

Una aproximación al desarrollo de un índice neurofisiológico capaz de predecir el rendimiento cognitivo de un alumno a partir del diseño del aula

An approach to developing a neurophysiological index capable of predicting a student's cognitive performance from classroom design

Juan Luis Higuera Trujillo^a, Adrián Colomer Granero^b, Valeriana Naranjo Ornedo^c y Carmen Llinares Millán^d

^aEscuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación, jlhiguera@i3b.upv.es, ^bInstituto de Investigación e Innovación en Bioingeniería, adcogra@i3b.upv.es, ^cInstituto de Investigación e Innovación en Bioingeniería, vnaranjo@dcom.upv.es y ^dEscuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación, cclinare@omp.upv.es

Abstract

Classroom design influences cognitive functions such as memory and attention. This relationship between environment and performance is complex, and the cognitive and neurophysiological effects are closely intertwined. The aim of this paper is to lay the foundations for a methodology capable of assessing the impact of classroom design on students' attention and memory, using automated cognitive indices based on neurophysiological measures. To this end, a laboratory study was carried out in which 50 subjects performed cognitive tests in virtual environments with different design configurations. During the tests, their psychological responses (attention and memory performance) and neurophysiological responses (electrocardiogram, electroencephalogram, and electrodermal response) were recorded. After processing the signals and extracting different metrics, correlations between the two types of responses were studied. This provided a basis of relationships for the future choice of metrics with which to train predictive models. The use of Artificial Intelligence will make it possible to automatically quantify the impact of classroom design on students' attention and memory, using indices based on neurophysiological measures.

Keywords: *design, psychological response, neurophysiological response, artificial intelligence.*

Resumen

El diseño del aula influye en las funciones cognitivas, como la memoria y la atención. Esta relación entre entorno y rendimiento es compleja, y los efectos cognitivos y neurofisiológicos están estrechamente entrelazados. El objetivo del presente trabajo es centrar las bases de una metodología capaz de evaluar el impacto del diseño del aula en la atención y memoria de los alumnos, a partir de índices cognitivos automatizados basados en medidas neurofisiológicas. Para ello se llevó a cabo un estudio en laboratorio, en el que 50 sujetos realizaron pruebas cognitivas en entornos virtuales con diferentes configuraciones de diseño. Durante estas se registraron sus respuestas psicológicas (relativas al rendimiento en atención y memoria) y respuestas neurofisiológicas (electrocardiograma, electroencefalograma, y respuesta electrodérmica). Tras el tratamiento de las señales y la extracción de distintas métricas, se estudiaron las correlaciones entre ambos tipos de respuestas. Esto ofreció una base de relaciones para la futura elección de métricas con las que entrenar modelos predictivos. El uso de Inteligencia Artificial permitirá cuantificar de manera automática el impacto del diseño del aula en la atención y memoria de los alumnos, a partir de índices basados en medidas neurofisiológicas.

Palabras clave: *diseño, respuesta psicológica, respuesta neurofisiológica, inteligencia artificial*

1. Introducción

Son muchos los estudios que han demostrado que los estímulos físicos del aula pueden influir en las funciones cognitivas determinantes del aprendizaje, la memoria y la atención (Choi et al., 2015). Estos importantes efectos han dado lugar a un creciente interés por analizar la relación entorno físico-aprendizaje.

Una gran parte de estos trabajos se ha centrado en los atributos ambientales, como la temperatura, la calidad del aire, o la acústica. Con respecto a la acústica del aula, Crandell y Smaldino (2000) y Picard y Bradley (2001) identificaron varias variables, como el ruido, la reverberación y la distancia entre el hablante y el oyente, que afectaban negativamente al proceso de aprendizaje. Por lo que se refiere a la iluminación, Tanner (2009) y Hescong et al. (2002) identificaron la influencia significativa de la luz natural en actividades de lectura y de ciencias, así como que las ventanas grandes estaban asociadas con mejores resultados de aprendizaje. Otra variable visual muy estudiada ha sido el color, por su impacto en el desempeño de las actividades de los estudiantes (Küller et al., 2009). Así, se ha demostrado que en tareas de lectura y escritura se cometen más errores en los espacios blancos que en aquellos coloreados (Kwallek et al., 1996). Esta relación entre el entorno y el rendimiento cognitivo es compleja debido a su carácter multidimensional (Higgins et al. 2005), y a que los efectos cognitivos, fisiológicos y afectivos que genera el entorno físico pueden estar estrechamente entrelazados (Evans y Stecker 2004).

En este sentido, resulta complejo medir el rendimiento cognitivo y no existe una metodología universalmente aceptada. El sistema tradicional de medición de estas funciones cognitivas es mediante el empleo de tests psicométricos. Sin embargo, este sistema resulta incompleto ya que no recoge el componente involuntario del sujeto. Hay que tener en cuenta que los estados cognitivo-emocionales se caracterizan por respuestas tanto psicológicas como fisiológicas (Izar, 1992). La medición neurofisiológica permite registrar datos no manipulables conscientemente por los sujetos (Dimoka et al., 2012), y en tiempo real mientras el sujeto ejecuta una tarea o responde a un estímulo específico.

Se sabe por ejemplo que las oscilaciones cerebrales pueden correlacionarse con múltiples funciones que incluyen registro y seguimiento sensorial, percepción, movimiento y procesos cognitivos relacionados con la atención, el aprendizaje y la memoria (Basar, 1999). Así, Cho et al., (2002) desarrollaron un sistema de mejora de la atención y concentración utilizando el electroencefalograma (EEG) en un aula virtual en la que se eliminaban distractores. Ko et al. (2017) encontraron una relación entre las variaciones de las señales de EEG y el nivel de atención sostenida en el aula, medida con los tiempos de respuesta realizando una tarea. Otros autores como Shah et al. (2011) encontraron una relación positiva entre las medidas de variabilidad del ritmo cardiaco (HRV) y el aprendizaje y la memoria verbal, pero no con la memoria visual. Hansen et al. (2003) observaron mejor desempeño de las tareas de memoria y atención con mayores niveles de HRV.

2. Objetivo

El objetivo del presente trabajo es centrar las bases de una metodología capaz de evaluar el impacto del diseño del aula en la atención y memoria del alumnado, a partir de índices cognitivos automatizados basados en medidas neurofisiológicas. Estos índices serán capaces de caracterizar el rendimiento cognitivo de un sujeto ante un espacio concreto. Esto es: ante un determinado diseño de aula (real o virtual), se podría predecir el rendimiento cognitivo de los estudiantes en base a la respuesta neurofisiológica. Dada la magnitud del objetivo general del trabajo, se plantea un estudio piloto como prueba inicial.

3. Material y Métodos

La metodología se basó en un estudio en laboratorio, con las siguientes características:

3.1. Muestra

La muestra estaba formada por 50 sujetos (55% hombres-45% mujeres), con una edad media de 20.06 años ($\sigma = 3.122$). Para formar parte de la muestra se marcaron cuatro criterios de inclusión: ser estudiante universitario, español (para evitar posibles efectos culturales), tener entre 18 y 23 años (edades más frecuentes en los grados universitarios de España) y no tener dificultades en la apreciación de los colores.

3.2. Estímulos

Como estímulo base se tomó la réplica virtual inmersiva de un aula física representativa. Concretamente, un aula de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE) de la Universitat Politècnica de València. Sobre esta aula base se desarrollaron 34 configuraciones de diseño, con la siguiente clasificación:

- Variable forma. Con tres medidas para la altura del techo: 3.8m, 3.2m y 2.6m; y otras tres para la anchura: 8.8m, 8.2m y 7.6m.
- Variable iluminación. Con tres medidas para la iluminancia: 100lx, 300lx y 500lx; y otras tres para la temperatura del color: 3000K, 4000K y 6500K.
- Variable color. Con 8 tonos, divididos a su vez en fríos (5BG, 5PB, 5P, 5GY) y cálidos (5RP, 5R, 5YR, 5Y); y 2 saturaciones: alta (entre 10 y 16 unidades en Munsell chroma) y baja (entre 4 y 10 unidades).

Los sujetos experimentaron los espacios visualizando las simulaciones mediante el dispositivo HTC Vive.

3.3. Análisis de datos

De cada sujeto se registraron datos psicológicos y neurofisiológicos, además de un cuestionario demográfico básico.

Datos psicológicos

Tarea de memoria. Esta tarea consistió en la memorización de un conjunto de palabras, basado en el estudio de Alonso y su equipo (2004). En concreto el sujeto debía escuchar 3 audios, cada uno de ellos con una lista de 15 palabras relacionadas entre sí. Las listas se presentaron contrabalanceadas. El sujeto debía escucharlas y repetirlas en un tiempo máximo de 30 seg, antes de avanzar a la siguiente lista. Posteriormente se anotaba el número de aciertos de cada lista. El número de palabras recordadas fue corregido según la tasa de recuerdo propuesta por Alonso et al (2004).

Tarea de atención. Esta tarea consistía en reaccionar lo antes posible ante un estímulo auditivo concreto con un clic de ratón (objetivo) y evitar hacerlo ante otros cuatro (distractores), similar a las pruebas de rendimiento auditivo continuo (Seidman et al., 1998). En total la tarea contaba con 8 objetivos y 32 distractores, y el tiempo entre estímulos era de 800 ms a 1600 ms. Los sujetos tenían 750 ms para reaccionar a los estímulos, pasados los cuales se consideraba un error (al igual que reaccionar ante un estímulo distractor). Se registró el tiempo de reacción ante los estímulos objetivos y el número de errores cometidos. Esto se repetía en 3 ocasiones para cada entorno simulado, con 1500 ms entre sets.

Datos neurofisiológicos

Variabilidad del ritmo cardiaco (HRV). Mide variaciones en los intervalos entre latidos (Goldman, 1976). La variación del ritmo cardiaco a lo largo del tiempo (HRV) ha demostrado en diversos estudios tener una relación con los sistemas simpático y parasimpático y, a través de ellos, con la actividad cognitiva (Mann et al., 2015) y el control atencional (Ramírez et al., 2015). Para el registro de los datos HRV se utilizó un dispositivo b-Alert X10 (Figura 1).

Electroencefalograma (EEG). Mide variaciones en la actividad eléctrica de la superficie del cuero cabelludo (Niedermeyer y da Silva, 2005). Su análisis generalmente implica la clasificación de la señal dentro de bandas de frecuencia definidas, sobre la base de que el cerebro está formado por diferentes redes que operan en su frecuencia (Mohammadi et al., 2017). El EEG se ha utilizado para estudiar, por ejemplo, la carga de trabajo mental (Lotte et al., 2018). Para el registro del electroencefalograma se utilizó el dispositivo b-Alert x10 (ver Figura 1).

Actividad electrodérmica (EDA). Mide variaciones en la sudoración de la piel (Boucsein, 2012). Estos datos se obtienen a partir de las propiedades eléctricas de la piel del sujeto ya que varían con la actividad de las glándulas sudoríparas debido al estrés o la excitación emocional. Cuando una persona suda, la conductividad de su piel cambia y la activación de las glándulas sudoríparas ecninas es un indicador de activación del sistema simpático. El dispositivo Shimmer 3GSR+ se utilizó para registrar la señal (Figura 1.).



Fig. 1 Dispositivos b-Alert (izquierda) y Shimmer 3 GSR+ (derecha)

4. Análisis de señales neurofisiológicas

La metodología se puede dividir en dos grandes fases. La primera de ellas tiene como objetivo la reducción de ruido y artefactos que incluyen los registros fisiológicos adquiridos. La segunda es la responsable de extraer las características más relevantes de las bioseñales que puedan cuantificar de manera automática las capacidades bajo estudio del alumnado.

4.1. Acondicionamiento de los registros neurofisiológicos

Por lo que respecta a la señal electrocardiográfica, en este trabajo se aplicaron una serie de procesos de filtrado de las señales cardíacas encargados de reducir el ruido debido al movimiento del electrodo, el producido por el contacto electrodo-piel, el desplazamiento de la línea base del registro, las posibles contribuciones indeseadas por contracciones musculares y la interferencia de la red eléctrica.

Debido a la naturaleza de la señal electroencefalográfica, el proceso de reducción de ruido y eliminación de artefactos de esta es un proceso complejo que no solo requiere de un banco de filtros. Se hace necesaria una descomposición de componentes de señal independientes (ICA de sus siglas en inglés) (Hyvärinen, 2000) para poder aislar con éxito la señal cerebral útil del resto de señal indeseada.

Por último, cabe mencionar que la morfología del registro electrodérmico hace que tan sólo se precise de un filtro paso bajo que elimine las altas frecuencias.

4.2. Extracción de métricas neurofisiológicas basadas en

Variabilidad del ritmo cardíaco (HRV). En este trabajo se extrajeron métricas en el rango de la alta frecuencia de la señal (HF) (0.15-0.4 Hz) relacionada con la activación del sistema parasimpático o incremento de la relajación, y la baja frecuencia (LF) (0.05-0.15 Hz) relacionada con la activación del sistema simpático o incremento de la excitación. Más concretamente, se extraen diversos descriptores de señal en cuatro dimensiones o dominios (tiempo, frecuencia, tiempo-frecuencia y análisis no lineal), que se recogen en la

guía acerca de la medición clínica del HRV que realizó la Sociedad Americana de Cardiología (1996).

Electroencefalograma (EEG). En este estudio se calcularon varias métricas: la banda Beta (13-30 Hz) de los electrodos C3 y Cz relacionados con la atención (Egner y Gruzelier, 2011), la banda Highbeta (21-30 Hz) relacionada a su vez con el estado de alerta (Choi et al., 2015) de los electrodos F3, Fz y Cz, que podrían ser indicadores de la memoria de trabajo y de la atención (Marzbani et al., 2016). Más concretamente se extraen índices de atención y memoria cuantificando el nivel de actividad cerebral en cada banda de frecuencia mediante la métrica Global Field Power propuesta por Lehmann (1980), ampliamente extendida en el ámbito de la neurociencia. Se cuantificaron las medias durante cada experiencia.

Actividad electrodérmica (EDA). En este estudio el análisis permitió discernir la componente fásica de la señal, relacionada con la atención a estímulos (Raskin, 1973).

4.3. Análisis estadístico

De manera complementaria, y previamente al futuro desarrollo del modelo predictivo, se estudió mediante análisis estadístico la relación entre las métricas neurofisiológicas extraídas y el rendimiento cognitivo en atención y memoria. Para ello, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman entre los datos neurofisiológicos y las variables de atención y memoria.

5. Resultados

Las siguientes métricas neurofisiológicas permitirían registrar datos sin posibilidad de manipulación por parte del sujeto y en tiempo real.

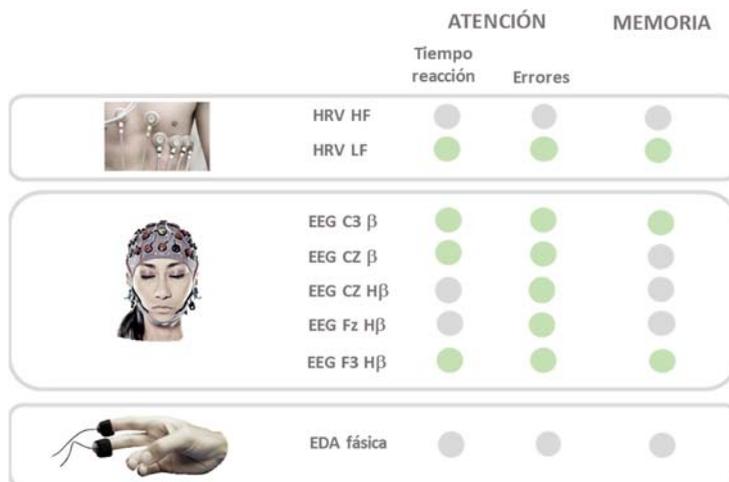


Fig. 2. Combinación de métricas neurofisiológicas integrantes de los índices cognitivos de atención y memoria

6. Conclusiones

Existe un creciente interés en otros campos de investigación en obtener datos objetivos directamente del cuerpo humano para medir la respuesta del sujeto cuando las personas participan en diversas actividades o reaccionan a diferentes estímulos, integrando bases neurofisiológicas con diseño y tecnología. La medición neurofisiológica permite registrar datos confiables que son difíciles o imposibles de obtener con herramientas tradicionales, como las pruebas psicométricas. Por una parte, los sujetos no pueden manipular conscientemente sus respuestas, y además permite la medición continua registrando datos en tiempo real mientras el sujeto ejecuta una tarea o responde a un estímulo específico.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (Proyecto BIA2017-86157-R; PRE2018-084051).

8. Referencias

- ALONSO, M. Á., FERNANDEZ, Á., DIEZ, E., y BEATO, M. S. (2004). "Índices de producción de falso recuerdo y falso reconocimiento para 55 listas de palabras en castellano" en *Psicothema*, vol. 16, nº 3, p. 357-362.
- BASAR, E., (1999). *Brain function and oscillations. II. Integrative brain function. Neurophysiology and cognitive processes*, Berlin Heidelberg: Springer.
- BOUCSEIN, W. (2012). *Electrodermal activity*, 2nd ed. Newsbury Park, London, New Dehli: Springer Science & Business Media.
- CRANDELL, C. C., y SMALDINO, J. J. (2000). "Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment" en *Language, Speech & Hearing services in schools*, vol. 31, nº 4, p. 362-370.
- CHO, B. H., LEE, J. M., KU, J. H., JANG, D. P., KIM, J. S., KIM, I. Y., ... y KIM, S. I. (2002b). "Attention enhancement system using virtual reality and EEG biofeedback" en *Proceedings IEEE Virtual Reality* (156-163). Orlando, USA.
- CHOI, Y., KIM, M., y CHUN, C. (2015). "Measurement of occupants' stress based on electroencephalograms (EEG) in twelve combined environments" en *Building & Environment*, vol. 88, p. 65-72.
- DIMOKA, A., DAVIS, F. D., GUPTA, A., PAVLOU, P. A., BANKER, R. D., DENNIS, A. R., ...y KENNING, P. H. (2012). "On the use of neurophysiological tools in IS research: Developing a research agenda for NeuroIS" en *MIS quarterly*, vol. 36, nº 3, p. 679-702.
- EGNER, T., y GRUZELIER, J. H. (2011). "Learned self-regulation of EEG frequency components affects attention and event-related brain potentials in humans" en *Neuroreport*, vol. 12, nº 18, p. 415.

- EVANS, G. W., y STECKER, R. (2004). "Motivational consequences of environmental stress" en *Journal of Environmental Psychology*, vol. 24, nº 2, p. 143-165.
- GOLDMAN, M. (1976). *Principles of clinical electrocardiography*. Los Altos, USA: LANGE.
- HANSEN, A. L., JOHNSEN, B. H., y THAYER, J. F. (2003). "Vagal influence on working memory and attention" en *International Journal of Psychophysiology*, vol. 48, nº 3, p. 263-274.
- HESCHONG, L., WRIGHT, R. y OKURA, S. (2002). "Daylighting impacts on human performance in school" en *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 31, nº 2, p. 101-114.
- HIGGINS, S., HALL, E., WALL, K., WOOLNER, P., y MCCAUGHEY, C. (2005). *The impact of school environments: a literature review*, London: Design Council.
- HYVÄRINEN A. y OJA E. (2000). "Independent component analysis: Algorithms and applications" en *Neural Networks*, vol. 13, nº 4-5, pp. 411-430.
- IZARD, C. E. (1992). "Basic emotions, relations among emotions, and emotion cognition relations" en *Psychological Review*, vol. 99, nº 3, p. 561-565.
- KO, L. W., KOMAROV, O., HAIRSTON, W. D., JUNG, T. P., y LIN, C. T. (2017). "Sustained attention in real classroom settings: An EEG study" en *Frontiers in Human Neuroscience*, vol 11, p. 388.
- KÜLLER, R., MIKELLIDES, B., y JANSSENS, J. (2009). "Color, arousal, and performance—A comparison of three experiments" en *Color Research & Application*, vol. 34, nº 2, p. 141-152.
- KWALLEK, N., LEWIS, C. M., LIN-HSIAO, J. W. D., y WOODSON, H. (1996). "Effects of nine monochromatic office interior colors on clerical tasks and worker mood" en *Color Research & Application*, vol. 21, nº 6, p. 448-458.
- LEHMANN, W. S. D. (1980). "Reference-free identification of components of checkerboard-evoked multichannel potential fields" en *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, vol. 48, nº 6, pp. 609-621.
- LOTTE, F., BOUGRAIN, L., CICHOCKI, A., CLERC, M., CONGEDO, M., RAKOTOMAMONJY, A., y YGER, F. (2018). "A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update" en *Journal of Neural Engineering*, vol. 15, nº 3, p. 31005.
- MANN, S. L., SELBY, E. A., BATES, M. E., y CONTRADA, R. J. (2015). "Integrating affective and cognitive correlates of heart rate variability: A structural equation modeling approach" en *International Journal of Psychophysiology*, vol. 98, nº 1, p. 76-86.
- MARZBANI, H., MARATEB, H. R., y MANSOURIAN, M. (2016). "Neurofeedback: a comprehensive review on system design, methodology and clinical applications" en *Basic and Clinical Neuroscience*, vol. 7, nº 2, p.143-158.
- MOHAMMADI, Z., FROUNCHI, J., & AMIRI, M. (2017). "Wavelet-based emotion recognition system using EEG signal" en *Neural Computing*, vol. 28, nº 8, p. 1985-1990.
- NIEDERMEYER, E., y DA SILVA, F. L. (2005). *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*. Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins.

Una aproximación al desarrollo de un índice neurofisiológico capaz de predecir el rendimiento cognitivo de un alumno a partir del diseño del aula - An approach to developing a neurophysiological index capable of predicting a student's cognitive performance from classroom design

- PICARD, M., Y BRADLEY, J. S. (2001). "Revisiting speech Interference in classrooms: revisando la interferencia en el habla dentro del salón de clases" en *Audiology*, vol. 40, nº 5, p. 221-244.
- RAMIREZ, E., ORTEGA, A. R., y DEL PASO, G. A. R. (2015). "Anxiety, attention, and decision making: The moderating role of heart rate variability" en *International Journal of Psychophysiology*, vol. 98, nº 3, p. 490-496.
- RASKIN, D.C. (1973). *Attention and arousal*. En W. F. Prokasy & D. C. Raskin (Eds.), *Electrodermal activity in psychological research* (pp. 123-156), London, UK: Academic Press.
- SHAH, A. J., SU, S., VELEDAR, E., BREMNER, J. D., GOLDSTEIN, F. C., LAMPERT, R., ... y VACCARINO, V. (2011). "Is heart rate variability related to memory performance in middle aged men?" en *Psychosomatic Medicine*, vol. 3, nº 6, p. 475.
- SEIDMAN, L. J., BREITER, H. C., GOODMAN, J. M., GOLDSTEIN, J. M., WOODRUFF, P. W., O' CRAVEN, K., ... ROSEN, B. R. (1998). "A functional magnetic resonance imaging study of auditory vigilance with low and high information processing demand" en *Neuropsychology*, vol. 12, nº 4, p. 505-518.
- SOCIEDAD AMERICANA DE CARDIOLOGÍA. (1996). "Task force of the european society of cardiology and the north american society of pacing and electrophysiology" en *European Heart Journal*, vol. 17, pp. 354-381.
- TANNER, C. K. (2000). "The influence of school architecture on academic achievement" en *Journal of Educational Administration*, vol. 38, nº 4, p. 309-330.