

# Algoritmo de Procesamiento del EEG para la Detección de los estados del Sueño

Jhosmary Cuadros Castro<sup>1</sup>, Gerardo Ceballos<sup>2</sup>, Edinson Dugarte Dugarte<sup>2</sup>, Nelson Dugarte Jerez<sup>3</sup>, Antonio Alvares Abril<sup>3</sup>, Adolfo F. González<sup>3</sup>, Gabriel Alvarez Juri<sup>3</sup>

Grupo de Bioingeniería, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira<sup>1</sup>

Táchira, Venezuela

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina (CIBYTEL), Universidad de Los Andes (ULA), Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica<sup>2</sup>

Mérida, Venezuela

Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Mendoza (FRM), Instituto Regional de Bioingeniería (IRB)

Mendoza, Argentina

jcuadros@unet.edu.ve, ceballos@ula.ve, ndj0227@gmail.com,

antonioalvarezabril@yahoo.com.ar

Fecha de recepción: 03/10/2016

Fecha de aceptación: 23/02/2017

Pág: 94 – 105

## Resumen

En este artículo, se propone una técnica de procesamiento de la señal electroencefalográfica desarrollada en software libre, con el propósito de estudiar los parámetros involucrados en el estado de sueño de la señal EEG. El sueño no es solo un fenómeno necesario, activo y periódico, también es un proceso variado y complejo. Dada la importancia de esta condición, el sueño se ha convertido en objeto de estudio por parte de la neurociencia. Entre los temas de mayor relevancia se encuentran las situaciones donde el sueño involucra a la persona en circunstancias de riesgo, como en los casos de trabajos peligrosos o mientras controla alguna máquina que puede causar daño a otros o a sí mismo. El software desarrollado permite la visualización simultánea de todos los registros del EEG, la extracción y visualización de sus ondas componentes y la generación de hipnogramas. El hipnograma se utiliza para visualizar como cambian los estados del sueño a lo largo de una sesión y facilita la demarcación de las diferentes etapas. Las pruebas preliminares demuestran el funcionamiento del algoritmo de detección, pero se continúa trabajando en la optimización del sistema.

**Palabras clave:** detección de los estados del sueño, algoritmo automático, procesamiento de la señal EEG

## Introducción

El estudio de la mente abarca un conjunto de disciplinas científicas que analizan la estructura cognitiva y la función de cada parte del cerebro. La bioquímica, la farmacología, la patología del sistema nervioso y la fisiología del cerebro se entrelazan con la ingeniería en busca de los elementos que interactúan dando lugar al pensamiento y la conducta [1]. La neurociencia aplica los conocimientos médicos con el apoyo de la instrumentación desarrollada por la ingeniería, así mismo la ingeniería utiliza las bases del conocimiento médico en el desarrollo de sistemas avanzados [2]. Con la implementación de la computadora, se desarrollan modelos matemáticos de los comportamientos observados en el sistema nervioso. A través de simulaciones se estudia el funcionamiento del cerebro. Se trata de entender cómo se almacena la memoria, cómo se procesa información de los sentidos, porqué la reacción ante los estímulos y de donde se deriva el pensamiento.

La valoración de la función del sueño es de vital importancia. El sueño no es solo un fenómeno necesario, activo y periódico, sino que es también un proceso variado y complejo [3, 4], por lo que se ha convertido en objeto de estudio por parte de la neurociencia. Bajo este contexto, es frecuente encontrar pacientes en los que las manifestaciones de sus enfermedades sólo se presentan durante la noche o se relacionan con el sueño [5]. La activación mediante el sueño es considerado uno de los mejores y más relevantes medios de demostrar la existencia de un foco epiléptico en el hombre o en animales [6]. La privación de sueño facilita la aparición de crisis y frecuentemente es usada como método de activación del electroencefalograma (EEG). No sólo en las epilepsias y trastornos del sueño son útiles los estudios nocturnos, sino también su realización es de gran importancia en las enfermedades cerebro-vasculares, en las enfermedades psiquiátricas y en las lesiones del Tallo Cerebral, entre otras [7, 8].

También existen las situaciones donde el sueño involucra a la persona en situaciones de riesgo. Es el caso de accidentes graves ocurridos en el medio laboral porque un operador o la persona misma se queda dormida. También son muchos los reportes de accidentes de tránsito ocurridos porque el conductor de un vehículo se ha quedado dormido [9].

En este trabajo, se propone una técnica de visualización de registros EEG, así como la extracción y visualización de sus ondas componentes, además de la generación de hypnogramas [10], herramientas útiles para visualizar como cambian las ondas cerebrales a lo largo de las etapas del sueño. Todo ello con el objetivo de captar el estado de sueño de un paciente.

Cabe destacar que todo el software de análisis desarrollado se realizó empleando herramientas de software libre. Para el análisis de señales se utilizó el software de procesamiento matemático “GNU Octave” y para el desarrollo del entorno gráfico se utilizó “Java”.

## El Electroencefalograma

El electroencefalograma (EEG) es el registro de la actividad eléctrica generada por el cerebro. Se adquiere de forma no invasiva por medio de electrodos de registro que son adheridos a la superficie de la cabeza [11]. El instrumento utilizado para tal fin es el electroencefalógrafo, que es un dispositivo electrónico que capta y amplifica la actividad bioeléctrica generada como

consecuencia de la actividad neuronal. Esta actividad se registra en un papel con velocidad normalizada y en los equipos modernos se almacena digitalmente y se presenta bajo un entorno gráfico computarizado [12]. La actividad eléctrica cerebral aparece registrada en la forma de líneas sinusoidales, es decir, secuencias de ondas que, por presentarse normalmente en forma continua, constituyen lo que se denomina un ritmo [12]. Cada onda puede clasificarse principalmente según su frecuencia, forma, amplitud y localización. Estas características de las ondas varían según la edad, el nivel de vigilia o de sueño, y la forma de actividad psíquica en curso durante el examen [11, 13]. Para la interpretación clínica del EEG, es preciso entonces conocer las características de dichas ondas y sus variaciones de acuerdo a estas condiciones fisiológicas [1].

### Ondas componentes del EEG

En el espectro del electroencefalograma (EEG) se han definido bandas específicas de frecuencias, que se relacionan con eventos clínicos y fisiológicos particulares [13]. La Tabla 1, presenta la clasificación estándar del ancho de banda de las ondas principales del EEG, utilizadas en el análisis que permite identificar los diferentes estados de sueño en un paciente.

Tabla 1: Bandas características del EEG.

Banda Espectral	Rango en Hz
Delta ( $\delta$ )	0-3.5
Theta ( $\theta$ )	4-7.5
Alfa ( $\alpha$ )	8-13.5
Beta ( $\beta$ )	14-30

Las ondas alfa son ondas rítmicas a una frecuencia de entre 8 y 13 ciclos por segundo (Hz). Se encuentran en los EEG de la mayoría de las personas adultas normales cuando están despiertas en un estado mental tranquilo, de reposo. Estas ondas son más intensas en la región occipital, pero también se pueden registrar en las regiones parietales y frontales del cuero cabelludo. Su voltaje es de unos 50  $\mu$ V. Durante el sueño profundo desaparecen las ondas alfa. Cuando la atención de la persona despierta se dirige a algún tipo de actividad mental específica, las ondas alfa son sustituidas por ondas beta asincrónica, de alta frecuencia y de menor voltaje [14].

Las ondas theta tienen frecuencia de entre 4 y 7 Hz. Se producen principalmente en las regiones parietales y temporales en los niños, pero también aparecen en el transcurso del estrés emocional en algunos adultos, especialmente durante el desánimo y la frustración. También, aparecen ondas theta en muchos trastornos cerebrales, con frecuencia en estados de degeneración cerebral [12, 14].

Las ondas delta incluyen todas las ondas del EEG de menos de 3.5 ciclos por segundo. Se producen en el sueño muy profundo, en la lactancia y en una enfermedad orgánica grave del cerebro. Por tanto, las ondas delta pueden aparecer por sí misma en la corteza con independencia de la actividad de zonas inferiores del encéfalo [12].

Otras ondas pueden aparecer sólo o casi sólo en condiciones patológicas. Tal es el caso de las ondas en forma de puntas (“spikes”), de puntas abiertas (ondas “sharp”), los complejos punta-onda, la hipsarritmia, y complejos periódicos que se repiten a intervalos regulares. Si las ondas normales aparecen fuera de los contextos señalados, se localizan en áreas restringidas y pueden tener alguna significación patológica [12, 13]. Durante los períodos de actividad mental, las ondas se vuelven asíncronas en lugar de síncronas, de forma que el voltaje disminuye considerablemente, a pesar del aumento de la actividad cortical.

Las ondas Delta y Theta son las más utilizadas para observar las diferentes etapas del sueño.

## Hipnogramas

El hipnograma es la representación gráfica de la organización cronológica de las diferentes etapas del sueño que experimenta un individuo durante una misma sesión. Una sesión de sueño puede ser dividida en varias etapas de acuerdo al movimiento de los ojos (detectado por electroculografía EOG), al tono muscular (detectado por electromiografía, EMG) y/o por la actividad eléctrica del cerebro (mediante electroencefalografía, EEG). De manera general estas etapas se dividen en etapa REM (rapid eye movement) y etapa NREM (non-rapid eye movement). NREM se puede dividir en tres o cuatro etapas basándose en los patrones que presenta el EEG [5, 14].

Los hipnogramas son herramientas útiles para visualizar como cambian las etapas a lo largo de una noche de sueño. Generalmente una noche de sueño consiste en varios ciclos de duración aproximada 90 min. Los primeros ciclos tienen ondas lentas correspondientes a las etapas más profundas del sueño NREM mientras que después comienza a ser más frecuente la etapa REM en las que se pueden presentar períodos en los que la persona se despierta.

El método tradicional para clasificar las etapas del sueño consiste en dividir la señal en segmentos o épocas de 30 segundos de duración, basado en el criterio estándar de Rechtschaffen y Kales [10].

## Metodología

La metodología empleada por la aplicación para el procesamiento y visualización de registros electroencefalográficos se basa en dar como entrada a la herramienta la señal digital proveniente de un electroencefalógrafo. Una vez que el registro EEG es cargado y procesado automáticamente por la aplicación, se visualiza el EEG en el tiempo, la energía en cada banda (delta, theta, alfa, beta y gamma) y el hipnograma.

La aplicación, por ser orientada a objetos, está formada por un conjunto de clases integradas en dos módulos principales: Módulo de Visualización y Módulo de Procesamiento de registros electroencefalográficos.

- Módulo de visualización: consta de tres interfaces, una para visualizar el EEG en el tiempo, otra para visualizar las ondas específicas del EEG y una para la energía presente en cada una de ellas. Este módulo se desarrolló utilizando el lenguaje de programación Java y él

se usó la Transformada Wavelets para extraer las distintas componentes frecuenciales del EEG.

- Módulo de procesamiento: está orientado al procesamiento de la señal EEG descomponiendo la señal en distintas bandas que sirven para definir los parámetros característicos de la señal. Conlleva una etapa de entrenamiento de las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), de prueba y de comparación con datos ya etiquetados para obtener los hipnogramas. Este módulo se desarrolló bajo GNU Octave 4.0.1.

## Procesamiento

El algoritmo de procesamiento se diseñó inicialmente para ser utilizado a partir de la selección de un registro EEG previamente captado del paciente, pero la eficiencia de su funcionamiento demuestra que puede ser implementado en tiempo real.

El funcionamiento del software desarrollado se inicia con la entrada a la herramienta de un registro electroencefalográfico proveniente de un electroencefalógrafo. La entrada se realiza a través del botón “Buscar” mediante el cual se abre el buscador de archivos nativo del sistema operativo. Posteriormente el usuario debe hacer click en el botón “Visualizar”. La Fig. 1 muestra la ventana inicio de la aplicación.

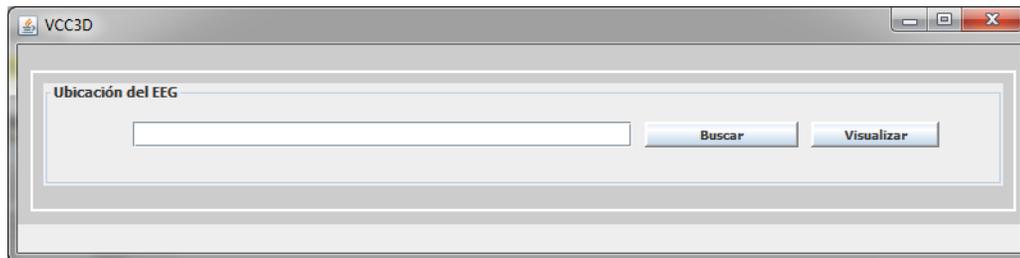


Figura 1: Ventana de inicio de la aplicación desarrollada.

A continuación se describen las técnicas empleadas para la extracción de las ondas del EEG así como la generación del hipnograma.

## Extracción de las ondas componentes del EEG

La extracción de las bandas del EEG se realiza a través de la Transformada Wavelet, específicamente la wavelet Daubechies 8, haciendo un análisis multiresolucional hasta el nivel 4 de descomposición: las componentes de onda Delta se representan con los coeficientes de aproximación del nivel 4 de descomposición, los de la onda Theta mediante los coeficientes de detalle del nivel 4, los de la onda Alpha mediante los de detalle del nivel 3, los de Beta con los coeficientes de detalle del nivel 2 y los de la onda Gamma mediante los coeficientes de detalle del nivel 1. Se decidió utilizar transformada Wavelet considerando lo propuesto en la literatura, en la cual se indica que una de las técnicas más utilizadas para la extracción de las bandas EEG

es la transformada Wavelet [15, 16, 17]. Es de notar que al usar el análisis multiresolucional que ofrece la técnica de wavelets las bandas consideradas quedan ligeramente modificadas de los estándares encontrados en la literatura, sin embargo, estas pequeñas desviaciones no afectan de manera significativa los resultados finales.

## Generación del Hipnograma

Para realizar el proceso de entrenamiento y de clasificación se mapean los datos correspondientes a cada ventana de análisis a un vector de características.

La parametrización de cada ventana a clasificar se realizó de la siguiente manera: se estimó la densidad espectral de potencia de la ventana con el método de Welch [18], promediando el periodograma en sub-segmentos de 4 segundos (s) sin solapamiento entre ellos. Para aplicar el método de Welch se implementó con la función *pwelch* provista por EEGLAB bajo GNU Octave 4.0.1. Se usó ventana Hamming para los sub-segmentos y 512 puntos para la transformada rápida de Fourier (FFT). El vector de características de la ventana se construyó con coeficientes correspondientes al porcentaje de la potencia total que posee cada una de 6 bandas de frecuencia (0-3 Hz, 3-5 Hz, 5-10 Hz, 10-15 Hz, 15-20 Hz, 20-25 Hz). Los límites inferiores y superiores de las bandas se definieron en base a la inspección visual de la distribución de las componentes frecuenciales en cada etapa de sueño en los datos de entrenamiento.

Con los datos de entrenamiento se entrenó un clasificador basado en Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) con Kernel Lineal para 3 clases: NREM1, NREM2, NREM3y4, haciendo uso de la librería *libsvm* en GNU Octave 4.0.1. Es de notar que no se usó la información del sueño REM por la falta de información necesaria para clasificar esa etapa de sueño (electroculograma y/o electromiograma).

## Presentación gráfica de los elementos característicos del EEG

Esta etapa del procesamiento consiste en la extracción de las ondas características del EEG y la visualización gráfica de las diferentes señales que lo componen. En la literatura consultada se reporta una diversidad de sistemas que permite la presentación gráfica del EEG [19, 20], normalmente diseñados para ser implementados en aplicaciones específicas. El problema que se presenta se debe a lo privativo de este tipo de software. Regularmente, el software de visualización gráfica del EEG que se encuentra comercialmente es del tipo cerrado y por lo tanto no admite modificaciones para adaptarlo a los requerimientos específicos de los usuarios e investigadores.

Lo novedoso en esta etapa del desarrollo se basa en el formato diseñado con software libre a partir de los requerimientos propuestos. Lo cual también admite las modificaciones y actualizaciones que surjan conforme al avance de las investigaciones. En el diseño de esta etapa del algoritmo se utilizó el lenguaje de programación “Java”, en su versión 1.7. La Fig. 2, muestra la interfaz diseñada para la visualización del EEG.

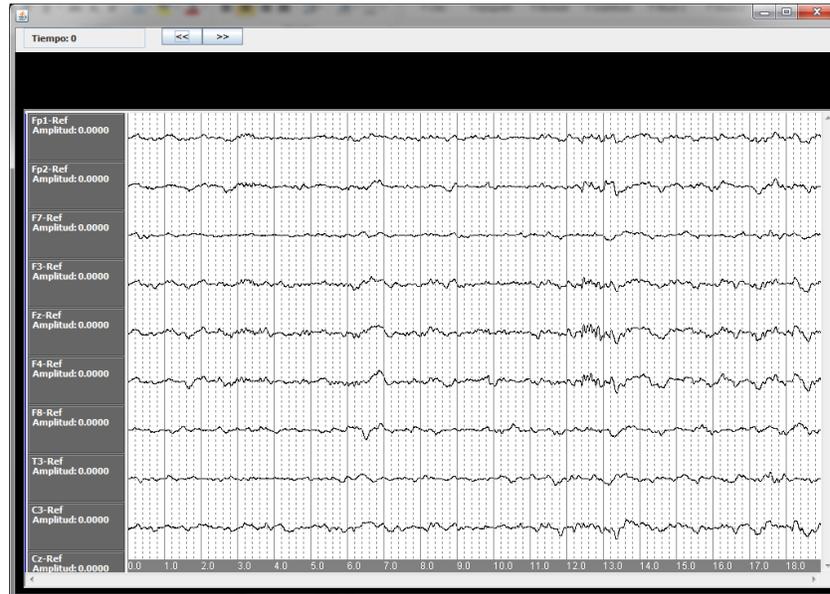


Figura 2: Ventana de presentación gráfica de la señal EEG con el formato propuesto.

En la Fig. 3 se muestra la parte de la interfaz gráfica desarrollada que permite visualizar las ondas componentes del EEG.

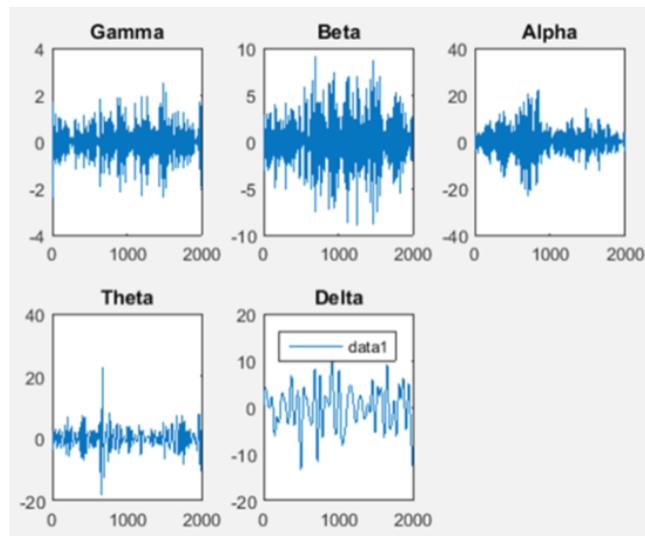


Figura 3: Visualización de las ondas componente del EEG.

En la Fig. 4 se puede observar la interfaz que permite mostrar en la parte superior un segmento de tiempo de la señal EEG para una derivación y en la parte inferior se visualiza la energía presente en cada onda.

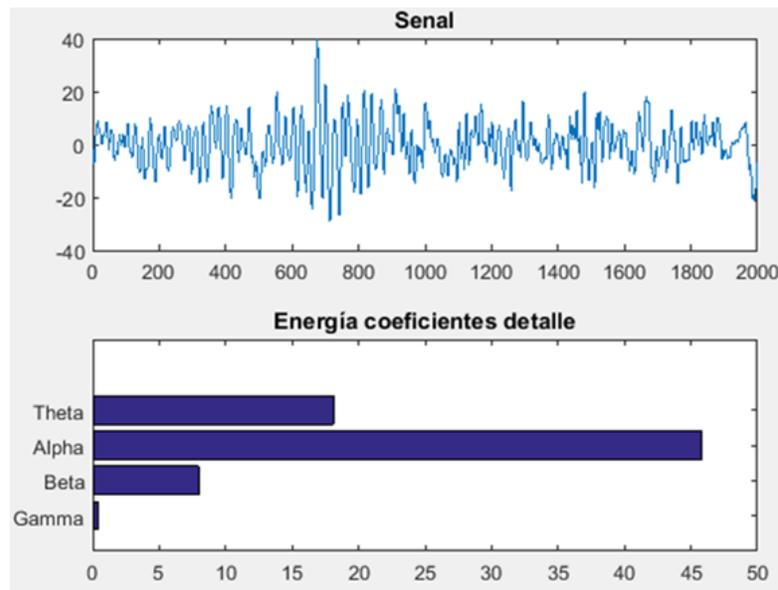


Figura 4: Visualización de la energía de las ondas del EEG.

En la Fig. 5 se puede apreciar una captura de pantalla del software desarrollado para la clasificación de las etapas de sueño.

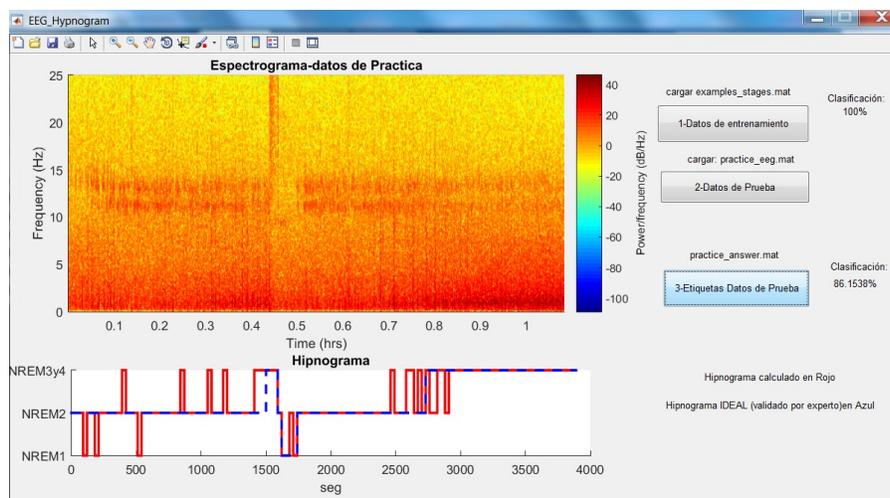


Figura 5: Captura de pantalla del software desarrollado.

## Resultados

En la Fig. 6, se puede observar el hipnograma ideal en azul, con las etiquetas asignadas por expertos, y en color rojo el calculado con el método de clasificación propuesto.

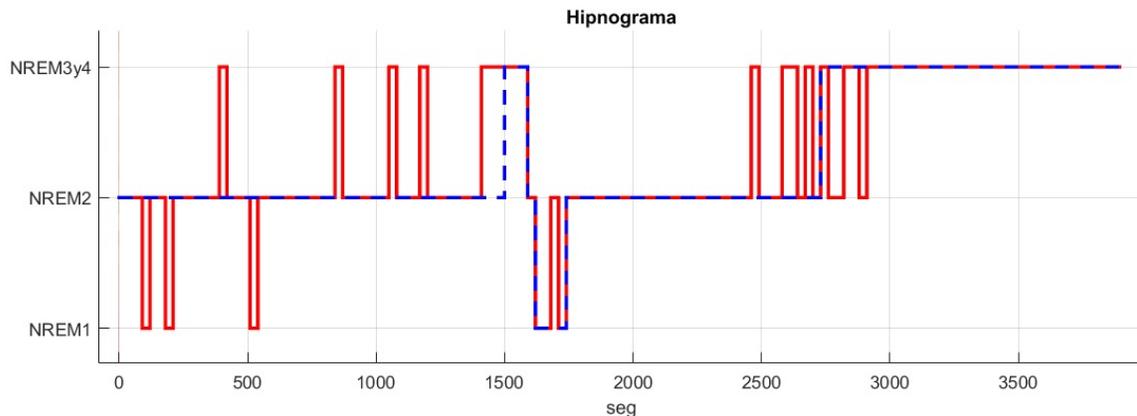


Figura 6: Hipnograma de los datos de prueba (en azul, asignado por expertos y en rojo el asignado automáticamente por el software desarrollado).

El algoritmo desarrollado concluye en la visualización del hipnograma con los marcadores que señalan las diferentes etapas del sueño. Los datos en los que se probó el algoritmo propuesto contienen el registro de un canal de EEG de un sujeto en una noche de sueño muestreado a 128Hz. El archivo usado para entrenamiento del sistema de clasificación consta de 5 minutos de registro de EEG para cada etapa NREM1, NREM2 y NREM3 y 4. El archivo de prueba consta de 65 min de registro y se conoce la etapa del sueño correspondiente o etiqueta de clasificación (NREM1, NREM2, NREM3 y 4) de cada segmento de 30 segundos contiguo, asignada por investigadores del sueño expertos de acuerdo al criterio de Rechtschaffen y Kales [10].

En los datos de prueba se clasificaron correctamente 112 épocas, o ventanas de 30 segundos, y se erró en la clasificación de 18 épocas lo que representa un porcentaje de clasificación correcta de 86 %. En la Fig. 7 se puede observar el espectrograma de las distintas etapas del sueño en los datos de entrenamiento. Allí se observa las diferencias en la energía que contienen las distintas bandas para cada etapa de sueño. Estas diferencias son las aprovechadas por el clasificador para etiquetar los segmentos y construir el hipnograma.

Se puede observar la gran similitud en la distribución de energía en el espectro entre las etapas de sueño REM y sueño NREM, por esto es que se requiere de otra información fisiológica del organismo para poder discriminar REM de NREM1, como son detectores de movimiento, electroculografía y electromiografía.

## Conclusiones

Aunque el método implementado solo explota la información espectral de los datos, ofrece una posibilidad simple y eficaz de estudiar las etapas del sueño en registros de EEG. El método es susceptible a mejoras que los autores llevarán a cabo en el software, por ejemplo, si se incluyeran características temporales como Husos de sueño (Sleep spindles) y complejos K (K-complex) en los vectores característicos se podría aumentar el porcentaje de clasificación.

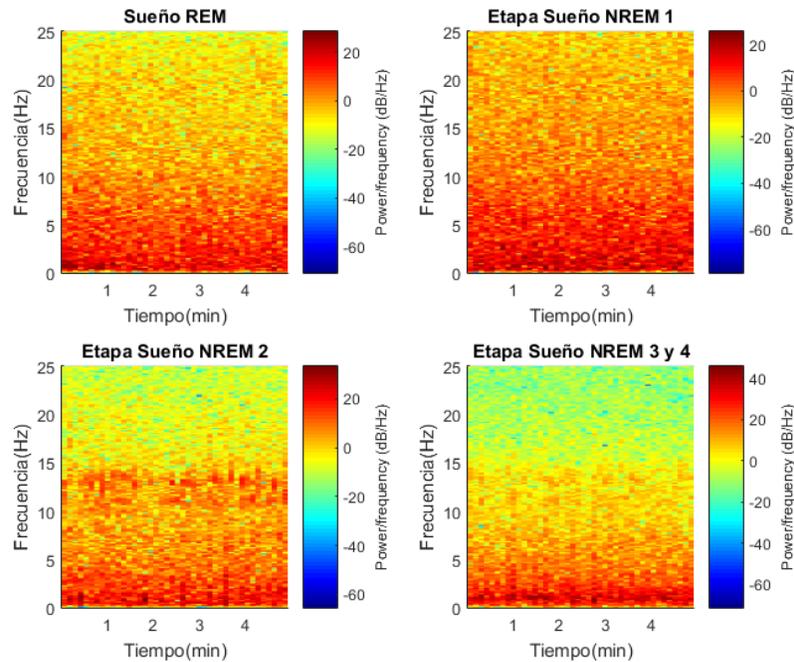


Figura 7: Espectrograma de los datos usados para el entrenamiento del clasificador.

Si además se utilizara la información de electrocugrafía (EOG) y de electromiografía sería factible clasificar también la etapa de REM.

Si se aprovechara la correlación entre épocas contiguas implementando modelos estadísticos de transición como HMM (Hidden Markov Models), es decir si se explota el hecho de que hay transiciones de etapas de sueño que son más probables que otras y el hecho de que se puede conocer a priori la duración estimada de cada etapa seguramente pudiera mejorarse el desempeño de la metodología planteada.

Las próximas investigaciones para ampliar la versatilidad del software desarrollado incluirá la prueba de los algoritmos propuestos en bases de datos públicas y más grandes como la ofrecida por la National Sleep Research Resource [19], en las que si se incluyen canales de EOG y EM.

## Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) en Mendoza - Argentina, a la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET) en San Cristóbal – Venezuela y a la Universidad de Los Andes (ULA) en Mérida - Venezuela, por la valiosa contribución científica y tecnológica en el desarrollo de este proyecto.

## Bibliografía

- [1] Sörnmo L., Laguna P. (2005). *Bioelectrical Signal Processing in cardiac and neurological applications*. Elsevier Academic Press
- [2] Kandel E.R, Schwartz J.H., Jessell T.M., Siegelbaum S.A., Hudspeth A.J. (2012). *Principles of neural science*. Ciudad: New York Editorial McGraw-Hill
- [3] Chokroverty S. (2010). *Overview of sleep sleep disorders*. Indian J Med Res. 121: p. 126-40.
- [4] Crowley K. (2011). *Sleep and sleep disorders in older adults*. Neuropsychol Rev. 21(1): p. 41-53.
- [5] Paterson L.M, Nutt D.J and Wilson S.J. (2011). *Sleep and its disorders in translational medicine*. J Psychopharmacol. 25(9): p. 1226-34.
- [6] Drury I, Beydoun A. (1993). *Pitfalls of EEG interpretation in epilepsy* Neurological Clinic
- [7] Bruni O., Ferri R., Novelli L., Terribili M., Troianiello M., Finotti E., Leuzzi V., Curatolo P. (2009). *Sleep spindle activity is correlated with Reading abilities in developmental dyslexia*. Sleep, vol. 32, no. 10, pp. 1333-1340.
- [8] Carskadon M.A and Dement W.C. (2005). *Normal human sleep: an overview*. Principles and Practice of sleep Medicine: M. H. Kryger, T. Roth, W.C Dement (eds), Elsevier Inc., 4th edition, pp 13-23, Phyladelphia, USA.
- [9] Jimenez R. (2011). *Sistema de detección de nivel de cansancio en conductores mediante técnicas de visión por computador* Colombia: Universidad de Colombia.
- [10] Allan Rechtschaffen y Anthony Kales, editors., (1968). *A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects*.
- [11] Tortora G. and Derrickson B. (2006). *Principios de Anatomía y Fisiología*. Barcelona, España Ed. Médica Panamericana.
- [12] Salazar G. (2007). *Manual de Electrocardiografía y Electroencefalografía*. D.F, México Ed. El Manual Moderno.
- [13] Castellanos P., Godinez R., Jiménez J., Medina V. (1997). *Electrofisiología humana, un enfoque para ingenieros*. México D.F. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.
- [14] International Classification of Sleep Disorders: Diagnostic and Coding Manual. 2. Westchester: American Academy of Sleep Medicine, (2005).

- [15] Murugappan M., Ramachandran N., and Sazali Y. (2010). *Discrete Wavelet Transform Based Selection of Salient EEG Frequency Band for Assessing Human Emotions*. Journal of Biomedical Science and Engineering,3, 390-396. doi:10.4236/jbise.2010.34054.
- [16] Omerhodzic I., Avdakovic S., Nuhanovic A., Dizdareciv K., and Rotim K. (2012). *Energy Distribution of EEG Signal Components by Wavelet Transform*. InTech, 45-60.
- [17] Shaker M. (2007). *EEG Waves Classifier using Wavelet Transform and Fourier Transform*. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol 1, no. 3.
- [18] Welch, P. D. (1967). *The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms*. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, AU-15 (2): 70–73.
- [19] Datex-Ohmeda (2016). Datex-Ohmeda S/5TM Módulo EEG, M-EEG
- [20] Huertas, Z., Mardones, E., Niño, P. (2001). *Diseño e implementación de un prototipo de sistema EEG portátil PEP8*
- [21] National Sleep Research Resource. <https://sleepdata.org/>