

Los Potenciales Relacionados a Eventos (PREs): una técnica para estudiar el funcionamiento del cerebro durante el procesamiento de información

Event-Related Potentials (ERPs): a technique to study brain functioning during information processing

Vladimir Huerta-Chávez

Sergio Rivera-Tello

Julieta Ramos-Loyo*

Instituto de Neurociencias, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.

*Autor para correspondencia: julieta.ramos@academicos.udg.mx

Resumen

La técnica electrofisiológica de potenciales relacionados a eventos (PREs) ha sido utilizada por décadas como una herramienta neurofisiológica confiable para el estudio de los procesos sensoriales, motores y cognitivos. Esta técnica consiste en capturar la señal de la actividad eléctrica cerebral sincronizada con un evento en particular, como por ejemplo, la aparición de un estímulo auditivo, una palabra escrita o una imagen emocional. Dada la alta precisión temporal que ofrecen los PREs, es posible estudiar con detalle el curso y la dinámica a través del tiempo de los procesos neurales implicados en el procesamiento de la información. Además, los PREs también son marcadores neurofisiológicos confiables en el diagnóstico de las alteraciones en las vías de entrada de información y son de utilidad en el estudio de las alteraciones en el funcionamiento cerebral como en el caso de lesiones cerebrales, enfermedades neurodegenerativas y trastornos neuropsiquiátricos como la enfermedad de Parkinson y la esquizofrenia. En este sentido, consideramos relevante realizar una revisión general de los fundamentos teóricos y metodológicos de los PREs.

Palabras clave: EEG, Neurocognición, Metodología de los PREs.

Abstract

Event-related potentials (ERPs) electrophysiological technique has been used for decades as a reliable neurophysiological tool for the study of sensory, motor, and cognitive processes. This technique captures the brain's electrical activity signal synchronized with a particular event, such as the appearance of an auditory stimulus, a written word, or an image. Given the high temporal resolution offered by ERPs, it is possible to study rigorously the course and temporal dynamics of the neural processes involved in information processing. Furthermore, ERPs are also reliable neurophysiological markers for the diagnosis of sensitive pathways disorders and are useful in the study of brain function disorders such as injuries, neurodegenerative diseases, and neuropsychiatric disorders such as Parkinson's disease, and schizophrenia. Accordingly, we consider it relevant to carry out a general review of the theoretical and methodological fundamentals of ERPs.

Keywords: EEG, Neurocognition, ERPs Methods.

Introducción

El registro de la actividad eléctrica cerebral (EEG) es un indicador confiable de su organización funcional. Nos brinda información, por ejemplo, del grado de madurez del cerebro durante el desarrollo ontogenético, además de ser una herramienta muy útil a nivel clínico para identificar tumores cerebrales y actividad epiléptica, entre otras patologías (ver Hughes, 1994). Así mismo, permite observar cambios en la actividad cerebral relacionada con distintos procesos cognitivos y emocionales, desde la entrada de estímulos sensoriales, hasta procesos cognitivos complejos como el lenguaje y la toma de decisiones.

El cerebro produce de manera continua y espontánea actividad la cual se modifica cuando percibimos un estímulo en cualquiera de sus modalidades sensoriales. A través de los años, se han utilizado distintos métodos con el fin de extraer la información contenida en el EEG. Uno de estos métodos, conocido como técnica de PREs, se refiere a la obtención de respuestas eléctricas cerebrales asociadas temporalmente al procesamiento de eventos específicos que evocan algún tipo de respuesta de tipo sensorial, cognitiva o motora (Liu y Hu, 2019). La técnica de PREs se ha convertido en una de las más utilizadas en la investigación de las neurociencias cognitivas, debido a que posee las ventajas de no ser invasiva, tener una alta resolución temporal y ser de bajo costo en comparación con otras técnicas como la imagen por resonancia magnética funcional (RMf), la magnetoencefalografía o la tomografía por emisión de positrones. El estudio de los PREs no se aplica de manera exclusiva en humanos, sino también en otras especies como los roedores, gatos y monos. En esos casos, los electrodos de registro se implantan directamente en las estructuras cerebrales de interés relacionadas con un proceso determinado. En humanos, los electrodos se colocan a nivel del cuero cabelludo, sin embargo, a nivel clínico con el objeto de identificar con exactitud la fuente y el tipo de epilepsia, algunos electrodos se insertan a través del orificio nasal para llegar hasta el lóbulo temporal y hacer así, realizar un registro directamente sobre la corteza cerebral.

Existen técnicas electroencefalográficas que analizan la señal EEG a partir de la potencia o la conectividad

las cuales permiten estudiar un estado funcional asociado a ciertas situaciones experimentales, sin embargo, no revelan detalladamente el curso temporal de los procesos cognitivos. En cambio, la técnica de PREs es particularmente útil para estudiar la dinámica temporal de la señal cerebral asociada a los mecanismos neurales que participan en las diferentes etapas del procesamiento de un evento en particular.

Debido a la importancia que tiene esta técnica en el campo de las neurociencias cognitivas para el estudio de las bases neurales del procesamiento de información, consideramos relevante realizar una revisión general de los fundamentos teóricos, metodológicos y las prácticas más comunes para analizar los PREs.

Inicialmente, se describe de manera general cuál es el origen neural de los PREs. Después, se menciona la manera en que se obtienen los PREs a partir de una señal EEG y los métodos más comunes para su medición cuantitativa. Luego, se refieren los potenciales más utilizados y los procesos sensoriales, motores y cognitivos a los que se asocian. Posteriormente, se explican algunos de los paradigmas experimentales que se utilizan para obtenerlos y la información que ofrecen. Por último, se comenta la utilidad de los PREs en el campo clínico de manera general.

¿Cómo se originan los PREs?

Para comprender el origen de los PREs es importante conocer la naturaleza del funcionamiento neural. El registro de los PREs requiere del registro de la actividad eléctrica cerebral sobre el cuero cabelludo. Esta actividad proviene principalmente de un mecanismo de acción de las neuronas llamado potencial postsináptico. El potencial postsináptico es el cambio de voltaje que surge cuando los neurotransmisores se unen a los receptores de la membrana de las neuronas postsinápticas, lo que propicia que los canales iónicos se abran o se cierren y que se genere un cambio en el potencial de la membrana celular. A partir de este cambio, se genera un dipolo (un par de cargas eléctricas, una positiva y otra negativa que están separadas por una pequeña distancia) entre la región apical de las dendritas y el soma de la neurona. La sumatoria de

los dipolos que son generados por los potenciales postsinápticos de múltiples grupos neuronales, resultará en un voltaje determinado que podrá ser capturado por electrodos que están colocados sobre la superficie del cuero cabelludo. Para que lo anterior sea posible, es necesario que ocurran miles o millones de potenciales postsinápticos de manera simultánea. Además, los dipolos resultantes tienen que estar espacialmente alineados o de lo contrario, las cargas eléctricas se cancelan entre sí. Concretamente, las neuronas piramidales de la corteza cerebral están alineadas de manera perpendicular a la superficie de la corteza, lo que permite que los dipolos de estas neuronas se puedan registrar con mayor facilidad. De ahí que, la actividad de los PREs se genere en mayor medida por la actividad de las neuronas piramidales, aunque esto no significa que la señal de EEG no involucre la actividad de otro tipo de neuronas y regiones cerebrales (Luck, 2014). Para una descripción más detallada de estos mecanismos sugerimos revisar a Başar (1998) y Luck y Kappenman (2011).

¿Cómo se obtienen los PREs?

Ordinariamente, en los estudios de PREs se utilizan paradigmas experimentales basados en fundamentos teóricos y metodológicos que son seleccionados por el investigador en relación con una pregunta de

investigación particular. En esos paradigmas se presenta un conjunto de estímulos con parámetros controlados mientras se registra la actividad eléctrica cerebral a través de electrodos que están posicionados sobre el cuero cabelludo de acuerdo al denominado Sistema Internacional 10-20 (Jasper, 1958) (Figura 1A). Se seleccionan varios segmentos libres de artefactos (interferencias asociadas con fuentes ajenas a la actividad cerebral de interés, por ejemplo, los parpadeos o movimiento muscular) de la señal EEG sincronizados con el inicio de los estímulos (Figura 1B). Luego, los segmentos de cada evento se promedian a través de todos los ensayos y de esta manera, se obtiene una señal promedio para cada persona (Figura 1C). La promediación permite retener únicamente la actividad que se repite en los distintos segmentos y eliminar la actividad aleatoria. Así, se obtiene un *promedio individual* en el que es posible observar los distintos componentes de los PREs. Posteriormente, se promedian los PREs individuales de todos los participantes y se obtiene el *gran promedio* del grupo.

Características de los PREs y su medición cuantitativa

Los PREs se caracterizan con base en su amplitud,

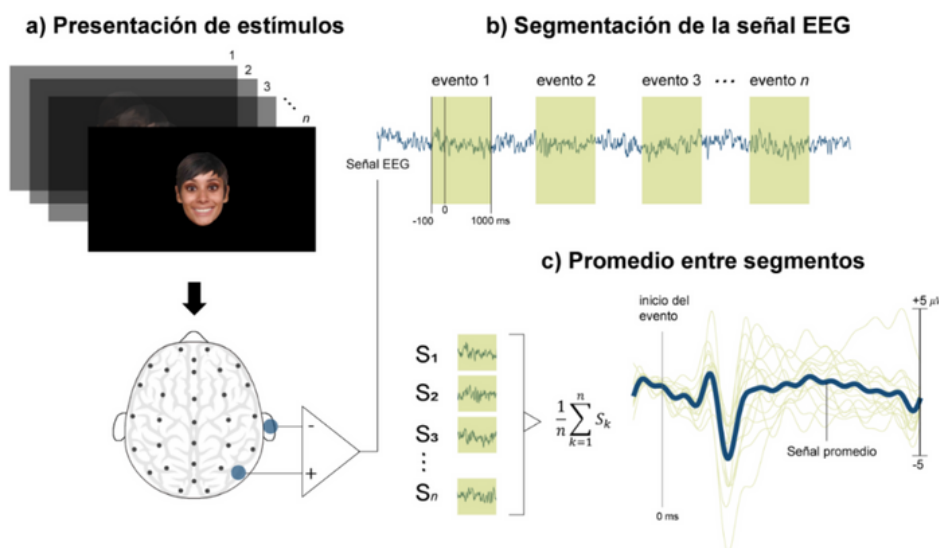


Figura 1. Obtención de los PREs. **a)** Se presenta un conjunto de estímulos mientras se registra la actividad EEG. La señal EEG obtenida en cada electrodo es un conjunto de valores de voltaje positivos o negativos en referencia con un electrodo colocado en un punto "neutro" **b)** Se segmenta la señal en ventanas pequeñas que están sincronizadas al inicio de cada estímulo. **c)** Se promedian los segmentos seleccionados de tal forma que se obtiene una señal promedio individual que revela a los componentes. Posteriormente, se promedian las señales individuales para obtener un gran promedio.

latencia, polaridad y localización. Dichas características pueden brindar información sobre la cantidad de recursos neurales requeridos durante la ejecución de alguna tarea, la velocidad de procesamiento y una aproximación de la fuente cerebral que está implicada.

La amplitud de los PREs es el valor máximo que alcanza la señal promedio y se mide en la unidad de microvolts (μV). Existen varios métodos para obtener el valor de voltaje de los componentes. El método más común es medir la amplitud del pico máximo del potencial, para ello, primero se asigna un valor de línea base que es el promedio de la actividad previa a la aparición del estímulo (desde 500 hasta 100 ms pre-estímulo). El valor de línea base se sustrae al resto de la señal, a este paso se le conoce como corrección de línea base. Después, a través de una inspección visual o de la detección automática con un código de programación, se localiza y mide el voltaje de mayor valor que ocurrió en una ventana de tiempo definida. (Figura 2A).

Otro método llamado pico-a-pico, consiste en evaluar la diferencia de amplitud que existe entre el pico máximo de un potencial tomando como referencia el pico máximo del potencial adyacente anterior (Figura 2B). Este método tiene la ventaja de medir la amplitud que está libre del ruido residual, cambios de corriente directa (CD) y otros artefactos que pueden existir desde la línea base (Handy, 2005).

Muchas veces, la medición de la amplitud no es tan directa debido a que la morfología de los componentes no es clara. Para resolver estos problemas, existen distintos métodos y prácticas comunes que ayudan a tener un criterio metodológico para la detección de estos parámetros.

Uno de estos métodos consiste en medir la integral de los valores de voltaje del área bajo la curva de la onda del potencial sobre la línea base (Figura 2C).

Otra opción que se utiliza cuando el pico del potencial no está bien definido o cuando la duración del componente es persistente, es la de medir los valores de amplitud promedio de los puntos que conforman el potencial dentro de un rango en un tiempo determinado (Figura 3A). De manera similar, existe otra alternativa para analizar potenciales poco definidos o los que su morfología refleja la superposición de varios componentes, en este caso se aplica un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés). La aplicación del PCA en el análisis de PREs, busca descubrir las variables latentes que son responsables de los patrones de covariación del conjunto de datos numéricos que forman la onda de un potencial (consultar a Dien *et al.*, 2007). De tal manera que, el PCA permite identificar qué componentes están implicados en la formación de la onda de un potencial y en qué medida (Figura 3B).

Por otra parte, la latencia es una medida del momento en que inicia el componente a partir de la presentación del estímulo y se mide en milisegundos. En términos de su latencia, hay componentes de inicio temprano y de inicio tardío. Los de inicio temprano reflejan el procesamiento inicial de un estímulo a través de la vía sensorial hasta que llega a las cortezas primarias del cerebro y dependen de las características físicas del estímulo, por lo que se denominan exógenos o potenciales evocados (PEs). En cambio, los componentes de latencia tardía, aunque también se desencadenan a partir del inicio del estímulo, no dependen de sus características, sino que están rela-

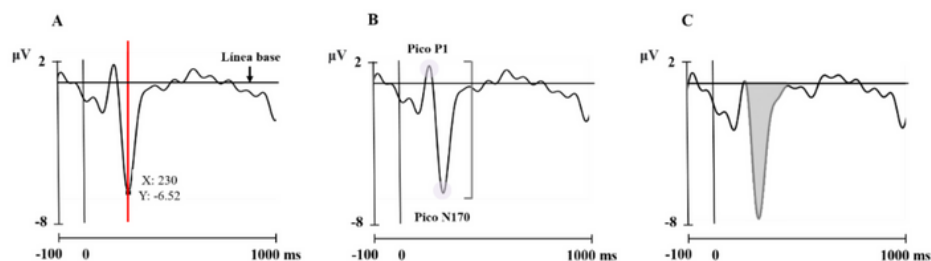


Figura 2. Representación de los métodos de medición de la amplitud de los PREs. **A.** Medición de la amplitud del pico máximo (eje y) y latencia (eje x) del potencial N170. La línea roja representa la latencia en milisegundos. **B.** Método de medición de pico a pico. El trazo gris representa el valor que se estimará para calcular la diferencia de amplitud que existe entre el pico del N170 y el pico del potencial adyacente anterior (P1). **C.** Método de medición del área bajo la curva. La zona sombreada representa el área de la que se estimará la integral para medir la amplitud del N170.

cionados con el procesamiento complejo de la información y están sujetos a la percepción y manipulación cognitiva del participante, por ello que se les considera como endógenos y se denominan como PREs.

La latencia de los potenciales se puede medir principalmente a través de dos métodos. Uno de ellos consiste en ubicar la latencia del pico máximo de un componente. Esto permite comparar entre dos o más ondas el tiempo de aparición del pico máximo de cada una. Asimismo, también es posible medir la latencia de un componente calculando la duración desde el punto en que inicia la onda hasta que termina. Así, podemos inferir el tiempo que tarda determinada etapa del procesamiento del estímulo en llevarse a cabo.

Al graficar los grandes promedios de las condiciones experimentales o de los grupos de participantes, podemos observar los componentes generados por la tarea y si existen diferencias en la amplitud y latencia de los componentes, sin embargo, para saber si estas diferencias son significativas, se aplican análisis estadísticos utilizando los valores de estos parámetros medidos en cada participante.

Por otra parte, la polaridad se refiere a que un componente puede ser positivo o negativo, ya sea que la onda del potencial se ubique por encima o por debajo de la línea base o línea cero. Es importante señalar que, la manera en la que se grafica la polaridad es una convención, algunos investigadores ubican la polaridad positiva hacia arriba y otros hacia abajo, lo importante es siempre indicar el signo sobre el eje y de la figura.

Otra característica relevante de los componentes de los PREs es su distribución topográfica. Esta distribución está relacionada con la ubicación de sus generadores cerebrales, aunque debido a que la corriente eléctrica se difunde a través de la conducción de volumen, la señal EEG carece de buena resolución espacial y es complicado distinguir con precisión qué región del cerebro es la fuente generadora. Sin embargo, es fundamental señalar en qué electrodo se encontró un determinado componente de acuerdo al Sistema Internacional 10-20 (Figura 4). Por ejemplo, el potencial N170 tiene una ubicación temporal posterior-occipital con una predominancia en el hemisferio derecho sobre el electrodo T6. Esta región corresponde con el giro fusiforme, estructura esencial en el reconocimiento de las características configuracionales de un rostro.

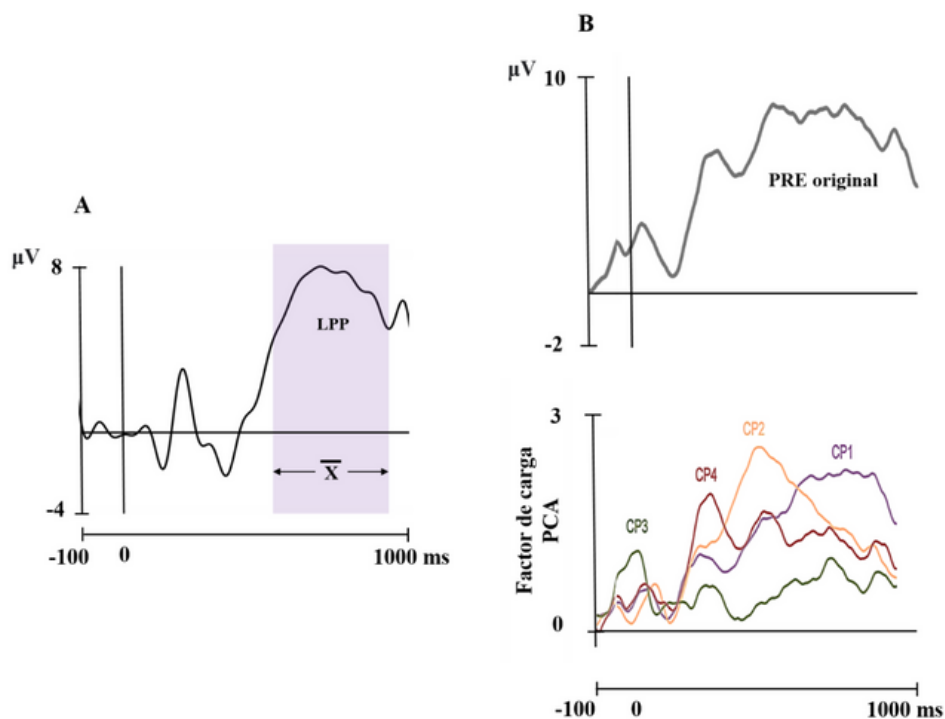


Figura 3. Representación de los métodos de medición en potenciales en los que la amplitud es persistente o no hay un pico máximo claro. **A**. Método de medición de promediación de puntos que conforman al LPP. La zona morada representa la ventana de tiempo de la que se promedian los valores de voltaje. **B**. Método de análisis PCA. La parte superior muestra la onda del potencial original antes del análisis de PCA. La parte inferior muestra los componentes principales resultantes que conforman la onda del análisis de PCA.

Los componentes de los PREs reciben su nombre en función principalmente de la polaridad y la latencia, como ejemplo están el N100 (N1), el P200 (P2), el P300 (P3), el N400 (N4), etc. En el caso de componentes en los que la latencia no está tan bien delimitada se utiliza la denominación tempranos o tardíos, como en el caso del EPN (*early potential negativity*) o el LPP (*late positive potential*). Otros componentes reciben su nombre con base en el proceso en el que están involucrados, por ejemplo el ERN (*error related negativity*) o el RewP (*reward positivity*).

Los componentes de los PREs reciben su nombre en función principalmente de la polaridad y la latencia, como ejemplo están el N100 (N1), el P200 (P2), el P300 (P3), el N400 (N4), etc. En el caso de componentes en los que la latencia no está tan bien delimitada se utiliza la denominación tempranos o tardíos, como en el caso del EPN (*early potential negativity*) o el LPP (*late positive potential*). Otros componentes reciben su nombre con base en el proceso en el que están involucrados, por ejemplo el ERN (*error related negativity*) o el RewP (*reward positivity*).

Potenciales más comunes y su dinámica temporal

Como se mencionó previamente, los PREs se pueden clasificar como ondas de latencia temprana o exógenos y tardía o endógenos en función del tiempo en el que aparecen a partir de la presentación del evento.

Los potenciales exógenos (PEs) son indicadores de la integridad de la vía sensorial que procesa los estímulos, por lo cual son de mucha utilidad en la evaluación clínica y también son auxiliares en la exploración del procesamiento temprano que precede a la actividad cognitiva en estudios experimentales. Se han descrito tres tipos de PEs sensoriales: los auditivos (PEsA), somatosensoriales (PEsS) y visuales (PEsV).

Los PEsA de latencia temprana corresponden a las respuestas generadas por el nervio auditivo y el tallo cerebral a los 10 ms, así como con la actividad talamocortical y subcortical ascendente de la vía auditiva extralemniscal entre los 10 y 60 ms después del inicio del estímulo. Los PEsA con una latencia de entre los 60 y 200 ms están relacionados con procesos perceptuales que implican un procesamiento de mayor orden a nivel cortical. De este modo, en caso de que alguno de los potenciales se observe alterado en su amplitud y/o latencia o no aparezca en lo absoluto, esto indicaría la existencia de una disfunción en alguna de estas estructuras. Esto es muy relevante para determinar el tratamiento a seguir, como por ejemplo, la pertinencia de un implante coclear.

Los PEsS tienen su origen principal en las fibras de los nervios espinales periféricos, subcorticales y corticales del sistema somatosensorial (Chiappa, 1990). Los potenciales subcorticales y corticales pueden ser capturados sobre el cuero cabelludo en respuesta a la estimulación sobre las extremidades

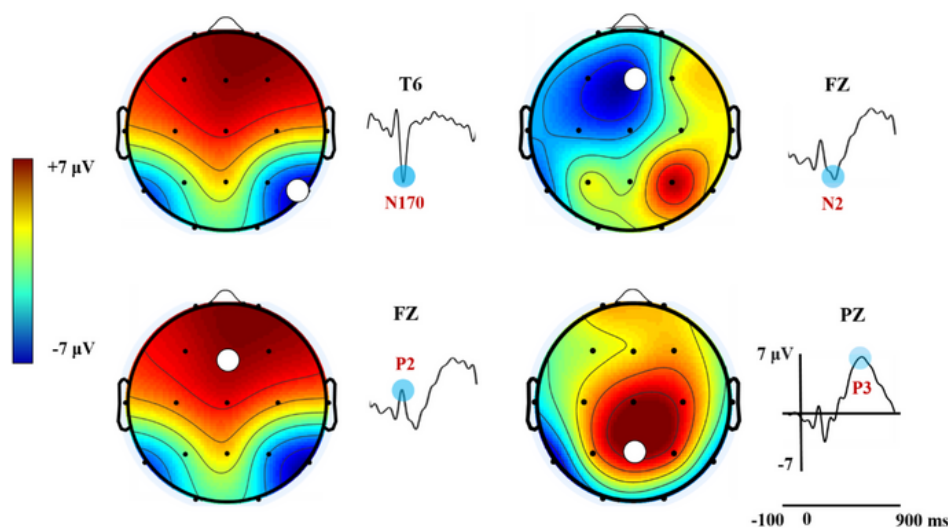


Figura 4. Representación de la distribución topográfica de los potenciales en una tarea de reconocimiento de palabras con interferencia de rostros. Los círculos blancos indican la localización del electrodo al que pertenece cada uno de los potenciales de acuerdo al Sistema Internacional 10-20: T6 para N170, FZ para P2 y N2 y; PZ para P3.

superiores e inferiores asociados con la activación de los núcleos del tallo cerebral y el tálamo.

Por su parte, los PEsV son el resultado de la actividad de la vía visual subcortical y cortical. También es posible capturarlos a través del electroretinograma para evaluar la respuesta de los mecanismos de transducción y conducción de la retina. Algunos experimentos se han centrado en los PEsV que son sensibles a los cambios perceptuales del estímulo como la luminancia y el patrón visual. En cuanto a la luminancia, se ha descrito un complejo de potenciales positivos y negativos que incluye un componente negativo denominado como C1 (entre los 50 y 70 ms) asociado con la activación de la corteza visual primaria y un componente positivo conocido como P100 (100 ms), que en ocasiones está acompañado de una deflexión negativa posterior (130 ms). Estos potenciales han sido asociados con procesos de inhibición por parte de las eferencias talámicas hacia la corteza visual y con la actividad intracortical, respectivamente. También se ha descrito la aparición del componente N200, al que se le ha relacionado con la actividad de la corteza extraestriada (Kraut *et al.*, 1985). Entre los PEsV sensibles al cambio de patrón visual se encuentra principalmente el P100 (90-110 ms) que tiene su mayor amplitud sobre las regiones occipitales y que suele presentarse entre dos picos negativos denominados como N70 y N135 (Pratt, 2011).

Por otra parte, los PEsV encontrados en estudios con imágenes complejas o texto escrito incluyen los componentes C1, P1 y N1. De manera similar a los PEsV sensibles al cambio de patrón y luminancia, el C1 y el P1 están asociados con la actividad de la corteza visual primaria y las vías de inhibición talamocorticales, mientras que el N1 es una negatividad (135-150 ms) relacionada con la actividad extraestriada. (Pratt, 2012). Otro potencial evocado visualmente y de latencia mayor es el N170, ampliamente relacionado con la detección, el reconocimiento configuracional y la codificación de rostros (Bentin *et al.*, 1996; Rossion *et al.*, 2000; Batty y Taylor, 2003; Rossion y Jacques, 2008) con una ubicación temporal posterior-occipital con predominancia en el hemisferio derecho.

Por otra parte, la técnica de PREs ha sido utilizada para evaluar procesos cognitivos de mayor jerarquía que están sujetos a un control cortical y

que suceden en latencias mayores a las de los componentes mencionados anteriormente. En este caso, el empleo de los paradigmas experimentales es fundamental, ya que en función del tipo de paradigma utilizado, variará el resultado en los potenciales incluso cuando se utilizan exactamente los mismos estímulos.

Uno de los primeros componentes en ser descritos dentro de la técnica de PREs es la onda negativa de larga duración denominada como variación contingente negativa (CNV, por sus siglas en inglés, descrita por Walter *et al.*, 1964). La CNV aparece cuando se utiliza un paradigma experimental que consiste en la presentación de un estímulo de advertencia, que anuncia que, en pocos segundos o cientos de milisegundos, se presentará un estímulo imperativo al que se pide responder de manera rápida. Algunos autores han reportado la distribución de la CNV sobre regiones frontocentrales (Judah *et al.*, 2013; Vanlessen *et al.*, 2015), sin embargo, la topografía del potencial puede variar en función de las demandas particulares de la tarea, la atención anticipatoria y la preparación motora que requiera el estímulo imperativo e incluso con la valencia emocional del estímulo.

Años más tarde, se describió un componente denominado como mismatch negativity (MMN por sus siglas en inglés, Näätänen *et al.*, 1978) que aparece entre los 100 y 200 ms posteriores a la presentación del estímulo. En el estudio del MMN, clásicamente se utiliza una tarea en la que surge una violación dentro de una secuencia de estímulos auditivos que aparecen de manera repetida (Näätänen, 2000), aunque también puede presentarse ante otro tipo de estimulación sensorial como es el caso de la estimulación visual (Winkler y Czigler, 2012) y somatosensorial (Lia, Jia, Chen y Fang, 2021). El MMN también puede ser denominado como N2a como parte de la familia de los componentes N2.

Precisamente, los componentes N2 son ondas negativas evocadas alrededor de los 180 y 325 ms después de la presentación de estímulos visuales o auditivos y se destacan el N2a, N2b y el N2pc. El N2b es un componente que aparece sobre regiones centrales del cuero cabelludo y que está relacionado con la atención consciente hacia un estímulo; el N2c es un componente que se presenta

sobre regiones frontocentrales en tareas de clasificación de estímulos y; el N2pc es un componente que aparece de manera contralateral a la ubicación del estímulo sobre regiones occipito-temporales y que ha sido vinculado con procesos de control atencional en tareas de búsqueda visual (Luck, Girelli, McDermott y Ford, 1997).

Otro de los potenciales ampliamente utilizados en las neurociencias cognitivas es el P300 o P3. El P3 es un componente positivo con una ventana de aparición que va desde los 250 ms hasta los 900 ms a partir de la presentación del estímulo visual o auditivo. Su latencia de aparición varía en función de las características experimentales de la tarea, la edad del participante y el tipo de población, entre otras cosas. El P3 ha sido dividido en dos sub-componentes: el P3a y el P3b. Por un lado, el P3a se origina a partir de mecanismos de atención selectiva y memoria de trabajo por parte de regiones frontales y su actividad es mediada por la actividad dopaminérgica (Polich, 2007). Por otro lado, el P3b ha sido descrito como un potencial con distribución centro-parietal que aparece en latencias más tardías que el P3a que tiende a aparecer en regiones frontales con una latencia menor (Squires, Squires y Hillyard, 1975). Más aún, el P3b ha sido asociado principalmente con procesos de atención y de actualización de la memoria de trabajo para facilitar la codificación de la información entrante (Polich, 2012). Con respecto al generador cerebral del P3b, se ha postulado principalmente a la región temporo-parietal con una influencia importante por parte del sistema noradrenérgico (Polich, 2007).

Otro componente que comparte similitudes con el P3b es el potencial positivo tardío (LPP, por sus siglas en inglés). El LPP ha sido descrito como una positividad sostenida que inicia alrededor de los 350 ms a partir de la presentación del estímulo y que se puede prolongar hasta los 1000 ms (Hajcak, MacNamara y Olvet, 2010). El LPP ha mostrado tener una amplia distribución sobre el cuero cabelludo debido a que le subyacen múltiples redes neurales que se superponen temporal y topográficamente (Weinberg, Ferri, y Hajcak, 2013), sin embargo, se ha reportado que el LPP tiene mayor focalización sobre regiones centro-parietales (Schupp *et al.*, 2006; Herbert *et al.*, 2006; Kissler *et al.*, 2008; MacNamara, Ferri, y Hajcak, 2011). El LPP es considerado como un componente

útil para estudiar la interacción entre los procesos cognitivos y emocionales, así como la confluencia de los mecanismos *bottom-up* y *top-down* que determinan la focalización de la atención sobre los estímulos emocionales, con un procesamiento elaborado y flexible que registra manipulaciones en línea realizadas por la atención sostenida (Yiend, Barnicot, y Koster, 2013).

Como se mencionó anteriormente, la dinámica de los potenciales varía de acuerdo al tipo de paradigma experimental empleado incluso cuando se utilizan exactamente los mismos estímulos. Por ejemplo, los potenciales N2 y P3 están presentes en las tareas que se diseñan bajo el paradigma de *odd-ball* y *Go/No-Go*. El primero relacionado con el estudio de la atención y el segundo relacionado con el estudio del control inhibitorio.

La tarea *odd-ball* consiste en presentar dos tipos de estímulos (visuales o auditivos), uno denominado como *frecuente* con mayor porcentaje de aparición (70-75%) y otro denominado como *infrecuente* con menor porcentaje de aparición (25-30%). El objetivo es que el participante atienda de manera selectiva a los ensayos infrecuentes. La indicación consiste en responder a un botón cada vez que se detecte la aparición de un estímulo infrecuente determinado (una letra X, una cara de alegría, etc.) (Figura 5). Mientras tanto, en la tarea *Go/No-Go* se invierte la proporción de estos dos tipos de estímulos, el denominado como *Go* tiene un mayor porcentaje de aparición (70-80%) y el otro denominado como *No-Go* una menor probabilidad de aparición (20-30%) (Figura 5). En este tipo de tarea, se busca generar una respuesta preponderante a partir de que el participante responda a una serie de ensayos *Go*. A medida de que se responda a un mayor número de ensayos *Go*, la inhibición de la respuesta a los *No-Go* será más difícil. Aunque, los estímulos en ambas tareas pueden ser prácticamente iguales, lo que las distingue es la instrucción que se le da al participante. Mientras que en la tarea *odd-ball* se le indica que responda ante un estímulo particular (cara de alegría) con menor probabilidad de aparición (*infrecuentes*), en la tarea *Go/No-Go*, la instrucción consiste en no responder a esos estímulos (*No-Go*).

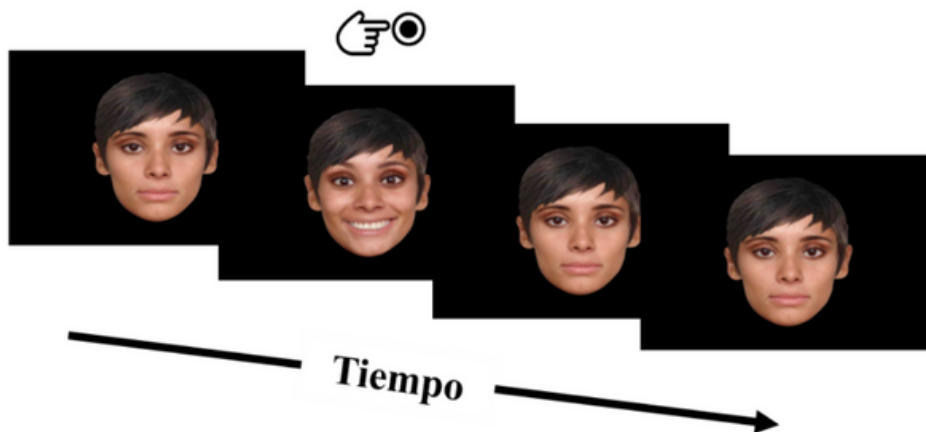
Si en ambas tareas utilizamos como estímulos rostros de expresión neutra y de alegría, muy probablemente obtendremos potenciales muy simi-

lares en etapas tempranas del procesamiento del estímulo, como es el caso de los potenciales P1 y N1, relacionados con el procesamiento visual a nivel perceptual en la corteza visual. De manera similar, dado que en ambas tareas la instrucción consiste en ver y reconocer expresiones de rostros, también se podría obtener un N170 sobre regiones temporales posteriores-occipitales, como reflejo de un proceso de detección y procesamiento configuracional de los rostros. De manera similar, en los resultados de ambas tareas podría aparecer un potencial con localización frontocentral denominado como P200. Este potencial ha sido vinculado con el procesamiento inicial del análisis

de la expresión de los rostros a un nivel atencional y la novedad, por lo tanto es posible que encontremos diferencias entre los estímulos de expresión neutra y de alegría (Paulman y Pell, 2009).

En la tarea *odd-ball*, el complejo de potenciales N2-P3a localizados sobre la región fronto-central, son un reflejo de la preparación del procesamiento del estímulo a un nivel ejecutivo, así como del proceso de preparación para responder ante el estímulo. Por lo tanto, la amplitud y/o latencia de estos potenciales es diferente entre los estímulos *frecuentes e infrecuentes*. Asimismo, la amplitud del potencial P3b localizado sobre la región central-parietal, sería mayor ante los ensayos *infrecuentes*

Tarea Odd-ball



Tarea Go/No-Go

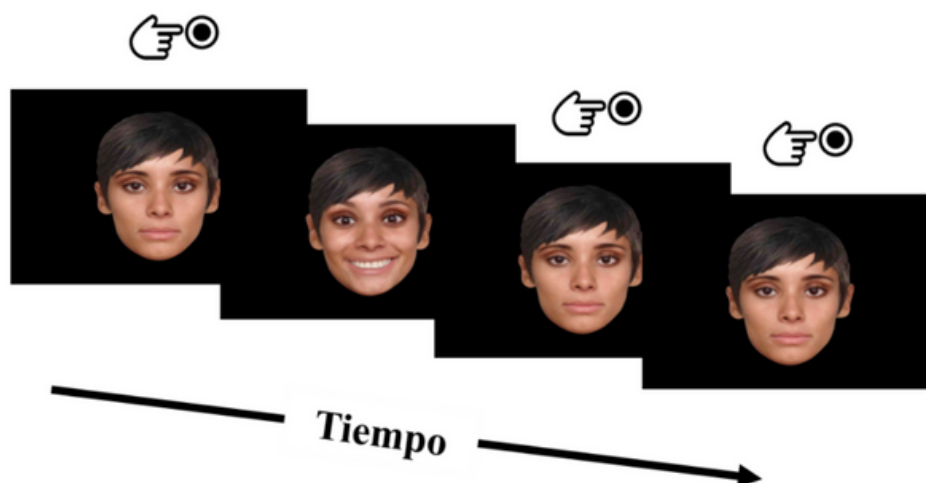


Figura 5. Representación del paradigma *odd-ball* (arriba) y *Go/No-Go* (abajo) con imágenes de rostros. En la tarea *odd-ball*, los ensayos *frecuentes*, a los que no se debe responder, se representan con estímulos de rostros neutros y los ensayos *infrecuentes*, a los que se tiene que responder, se representan con un rostro de alegría. En la tarea *Go/NoGo*, los ensayos *frecuentes (Go)* se representan con estímulos de rostros neutros y los ensayos *no frecuentes (No-Go)* a los que no se tiene que responder, se representan con un rostro de alegría.

y probablemente las expresiones de los rostros obtengan diferentes amplitudes de P3b dada a la interferencia emocional que influye sobre los procesos de atención. En cambio, en la tarea *Go/No-Go*, el potencial N2 con distribución fronto-central, muestra mayor amplitud en los ensayos *No-Go* que los *Go*, en relación con los procesos de control atencional, la resolución del conflicto y la inhibición que están implicados en mayor medida en los ensayos *No-Go*. Por su parte, el potencial P3 fronto-central también muestra mayor amplitud en los ensayos *No-Go* que los *Go* y muestra diferencias entre las expresiones de los rostros. Estas diferencias pueden deberse al efecto de interferencia que causan las emociones sobre la inhibición de la respuesta motora (Ramos-Loyo *et al.*, 2013).

Como vemos en lo descrito anteriormente, los PREs son influenciados por el tipo de paradigma experimental que se utiliza. Incluso, aunque se utilicen exactamente los mismos estímulos con los mismos parámetros, el cambio de la instrucción es suficiente para estudiar procesos cognitivos distintos y por consecuencia, obtener potenciales con características particulares para cada caso. Es importante destacar que los PREs que se van presentando en una secuencia temporal, reflejan los procesos sensoriales, perceptuales, cognitivos y emocionales que están implicados en cada una de las etapas del procesamiento de un estímulo en particular y en un paradigma concreto que pertenece a determinada tarea experimental. Conviene subrayar que existen potenciales que por denominación son similares, como por ejemplo el P3, sin embargo, en función del paradigma utilizado, el P3 reflejará procesos neurales particulares y por ende, una distribución topográfica distinta.

PREs y sus aplicaciones clínicas

Como se mencionó a lo largo de este trabajo, la técnica de PREs además de ser ampliamente utilizada en el área de la investigación experimental, también ha mostrado ser una herramienta confiable para complementar la exploración y el estudio de lesiones cerebrales, enfermedades neuropsiquiátricas y determinadas condiciones cognitivas.

Los PE auditivos se han utilizado para estudiar problemas de sordera profunda (Hine, Thornton, Davis y Debener, 2008) y el impacto del uso de implantes cocleares sobre la plasticidad cerebral en niños (Ponton, Moore y Eggermont, 1999). Por su parte, los PREs a nivel estadístico muestran diferencias en poblaciones con algún tipo de patología en comparación con los controles sanos. Por ejemplo, el potencial P3 ha mostrado alteraciones en la esquizofrenia (Jeon y Polich, 2003), la enfermedad de Parkinson (Ferrazoli *et al.*, 2022), el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (Brandeis *et al.*, 2002) y el trastorno del espectro autista (Cui, Wang, Liu, y Zhang, 2017). No obstante, es importante señalar que su uso en el área clínica ha mostrado evidencias contrapuestas debido a las variaciones experimentales, las diferencias en los equipos de registro e incluso la falta de consenso entre especialistas (Helfrich, y Knight, 2019). De manera importante, es de resaltar que las diferencias individuales en las características de la enfermedad que presentan estas poblaciones dificulta su empleo en la valoración clínica. A pesar de la gran cantidad de estudios que se han llevado a cabo, aún no están del todo claros los mecanismos que subyacen a las alteraciones en los PREs en distintos padecimientos que involucran afectaciones a nivel cerebral.

Conclusión

La técnica de PREs es una herramienta de gran utilidad en la exploración y el estudio de procesos sensoriales, motores, cognitivos y emocionales que ocurren desde el inicio hasta el final del procesamiento de determinado evento. A través de los PREs, es posible observar con detalle el curso y la dinámica temporal de los mecanismos neurales que subyacen al procesamiento del estímulo al que están sincronizados. El estudio de los PREs ha brindado aportaciones muy valiosas para el entendimiento de la interacción cerebro-cognición-comportamiento, no obstante, aún está pendiente el esclarecimiento de diversos fenómenos que se suscitan a nivel cerebral y que se reflejan sobre la cognición y el comportamiento. Para ello, el desarrollo de técnicas de análisis que nos permitan extraer mayor información sobre las características de los PREs se hace cada vez más relevante.

Literatura Citada

- Başar, E. (1998). Electrical Signals from the Brain. En H. Haken (Ed), *Brain Function and Oscillations. Springer Series in Synergetics* (pp. 21-38). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-72192-2_3
- Batty, M., y M.J. Taylor. (2003). Early processing of the six basic facial emotional expressions. *Cognitive Brain Research*, 17(3), 613–620. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(03\)00174-5](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(03)00174-5)
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E., y G. McCarthy. (1996). Electrophysiological Studies of Face Perception in Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(6), 551–565. <https://doi.org/10.1162/jocn.1996.8.6.551>
- Brandeis, D., T. H. van Leeuwen, J. Steger, K. Imhof y H.C. Steinhausen. (2002). Mapping brain functions of ADHD children. *International Congress Series*, 1232, 649–654.
- Brunia, C. H. M., G. J. M. van Boxtel y K.B. Böcker. (2011). Negative slow waves as indices of anticipation: The Bereitschaftspotential, the contingent negative variation, and the stimulus-preceding negativity. En S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components* (pp. 189–207). Oxford University Press, New York.
- Chiappa, K. H. (1990). Short latency somatosensory evoked potentials: Methodology. En K. H. Chiappa (Ed.), *Evoked Potentials in Clinical Medicine* (pp. 307–370). Raven Press, New York.
- Cui, T., Wang, P. P., S. Liu, y Zhang, X. (2017). P300 amplitude and latency in autism spectrum disorder: a meta-analysis. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 26(2), 177–190. <https://doi.org/10.1007/s00787-016-0880-z>
- Dien, J., Khoe, W., y G.R. Mangun. (2007). Evaluation of PCA and ICA of simulated ERPs: Promax vs. Infomax rotations. *Human Brain Mapping*, 28(8), 742–763. <https://doi.org/10.1002/hbm.20304>
- Ferrazoli, N., Donadon, C., Rezende, A., Skarzynski, P. H., y M.D. Sanfins. (2021). The Application of P300-Long-Latency Auditory-Evoked Potential in Parkinson Disease. *International Archives of Otorhinolaryngology*, 26(1), 158–166. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1722250>
- Hajcak, G., A. MacNamar y D. M. Olvet. (2010). Event-related potentials, emotion, and emotion regulation: an integrative review. *Developmental Neuropsychology*, 35(2), 129–155. <https://doi.org/10.1080/87565640903526504>
- Helfrich, R. F., y R.T. Knight. (2019). Cognitive neurophysiology: Event-related potentials. *Handbook of Clinical Neurology*, 160, 543–558. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64032-1.00036-9>
- Herbert, C., J. Kissler, M. Junghöfer, P. Peyk y B. Rockstroh. (2006). Processing of emotional adjectives: Evidence from startle EMG and ERPs. *Psychophysiology*, 43(2), 197–206. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2006.00385.x>
- Hine, J., R. Thornton, A. Davis y S. Debener. (2008). Does long-term unilateral deafness change auditory evoked potential asymmetries?. *Clinical Neurophysiology*, 119(3), 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.11.010>
- Jasper, H. H. (1958). The 10-20 electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
- Jeon, Y. W., y J. Polich. (2003). Meta-analysis of P300 and schizophrenia: patients, paradigms, and practical implications. *Psychophysiology*, 40(5), 684–701. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00070>
- Judah, M. R., D. Grant, A.C. Mills, y V.W. Lechner. (2013). The neural correlates of impaired attentional control in social anxiety: an ERP study of inhibition and shifting. *Emotion*, 13(6), 1096–1106. <https://doi.org/10.1037/a0033531>
- Kissler, J., C. Herbert, I. Winkler, y M. Junghofer. (2009). Emotion and attention in visual word processing: an ERP study. *Biological Psychology*, 80(1), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2008.03.004>
- Kraut, M. A., J.C. Arezzo y H.G. Vaughan. (1985). Intracortical generators of the flash VEP in monkeys. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 62(4), 300–312. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(85\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0168-5597(85)90007-3)
- Li, B., L. Jia, L. Chen, y F. Fang. (2021). Electrophysiological correlates of the somatotopically organized tactile duration aftereffect. *Brain Research*, 1762, 147432. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2021.147432>
- Lu, X., y L. Hu. (2019). Electroencephalography, Evoked Potentials, and Event-Related Potentials. En: L. Hu., Z. Zhang (Eds) *EEG Signal Processing and Feature Extraction*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9113-2_3

- Luck, S. J. (2014). An Introduction to Event-Related Potentials and Their Neural Origins. En: S.J. Luck (Eds) *An introduction to the event-related potential technique*. MIT Press, Massachusetts.
- Luck, S. J., M. Girelli, M.T. McDermott y M.A Ford. (1997). Bridging the gap between monkey neurophysiology and human perception: an ambiguity resolution theory of visual selective attention. *Cognitive Psychology*, 33(1), 64–87. <https://doi.org/10.1006/cogp.1997.0660>
- Luck, S. J., y E.S. Kappenman. (Eds.). (2011). *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford University Press, New York.
- MacNamara, A., J. Ferri, y G. Hajcak. (2011). Working memory load reduces the late positive potential and this effect is attenuated with increasing anxiety. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 11(3), 321–331. <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0036-z>
- Näätänen R. (2000). Mismatch negativity (MMN): perspectives for application. *International Journal of Psychophysiology*, 37(1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(00\)00091-x](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(00)00091-x)
- Näätänen, R., A.W. Gaillard y S. Mäntysalo. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42(4), 313–329. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90006-9)
- Polich J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Polich, J. (2011). Neuropsychology of P300. En S. J. Luck & E. Kappenman (Eds.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford University Press, New York.
- Ponton, C. W., J.K. Moore y J.J. Eggermont. (1999). Prolonged deafness limits auditory system developmental plasticity: evidence from an evoked potentials study in children with cochlear implants. *Scandinavian Audiology. Supplementum*, 51, 13–22.
- Pratt, H. (2011). Sensory ERP components. En S. J. Luck & E. Kappenman (Eds.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford University Press, New York.
- Ramos-Loyo, J., A.A. González-Garrido, G. García-Aguilar y Y. Del Río-Portilla. (2013). The emotional content of faces interferes with inhibitory processing: an event related potential study. *International Journal of Psychological Studies*, 5(2), 52.
- Rossion, B., I. Gauthier, M.J. Tarr, P. Despland, R. Bruyer, S. Linotte y M. Crommelinck. (2000). The N170 occipito-temporal component is delayed and enhanced to inverted faces but not to inverted objects: an electrophysiological account of face-specific processes in the human brain. *Neuroreport*, 11(1), 69–74. <https://doi.org/10.1097/00001756-200001170-00014>
- Rossion, B., y C. Jacques. (2008). Does physical interstimulus variance account for early electrophysiological face sensitive responses in the human brain? Ten lessons on the N170. *NeuroImage*, 39(4), 1959–1979. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.10.011>
- Squires, N. K., K.C. Squires, y S.A. Hillyard. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 38(4), 387–401. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90263-1](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90263-1)
- Vanlessen, N., R. De Raedt, S.C. Mueller, V. Rossi y G. Pourtois. (2015). Happy and less inhibited? Effects of positive mood on inhibitory control during an antisaccade task revealed using topographic evoked potential mapping. *Biological Psychology*, 110, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.07.004>
- Walter, W., R. Cooper, V. J. Aldridge, W. McCallum y A.L. Winter. (1964). Contingent negative variation: an electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203(4943), 380–384. <https://doi.org/10.1038/203380a0>
- Weinberg, A., J. Ferri y G. Hajcak. (2013). Interactions between attention and emotion: Insights from the late positive potential. En M. D. Robinson, E. Watkins, & E. Harmon-Jones (Eds.), *Handbook of Cognition and Emotion* (pp. 35–54). The Guilford Press, New York, London.
- Winkler, I., y I. Czigler. (2012). Evidence from auditory and visual event-related potential (ERP) studies of deviance detection (MMN and vMMN) linking predictive coding theories and perceptual object representations. *International Journal of Psychophysiology*, 83(2), 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.10.001>
- Yiend, J., K. Bamiccott, y E.H.W. Koster. (2013). Attention and emotion. En: M.D. Robinson, E.R. Watkins, E. Harmon-Jones, (Eds.), *Handbook of Cognition and Emotion*. The Guilford Press, New York, London.