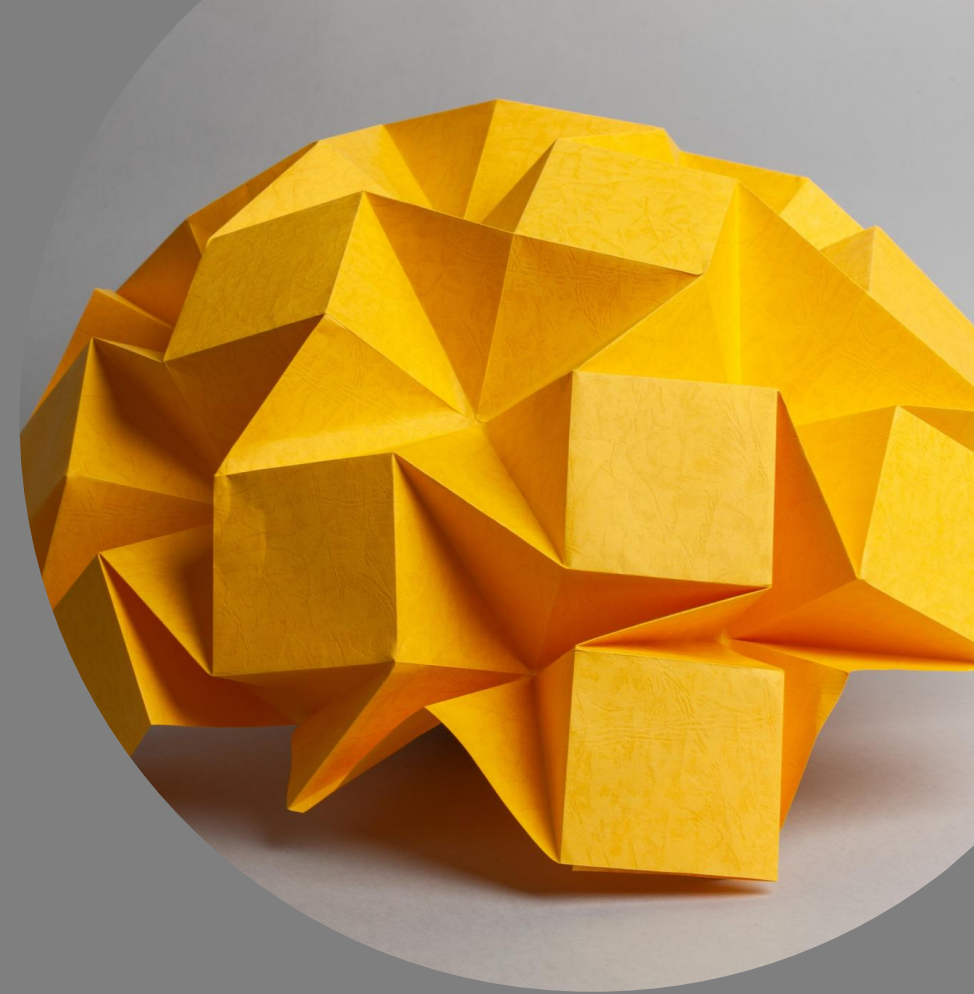


Principios del procesamiento de señales de electroencefalografía

I Escuela MADATOP
Matemática, Datos y Optimización

8 | MAYO | 2026



UNL • FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA



Dra. Catalina Galván



Dra. Victoria Peterson



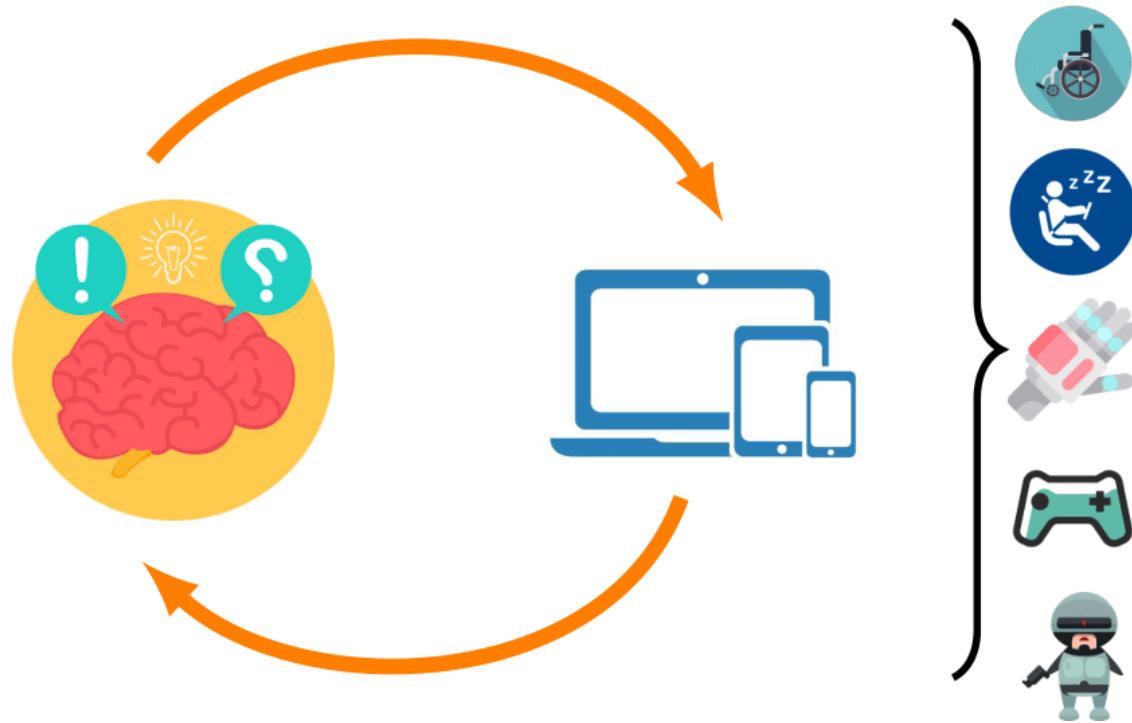
Lic. Ma. Emilia Joerin



¿Neuroingeniería?

Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Definición

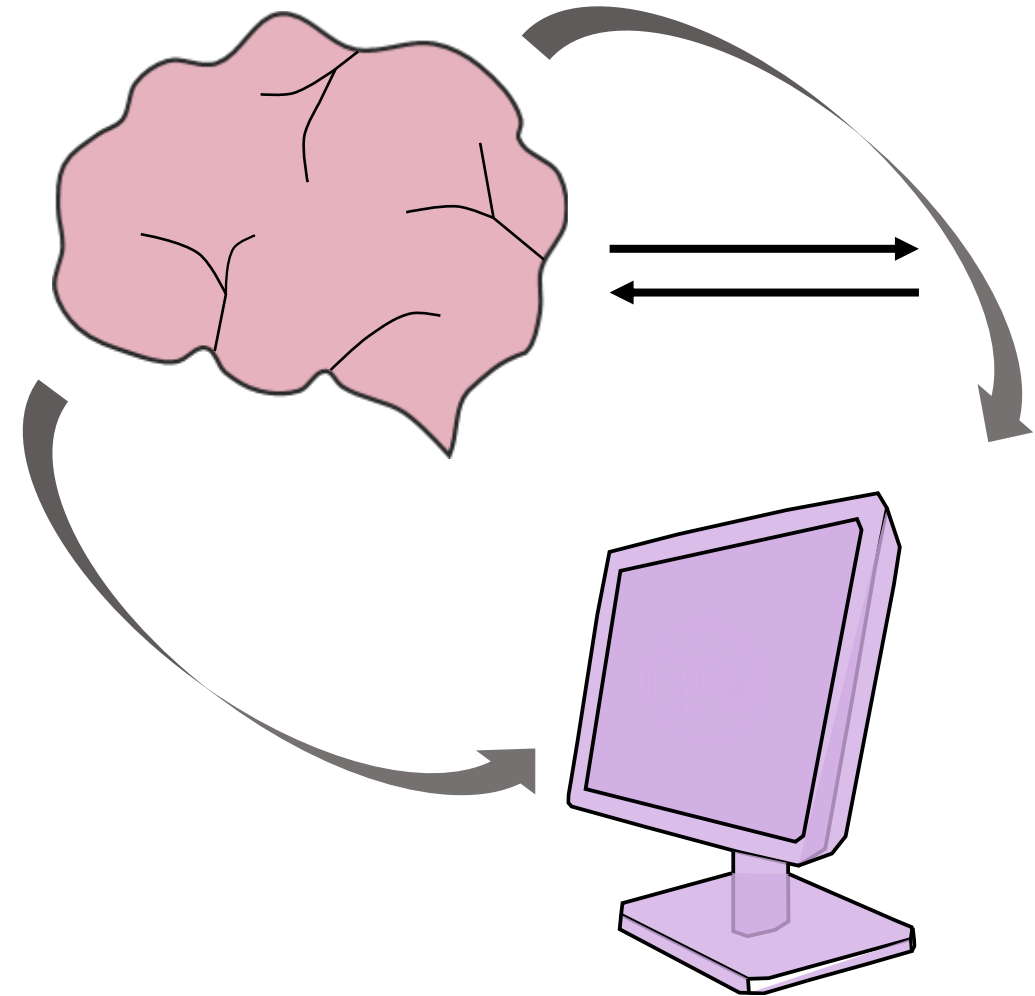
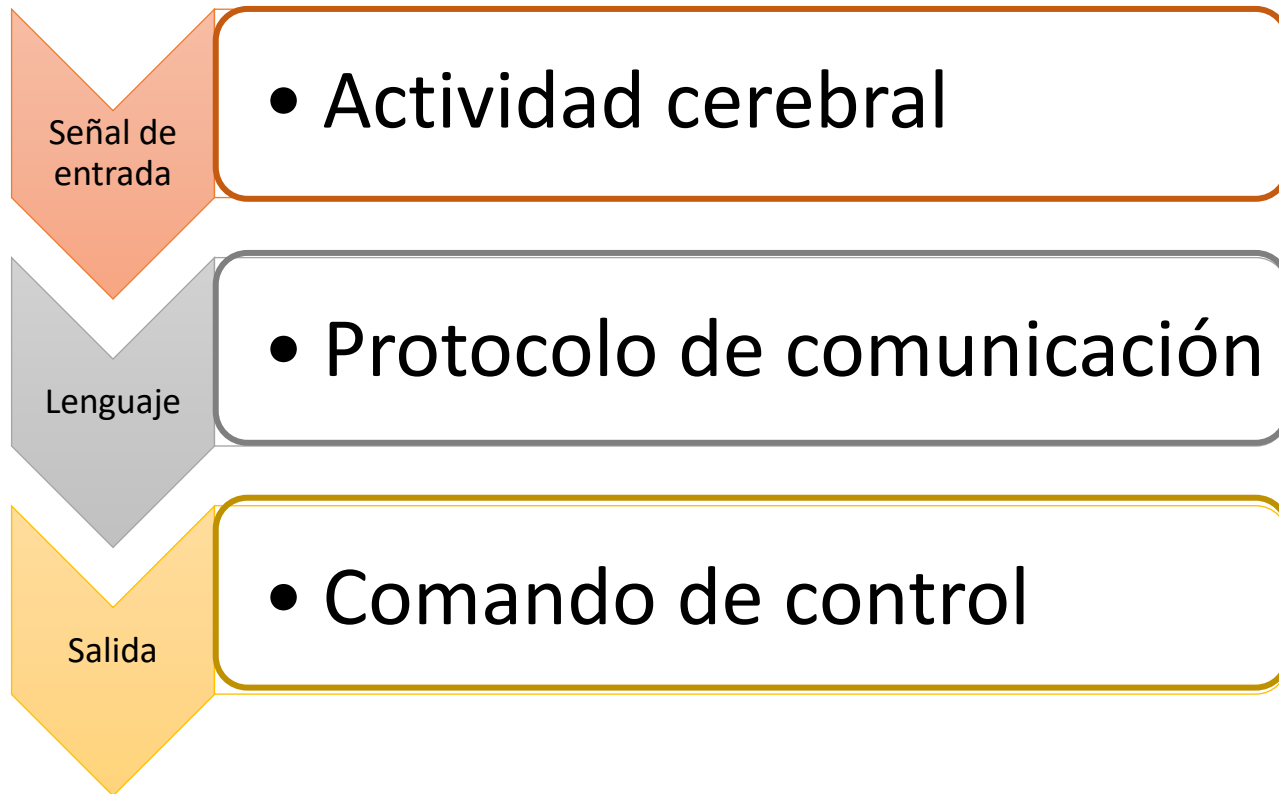


Definición más utilizada

“Una BCI es un sistema que mide la actividad cerebral del sistema nervioso central (CNS) y la convierte en salidas artificiales que **reemplazan, reparan, mejoran, aumentan o suplen** las salidas naturales del CNS ” [2]

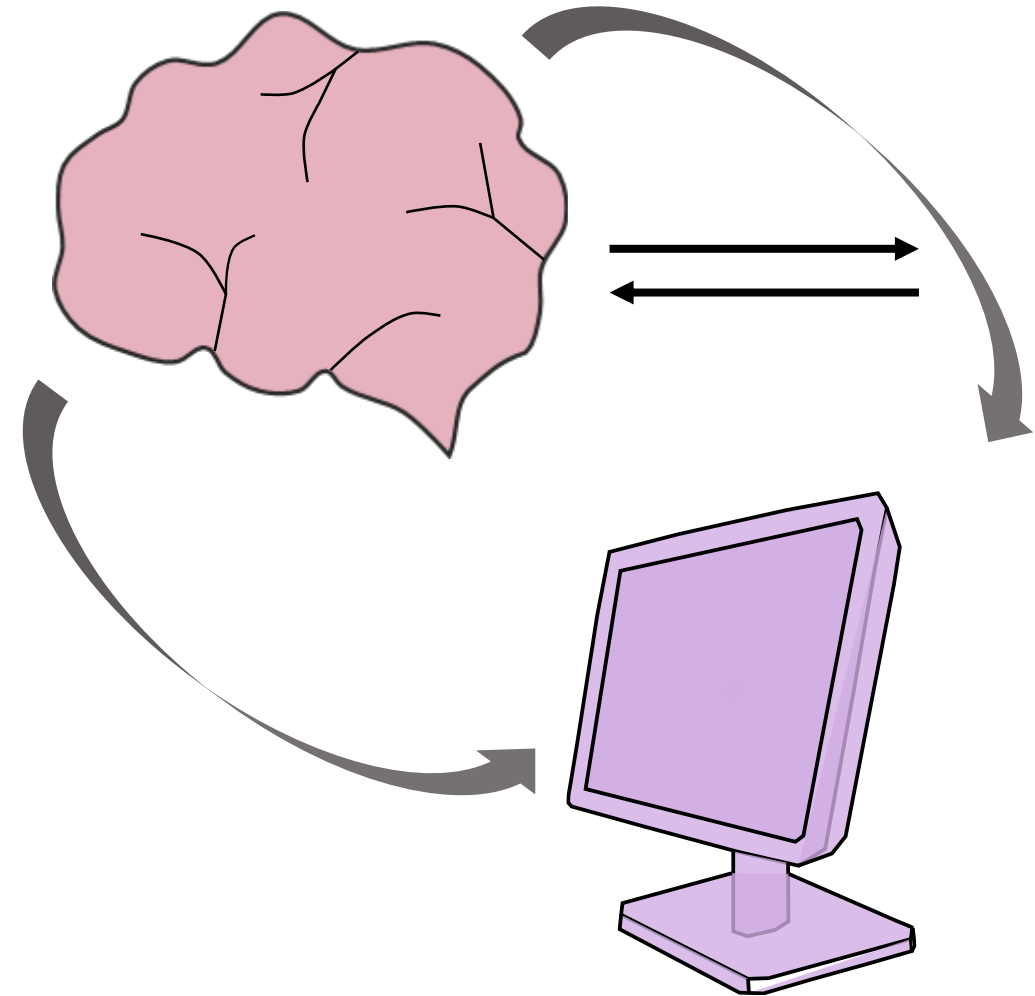
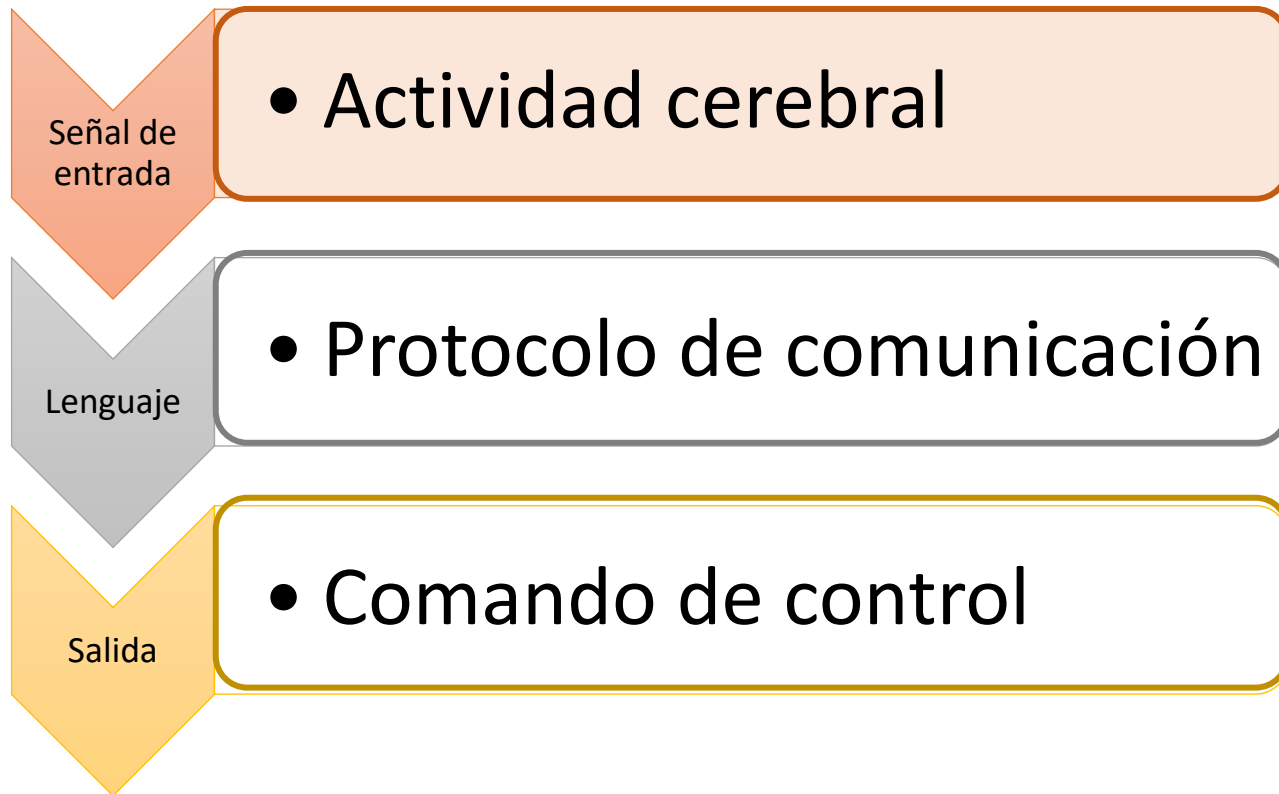
Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Sistema de comunicación: sus partes



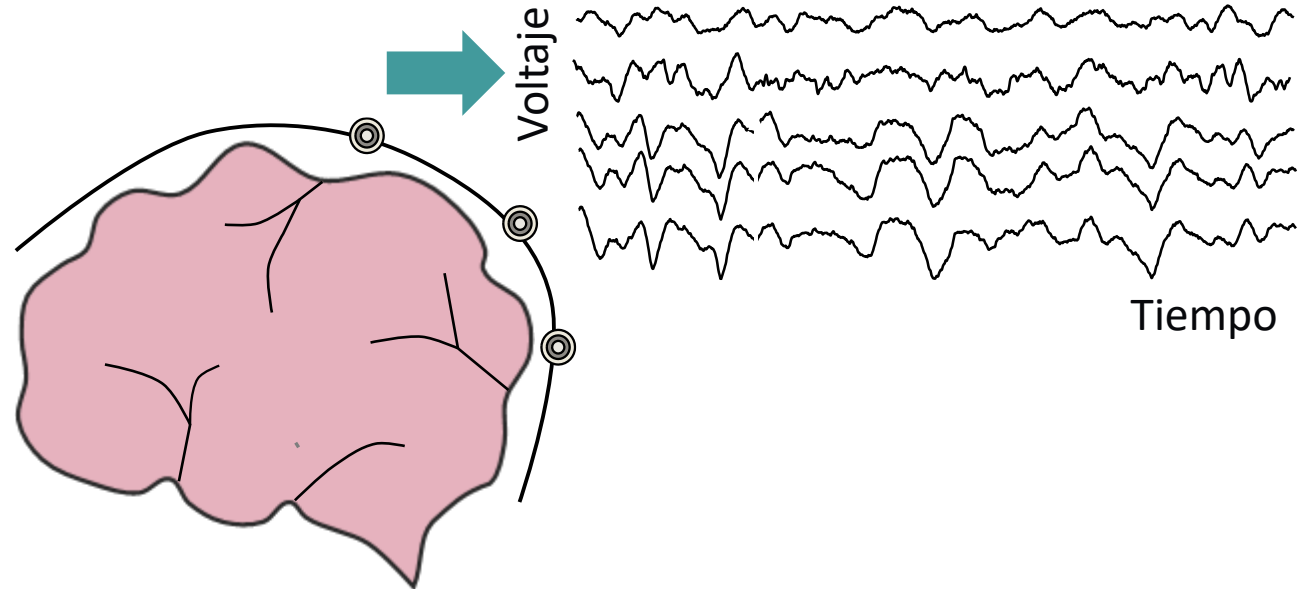
Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Sistema de comunicación: sus partes



Señal de entradas: técnicas de neuroimagen

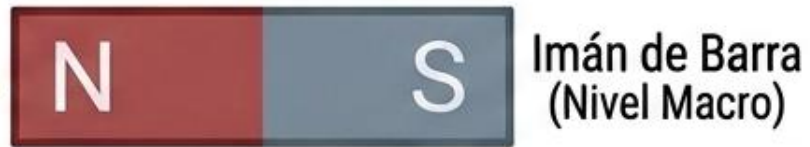
Electroencefalografía (EEG)



Electroencefalografía de superficie (EEG)

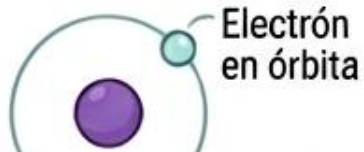
Señal de entrada: ¿qué medimos?

1. ¿QUÉ ES UN DÍPOLO MAGNÉTICO?



MOMENTO MAGNÉTICO (μ)

1. Vista Atómica (Simplificada)



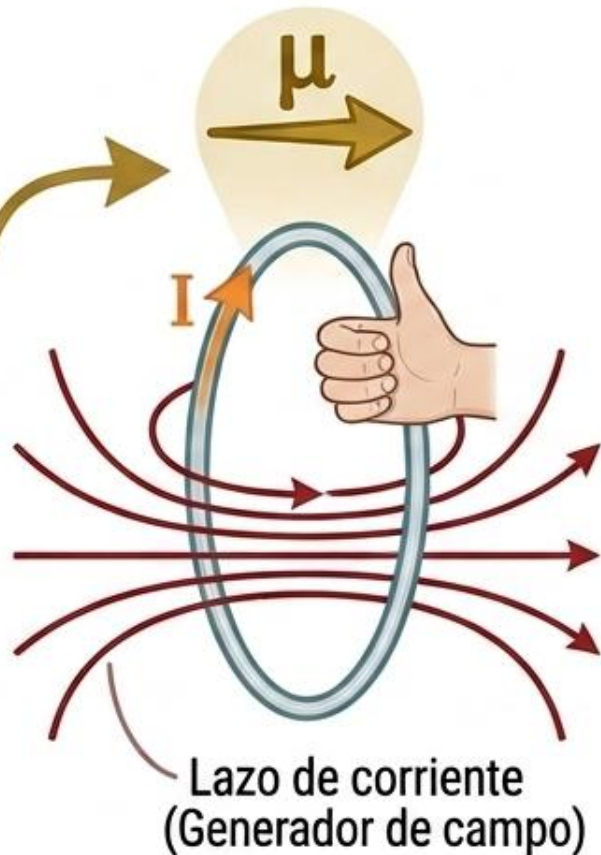
Un dipolo elemental



2. Nivel Macro (Ejemplos)



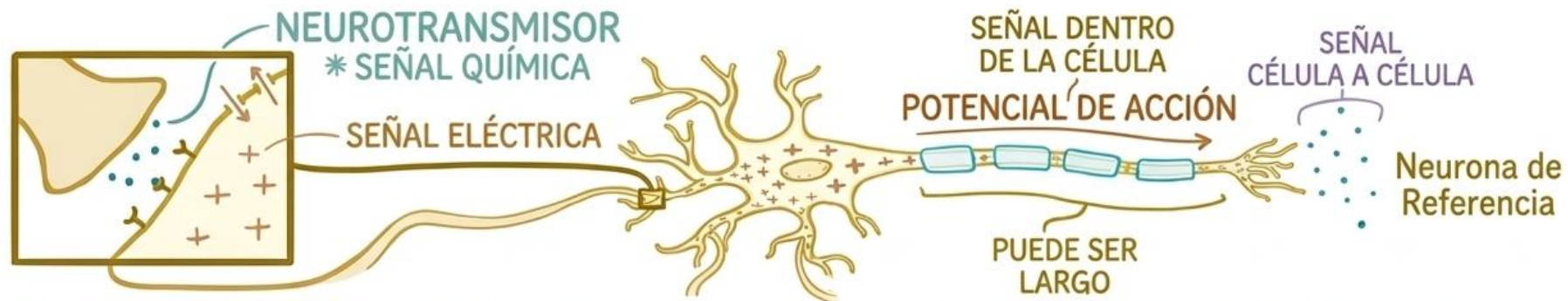
2. ¿CÓMO GENERA UN CAMPO MAGNÉTICO?



DÍPOLO MAGNÉTICO

Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: ¿qué medimos?

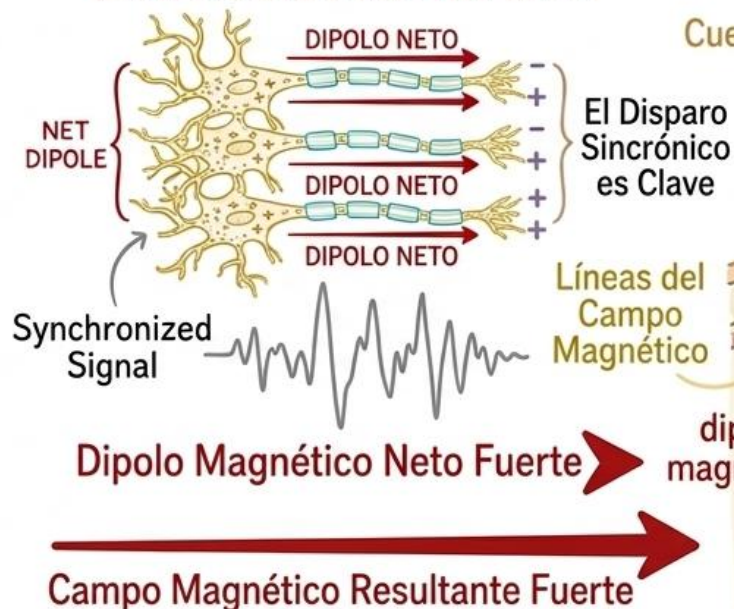


GENERACIÓN DEL EEG: NEURONAS SINCRONIZADAS

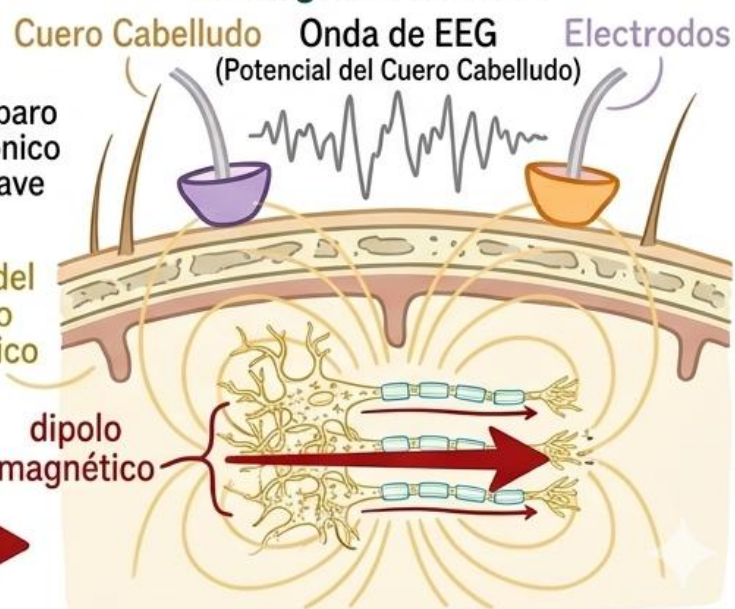
1. Neuronas Individuales



2. Neuronas Sincronizadas



3. Registro de EEG

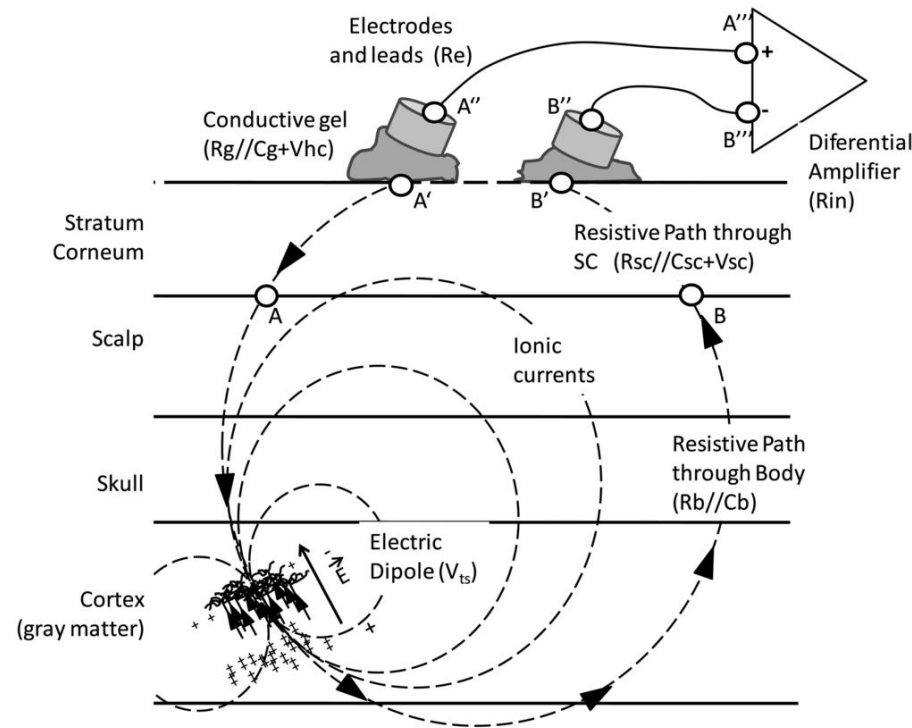


DIPOLO
MAGNÉTICO
EEG

Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: ¿qué medimos?

“Es como escuchar una conversación del otro lado de una pared”



Funete: Lopez-Gordo, M., Sanchez-Morillo, D., and Valle, F. (2014). Dry EEG electrodes. *Sensors*, 14(7):12847-12870.

Mediante EEG **medimos**

dipolos eléctricos generados por la suma de potenciales de acción de más de 100 **neuronas** disparando en sincronía

Mediante EEG **NO** medimos

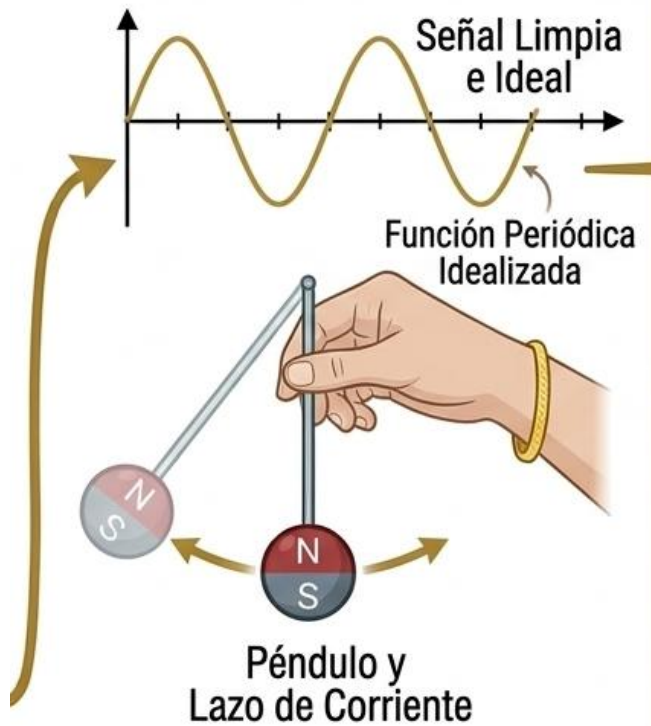
- Potenciales individuales o generados por pocas neuronas,
- Actividad de estructuras profundas (hipocampo, tálamo, etc.),
- Fuentes opuestas entre sí o paralelas al electrodo.

Electroencefalografía de superficie (EEG)

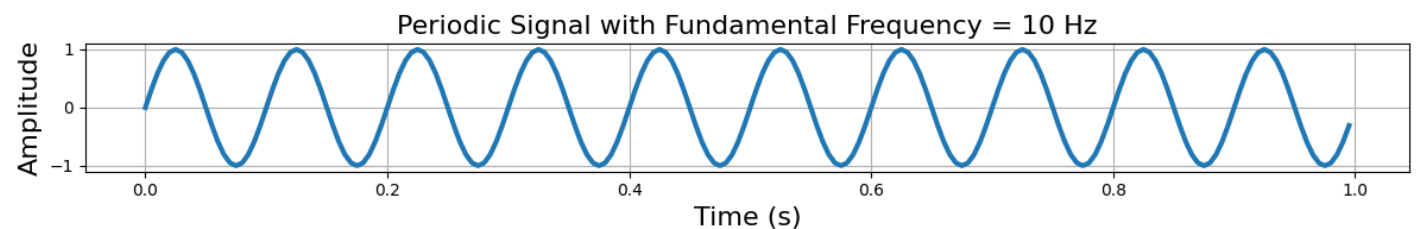
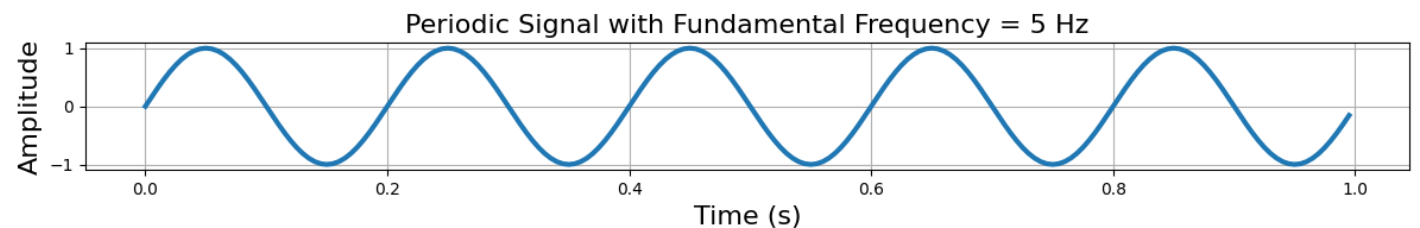
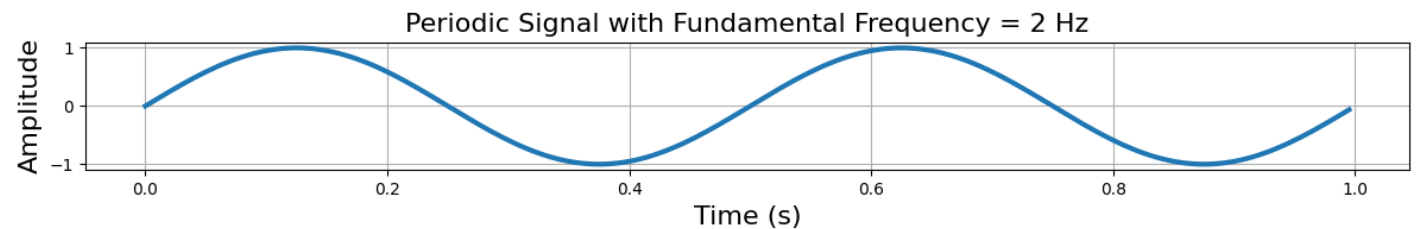
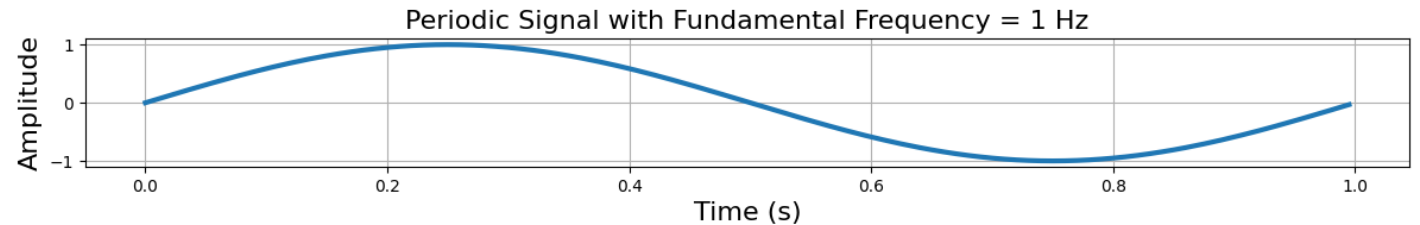
Señal de entrada: ¿qué medimos?

$$x(t) = \sin(2\pi w_0 t) \quad \text{Frecuencia fundamental}$$

1. El Oscilador Mecánico: Generación de Señal Rítmica

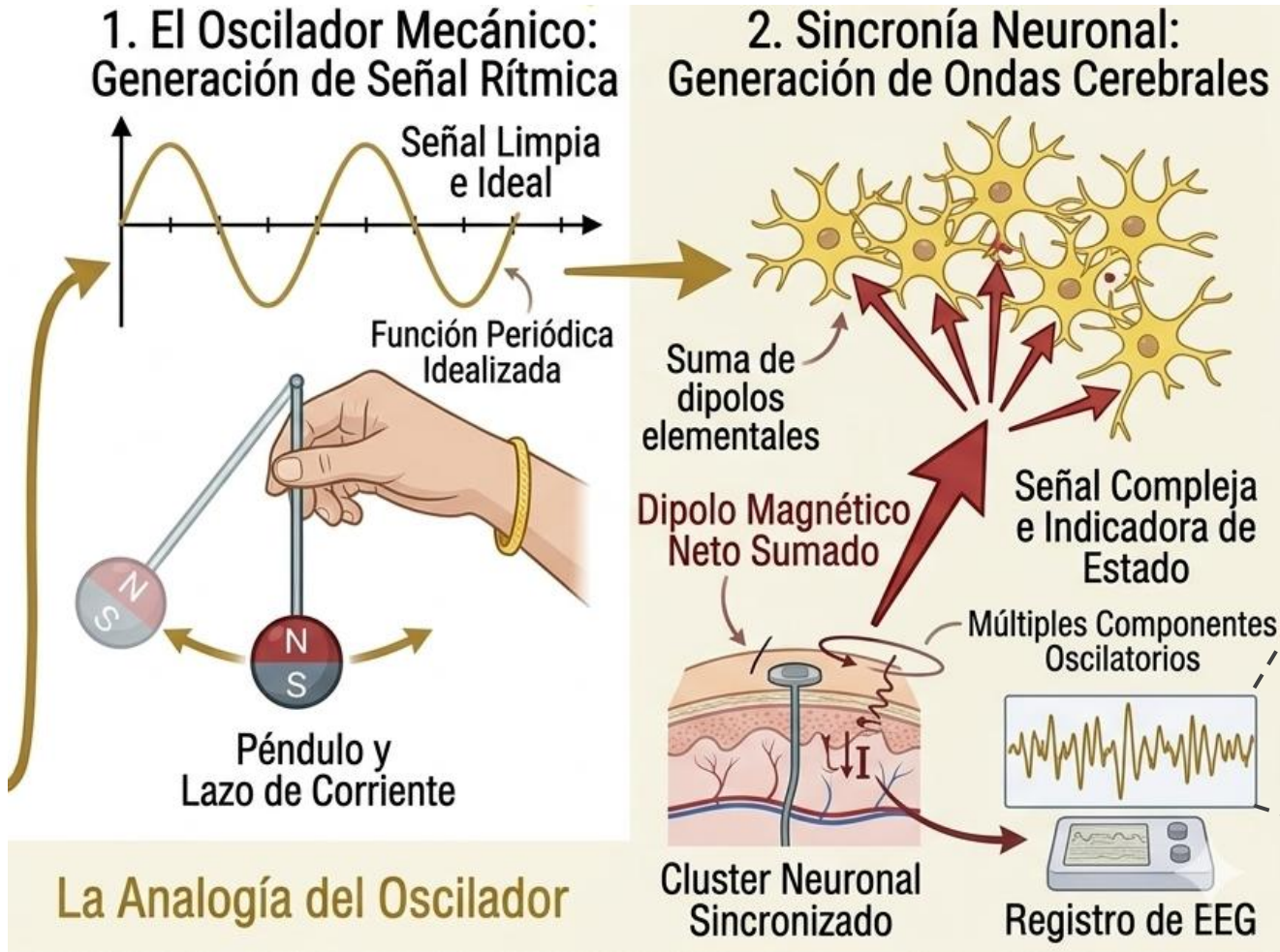


La Analogía del Oscilador

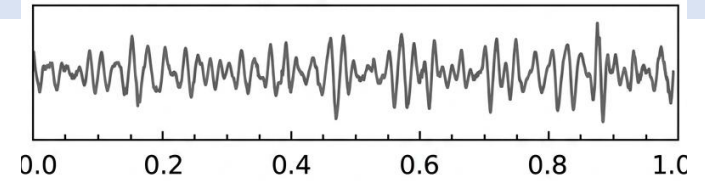


Electroencefalografía de superficie (EEG)

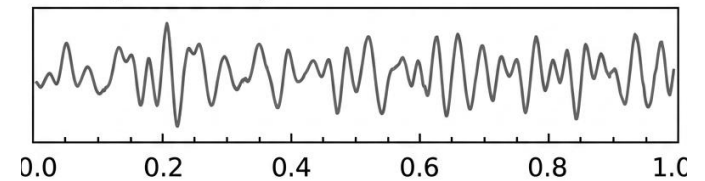
Señal de entrada: ¿qué medimos?



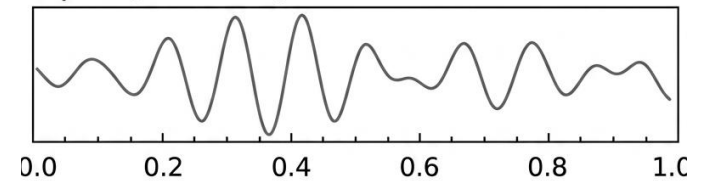
Gamma (30-100Hz)



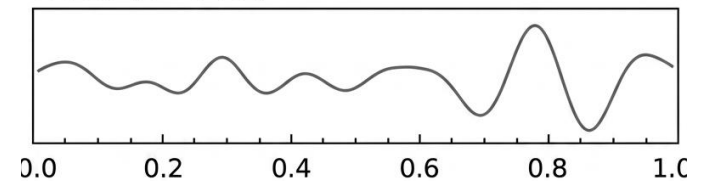
Beta (13-30 Hz)



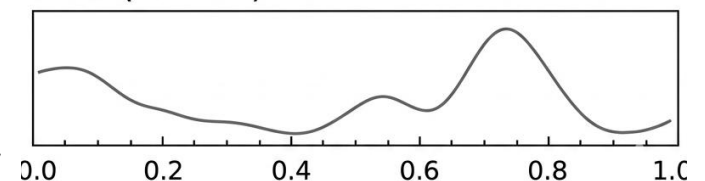
Alpha (8 - 13 Hz)



Theta (4 - 8 Hz)



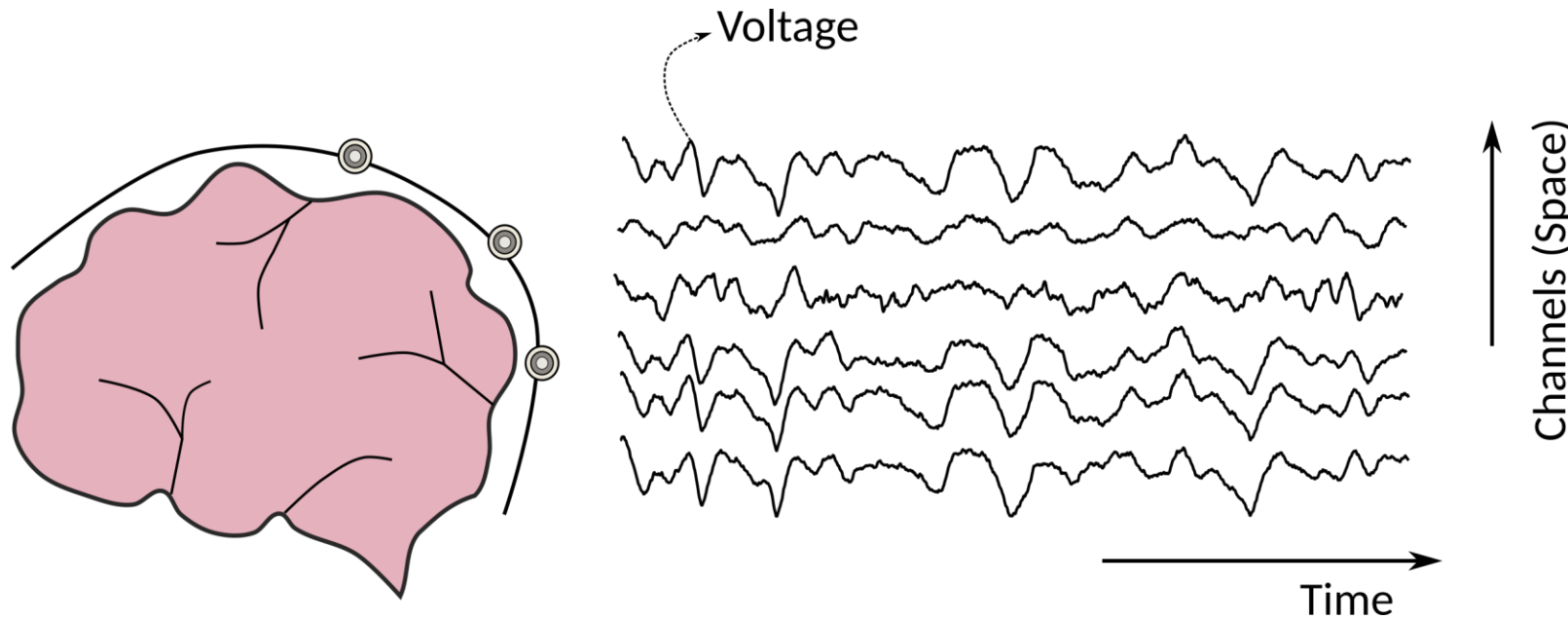
Delta (0.1-4Hz)



(seconds)

Electroencefalografía de superficie (EEG)

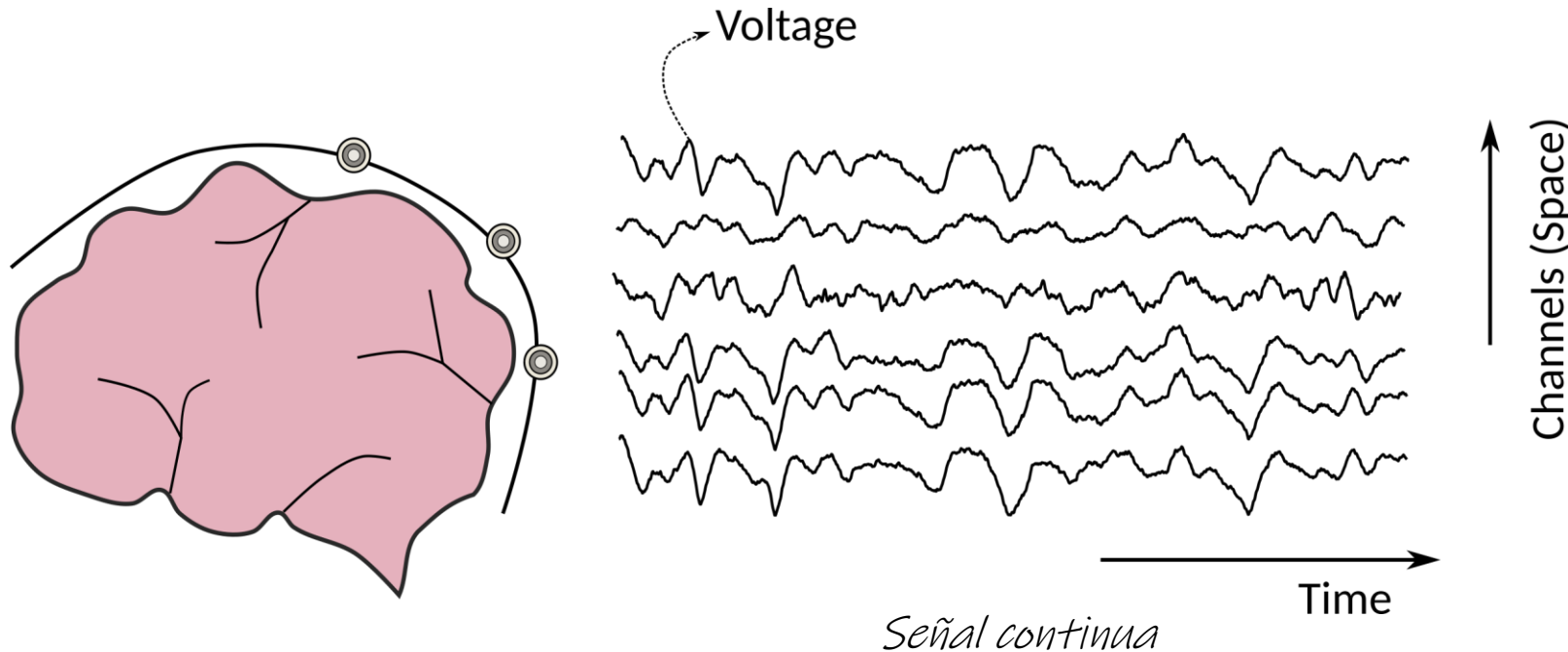
Señal de entrada: ¿qué medimos?



VARIACIONES DE
VOLTAJE A LO
LARGO DEL
TIEMPO
EN DIFERENTES
POSICIONES
SÍNCRONIZADAS

Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: ¿qué medimos?

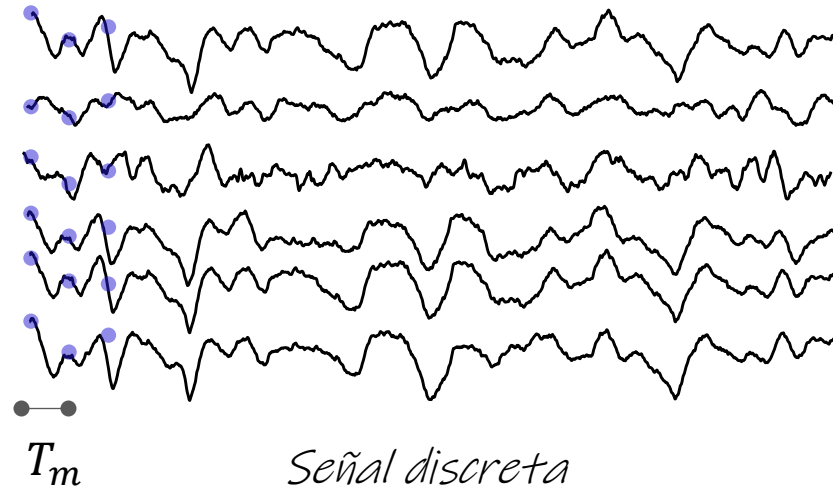
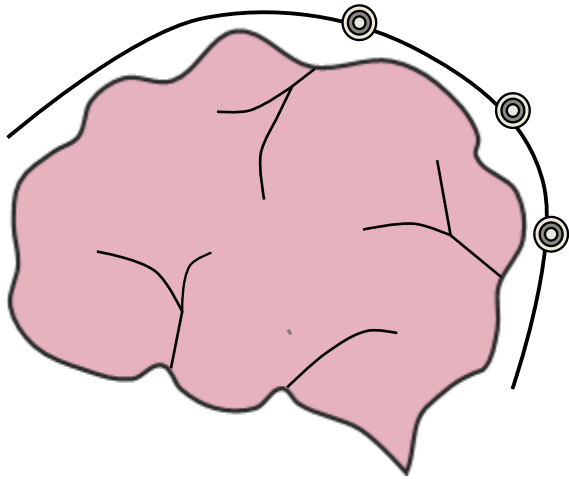


$$x(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

VARIACIONES DE
VOLTAJE A LO
LARGO DEL
TIEMPO
EN DIFERENTES
POSICIONES
SÍNCRONIZADAS

Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: señal discreta



$$x[n] = x(nT_m)$$

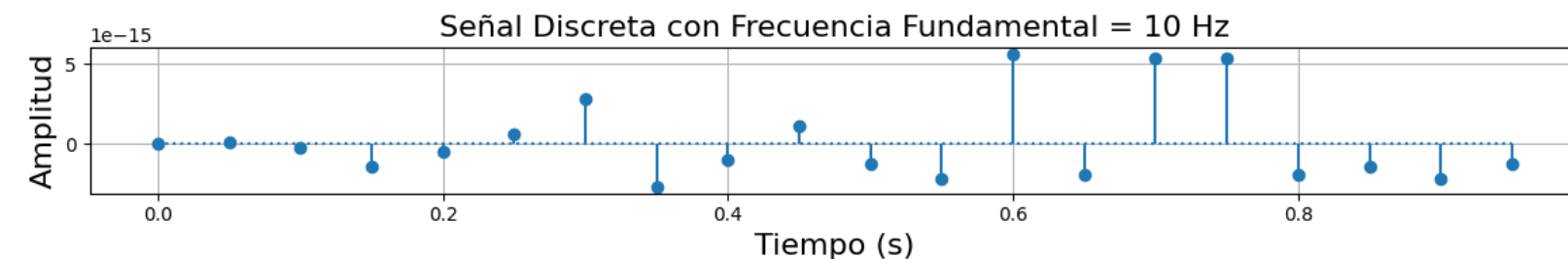
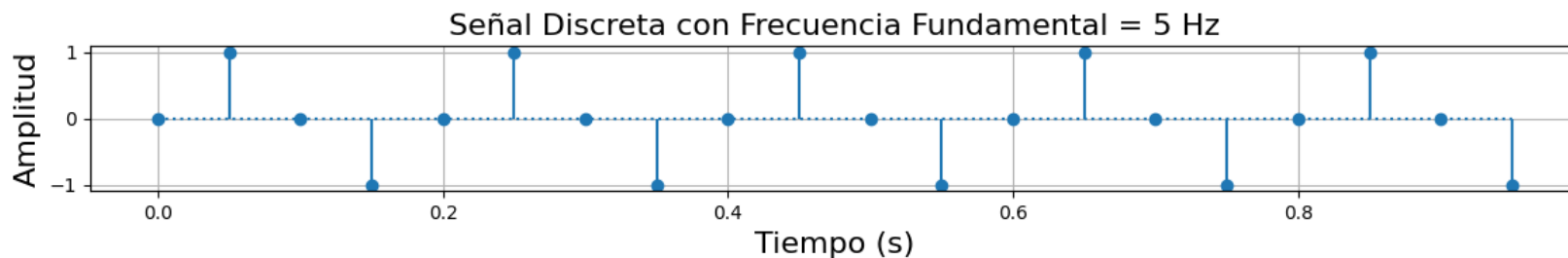
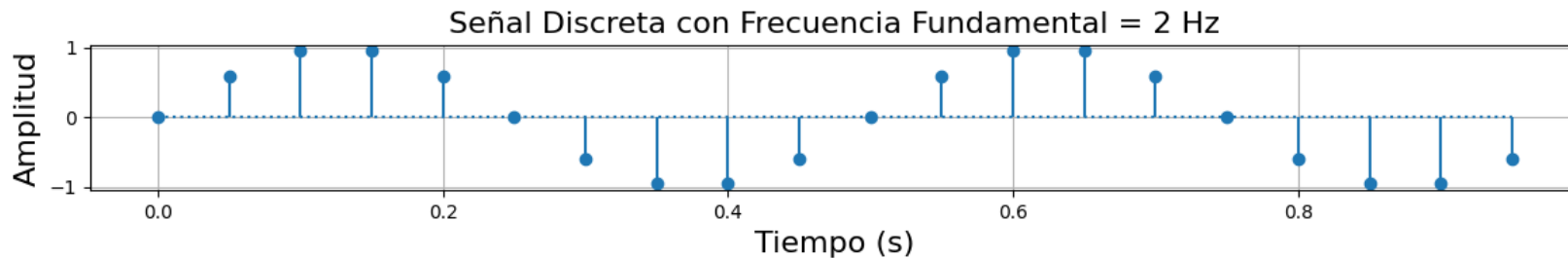
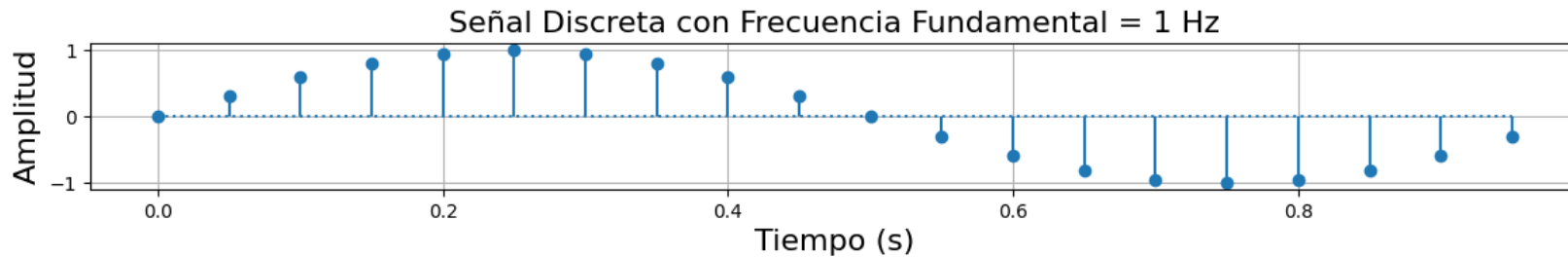
T_m Periodo de muestreo

$$f_m = \frac{1}{T_m} \quad \text{Frecuencia de muestreo}$$

VARIACIONES DE
VOLTAJE A LO
LARGO DEL
TIEMPO
EN DIFERENTES
POSICIONES
SÍNCRONIZADAS

Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: señal discreta



No deben confundirse

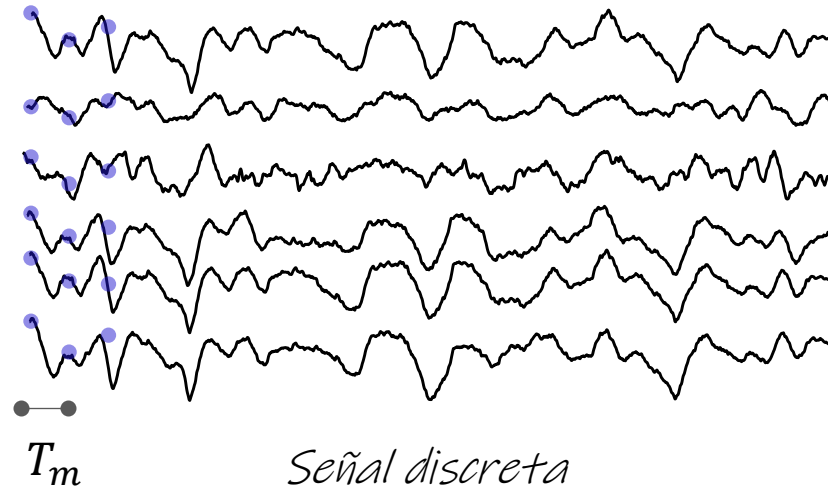
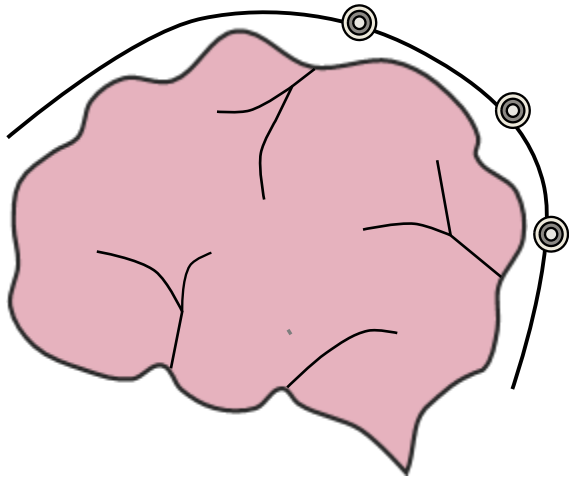
La frecuencia fundamental f_0 caracteriza el contenido de la señal, mientras que la frecuencia de muestreo f_m indica cuántas veces por segundo se observa (registra) la señal.

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \quad \text{Frecuencia fundamental}$$

$$f_m = \frac{1}{T_m} \quad \text{Frecuencia de muestreo}$$

Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: señal discreta



$$x[n] = x(nT_m)$$

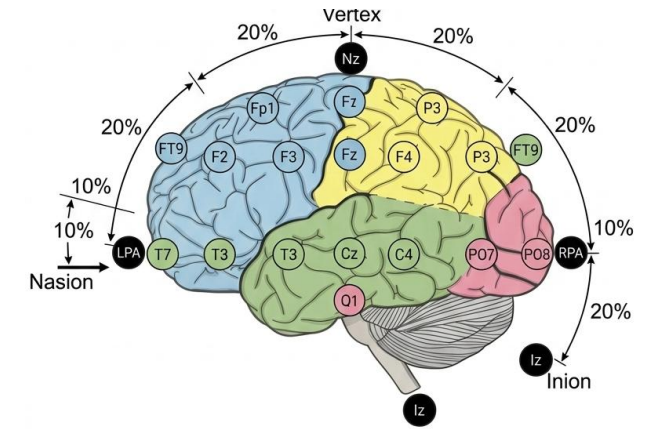
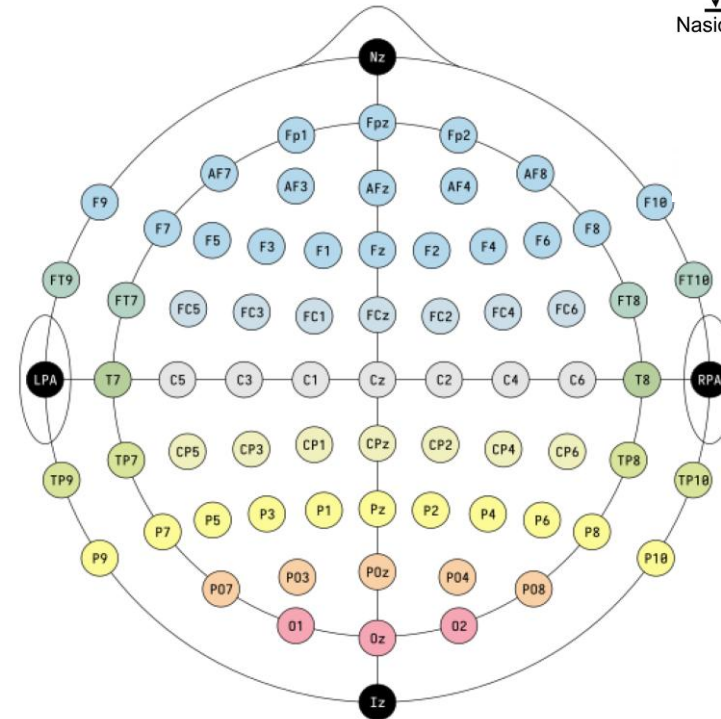
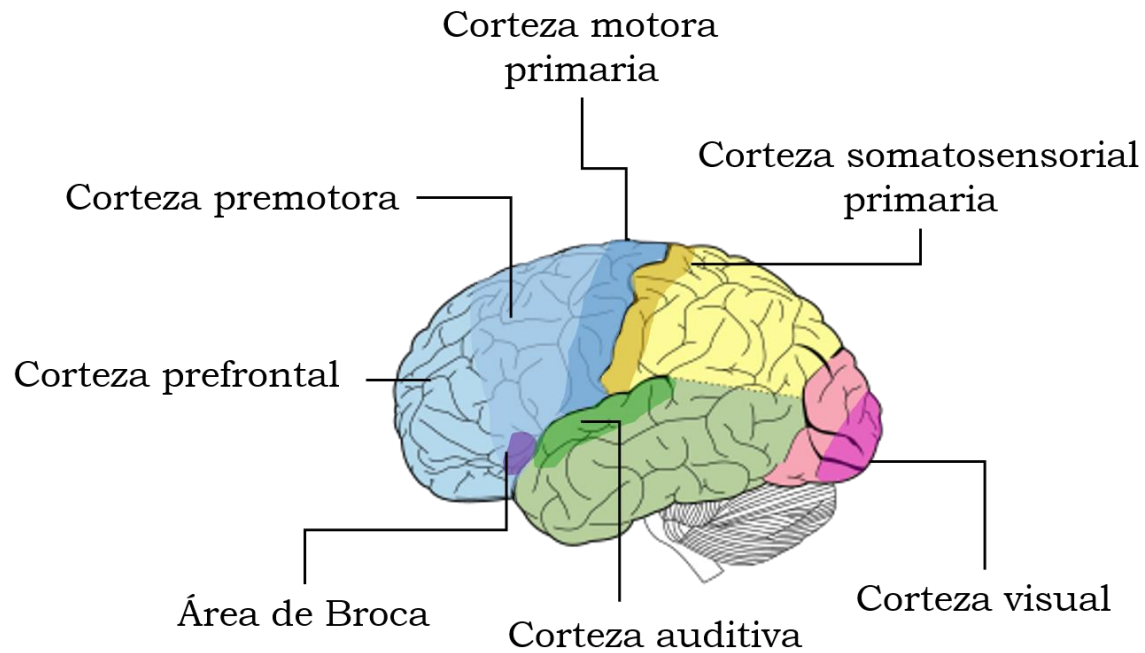
T_m Periodo de muestreo

$$f_m = \frac{1}{T_m} \quad \text{Frecuencia de muestreo}$$

VARIACIONES DE
VOLTAJE A LO
LARGO DEL
TIEMPO
OBSERVADAS A
UNA FRECUENCIA
DE MUESTREO
DADA
EN DIFERENTES
POSICIONES
SÍNCRONIZADAS

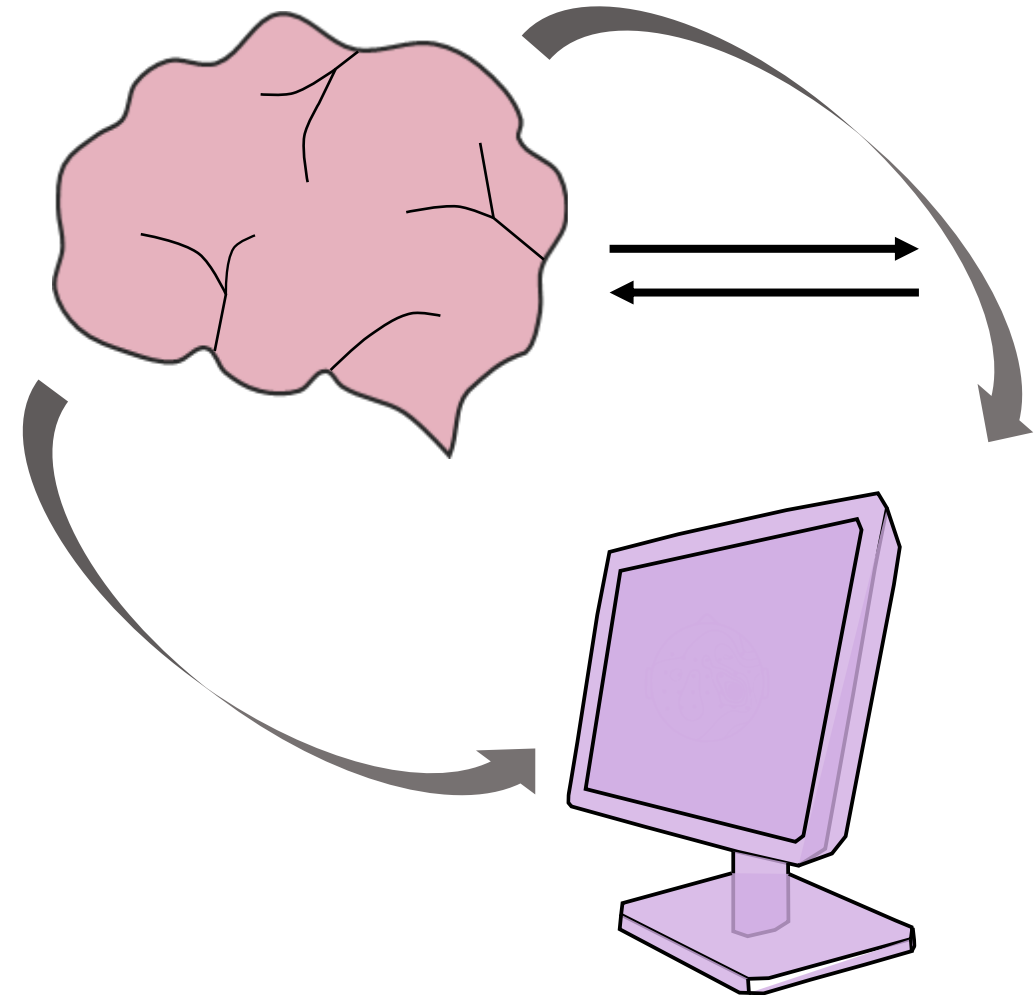
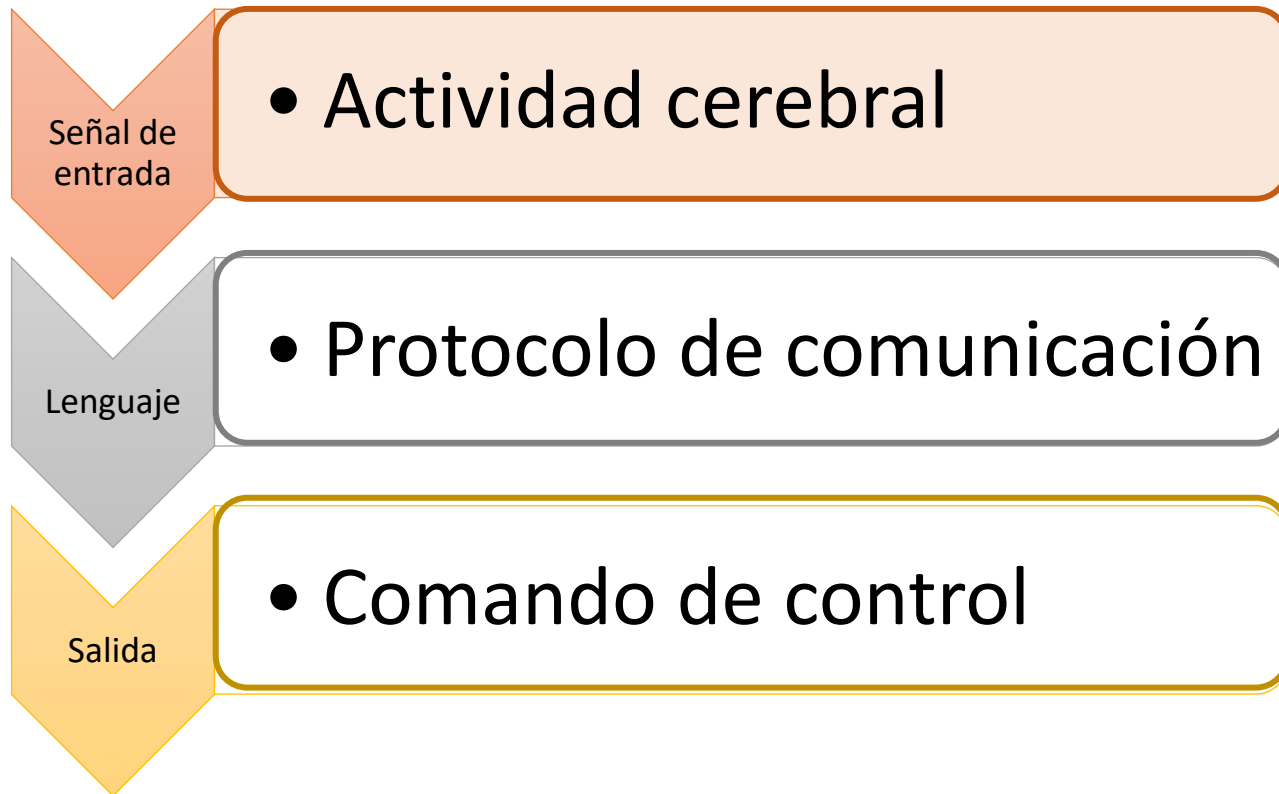
Electroencefalografía de superficie (EEG)

Señal de entrada: ¿dónde medimos?



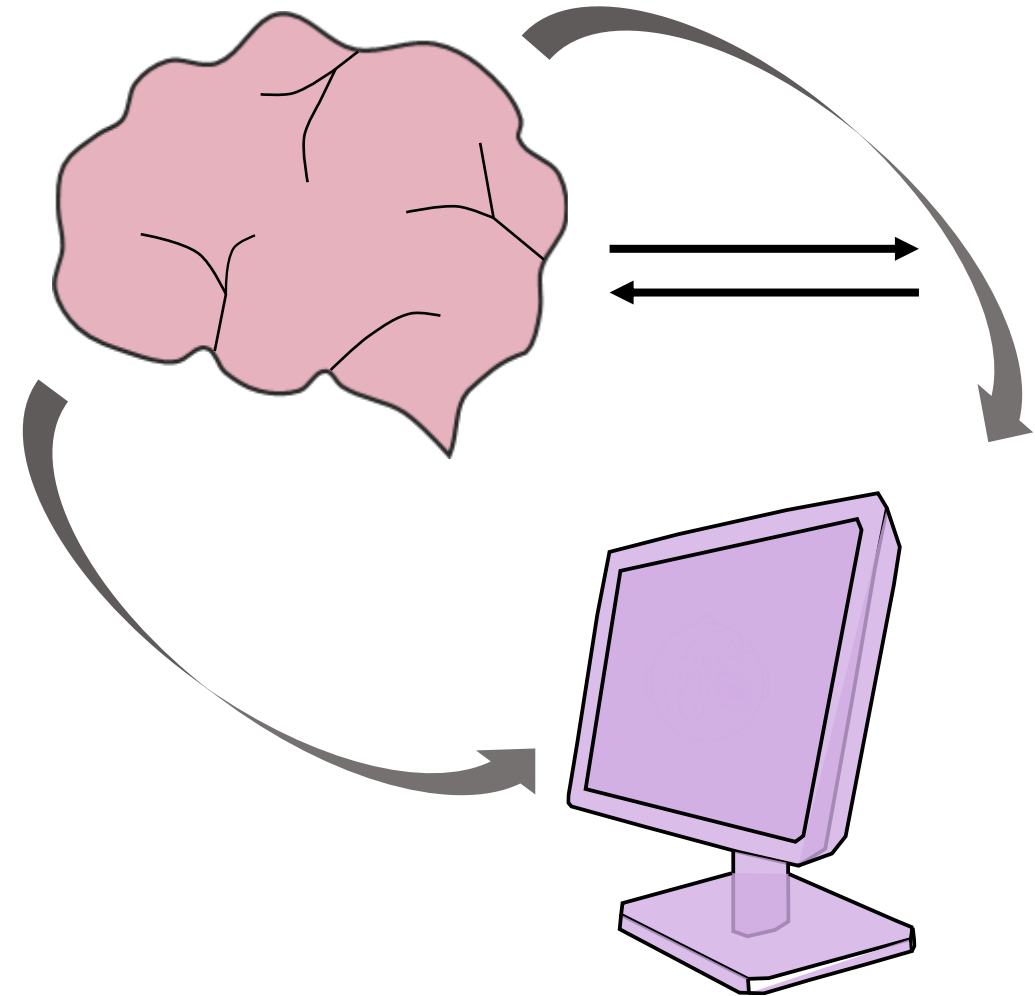
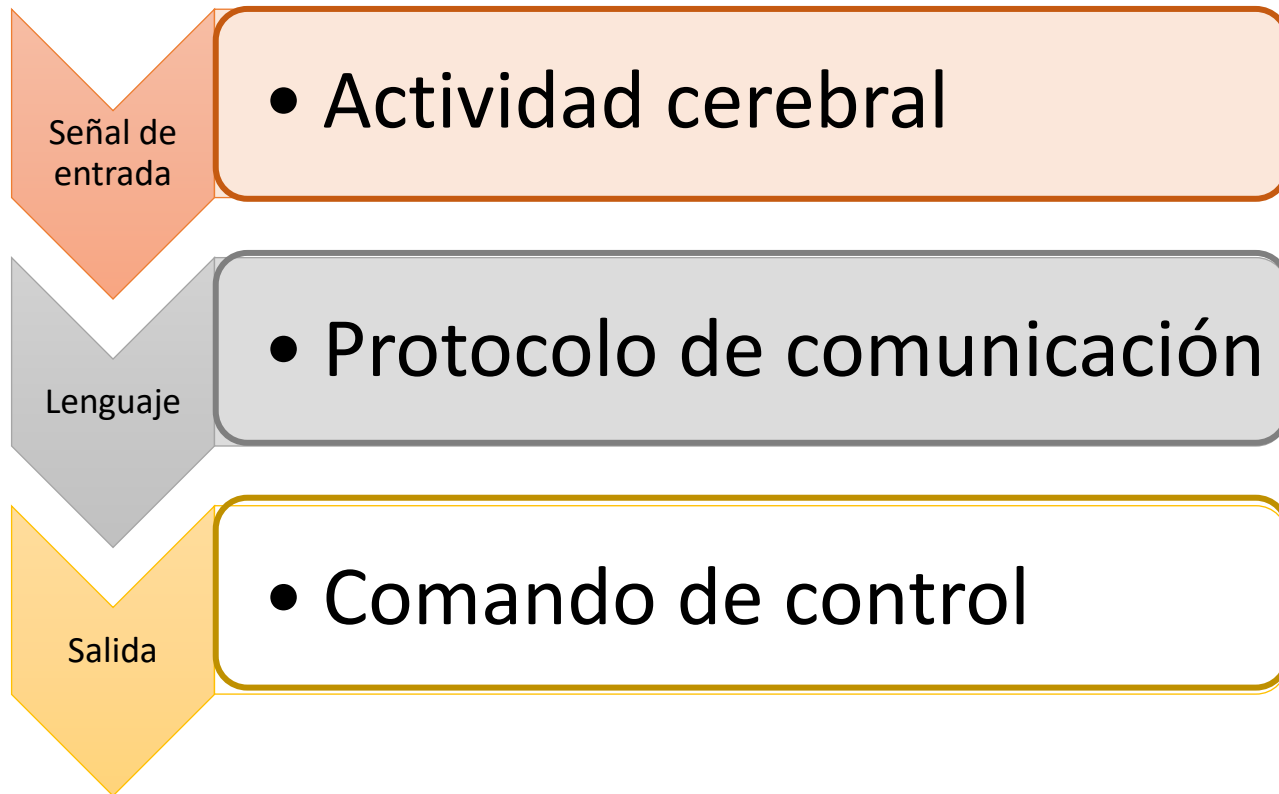
Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Sistema de comunicación: sus partes

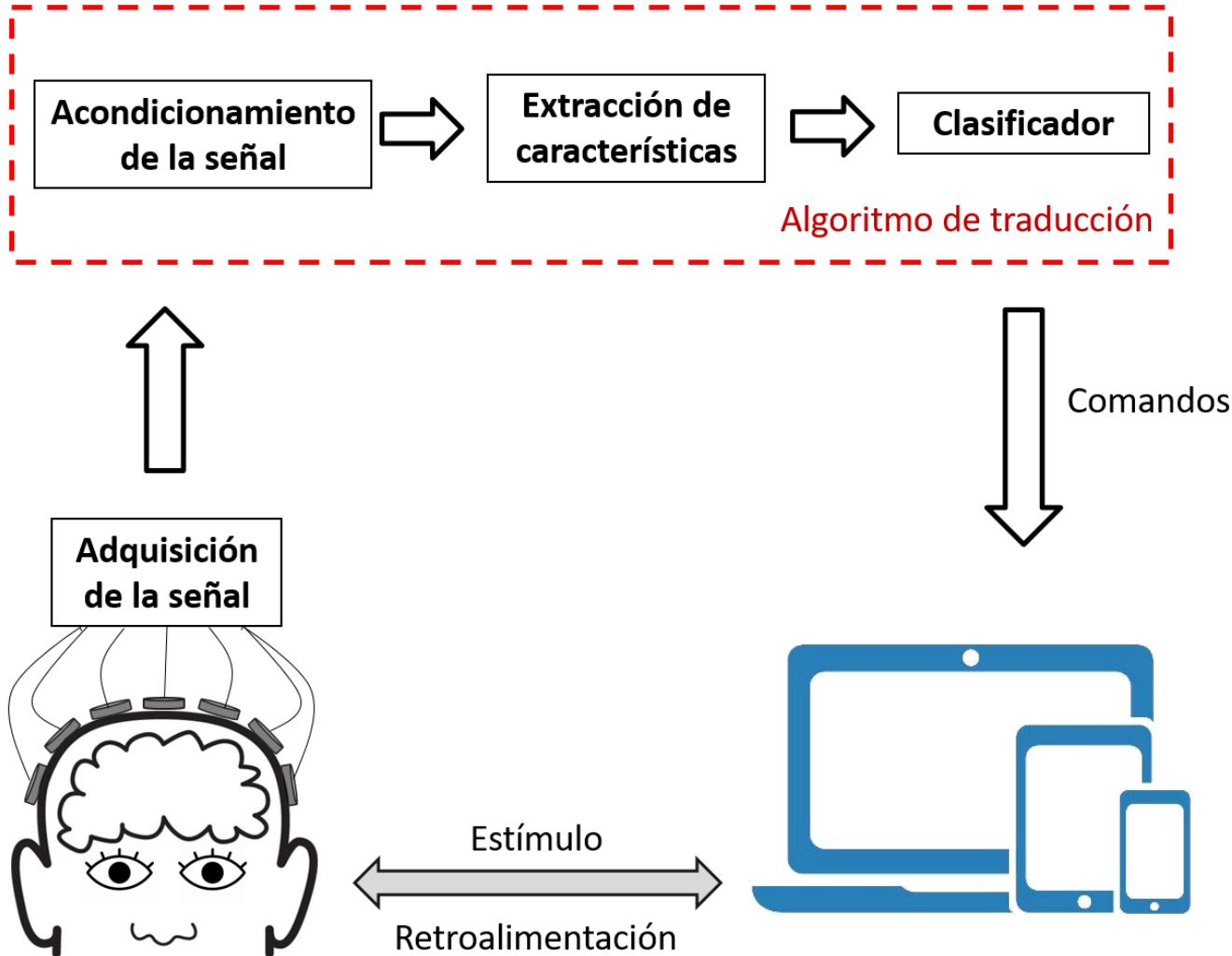


Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Sistema de comunicación: sus partes



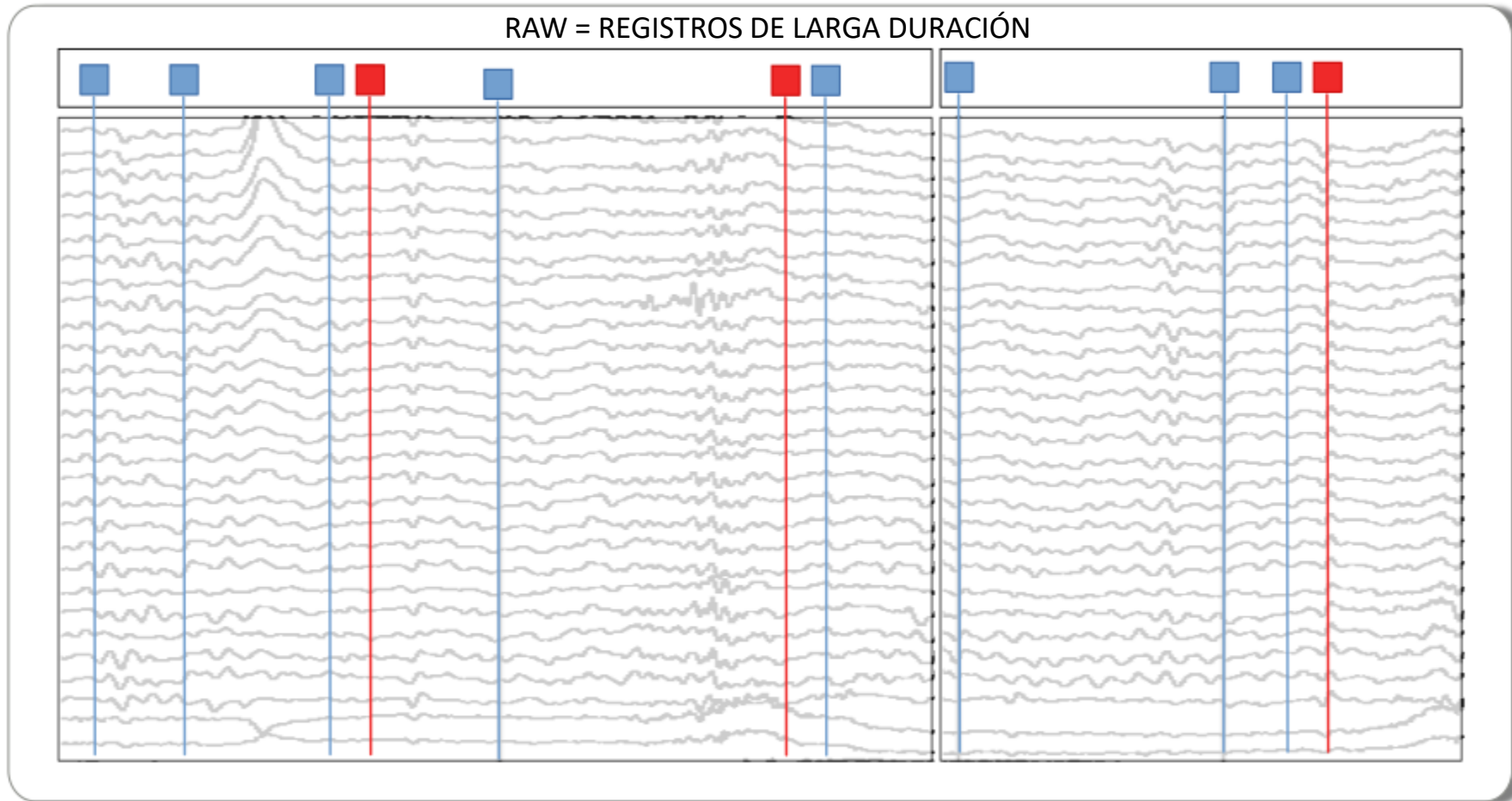
Protocolo de comunicación



PROTOCOLOS	POTENCIALES EVOCADOS
	ESTÍMULOS DE RESPUESTA VISUAL
	ESTADOS COGNITIVOS

Protocolo de comunicación

Obteniendo la señal: datos



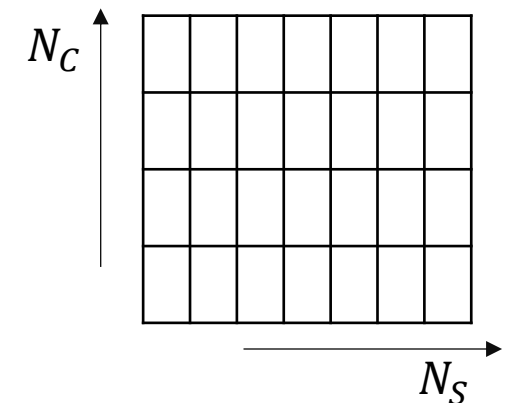
■ Marcador evento 1

■ Marcador evento 2

$$x[n] = x(nT_m), \\ n = 1, \dots, N_s$$

Longitud total del registro/dato

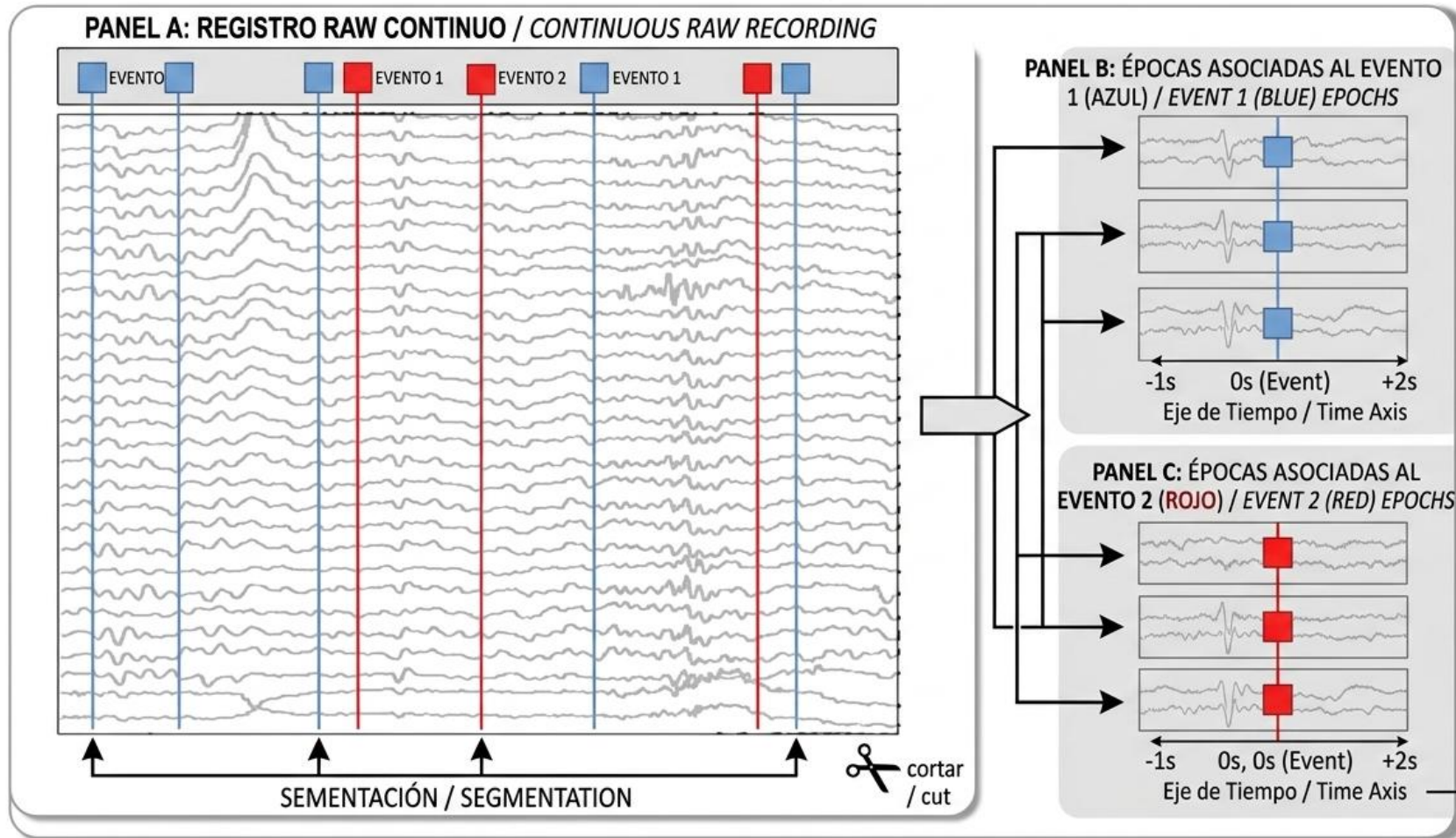
Arreglo bidimensional



Protocolo de comunicación

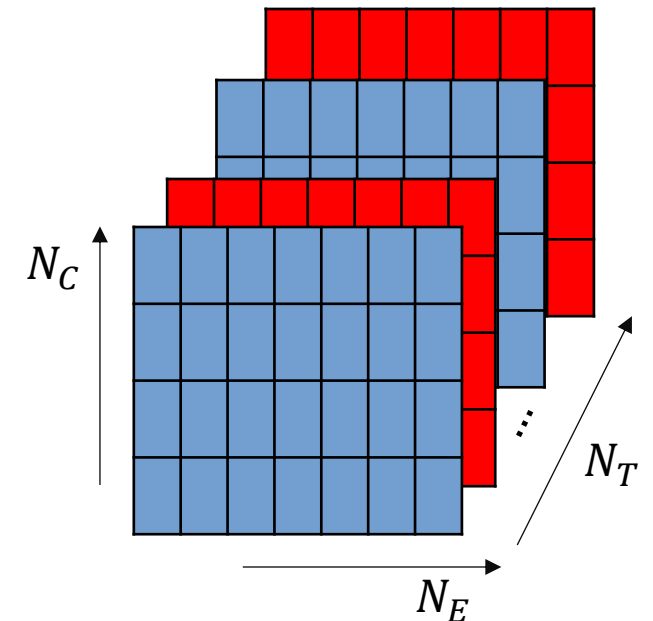
Obteniendo la señal: datos

PROCESAMIENTO: DE REGISTRO RAW A ÉPOCAS / PROCESSING: FROM RAW TO EPOCHS



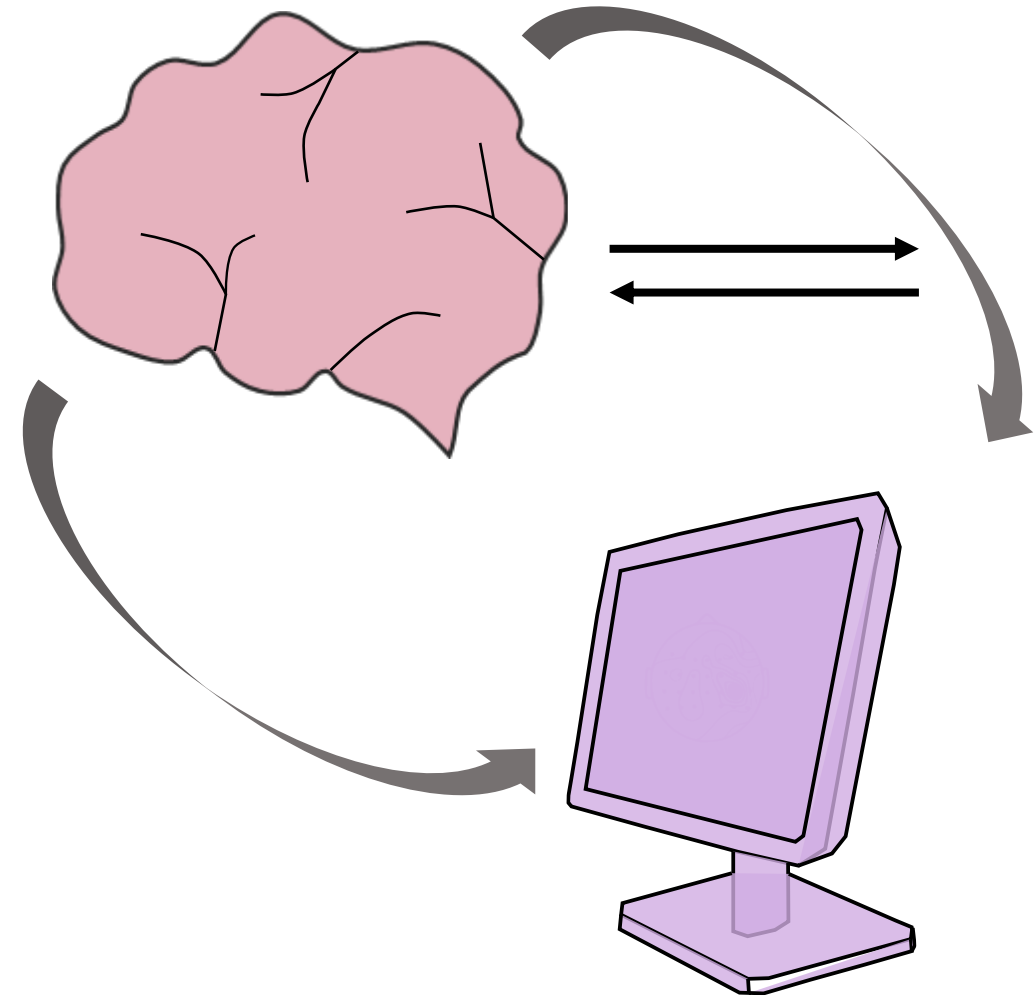
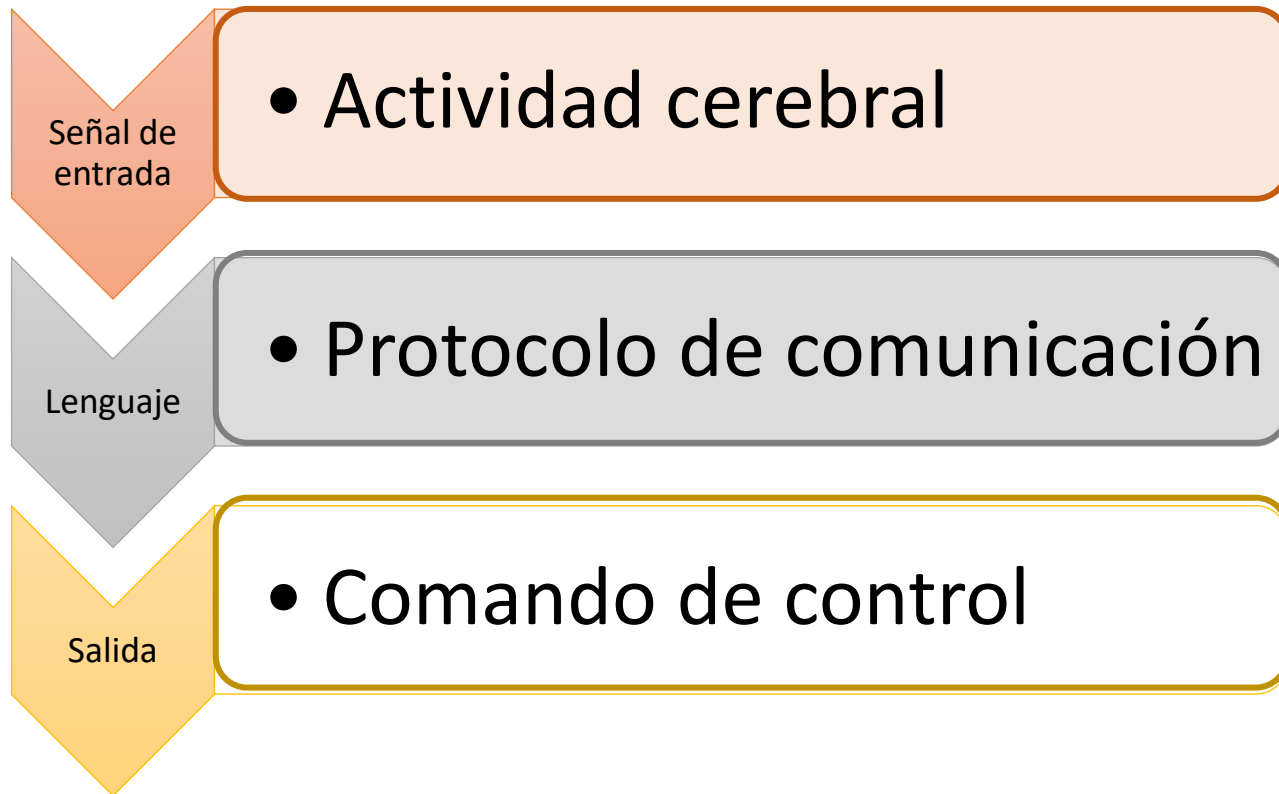
- Marcador evento 1
- Marcador evento 2

Arreglo tridimensional



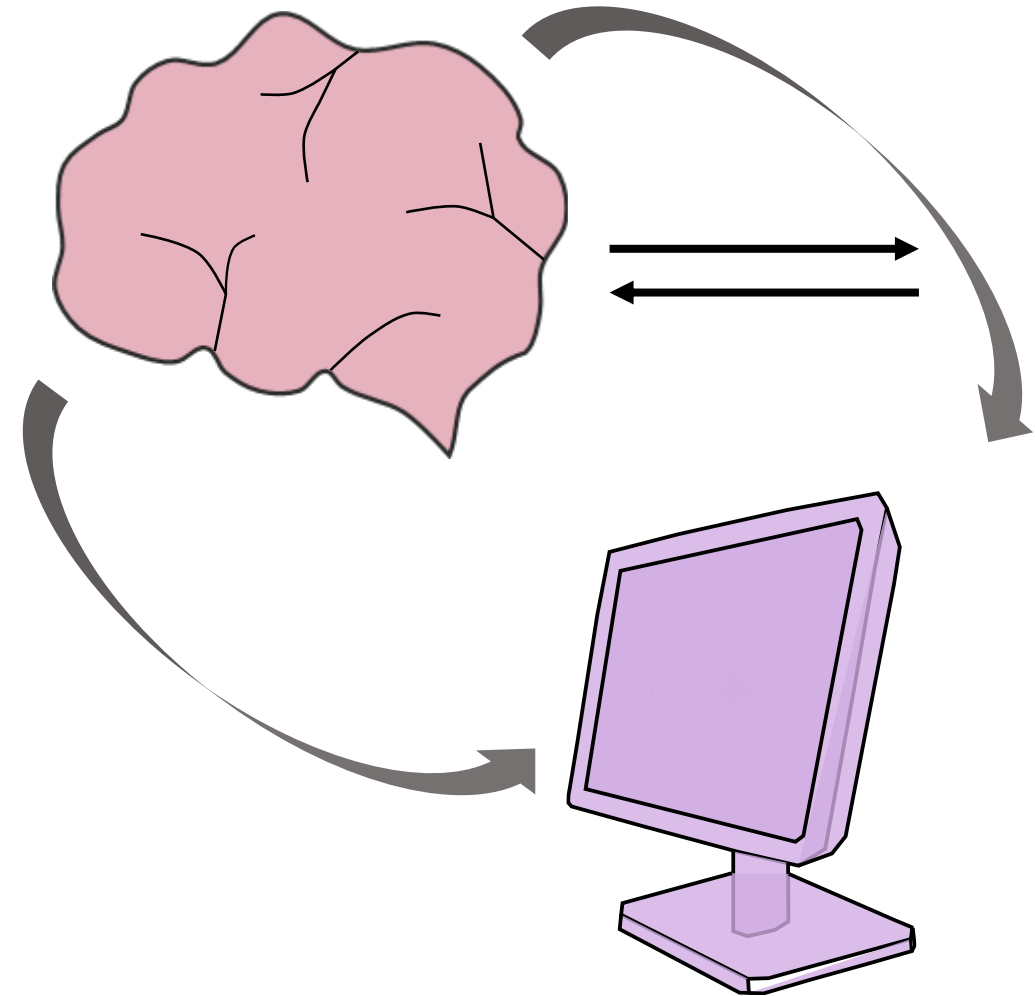
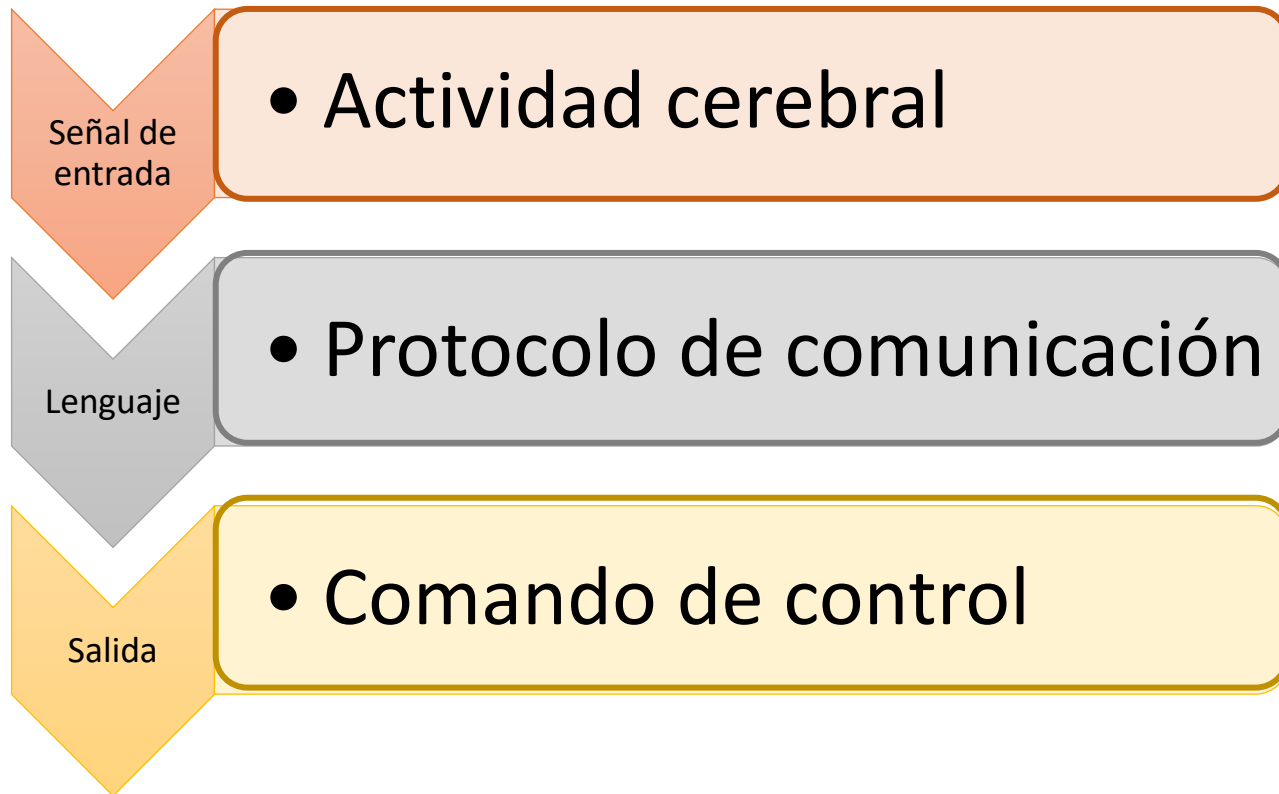
Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Sistema de comunicación: sus partes

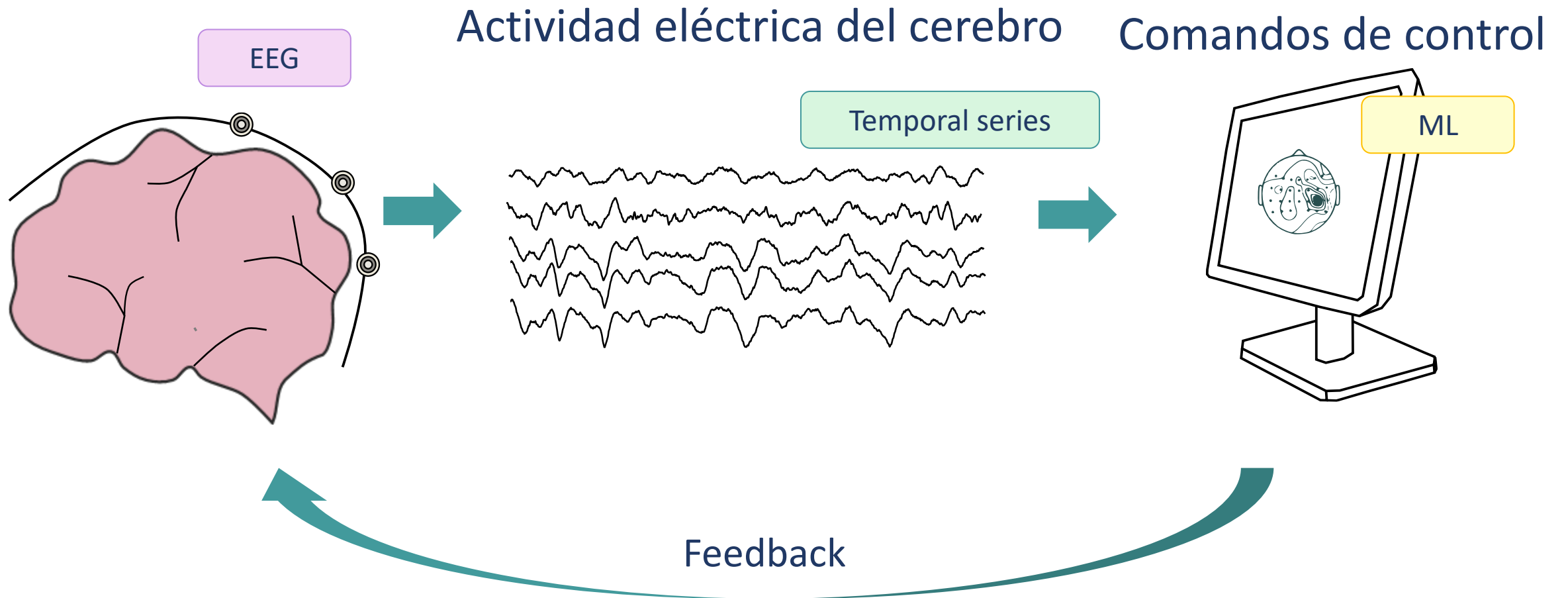


Interfaz cerebro-computadora (BCI)

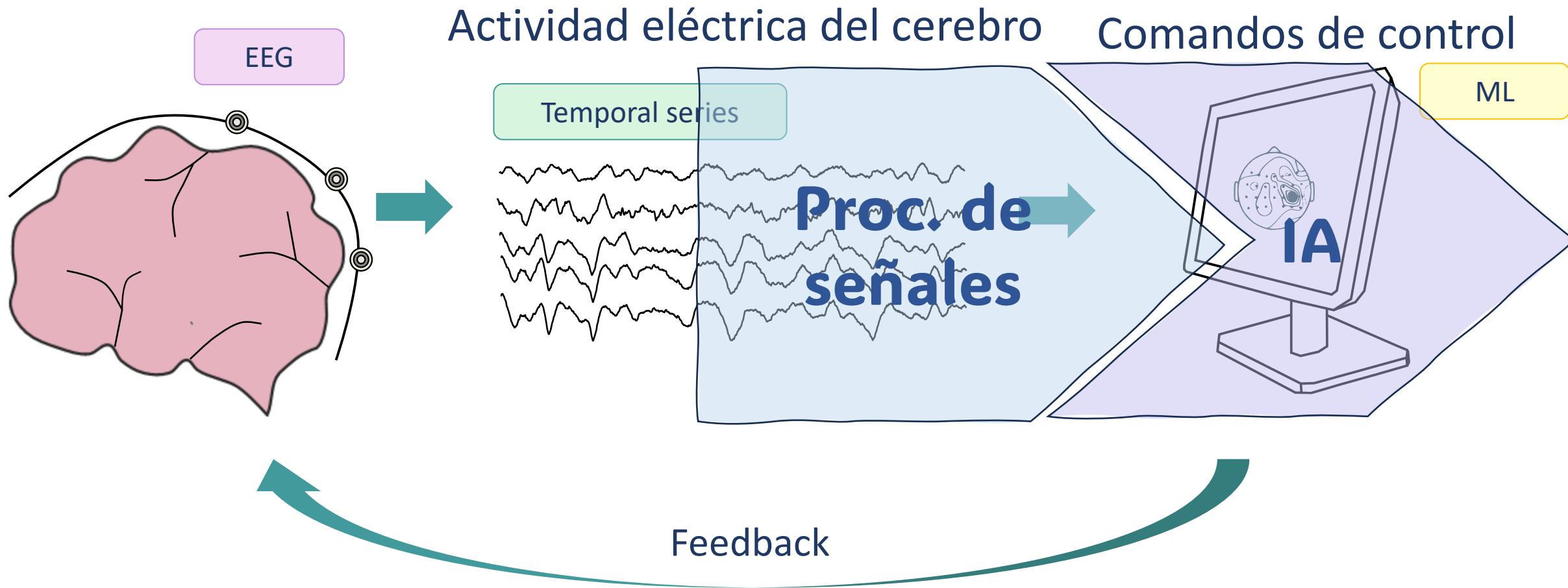
Sistema de comunicación: sus partes



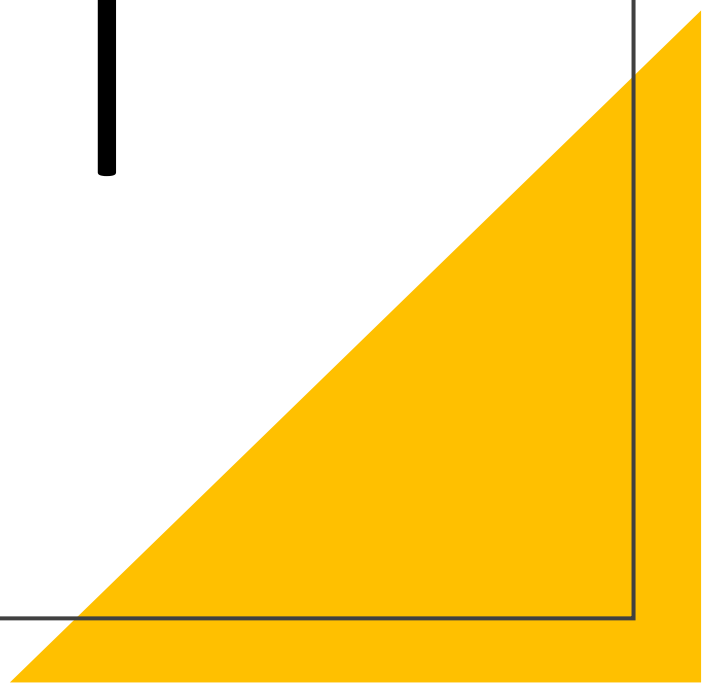
Algoritmo de traducción



Algoritmo de traducción

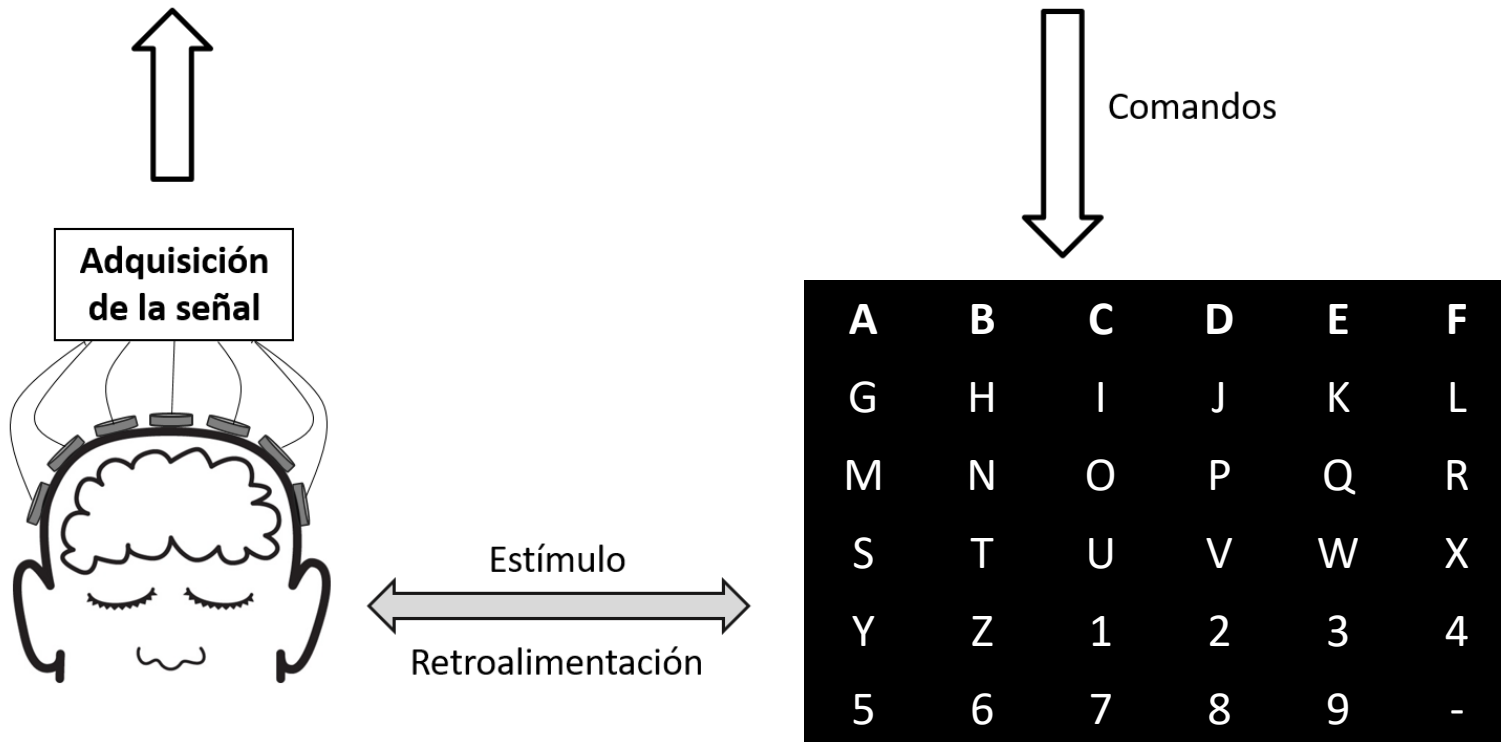


APLICACIÓN I



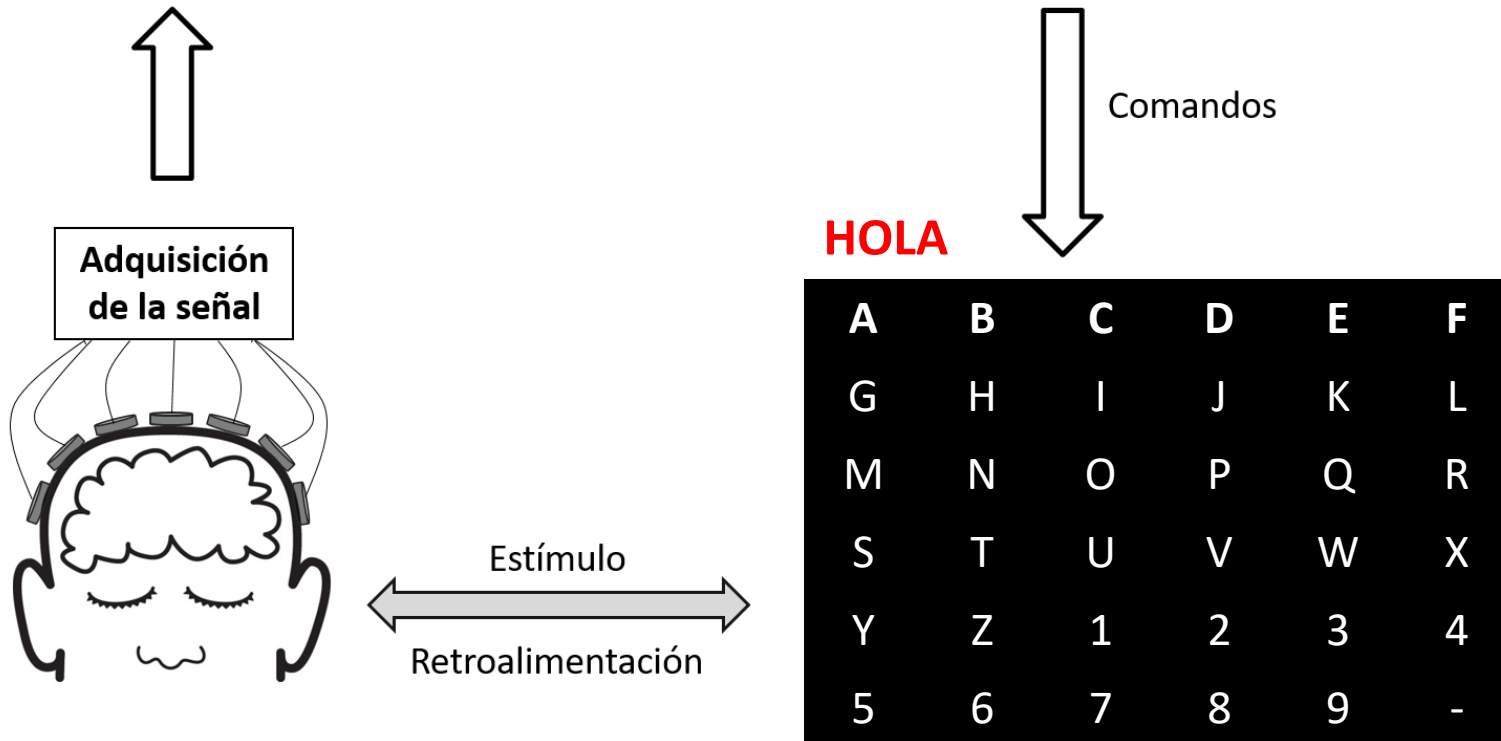
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



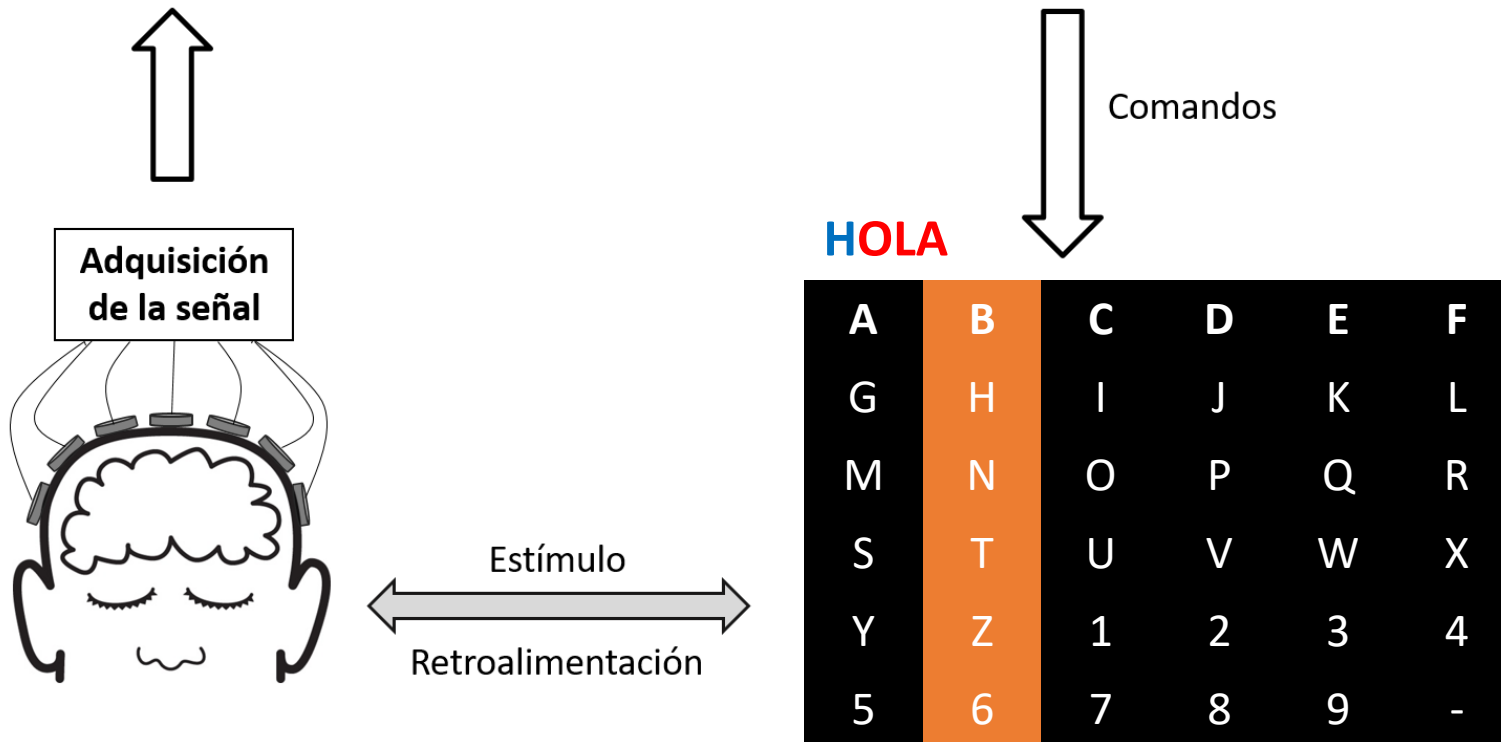
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



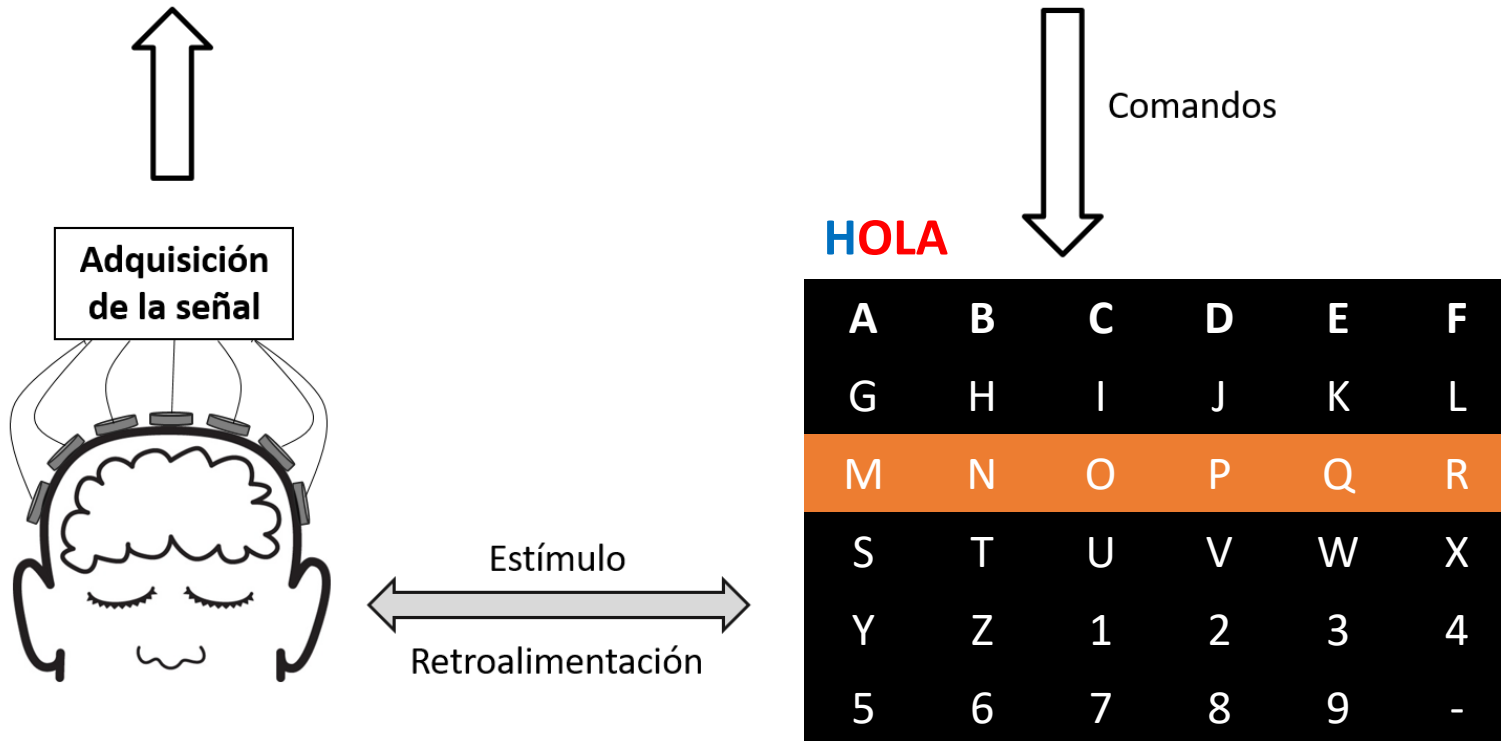
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



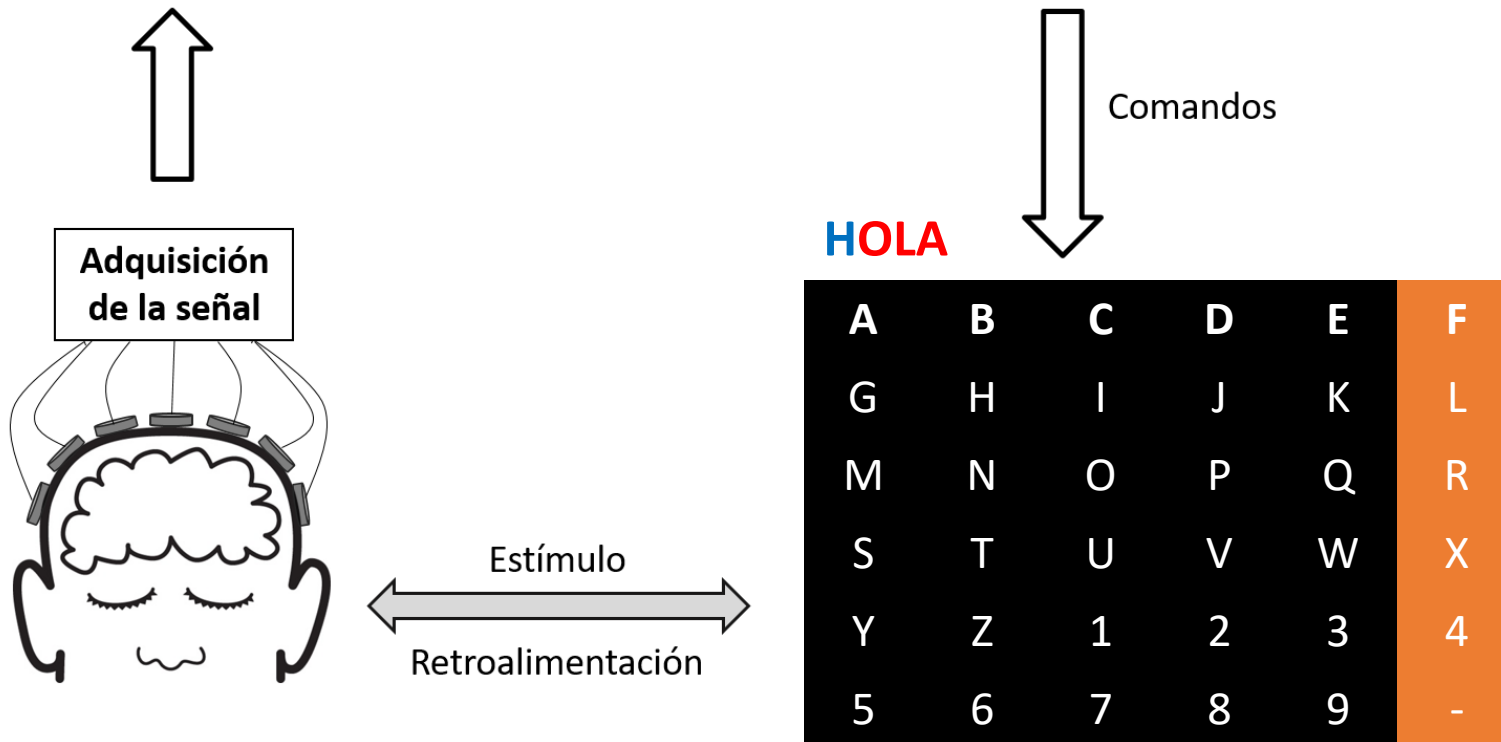
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



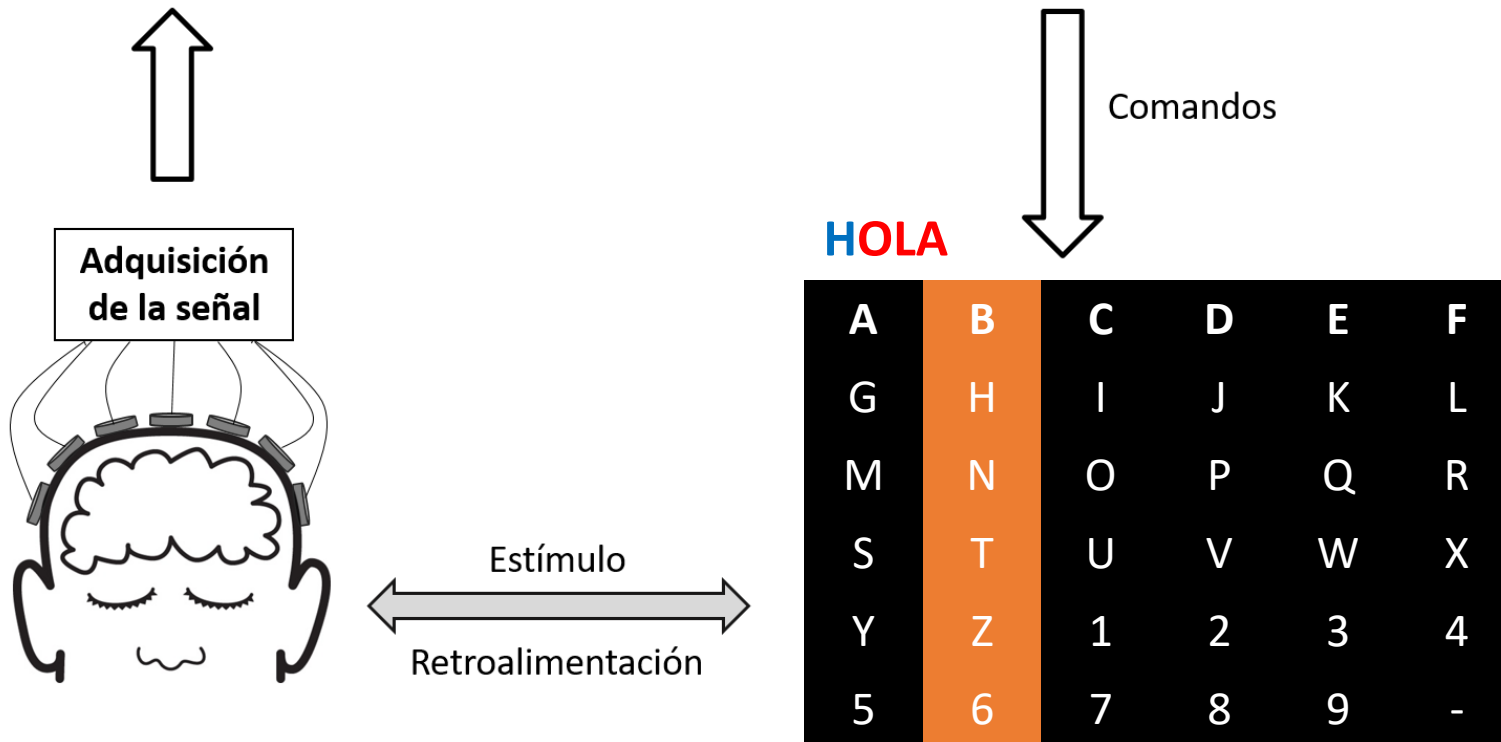
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



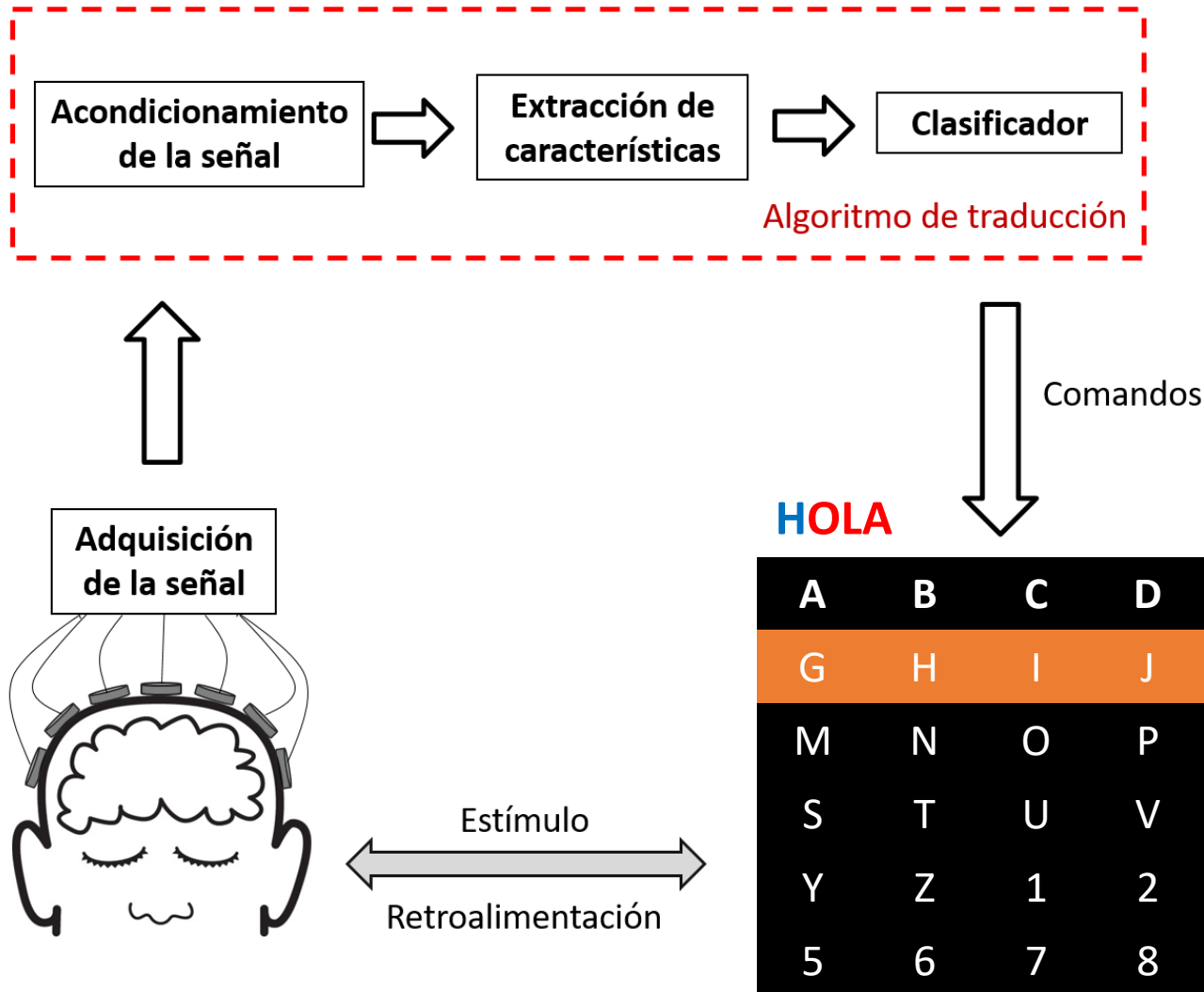
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)

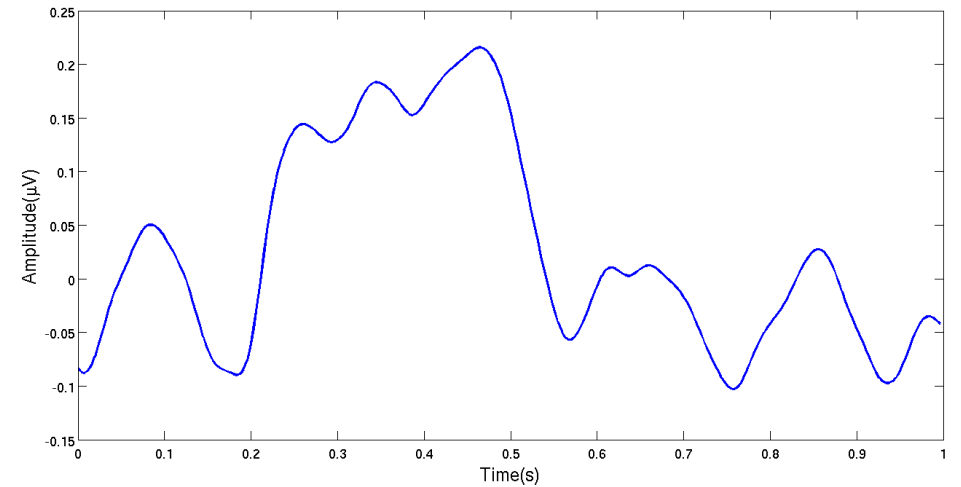


Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)

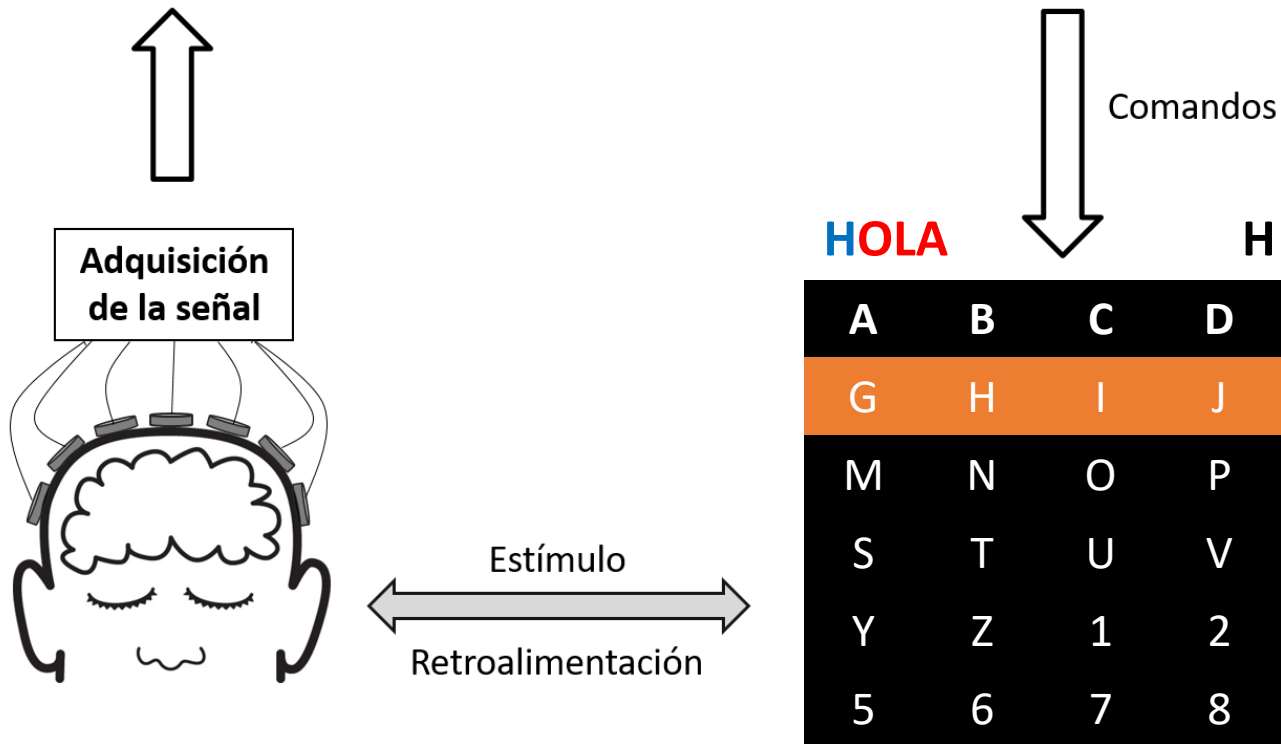


Potencial evocado relacionado a un evento

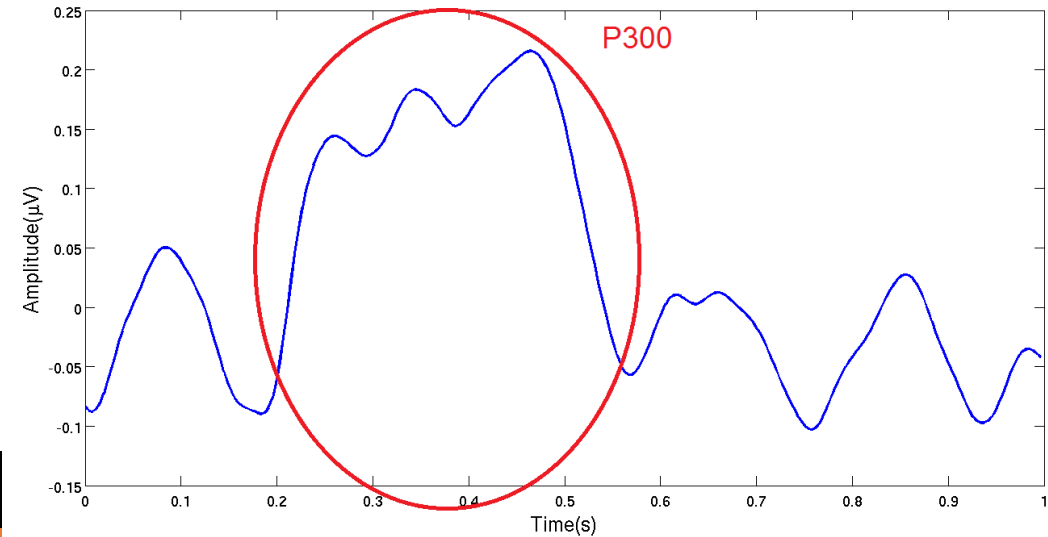


Protocolos de comunicación

Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



Potencial evocado relacionado a un evento
ONDA P300

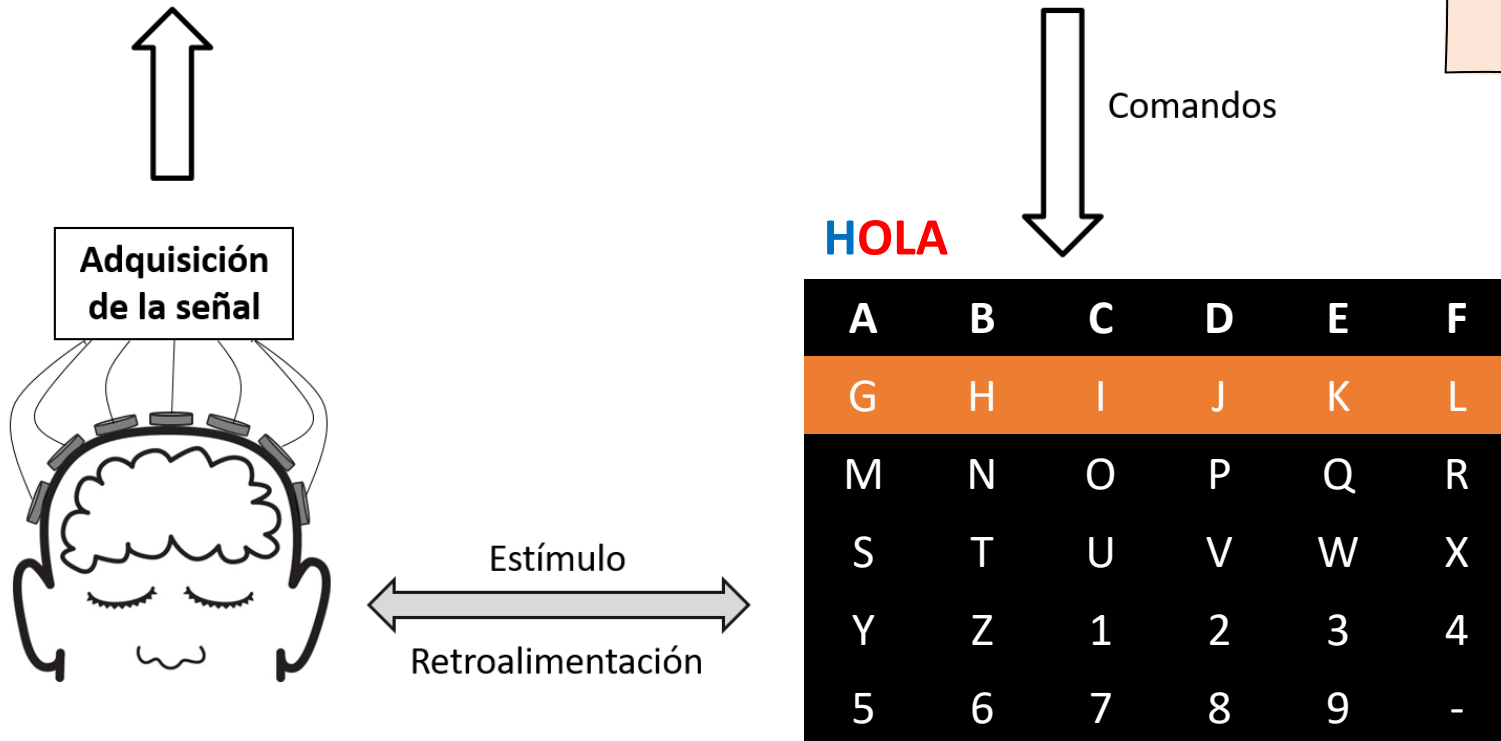


Protocolos de comunicación

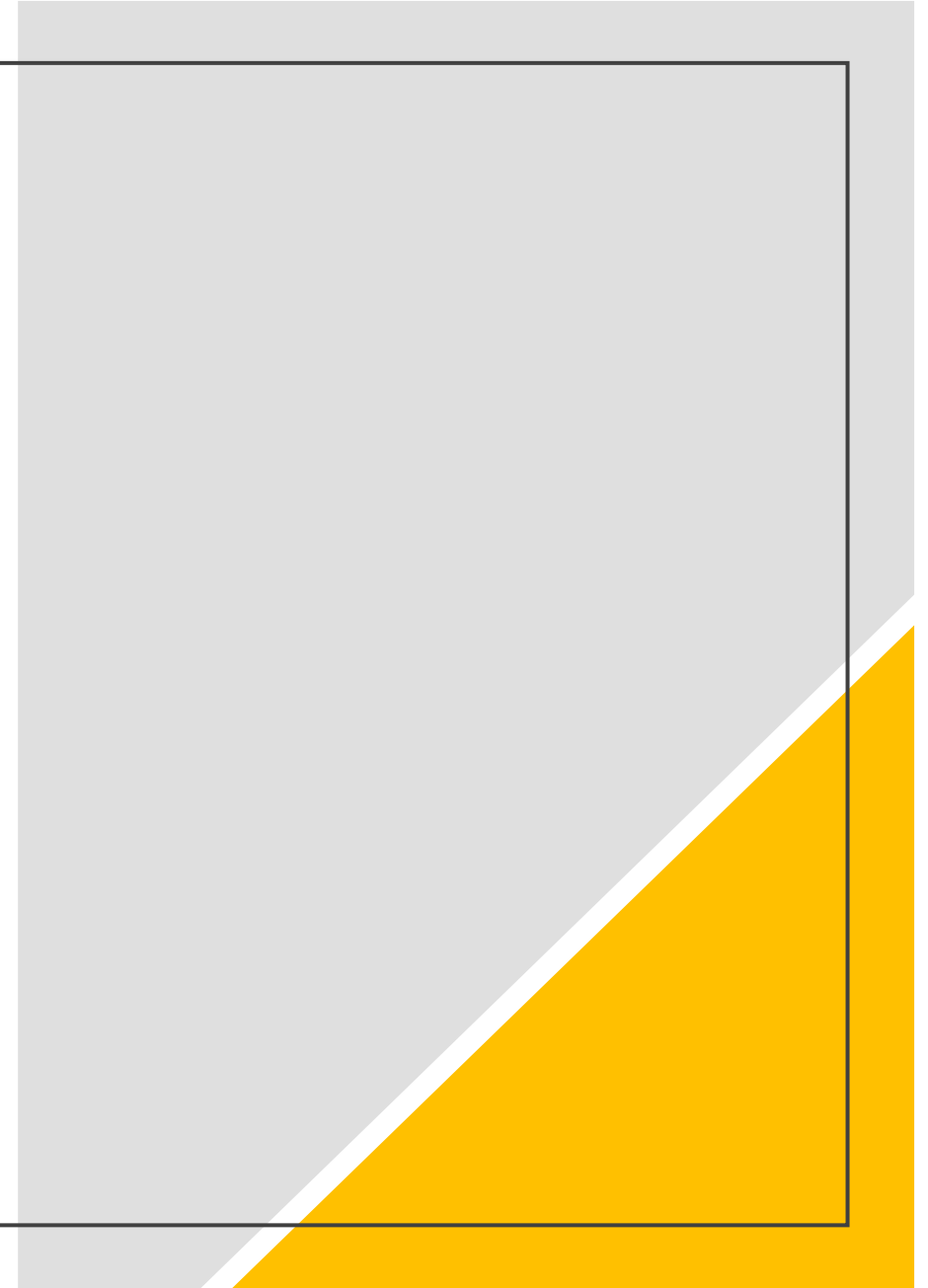
Basados en potenciales relacionados a eventos (ERPs)



- Información temporal: latencia entre 250 y 700 ms post-estímulo
- Información frecuencial: hasta 12 Hz
- Información espacial: electrodos línea media y parieto-occipitales



Técnica básica I



Procesamiento del EEG

Promediación coherente

$$x_k[n] = s[n] + n_k[n], \quad n = 1, \dots, N_E, k = 1, \dots, N_T$$

Señal de interés (pointing to $s[n]$)
Señal observada (pointing to $x_k[n]$)
Ruido aleatorio (pointing to $n_k[n]$)

$$\bar{x}_N[n] = \frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} x_k[n].$$

$$\bar{x}_N[n] = \frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} (s[n] + n_k[n]) = s[n] + \frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} n_k[n]$$

$$\mathbb{E}[\bar{x}_N[n]] = s[n]$$

Supuestos

$$\mathbb{E}[n_k[n]] = 0$$

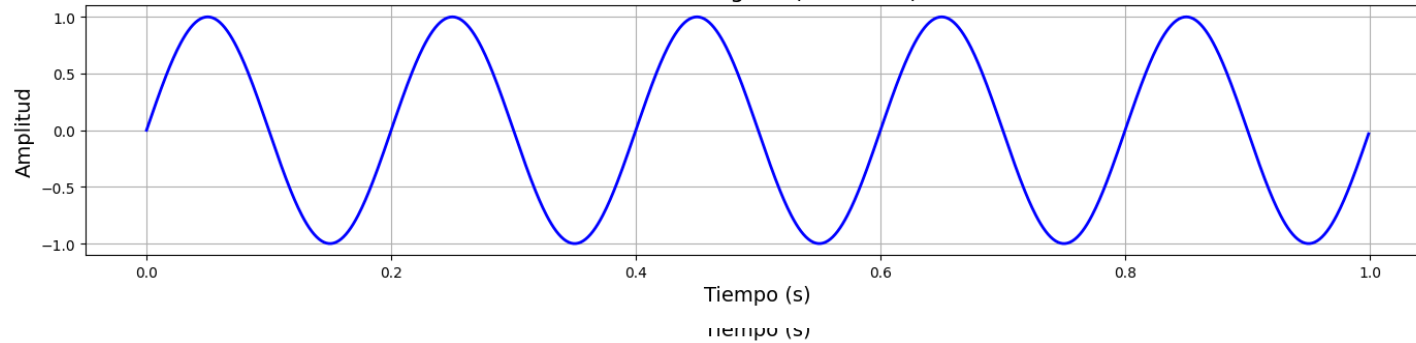
$$\text{Cov}(s[n], n_k[n]) = 0$$

$$\mathbb{E}[n_k[n] n_j[n]] = 0, \text{ para } k \neq j.$$

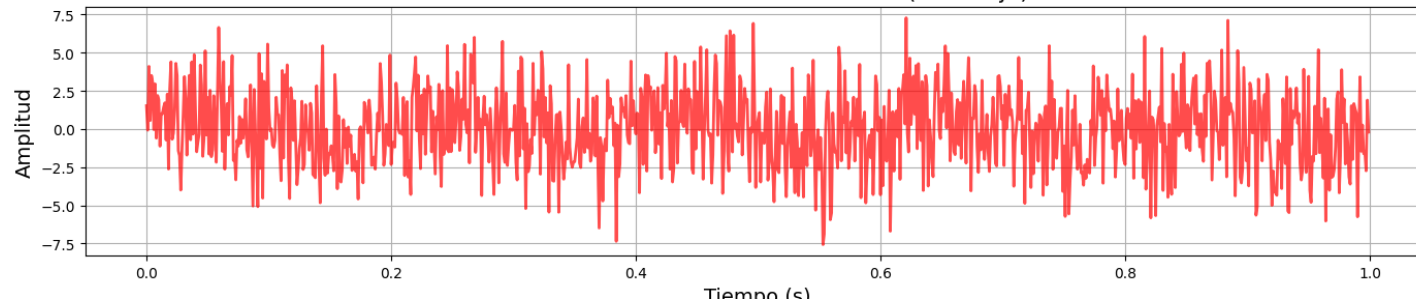
Procesamiento del EEG

Promediación coherente

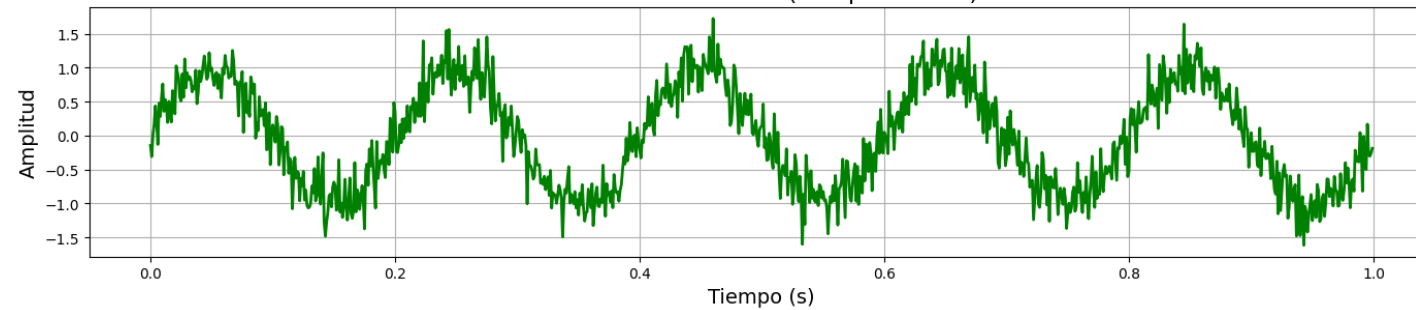
1. Señal Original (Sin Ruido)



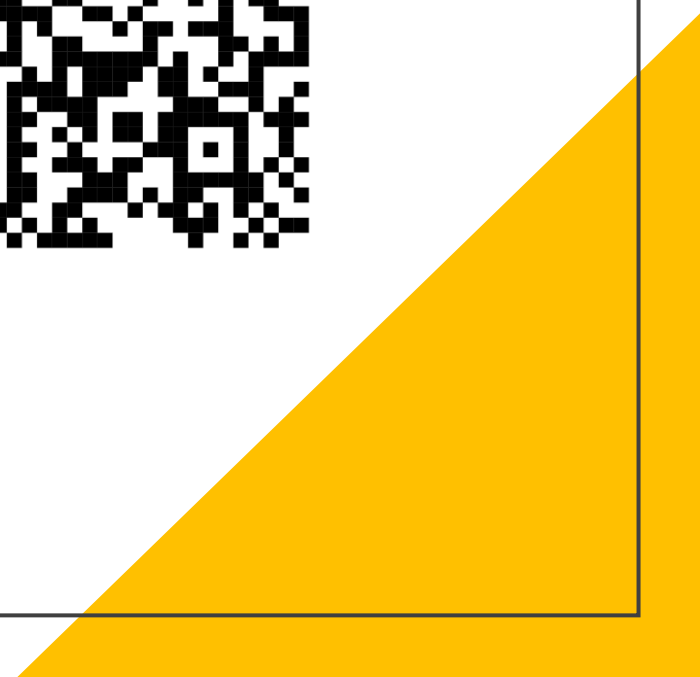
2. Una Instancia de Señal con Ruido (SNR baja)



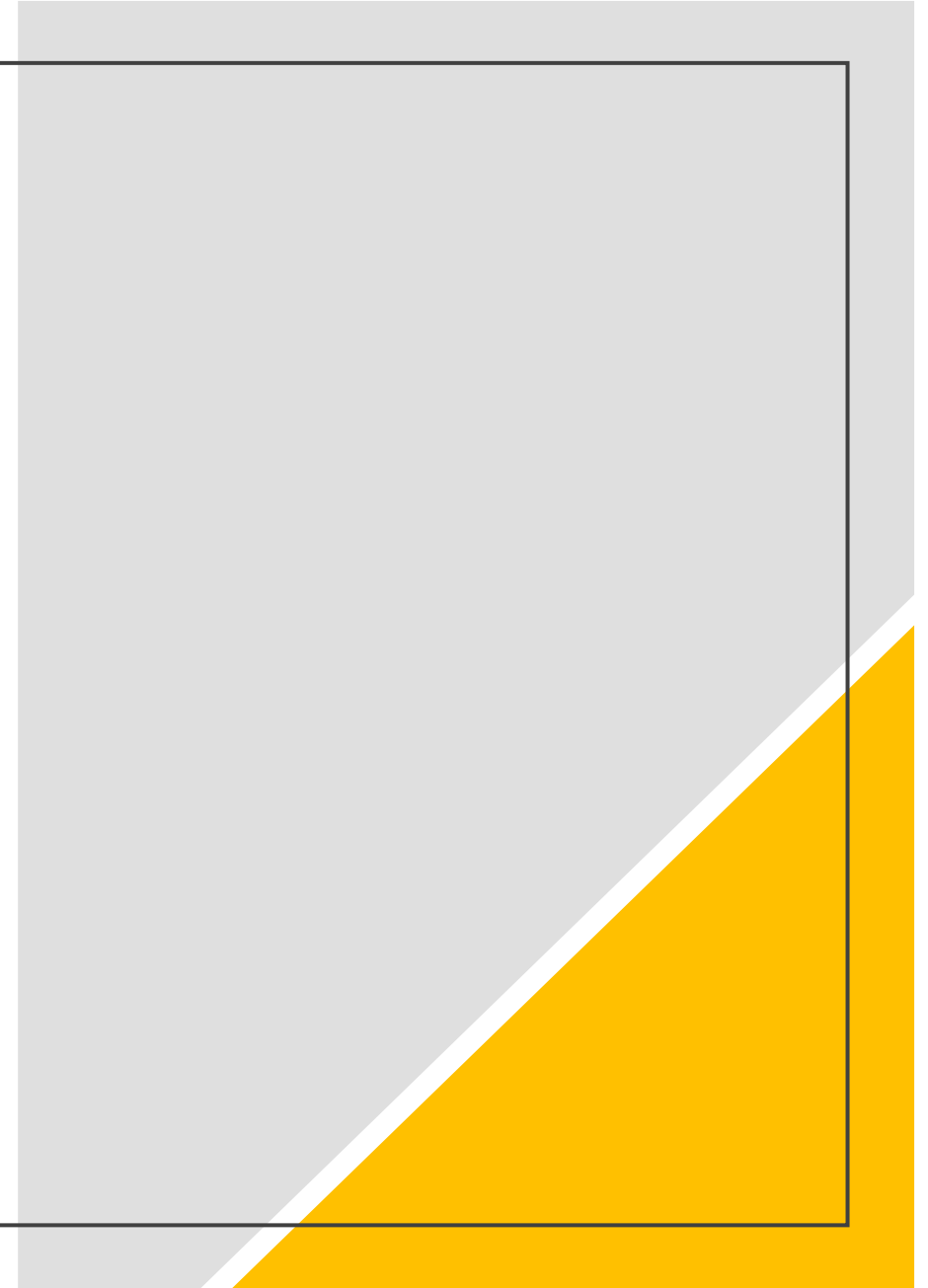
3. Señal Promediada (100 promedios)



COLAB

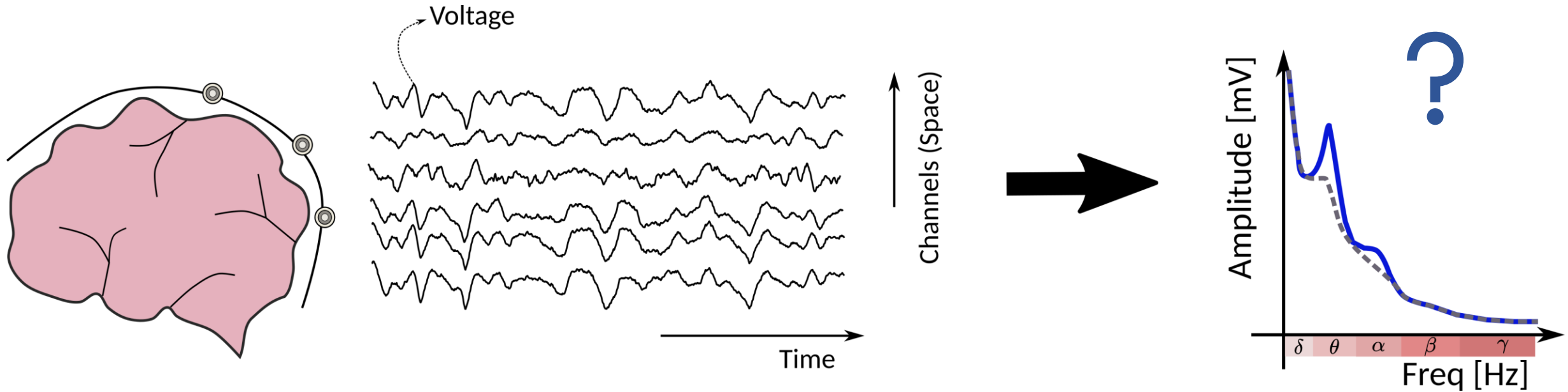


Técnica básica II



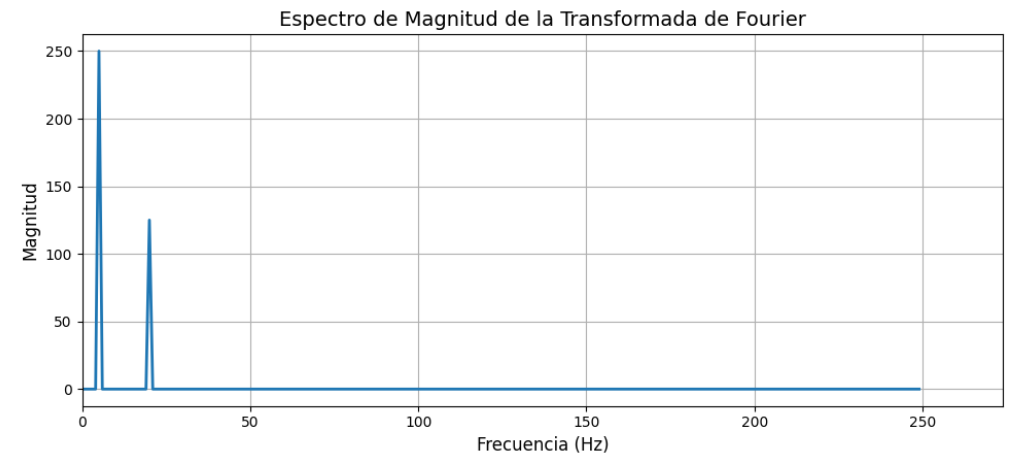
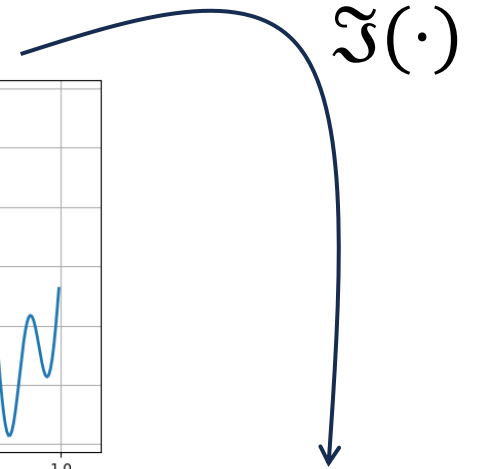
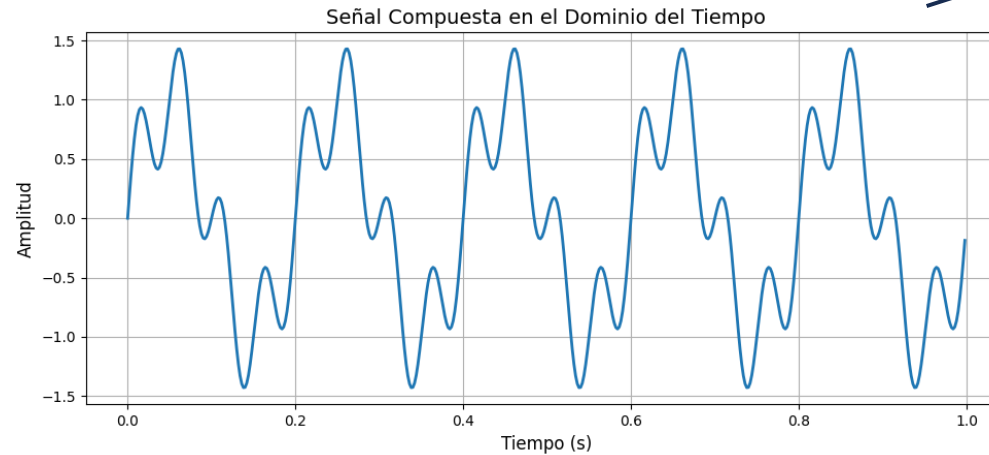
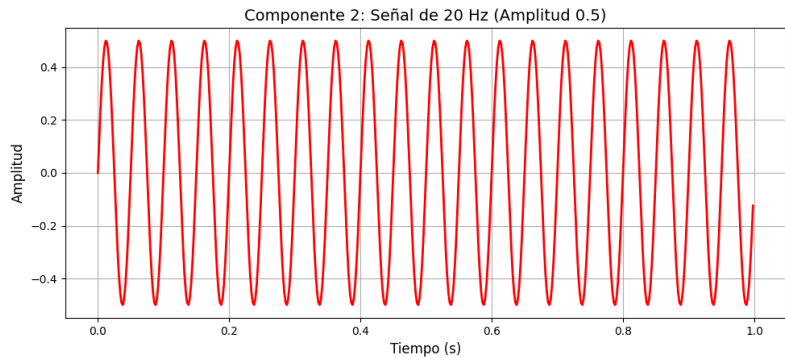
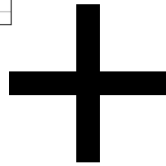
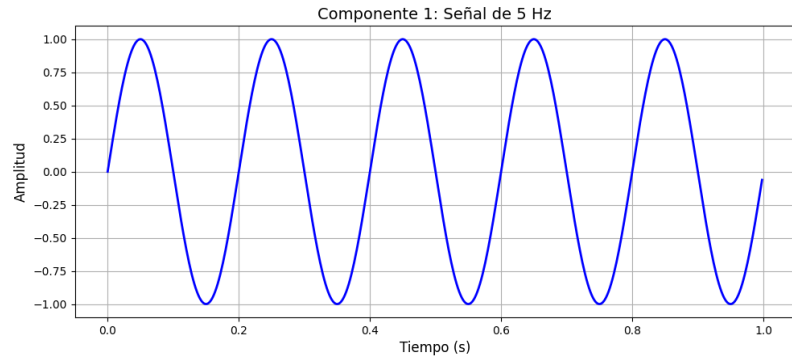
Procesamiento del EEG

Del dominio temporal al frecuencial



Procesamiento del EEG

Del dominio temporal al frecuencial



Procesamiento del EEG

Representación “frecuencial”

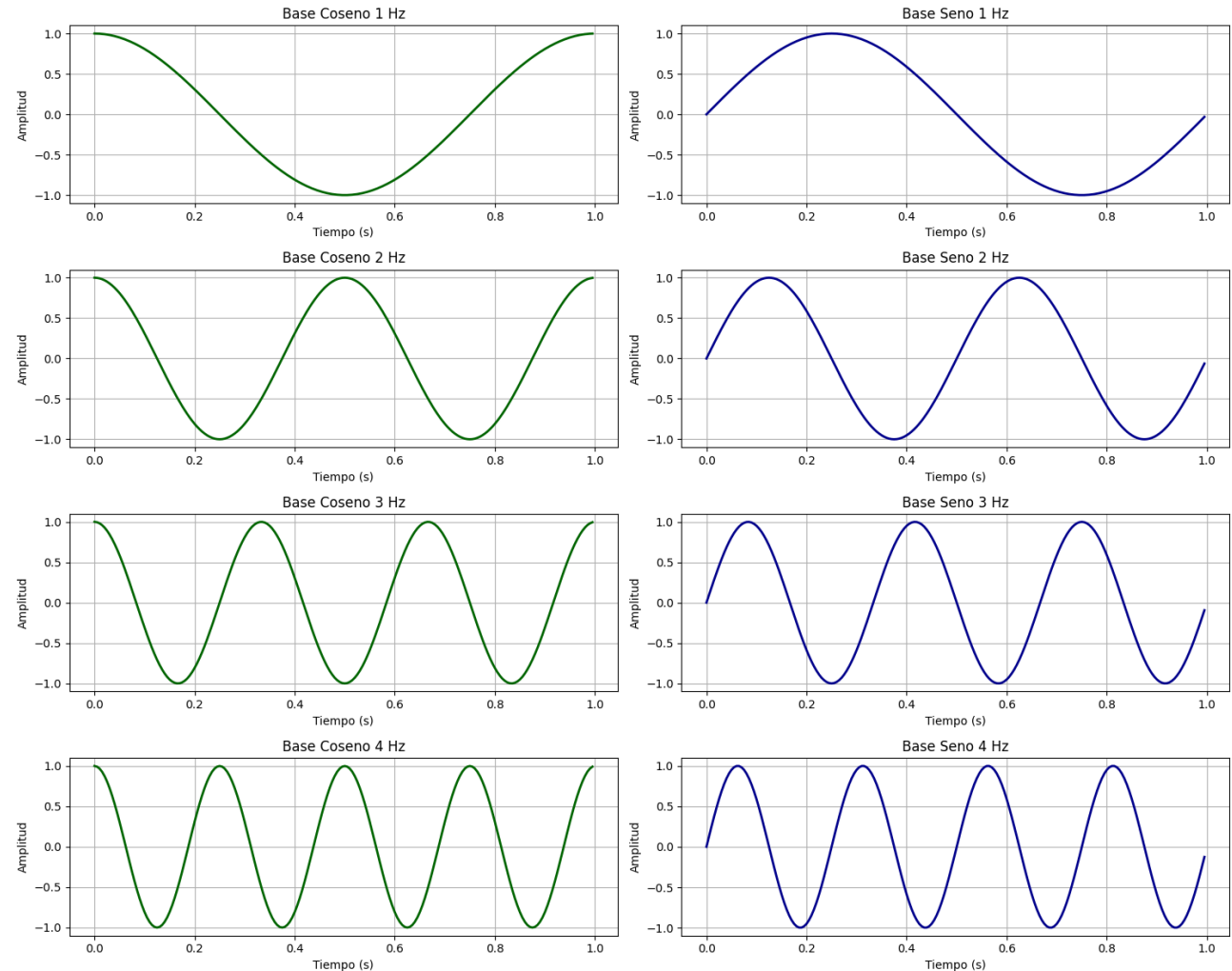
Transformada de Fourier Discreta (DTF)

Base Ortogonal de Fourier

$$e^{-j2\pi\frac{kn}{N}} = \cos\left(2\pi\frac{kn}{N}\right) - j \sin\left(2\pi\frac{kn}{N}\right)$$

Cada exponencial compleja representa una onda de frecuencia discreta k/N , con parte real y parte imaginaria ortogonales en el plano

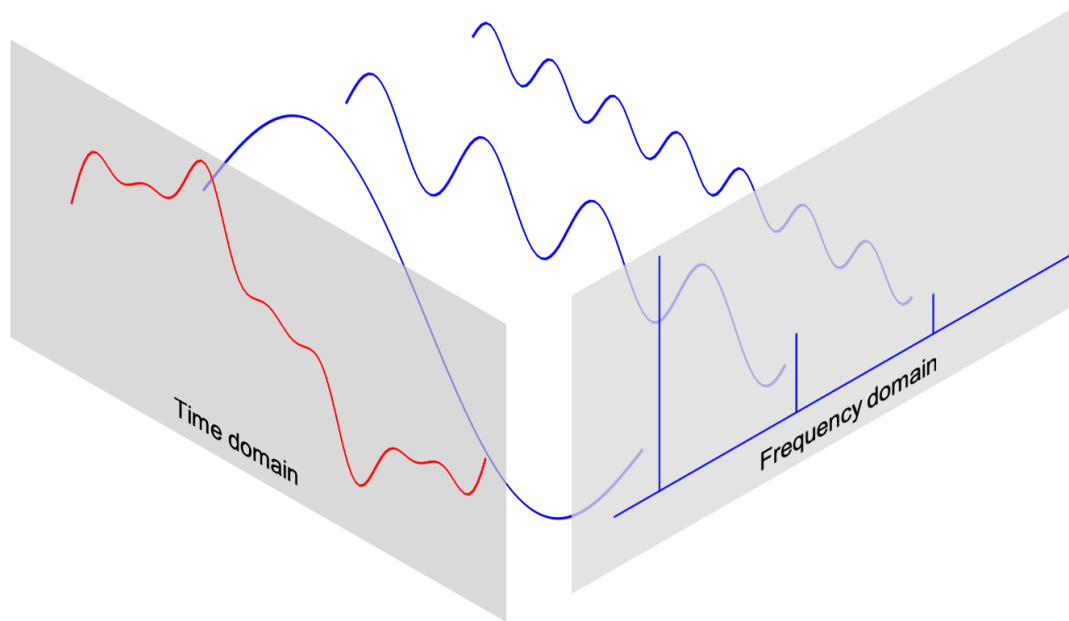
Ejemplo de Funciones Base de Fourier (Coseno y Seno)



Procesamiento del EEG

Representación “frecuencial”

Transformada de Fourier Discreta (DTF)



Descomposición frecuencial

Sea $x[n]$, $n = 0, \dots, N - 1$, mi señal de interés

Dada una base ortogonal de exponenciales complejas denotada mediante:

$$e^{-j2\pi kn/N}$$

¿cuál es la descomposición de mi señal en dicha BON?

Transformada discreta de Fourier

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad k = 0, \dots, N - 1$$

$$X[k] = \langle x, e_k \rangle$$

Coordenadas de la nueva base

*Medida de “parecido”
con una señal periódica*

Cambio de base

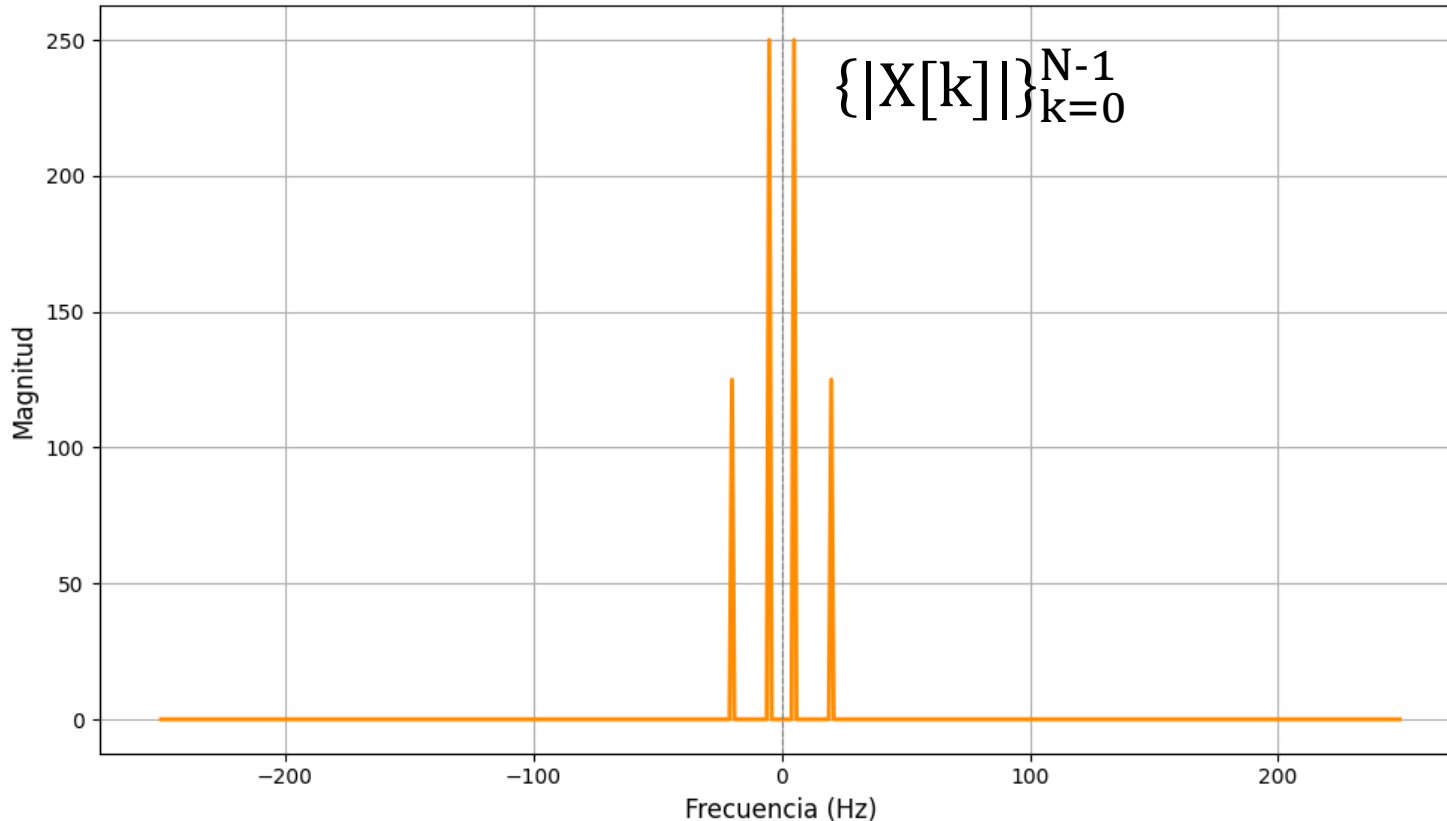
Procesamiento del EEG

Espectro de Fourier

Transformada de Fourier Discreta (DTF)

Espectro de Magnitud de Fourier

Espectro de Magnitud Completo (Frecuencias Positivas y Negativas)



Es una función PAR que muestra para cada componente frecuencial el valor (magnitud/amplitud) de los coeficientes de Fourier

↳ *Representación de la señal en el dominio de la frecuencia*

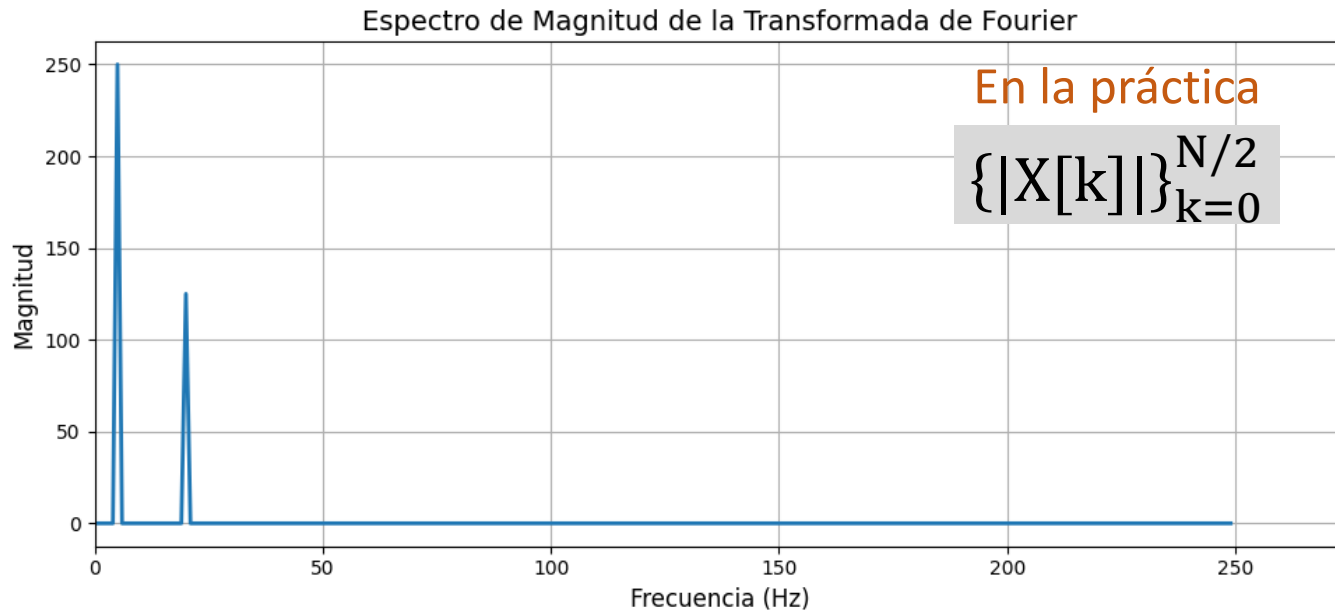
Energía aportada por cada frecuencia

Procesamiento del EEG

Espectro de Fourier

Transformada de Fourier Discreta (DTF)

Espectro de Magnitud de Fourier



↳ Sólo frecuencias
positivas

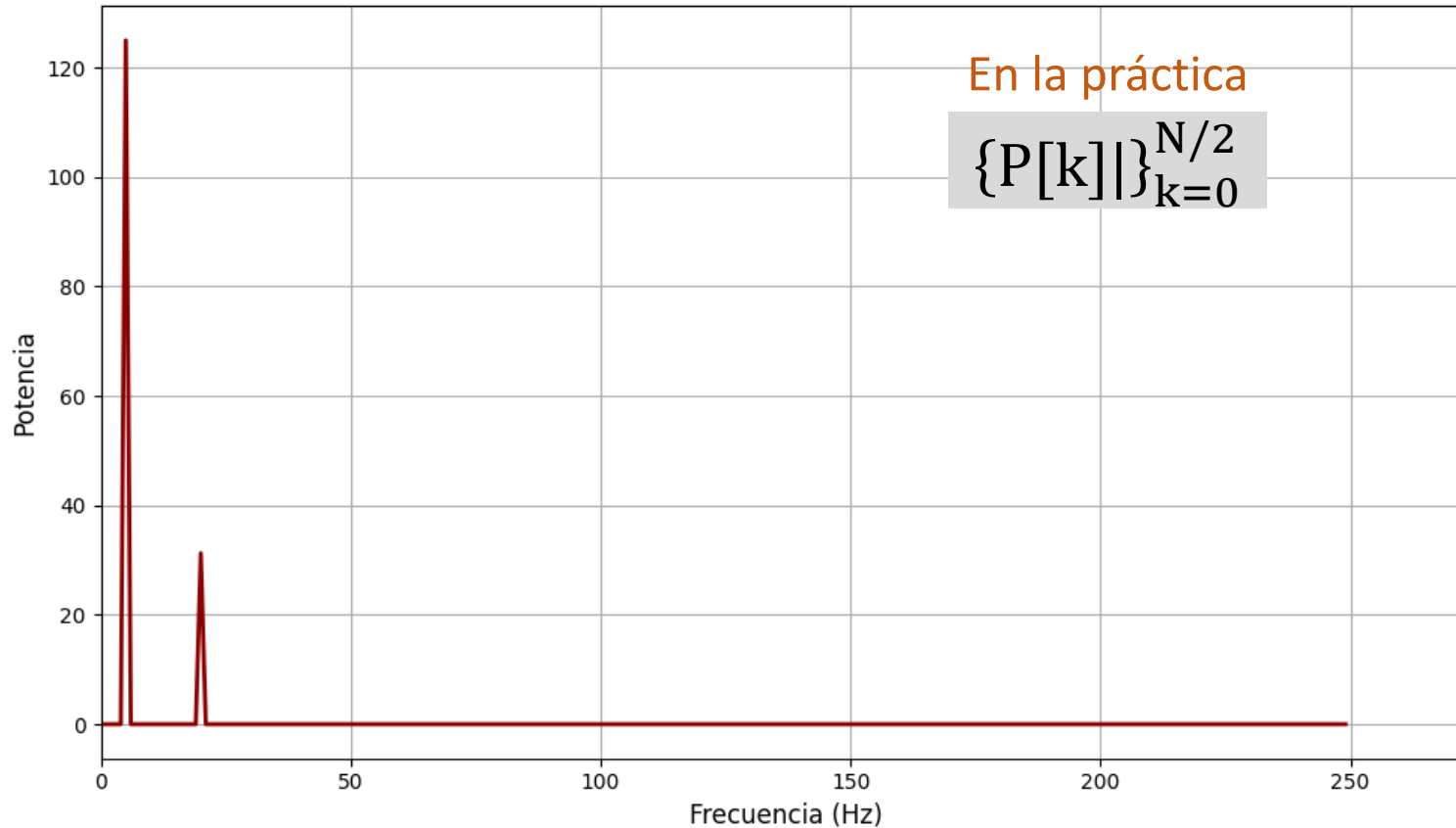
Procesamiento del EEG

Espectro de Fourier

Transformada de Fourier Discreta (DTF)

Espectro de Potencia de Fourier

Espectro de Potencia de la Señal Compuesta (Frecuencias Positivas)



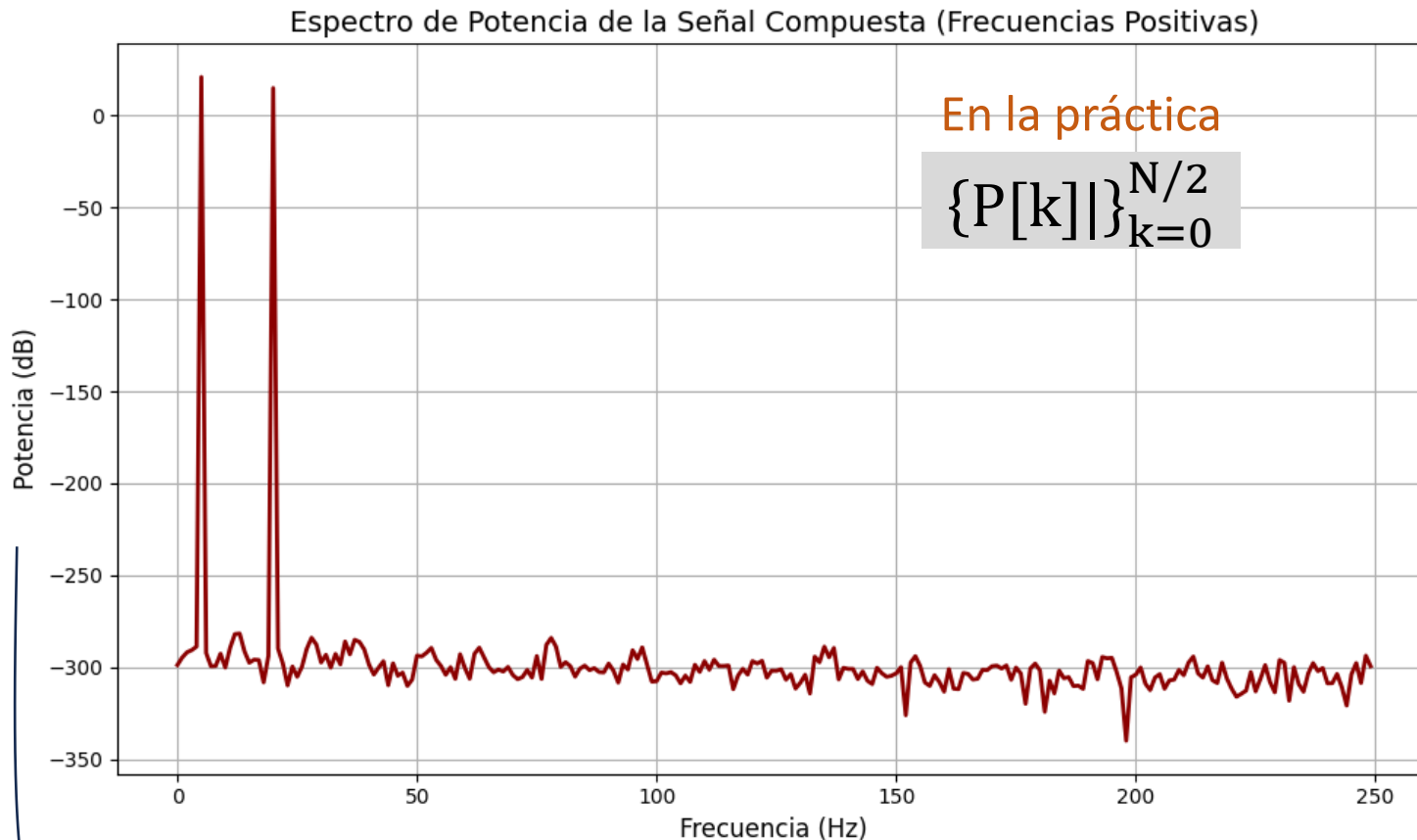
$$P[k] = \frac{1}{N} |X[k]|^2$$

Procesamiento del EEG

Espectro de Fourier

Transformada de Fourier Discreta (DTF)

Espectro de Potencia de Fourier



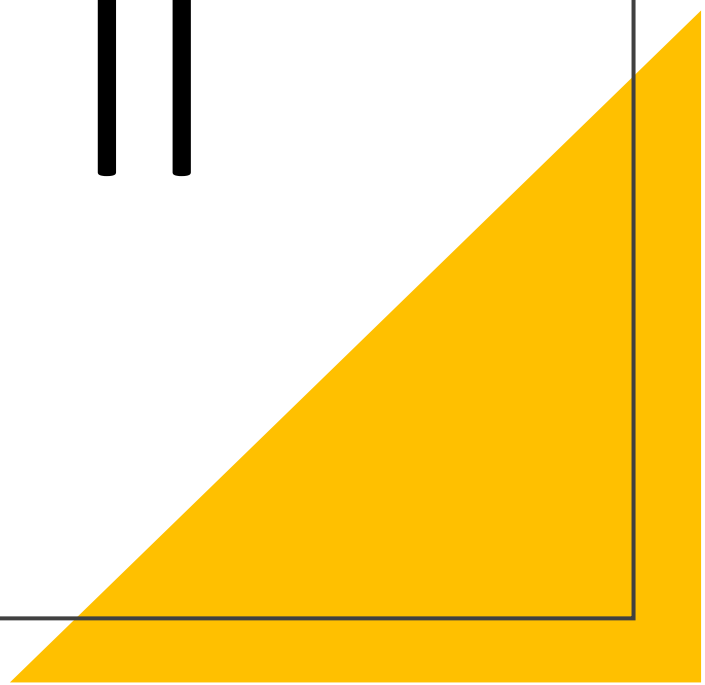
$$P[k] = \frac{1}{N} |X[k]|^2$$

$$P_{dB}[k] = 10 \log_{10}(|X[k]|^2).$$

Para mejorar la interpretabilidad

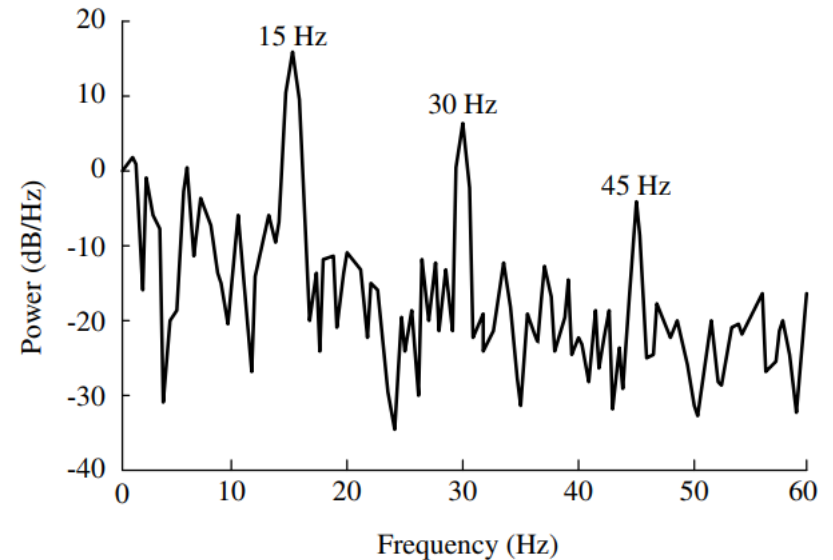
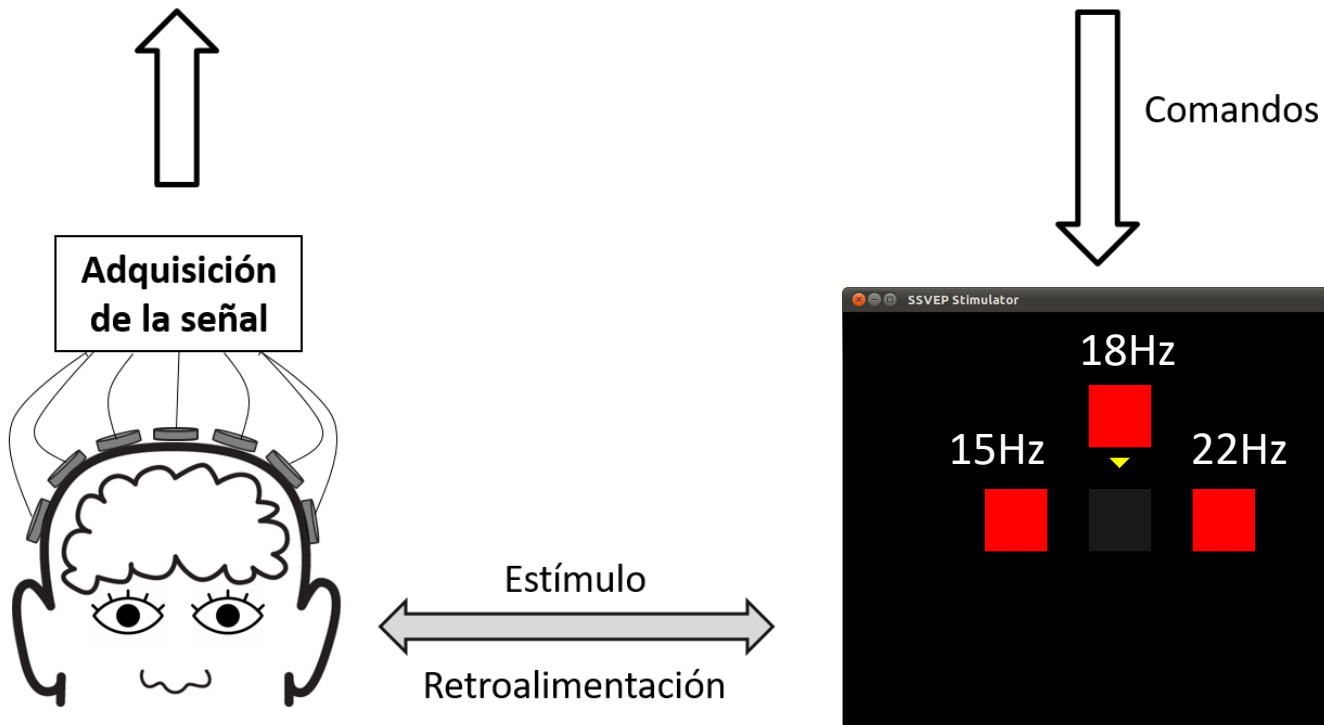
Transformamos a decibelios

APLICACIÓN II



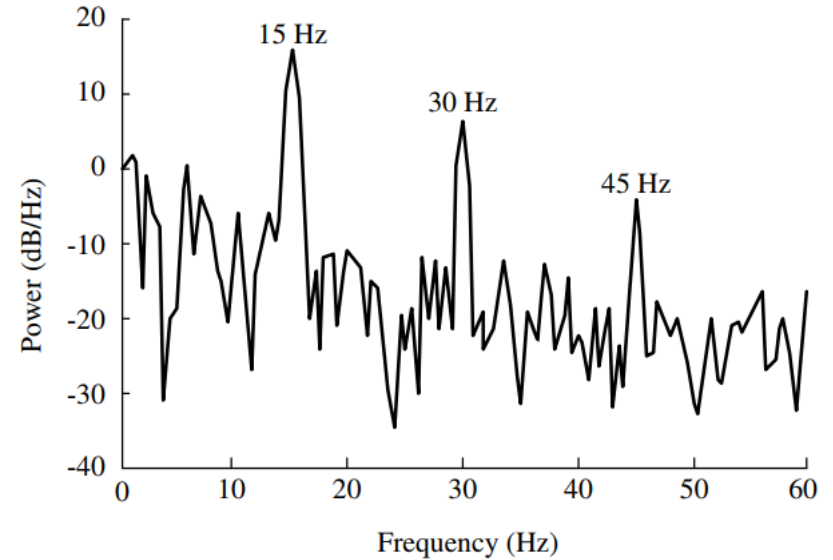
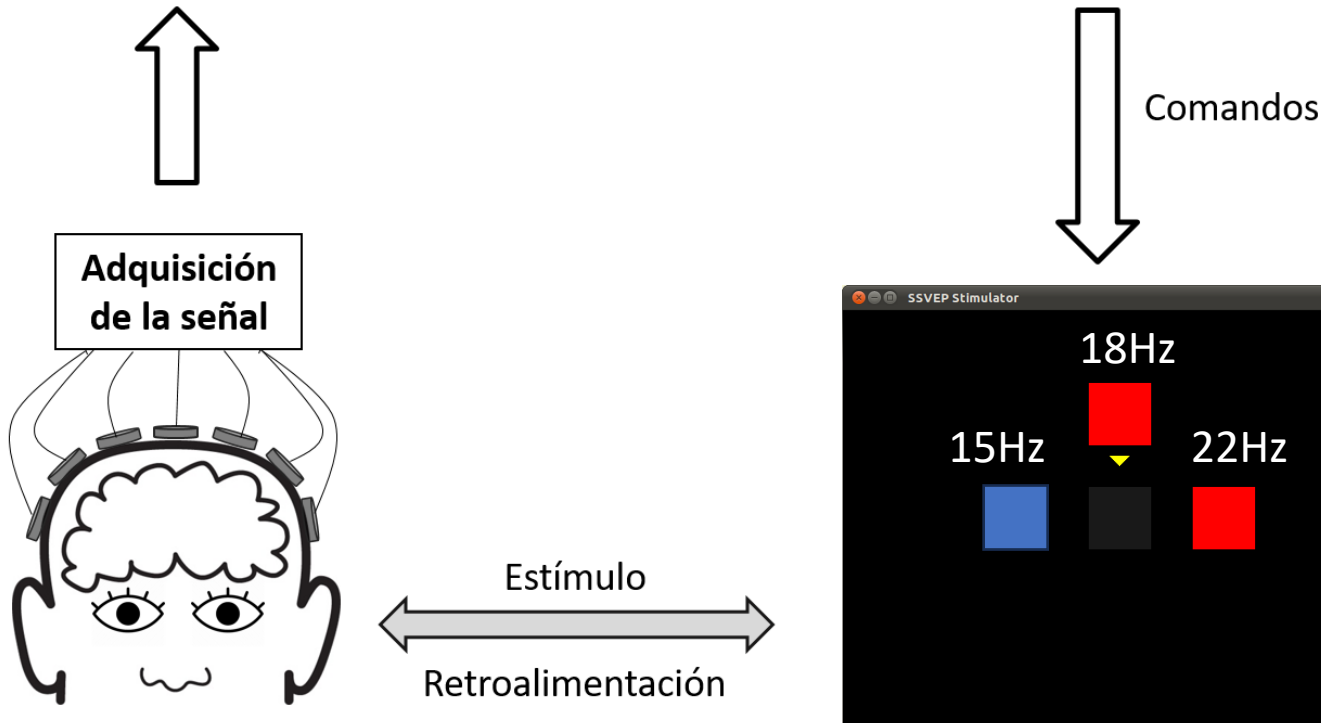
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales evocados visualmente en estado estacionario (SSVEP)



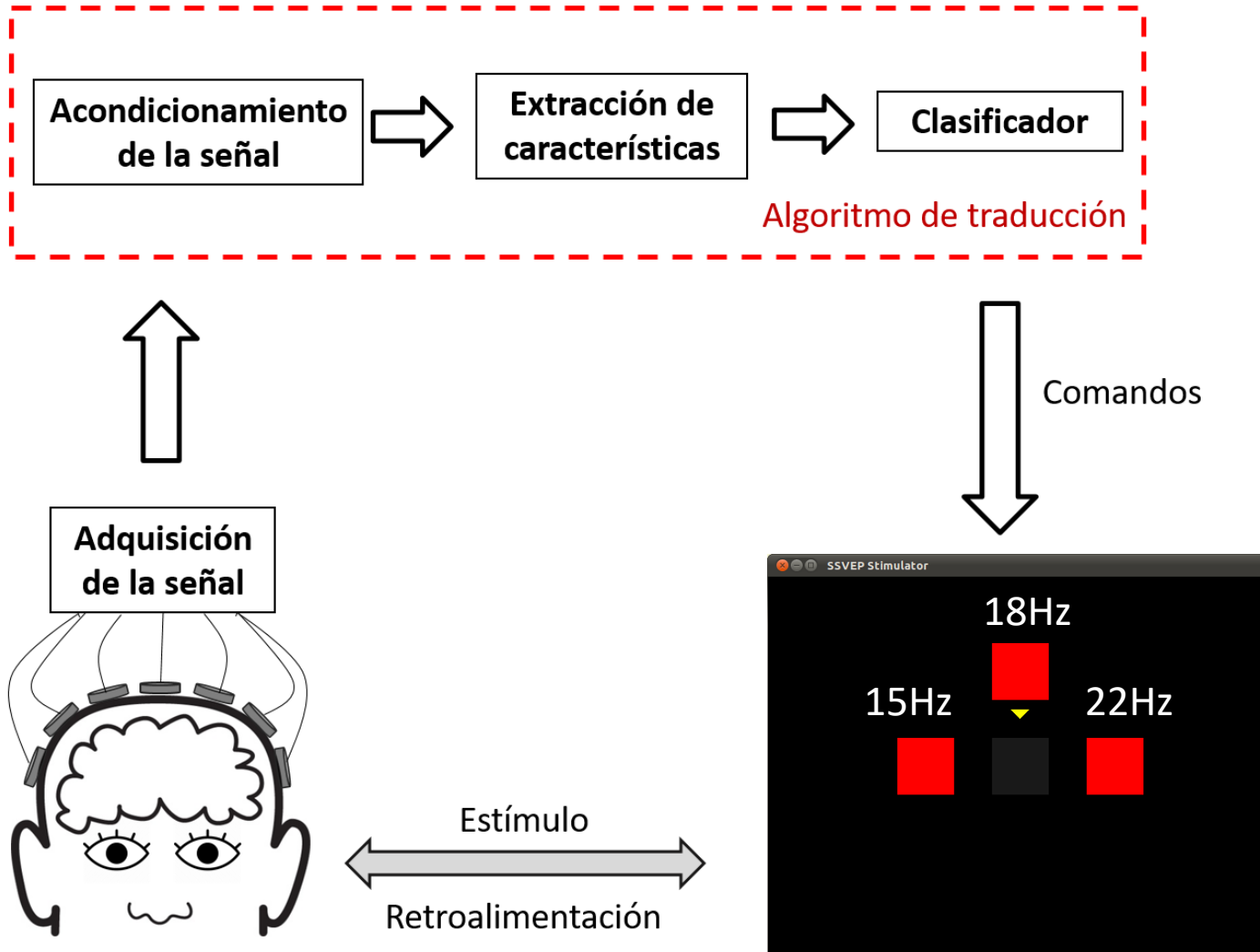
Protocolos de comunicación

Basados en potenciales evocados visualmente en estado estacionario (SSVEP)



Protocolos de comunicación

Basados en potenciales evocados visualmente en estado estacionario (SSVEP)



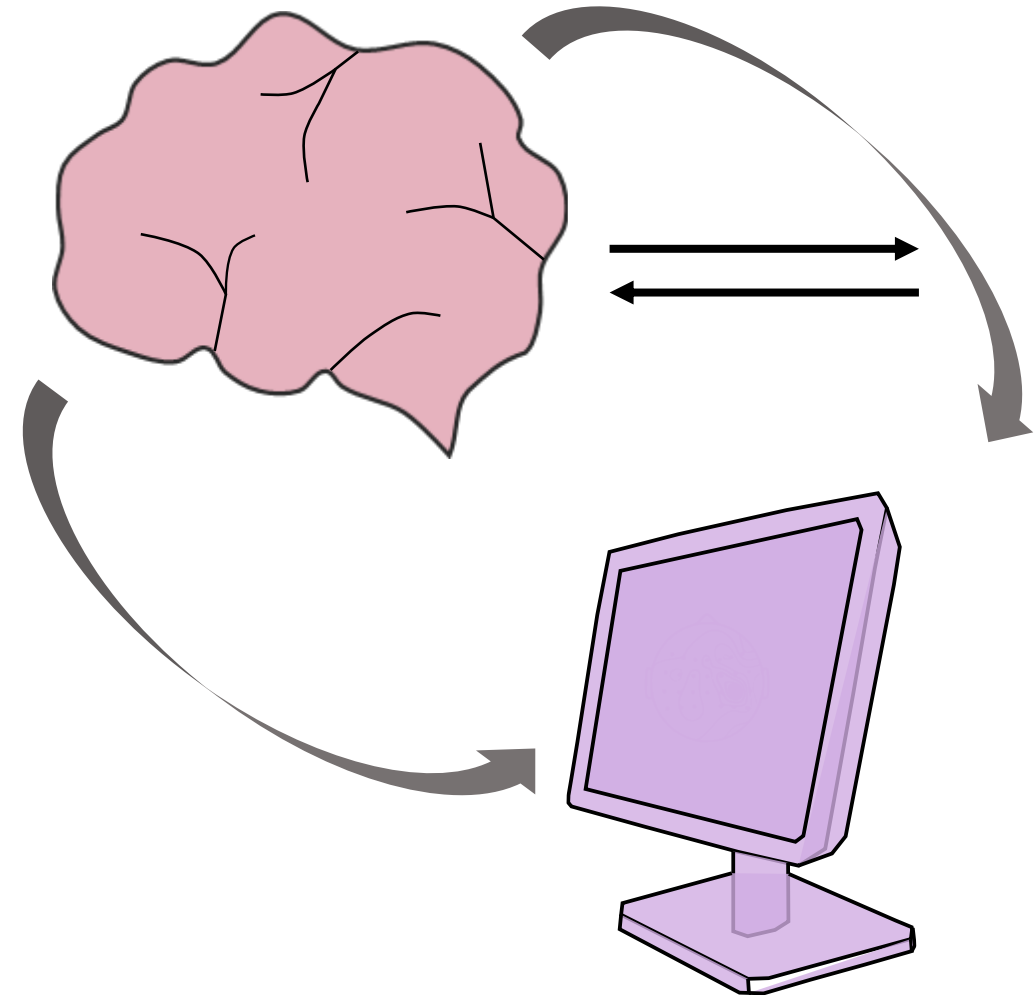
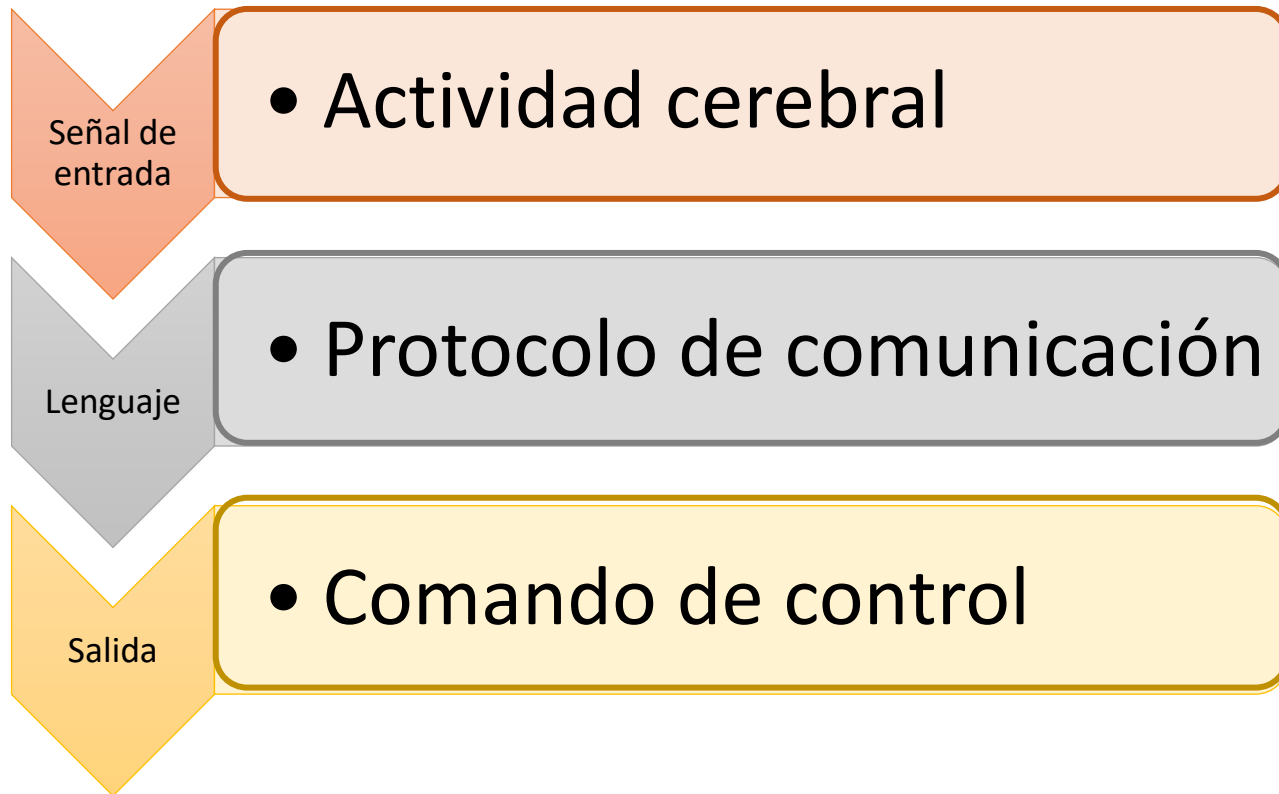
- Información frecuencial: frecuencia fundamental del flashing y sus armónicas.
- Información espacial: corteza visual
- Información temporal: no informativa

COLAB



Interfaz cerebro-computadora (BCI)

Sistema de comunicación: sus partes



Líneas de investigación NiCALab

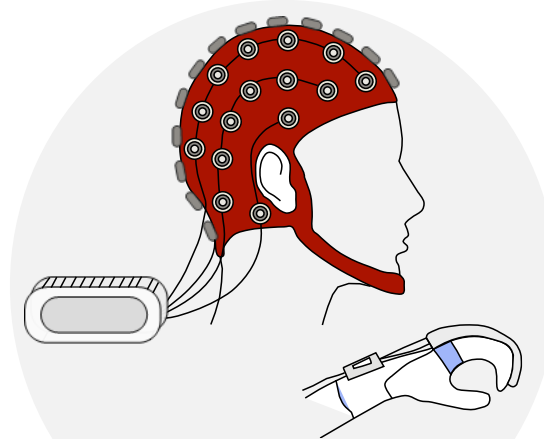
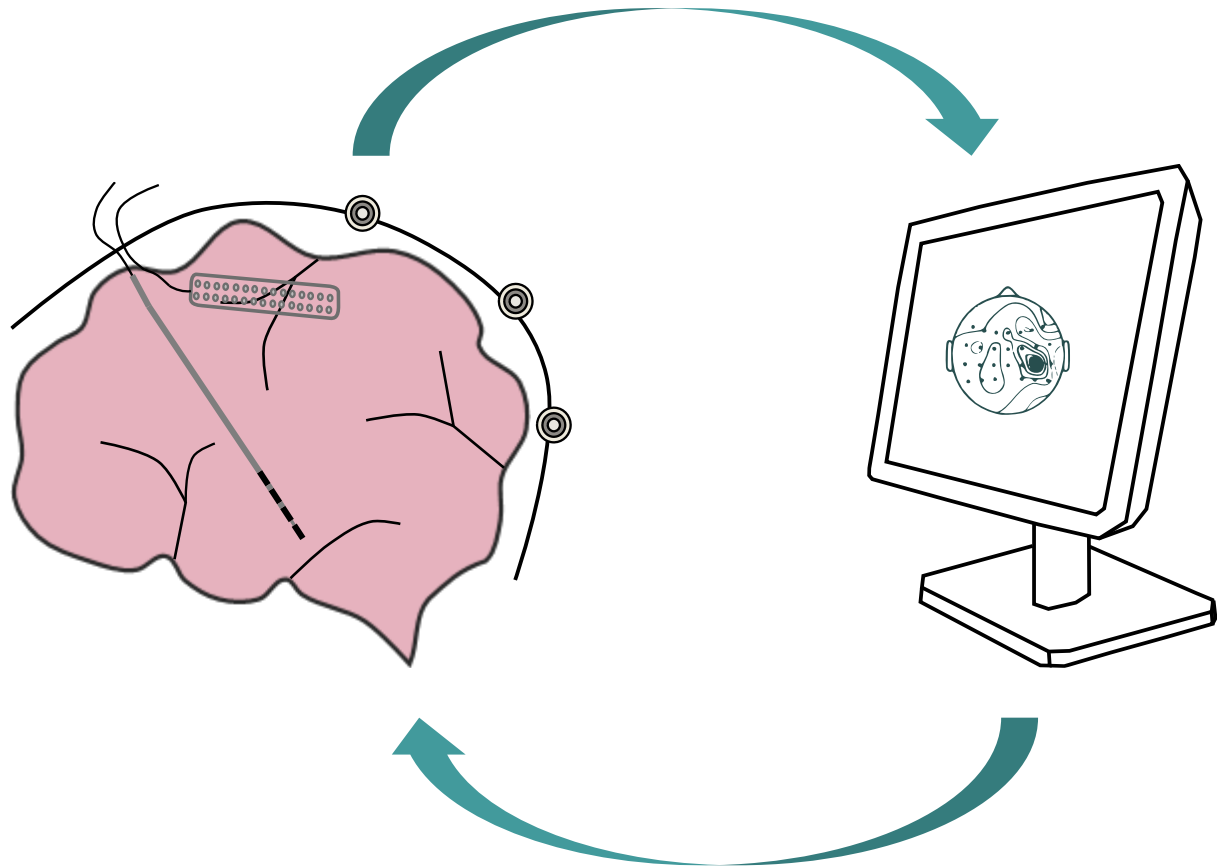


CONICET



I M A L

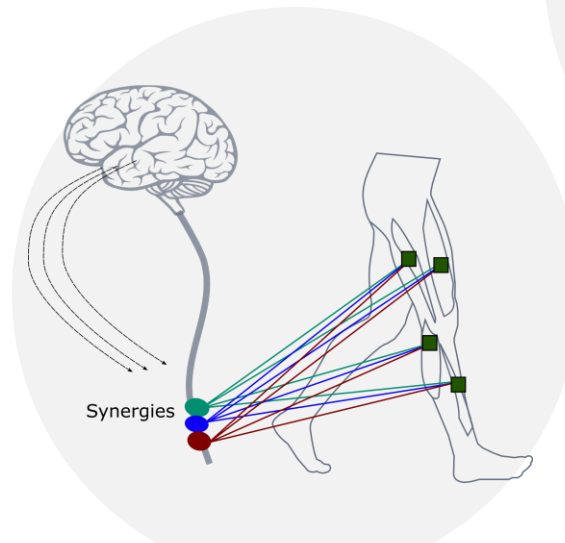
BCI y Neurotecnologías en salud



BCI para rehabilitación

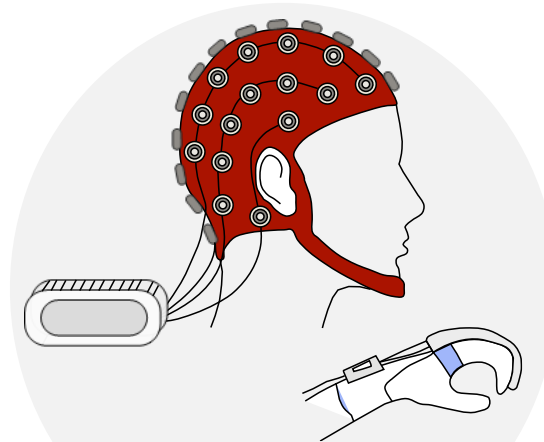
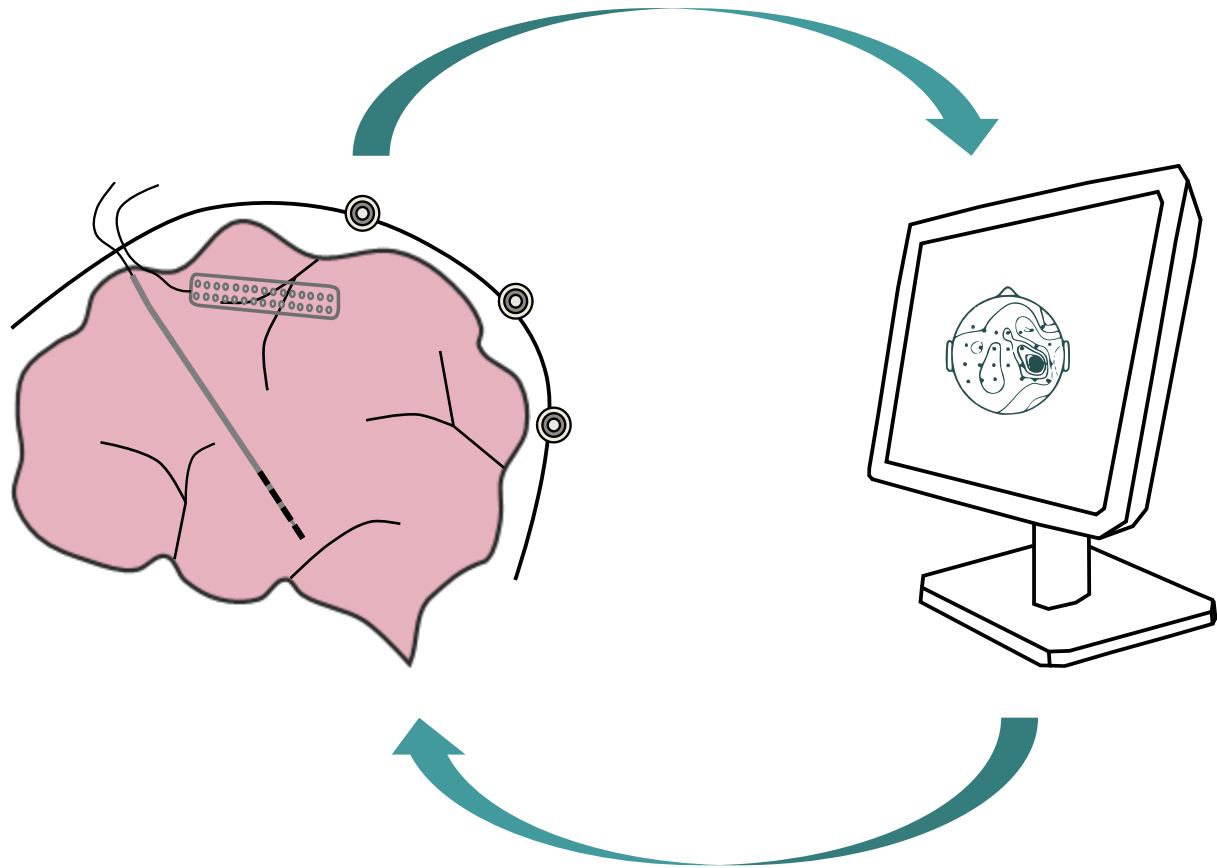


BCI para Epilepsia



EEG y movimiento

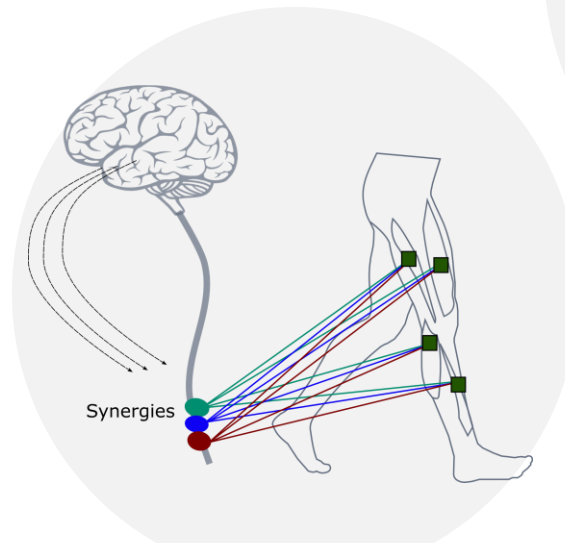
BCI y Neurotecnologías en salud



BCI para rehabilitación

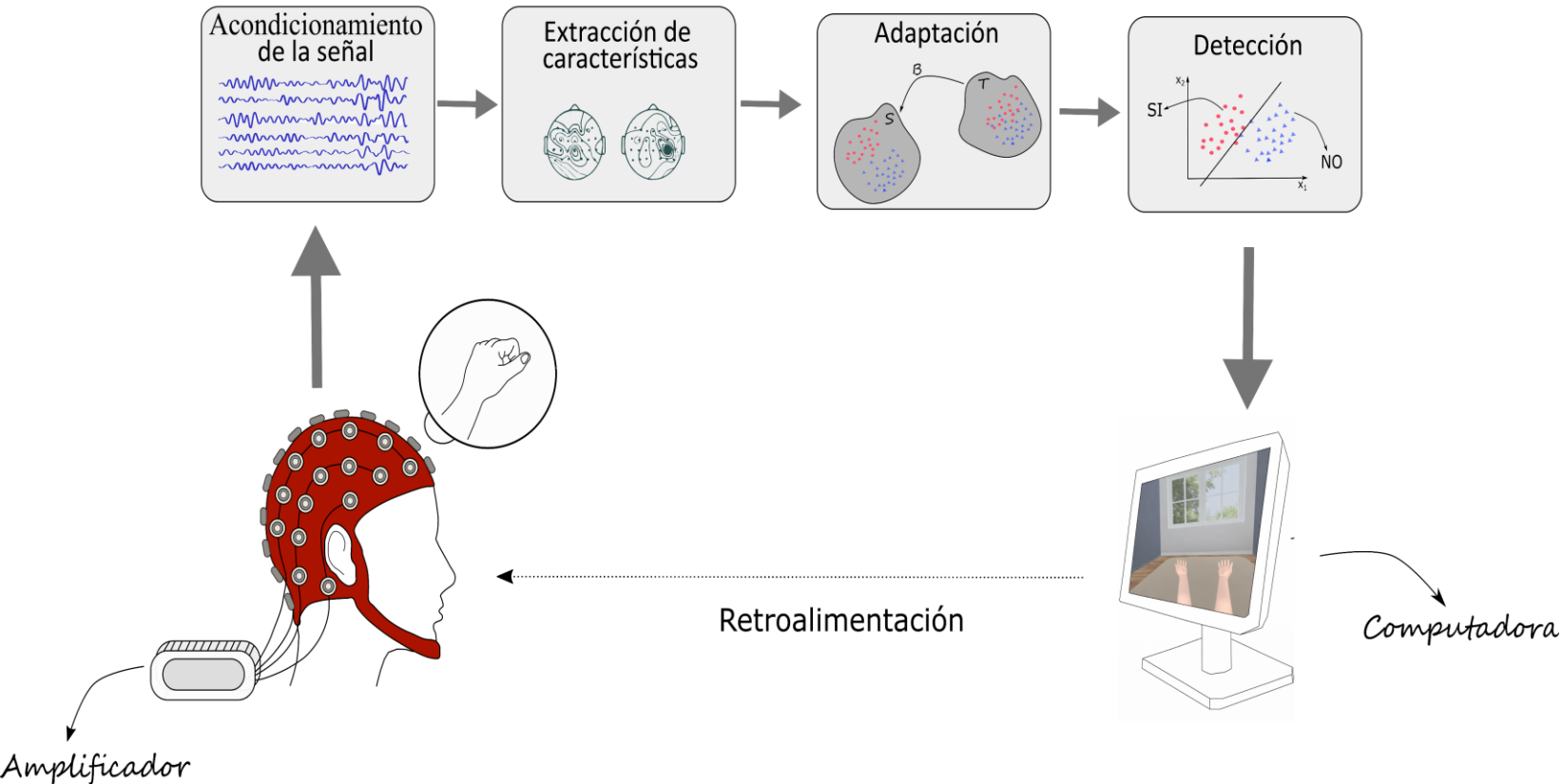


BCI para Epilepsia



EEG y movimiento

BCI para rehabilitación

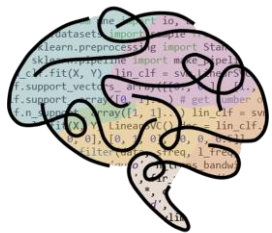


“IA y neurociencia para mejorar la comunicación persona-máquina en sistemas pensados para la rehabilitación motora”

Desarrollar algoritmos computacionales y protocolos experimentales que permitan potenciar la rehabilitación basada en BCIs

COARBCI

CoAdaptiveRehabilitation.BCI



NiCALab



CONICET



I M A L

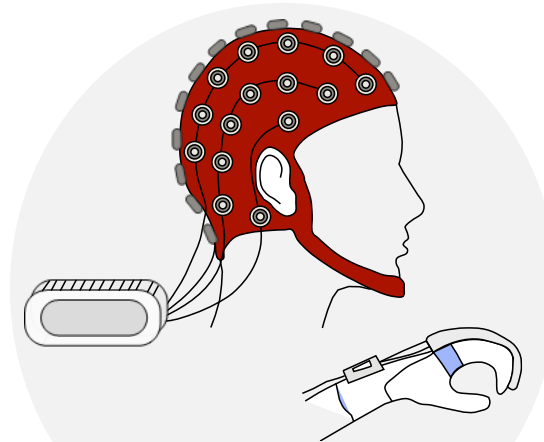
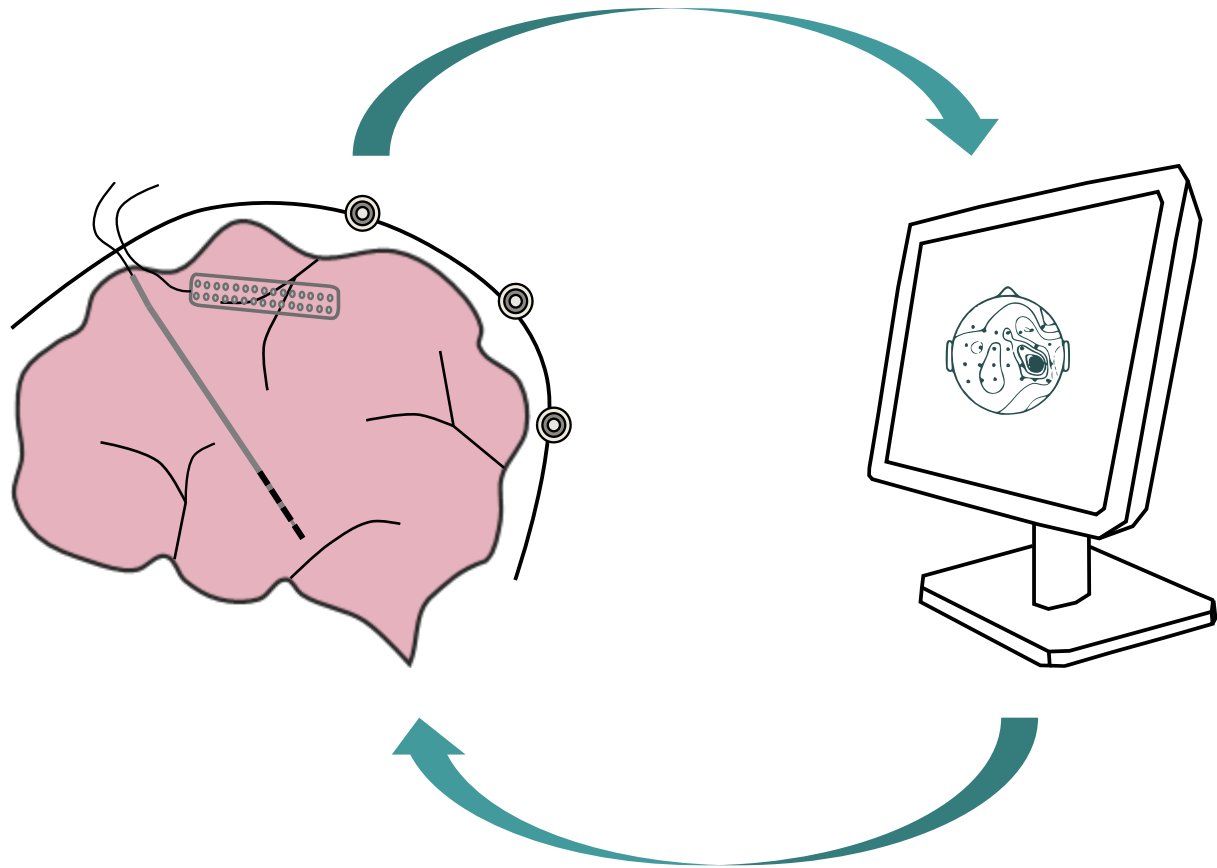


Fleni

Neurología
Neurocirugía
Rehabilitación



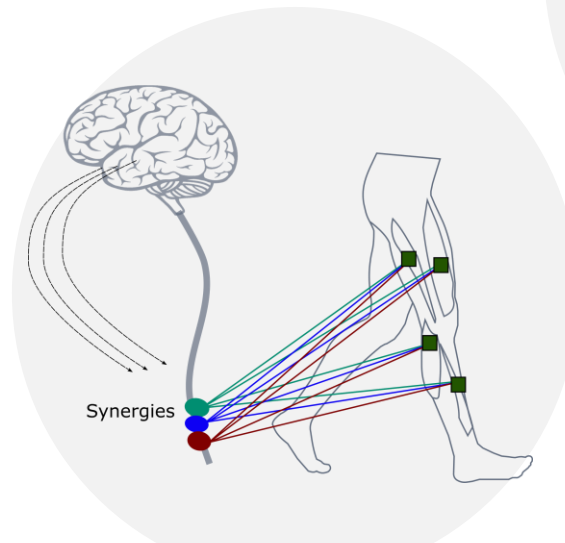
BCI y Neurotecnologías en salud



BCI para rehabilitación

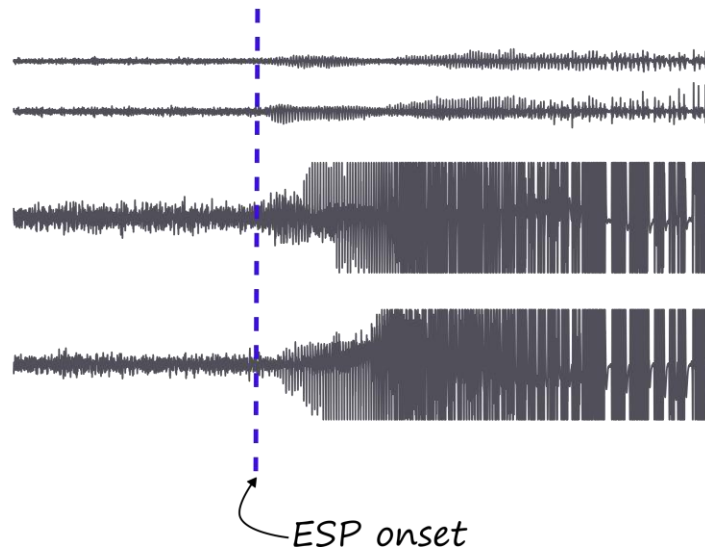
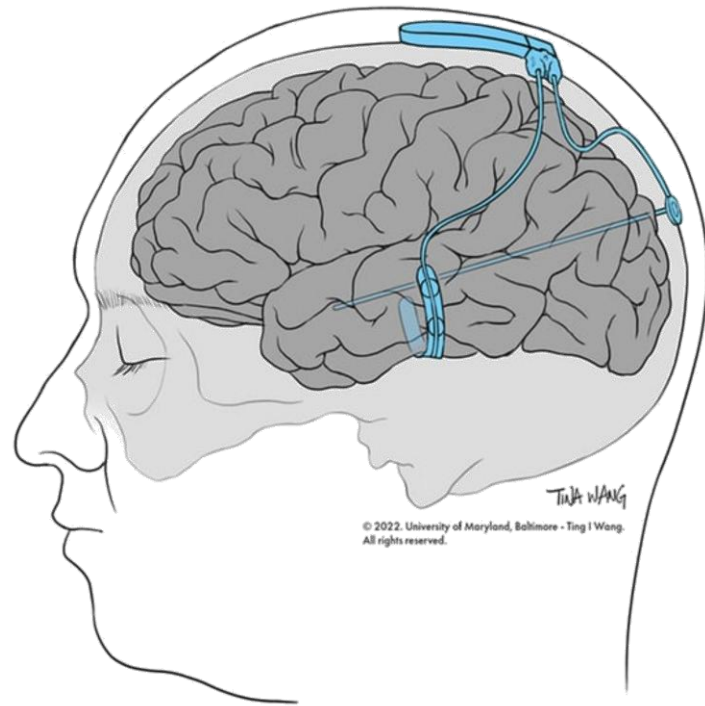


BCI para Epilepsia



EEG y movimiento

BCI para Epilepsia

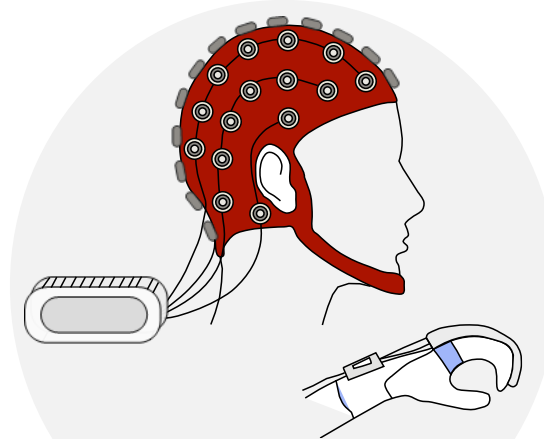
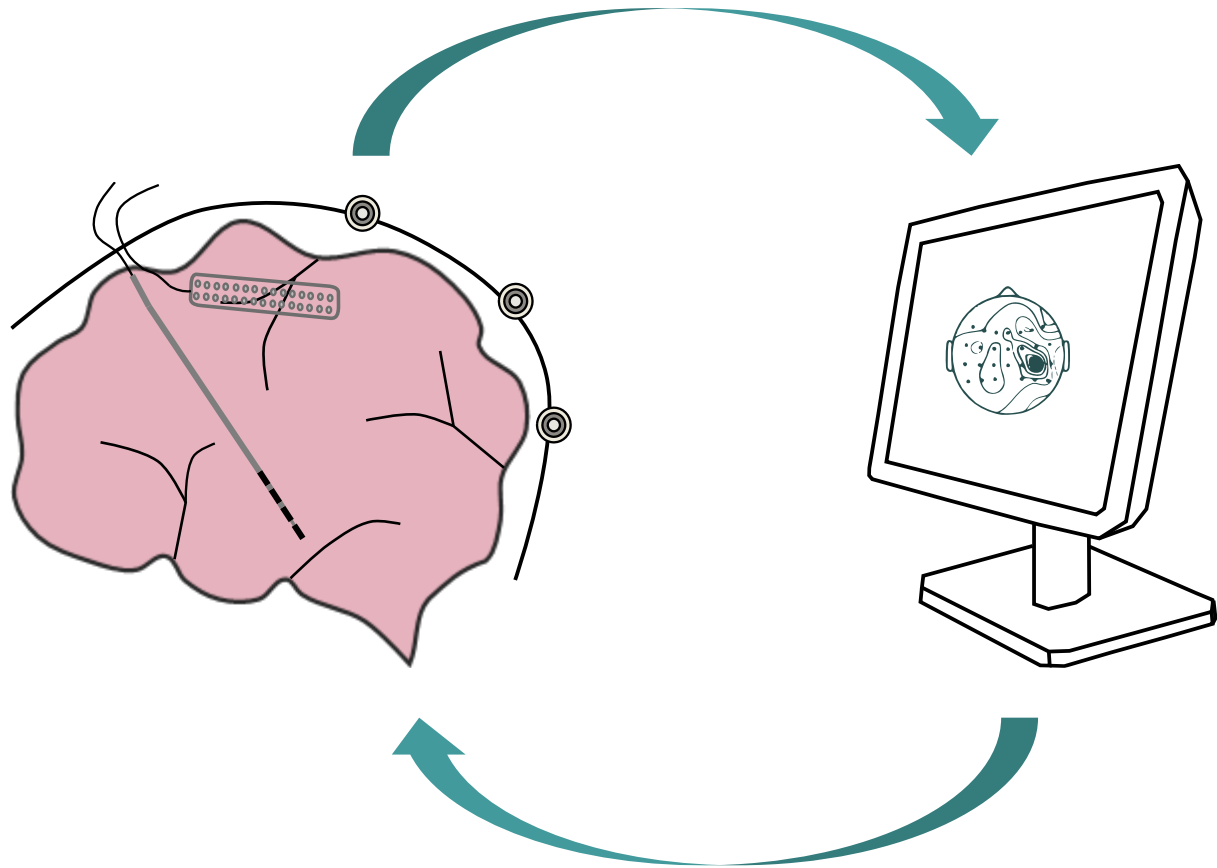


“IA y Cs. de Datos para comprender la prognosis en pacientes neuroestimulados con el sistema RNS”

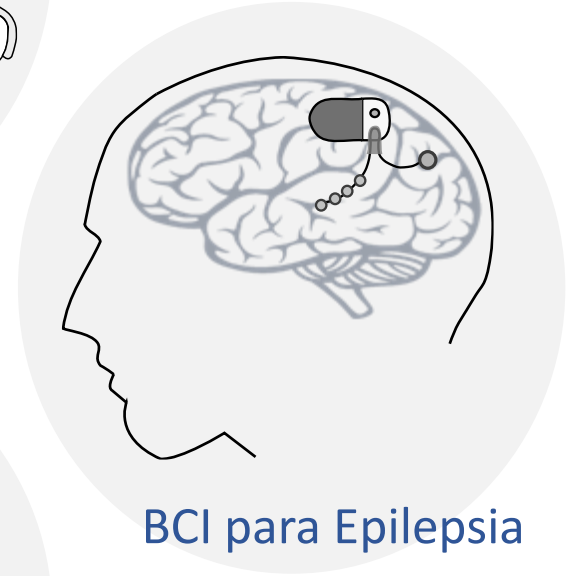
Desarrollar algoritmos computacionales que permitan detectar neuromarcadores asociados a los efectos de la estimulación eléctrica en epilepsia

From: **Boddeti** et al, (2022)

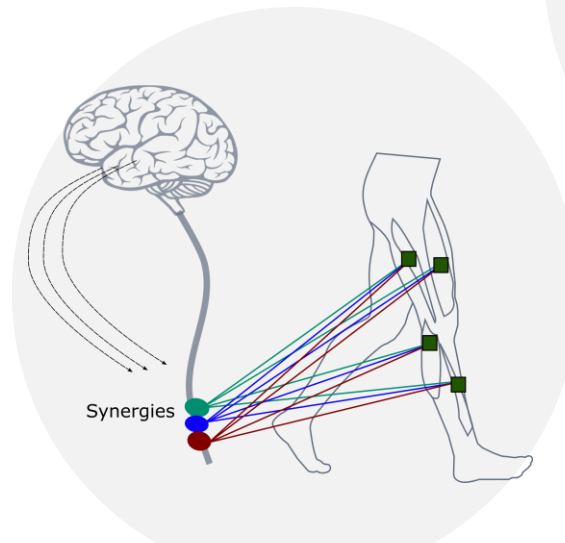
BCI y Neurotecnologías en salud



BCI para rehabilitación

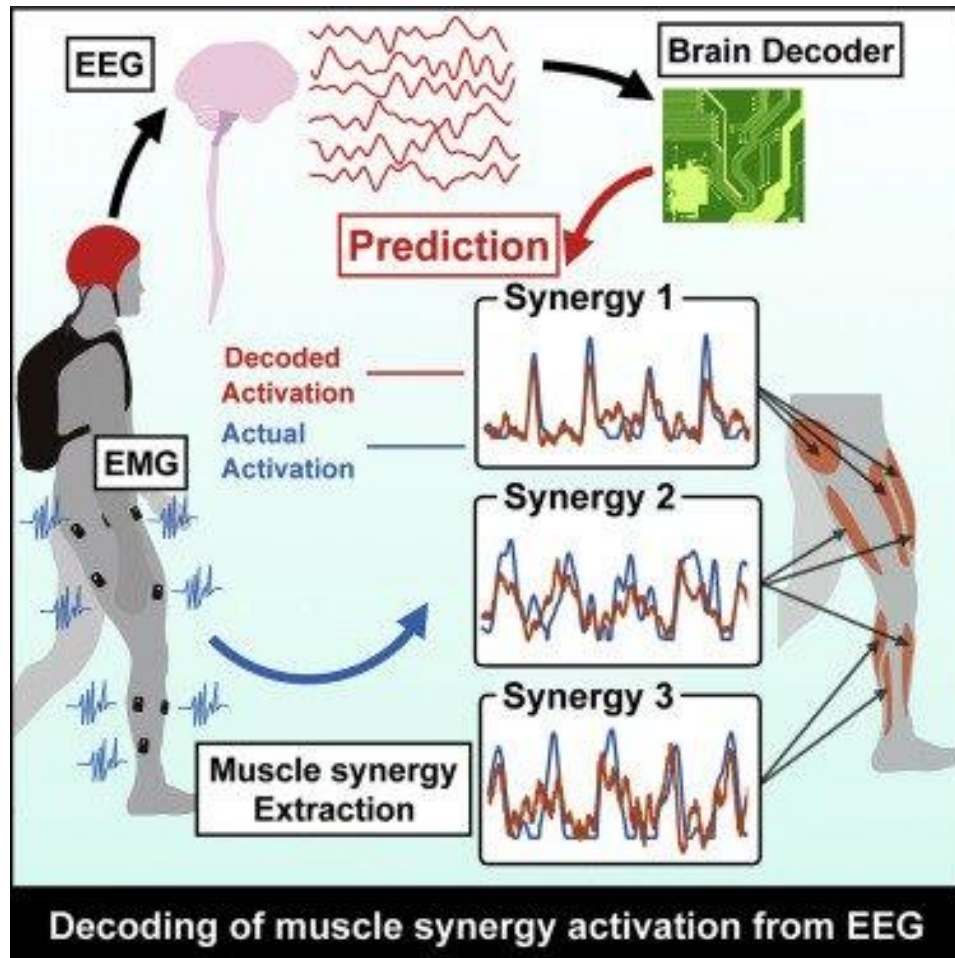


BCI para Epilepsia



EEG y movimiento

EEG y movimiento



From: Yokoyama et al. (2019).

“Procesamiento de la señal de EEG para comprender su activación a nivel cortical e implicancia con otras bioseñales”

Desarrollar algoritmos que permitan identificar componentes neuronales y no-neuronales para el posterior procesamiento de la señal de EEG

Estadística y Probabilidad

Análisis y procesamiento de bioseñales

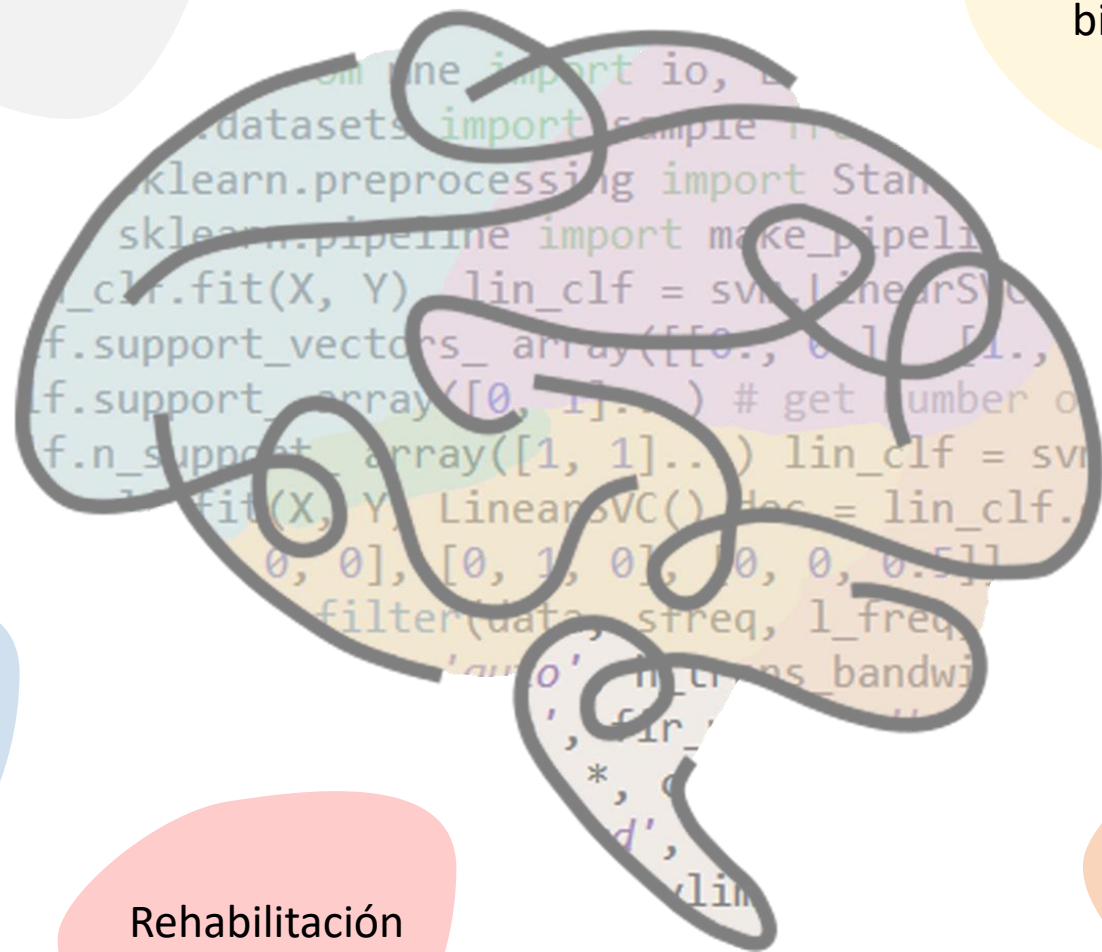
Deep learning

Matemática Aplicada

Rehabilitación

Neurociencia

Machine learning



Bibliografía recomendada

