

Análisis de la Reorganización Topológica y Eficiencia Funcional en Redes Cerebrales Epilépticas

Por Luis Javier González Santos

Resumen del Dataset

En esta base de datos se registra la actividad funcional cerebral de 14 pacientes con epilepsia, tanto en estado de reposo o durante las crisis epilépticas. Esta actividad se obtuvo gracias a las grabaciones de electroencefalografía (EEG). Los pacientes varían en edades que van desde los 20 hasta los 71 años de edad, con tres tipos distintos de crisis epilépticas. Utilizando la teoría de grafos se modelaron las conexiones cerebrales de los pacientes que mostraron una **reorganización de conexiones significativa**, que se caracterizó por un aumento en la **Eficiencia Global** de la red ($p < 0.05$) durante las crisis.

Entre algunas otras cosas se observó que las conectividades entre áreas se volvieron hipersincronizadas y rígidamente integradas lo que facilitó la propagación de la actividad epiléptica a todo el cerebro.

Introducción

La epilepsia se define como un trastorno neurológico en el que se presentan cícicamente episodios de actividad eléctrica anormal y descontrolada en un grupo de neuronas del cerebro. Este trabajo busca medir la alteración eléctrica a un nivel estructural durante una crisis epiléptica.

Se seleccionó el dataset: **Siena Scalp EEG Database**, proveniente de la página PhysioNet.com. Este dataset de estructuró en la Unidad de neurología y neurofisiología de la Universidad de Siena, donde se obtuvieron señales adquiridas por amplificadores EB Neuro y Natus Quantum LTM, con electrodos de copa de plata/oro reutilizables que registraban a una tasa de muestreo de **512 Hz**.

El experimento consistió en un análisis comparativo entre sujetos, aplicando un diseño de medidas repetidas. Se realizó un monitoreo mediante video-EEG continuo para obtener períodos de actividad basal o de reposo, y actividad epiléptica, todo esto se le realizó a 14 pacientes adultos de un rango de edad de 20 a 71 años, de los cuales 5 eran mujeres y 9 hombres. En el análisis se clasificaron y registraron 3 tipos de crisis epilépticas: crisis focales con alteración de la conciencia (IAS), crisis focales sin alteración de la conciencia (WIAS) y tónico-clónicas generalizadas (FBTC).

Metodología y Resultados

Como primer paso se realizó un procesamiento para transformar las señales de voltaje en métricas de red que pudieran interpretarse con la teoría de grafos:

1. Primero era necesario seleccionar y extraer segmentos de tiempo de cada estado de los pacientes, "Basal" y "Crisis", tomando en cuenta las marcas de tiempo clínicas registradas en archivos .txt de la base de datos y luego se aplicó un filtrado de banda que va desde los 0.5Hz hasta los 45 Hz, así eliminamos el ruido de fondo y otros artefactos, centrando el análisis en las bandas fisiológicas: Delta, Theta, Alpha, Beta y Gamma.
2. Luego se eligió el **Phase Locking Value (PLV)** como métrica de conectividad funcional. Ya que, a diferencia de la correlación lineal, el PLV puede medir la sincronización de fase, sin verse afectado por amplitud de la señal. Esto es necesario ya que en la epilepsia los picos de activación podrían sesgar una correlación simple. Aun así lo que realmente interesa es de qué manera están disparando las regiones cerebrales.

Las redes cerebrales completas son ruidosas y densas, por lo que en una visualización 3D podría no apreciarse correctamente la conectividad, debido a esto supuse que las conexiones con valores de peso muy bajos, como que $PLV < 0.2$, representarían ruido de y no representan una comunicación funcional real, por lo que se filtraron esas conexiones débiles, para revelar la base de la red. De esta manera se pudieron identificar cambios estructurales la fusión de comunidades en algunos casos

Resultados

1. En el análisis estadístico se realizó una prueba de Wilcoxon que reveló una diferencia significativa en la eficiencia global, con un valor **p = 0.0034**. aunque se calcularon otras métricas, algunas como la modularidad, mostraron alta variabilidad dependiente de la edad.
2. En las matrices de adyacencia se observó un cambio drástico de matrices "frías" o con baja conectividad dispersa en estado basal a matrices "calientes" que tenían alta conectividad global durante la crisis.
3. Por otro lado la distribución de pesos mostró que la densidad de probabilidad de la fuerza de conexión se desplazó hacia la derecha durante la crisis, lo que confirmó un reclutamiento masivo de nodos

Discusión y Conclusión

Los datos arrojan tres hallazgos principales:

1. **La "Hiper-Eficiencia" Patológica:** El hallazgo estadístico más robusto fue el cambio en la eficiencia global. Contrario a lo que se podría pensar intuitivamente la crisis epiléptica optimiza la red para la transmisión de señal. El cerebro crea "atajos" funcionales que permiten que la descarga eléctrica viaje instantáneamente a través de toda la corteza. Esta eficiencia es patológica porque sacrifica la capacidad de procesamiento de información compleja.
2. **Centralización del Mando (Hubs):** Las visualizaciones 3D mostraron una migración de los nodos centrales (Hubs). Mientras que en reposo los hubs se ubicaban en áreas parietales/occipitales (redes sensoriales), durante la crisis migraron hacia la línea media central (ej. electrodo **Cz**). Esto sugiere que la crisis "secuestra" los centros integradores del cerebro para maximizar su propagación bilateral.
3. **Colapso de la Segregación:** En el análisis estratificado, especialmente en pacientes mayores, se observó una caída en la Modularidad. Esto indica que los subsistemas funcionales del cerebro (visión, motor, memoria) pierden su independencia y se funden en un solo bloque de actividad sincrónica, lo que explica la pérdida de conciencia y función cognitiva durante el evento.

Conclusión del Trabajo Realizado

Este análisis concluye que la crisis epiléptica es un fenómeno de **reorganización topológica dinámica**. El cerebro transita de un estado de equilibrio de mundo pequeño a una configuración de **saturación global**, donde la prioridad de la red cambia de "procesar información" a "transmitir la descarga".

La metodología implementada valida el uso de la **Eficiencia Global** basada en PLV como un biomarcador cuantitativo sensible para distinguir estados ictales de interictales, independientemente de la localización anatómica del foco, ofreciendo una perspectiva sistémica de la enfermedad