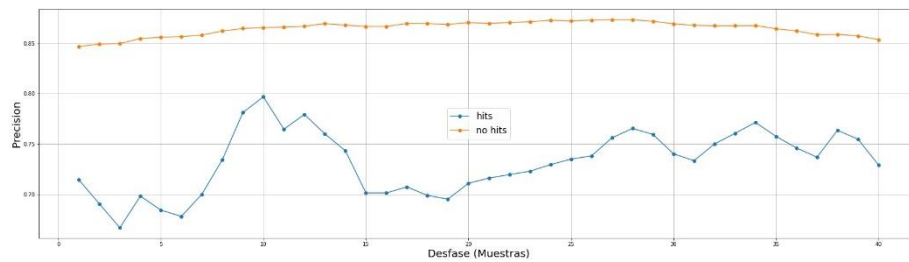


El *f1_score*, dado por la combinación de las dos anteriores, confirma el resultado obtenido.

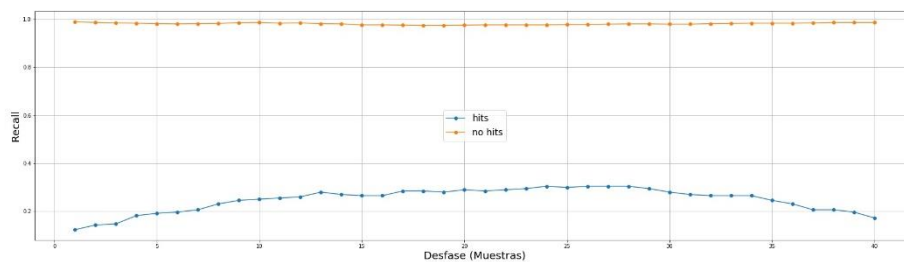


En el segundo caso, las métricas arrojan que, ***para alteraciones en el tiempo (muestras)***, no necesariamente ocurren mejoras en el rendimiento, ni tampoco comportamientos similares entre disparos hit/nohit. Es importante tenerlo en cuenta, ya que, es el total de la predicción la que impacta en el resultado. El desfase de las ondas modifica de manera directa y con altos márgenes en la predicción del algoritmo.

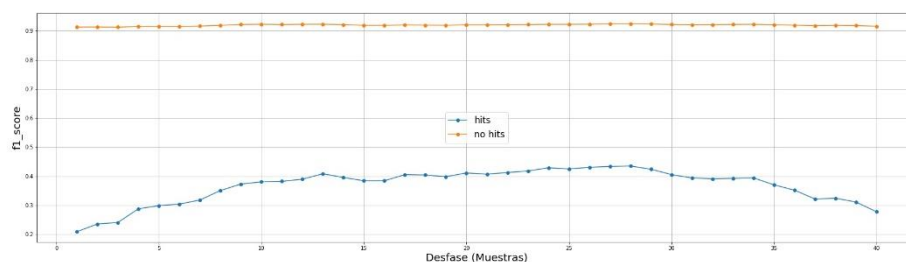
La métrica de precisión nos muestra relativa estabilidad en los nohits, mientras que en los hits ocurren variaciones que modifican notoriamente el resultado.



La proporción de resultados positivos que fueron identificados como tal, muestran en los hits un bajo rendimiento, afectando el resultado en conjunto.



La combinación de las dos anteriores, compactado en la métrica mostrada en la siguiente gráfica, prácticamente replica el comportamiento de la métrica recall.



Los resultados se pueden obtener y probar con todos los archivos en los siguientes links:

[a Lag&DrugSignal v6 CASO1.ipynb](#),
[a Lag&DrugSignal v6 CASO2.ipynb](#) y
[a Lag&DrugSignal v6 CASO3.ipynb](#).

12. Referencias / Bibliografía

1. Hartman, A.L. Atlas of EEG Patterns; Lippincott Williams & Wilkins: Philadelphia, PA, USA, 2005.
2. Guger, C.; Allison, B.Z.; Lebedev, M.A. Introduction. In Brain Computer Interface Research: A State of the Art Summary 6; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 1–8.
3. Ramele, R.; Villar, A.J.; Santos, J.M.; EEG Waveform Analysis of P300 ERP with Applications to Brain Computer Interfaces: Computer Engineering Department, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), Published: 16 November 2018.
4. Rao, R. P. N. (2013). Brain-Computer Interfacing: An Introduction. New York, NY: Cambridge University Press.
5. [The P300 wave of the human event-related potential.](#)
6. G. Schalk, D. J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer, e J. R. Wolpaw, «BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system», IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 51, n. 6, pagg. 1034–1043, 2004
- 7 L. A. Farwell e E. Donchin, «Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing eventrelated brain potentials», Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol., vol. 70, n. 6, pagg. 510–523, 1988.

Consultas adicionales

- [Archivos .mat.](#)
- [UMA-BCI Speller, a P300-based spelling tool.](#)
- [MEG and EEG data analysis with MNE-Python.](#)