

Una introducción al uso de los potenciales evocados en el estudio del lenguaje

Juan Haro

Universitat Rovira i Virgili, Departamento de Psicología, Tarragona

juan.haro@urv.cat

Resumen

La técnica de potenciales evocados consiste en el registro de la actividad eléctrica cerebral generada tras la presentación de un estímulo. Gracias a su elevada resolución temporal, del orden de milisegundos, esta técnica es útil para analizar con precisión el curso temporal del procesamiento del lenguaje. La investigación con potenciales evocados ha logrado identificar algunos patrones de actividad cerebral asociados a distintos niveles del procesamiento y representación del lenguaje. Entre los más estudiados se encuentran el potencial de disparidad (MMN), asociado a la fonología, y los componentes N400 y P600, asociados a la semántica y sintaxis, respectivamente.

Palabras clave: potenciales evocados; lenguaje; EEG; N400; P600; potencial de disparidad

Abstract

The event-related potential technique records the electrical brain activity generated by the presentation of a stimulus. Because of its high temporal resolution, in the order of milliseconds, this technique is useful for an accurate analysis of the time course of language processing. Research with event-related potentials has revealed patterns of brain activity associated with different levels of language processing and representation. Among the most studied, we find the mismatch negativity (MMN), associated with phonology, and the N400 and P600 components, associated with semantics and syntax, respectively.

Keywords: event-related potentials; language; EEG; N400; P600; mismatch negativity

1. Introducción

Un problema frecuente cuando planificamos y diseñamos una investigación es escoger una medida que sea lo suficientemente fiable y válida. Existen diferentes medidas para el estudio del lenguaje. Las más empleadas y con mayor tradición en este campo son las medidas conductuales. Estas medidas se obtienen de la respuesta emitida por un participante en una tarea experimental; por ejemplo, el tiempo que tarda un participante en reconocer una palabra en una tarea de discriminación de palabras (p.ej., *pelota*) y falsas palabras (p.ej., *judapo*).

Las medidas conductuales son de gran utilidad para el estudio del lenguaje y han permitido arrojar luz sobre los mecanismos que subyacen al procesamiento y producción del lenguaje (véase Garrod 2006, para una breve revisión). Sin embargo, presentan algunas limitaciones. Una crítica frecuente es que la respuesta conductual del participante es solo el *output* de un complejo proceso. Las medidas conductuales revelan una imagen estática de procesos dinámicos, de breve duración, compuestos por un número indeterminado de subprocesos en continua interacción. Además, la respuesta conductual

puede estar influida por variables ajenas al procesamiento de estímulos lingüísticos, como son todas aquellas relacionadas con la planificación y ejecución de dicha respuesta. Un ejemplo de ello lo podemos encontrar en Balota y Abrams (1995), quienes realizaron un estudio de decisión léxica en el cual examinaron cómo afecta la manipulación de la frecuencia de una palabra a la fuerza, velocidad y duración de la respuesta motora que emiten los participantes. Los participantes disponían de una palanca con la que tenían que indicar si el estímulo presentado era una palabra o bien una falsa palabra. Debían mover la palanca hacia un lado si se trataba de una palabra o hacia el opuesto si se trataba de una falsa palabra. Los resultados mostraron que la frecuencia de la palabra no solo influyó en los tiempos de reconocimiento de las palabras, sino también en la fuerza, velocidad y duración de la respuesta motora. Los participantes movieron la palanca con mayor velocidad y fuerza al responder a palabras de alta frecuencia que al hacerlo con palabras de baja frecuencia.

Una forma de salvar las limitaciones de las medidas conductuales es complementarlas con otras medidas que permitan realizar un seguimiento preciso del desarrollo de los procesos cognitivos que preceden (y siguen) a la respuesta del participante. La técnica de potenciales evocados satisface perfectamente esta necesidad. Esta es una técnica neurofisiológica, basada en el registro de la actividad electroencefalográfica (EEG), que proporciona una medida en tiempo real de la actividad eléctrica del cerebro mediante métodos no invasivos. El presente trabajo se inicia con un breve repaso sobre el origen y el desarrollo de la técnica de potenciales evocados, seguido de una descripción de algunos componentes de potenciales evocados estrechamente relacionados con el estudio del lenguaje. Por último, se incluye un ejemplo práctico sobre cómo preparar, administrar y analizar un experimento de potenciales evocados.

2. Electroencefalografía

La EEG humana fue descubierta por el médico y psiquiatra Hans Berger (ver Figura 1). La primera publicación en la que se describe el uso de esta técnica en humanos data de 1929 (Berger 1929). En dicho trabajo, Berger explica cómo colocó un conjunto de electrodos sobre la cabeza de un participante, que a su vez estaba conectado a un galvanómetro¹, con el cual registró una curva de fluctuación constante. En el registro pudo apreciar dos tipos de ondas eléctricas: unas de mayor longitud y con una duración de 90 milisegundos (las cuales denominó *ondas de primer orden*) y otras de menor longitud y con una duración de 35 milisegundos (*ondas de segundo orden*).

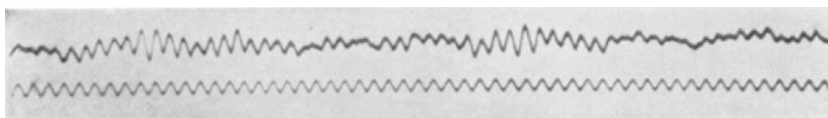


Figura 1. Uno de los primeros registros EEG de Hans Berger. La onda superior es el registro EEG obtenido de un participante, mientras que la onda de la parte inferior representa una onda sinusoidal de 10Hz usada para determinar la frecuencia del registro. Fuente: dominio público.

Pero ¿cómo es posible que de nuestro cerebro emanen ondas eléctricas? El cerebro es un órgano húmedo por el cual se propaga la electricidad generada por la actividad de las neuronas. Las neuronas se comunican mediante impulsos nerviosos. No están

¹ Un galvanómetro es un instrumento utilizado para la medición de la corriente eléctrica.

entrelazadas, sino que entre ellas existen minúsculos espacios de conexión en los que se lleva a cabo la comunicación neuronal. Estos espacios se conocen como sinapsis. Las sinapsis más comunes son las de tipo químico (véase Hammond y Esclapez 2015), donde la neurona emisora (*neurona presináptica*) segrega una serie de compuestos químicos (*neurotransmisores*), que son captados por la neurona receptora (*neurona postsináptica*). Según el tipo de neurotransmisor liberado, la sinapsis puede ser excitatoria o inhibitoria. Si la sinapsis es excitatoria, se desencadena una descarga eléctrica (*potencial de acción*) que recorre la neurona postsináptica y da lugar, a su vez, a la secreción de neurotransmisores en los espacios sinápticos que esta comparte con otras neuronas. Así, la información transmitida por la neurona presináptica a la neurona postsináptica sigue viajando por el tejido nervioso, generando más potenciales de acción en otras neuronas. En cambio, si la sinapsis es inhibitoria, es difícil que se produzca un potencial de acción en la neurona postsináptica, lo cual obstaculizará o impedirá que la neurona postsináptica siga transmitiendo información al resto de neuronas.

Es posible captar la electricidad generada en los potenciales de acción mediante electrodos situados en la superficie del cráneo. Esto convierte a la EEG en un método no invasivo que proporciona una medida directa y en tiempo real de la actividad neuronal. La EEG recoge la actividad eléctrica de la corteza cerebral, esto es, del tejido neuronal situado en la capa más externa del cerebro. En concreto, la actividad eléctrica que captan los electrodos es la suma de la actividad eléctrica excitatoria e inhibitoria de los potenciales de acción de las neuronas piramidales, las cuales destacan por su gran tamaño y forma cónica de su *soma* (el cuerpo de la neurona), además de por ser de las más abundantes en la corteza cerebral y por tener un papel relevante en los procesos cognitivos complejos y en el control motor. La suma de la actividad generada por la acción simultánea y coordinada de grandes conjuntos de neuronas piramidales se refleja en un flujo constante de ondas, de variable amplitud (entre -100 y +100 microvoltios) y frecuencia (desde 0 Hz hasta 40 Hz o más). Cabe destacar que la frecuencia de las ondas se asocia a distintos estados de conciencia (en la Figura 2 se muestran ondas de distinta frecuencia).

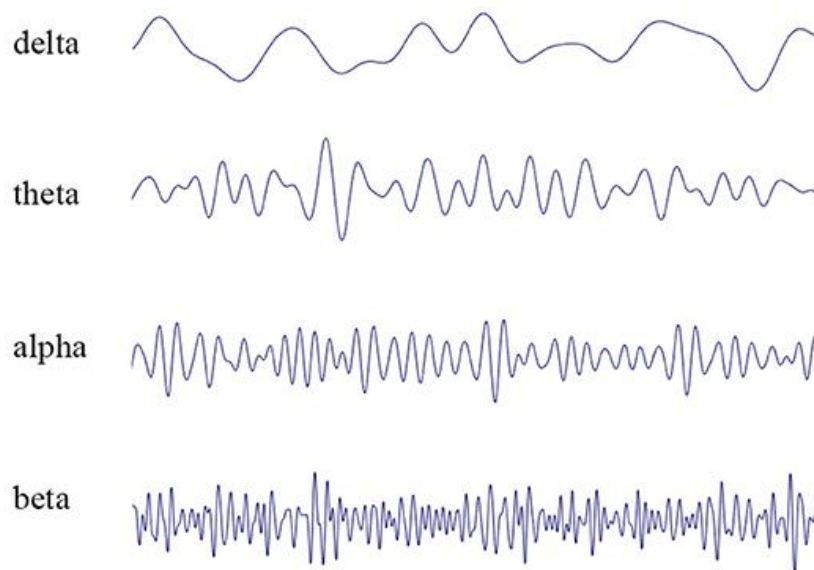


Figura 2. Ondas de diferente frecuencia que se pueden observar en un registro EEG. Aparecen ordenadas de menor a mayor frecuencia (Sun et al. 2020: 2)

Las ondas de primer orden detectadas por Berger (1929), de una frecuencia de 10 Hz, se denominan *ondas alfa* y se asocian a estados de relajación y tranquilidad, y también a fases previas al sueño. Berger también observó unas ondas de frecuencia más elevada, que denominó ondas de segundo orden, con una frecuencia comprendida entre 13 y 30 Hz, las cuales conocemos hoy en día como *ondas beta*. Estas se asocian a estados de actividad mental entre moderada e intensa durante la vigilia. Otras ondas de menor frecuencia fueron observadas por primera vez por Walter (1936) y Walter y Dovey (1944): las *ondas delta* y *theta*. Las ondas theta poseen una frecuencia entre 3,5 y 7,5 Hz y se suelen observar durante fases de sueño ligero. Las ondas delta, por su parte, poseen una frecuencia menor, entre 1 y 3 Hz, y se asocian a fases de sueño profundo.

Aunque existe toda una línea de investigación dedicada a examinar la relación entre el procesamiento del lenguaje y los cambios en la frecuencia de la actividad EEG (véase Petsche y Etlinger 1998, para una revisión), el presente trabajo se centrará en cómo se ha abordado el estudio del procesamiento y representación del lenguaje mediante el análisis de potenciales evocados, el cual será tratado a partir del apartado siguiente.

3. Potenciales evocados

Un potencial evocado (PE; *event-related potential*, ERP, en inglés) se corresponde con la actividad eléctrica, dentro del flujo continuo de la actividad EEG, causada por la presentación de un estímulo (p.ej., una imagen, una palabra, un sonido, etc.). Dicho estímulo *evoca* una serie de cambios en la actividad cerebral, distinguibles de la actividad de fondo, los cuales permiten entrever los mecanismos cerebrales subyacentes al procesamiento del estímulo.

El registro de PE se realiza mediante un conjunto de electrodos colocados sobre la superficie del cráneo (Figura 3). Estos electrodos captan la actividad eléctrica de grandes grupos de neuronas que se activan de forma simultánea y sincronizada durante el procesamiento de un estímulo. En concreto, captan la actividad de las neuronas piramidales de la corteza cerebral, que se encuentran dispuestas de forma perpendicular al lugar donde está situado cada electrodo. Los electrodos se ubican estratégicamente en diferentes zonas del cráneo: frontal, central, parietal, occipital, etc. Esta disposición tiene como finalidad recoger la actividad de diferentes áreas cerebrales.

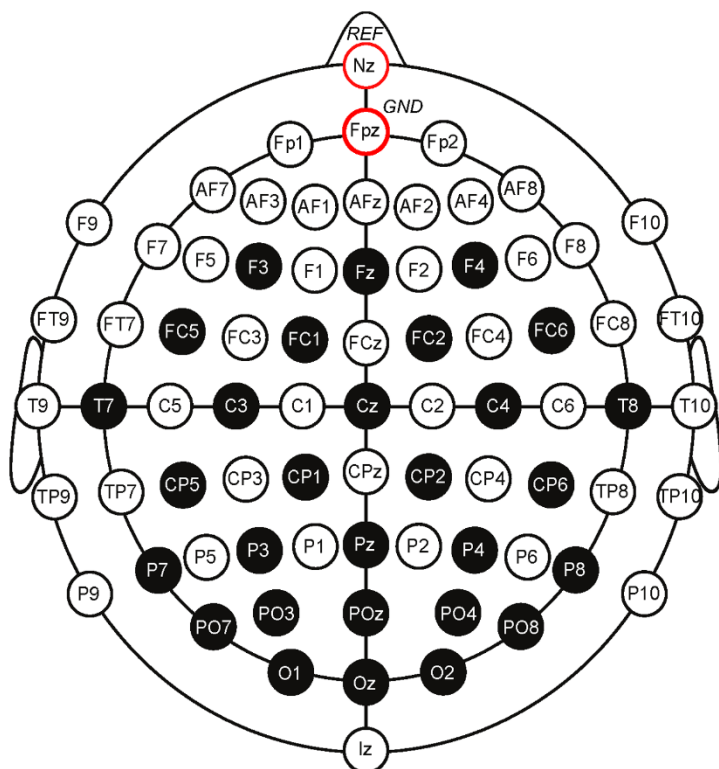


Figura 3. Localización de un conjunto de electrodos siguiendo el sistema internacional 10-20 (Yeom et al. 2014: 2). Se puede encontrar más información sobre el sistema internacional 10-20 en Silverman (1963).

Sin embargo, cabe destacar que la resolución espacial es una de las mayores limitaciones del registro de PE. Es difícil determinar con certeza en qué área cortical se ha generado la actividad captada en un electrodo o electrodos en particular. Por ejemplo, la actividad recogida en un electrodo frontal puede provenir de la corteza frontal, pero también de otras áreas corticales, tanto adyacentes como distantes a esta. Esto se debe a que el cerebro se comporta como un volumen conductor: esto es, la actividad eléctrica generada en una región concreta del cerebro puede propagarse por todo el tejido neuronal. Además, la actividad eléctrica debe superar varios obstáculos hasta lograr ser captada por los electrodos, en concreto, tiene que sobrepasar el resto de tejido cerebral, el cráneo y el cuero cabelludo.

Por todo lo anterior, el registro de PE no es el procedimiento de primera elección para el estudio de la localización espacial de los procesos cognitivos (aunque existen métodos para mejorar su resolución; en esta línea véase Nunez et al. 1994). No obstante, son numerosas las ventajas de esta técnica, que sobresale por su elevada resolución temporal (del orden de milisegundos), lo cual es su principal punto positivo respecto a otras técnicas de exploración neurofisiológica (p.ej., resonancia magnética funcional). También cabe destacar que se trata de una técnica no invasiva, que no requiere una respuesta explícita del participante, y que proporciona una medida multidimensional del procesamiento cognitivo, es decir, aporta más de una variable dependiente para el análisis (véase Luck 2005). Otra importante ventaja es que el registro de PE puede ser descompuesto en diferentes segmentos para su análisis. De esta forma, es posible segmentar una señal de EEG continua en los componentes que la forman, los cuales

reflejan distintas fases del procesamiento de un estímulo. Este aspecto se describe con más detalle a continuación.

3.1. Potenciales evocados: componentes

Tras un proceso de limpieza, filtrado y promediado de la actividad EEG, obtenemos una línea que fluctúa en forma de ondas a lo largo de un plano formado por dos ejes (Figura 4). En el eje vertical podemos observar la amplitud de voltaje (en microvoltios), y en el eje horizontal, el tiempo de presentación del estímulo (en milisegundos). El eje horizontal comienza en el milisegundo 0 (o bien unos milisegundos antes, si incluimos la actividad eléctrica de línea base), indicando el momento exacto en el que se ha presentado el estímulo. La actividad eléctrica oscila durante el transcurso temporal, elevándose y hundiéndose. Estas oscilaciones en forma de colinas y valles se denominan *componentes*. La polaridad de los componentes indica si la actividad neuronal durante ese rango temporal es principalmente excitatoria (*polaridad positiva*) o inhibitoria (*polaridad negativa*). Los componentes de polaridad positiva se identifican con la letra *P*, mientras que los de polaridad negativa se identifican con la letra *N*. Es importante tener en cuenta que, al representar la actividad EEG en un gráfico, es práctica habitual invertir la polaridad, de modo que la polaridad negativa queda en la parte superior, mientras que la positiva se encuentra en la parte inferior. Además, la nomenclatura asignada a los componentes refleja el rango temporal o el orden secuencial en el que suelen aparecer. Por ejemplo, el componente N400 es un componente que suele alcanzar su pico de máxima amplitud en torno a los 400 milisegundos tras la presentación del estímulo. También podemos encontrar componentes numerados como P1, N1, P2, N2, etc., los cuales indican su orden de aparición (p.ej., el componente P2 es el segundo componente de polaridad positiva que podemos observar en el registro). Además, cabe destacar que ciertos componentes poseen una distribución espacial concreta. Es posible que un componente se manifieste en electrodos situados en una región determinada (p.ej., en la región anterior), pero que su magnitud se vea disminuida o que sea indistinguible del resto de fluctuaciones del registro en otras regiones (p.ej., regiones central y parietal en el componente N400; Kutas y Federmeier 2011).

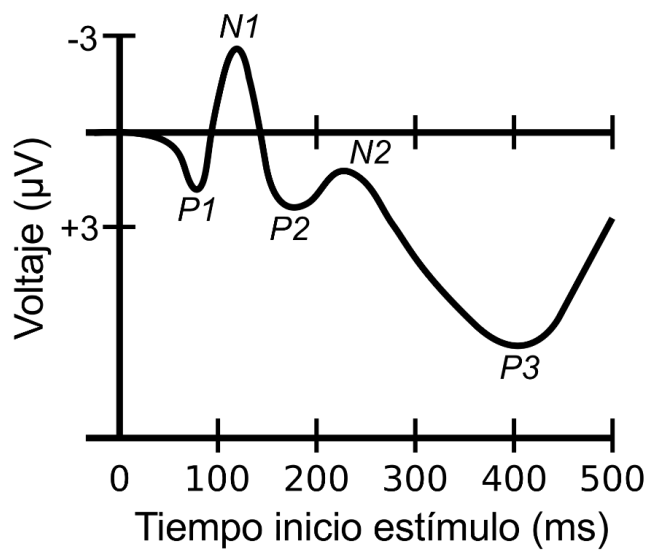


Figura 4. Una representación de los distintos componentes que se pueden apreciar en un registro de PE.

Son numerosos los estudios que han investigado los procesos cognitivos asociados a cada uno de los componentes que aparecen en un registro de PE. La lógica detrás de la mayoría de estos estudios es simple. Se crean diversas condiciones experimentales compuestas por estímulos que difieren en alguna variable en concreto, pero igualados en todas aquellas variables ajenas a la manipulación experimental y que pueden influir en los resultados. Los estímulos son presentados a una muestra de participantes, quienes deben realizar alguna tarea con ellos (en ocasiones esto no es necesario, basta con que los participantes sean expuestos a los estímulos). Durante la sesión se registra la actividad EEG de los participantes. Una vez finalizado el experimento, se compara el registro PE entre condiciones para analizar las diferencias de amplitud de los diferentes componentes. Si se observa alguna diferencia entre condiciones en uno o varios componentes, se asume que ese o esos componentes reflejan el proceso cognitivo implicado en el procesamiento de la variable manipulada.

El estudio de Barber et al. (2013) es un buen ejemplo de lo anterior. En este estudio se presentaron 120 palabras y 120 no palabras a un grupo de participantes en una tarea de decisión léxica. Los participantes debían indicar si cada uno de los estímulos presentados se correspondía con una palabra o no. Se manipuló el grado de concreción de las palabras. De las 120 palabras, 60 eran concretas (p.ej., *peló*) y las otras 60 eran abstractas (p.ej., *cosa*). Las palabras de ambos conjuntos estaban igualadas en un gran número de variables: frecuencia léxica, familiaridad, número de letras, número de sílabas, valencia emocional, edad de adquisición, etc. Los resultados mostraron diferencias entre condiciones en distintos componentes. En una franja temporal que abarcaba desde los 250 hasta los 450 milisegundos tras la presentación del estímulo se observó una fluctuación de polaridad negativa en el registro, la cual los autores identificaron con el componente N400. Las palabras concretas obtuvieron una amplitud de voltaje más negativa que las palabras abstractas en la N400. También se observaron diferencias entre condiciones en un componente de polaridad negativa que apareció en torno a los 700 y 1000 milisegundos tras la presentación del estímulo (N700). De nuevo, las palabras concretas mostraron amplitudes de voltaje más negativas que las palabras abstractas en este

componente. Teniendo en cuenta que las palabras concretas y abstractas estaban igualadas en un gran número de variables, los autores interpretaron estos resultados como una evidencia de que los componentes N400 y N700 reflejan ciertos mecanismos cognitivos asociados al procesamiento del grado de concreción de las palabras. Según los autores, las diferencias en estos dos componentes indicarían que, durante el procesamiento de una palabra concreta, se activa una mayor cantidad de información semántica que durante el procesamiento de una palabra abstracta. Esto sería debido a que las palabras concretas, a diferencia de las abstractas, requieren la activación e integración de información multimodal (sensoriomotora) representada de forma distribuida en múltiples redes neuronales. En cambio, la representación semántica de las palabras abstractas no incluiría información multimodal, dado que dependería de asociaciones superficiales con otras palabras.

El estudio de Barber et al. (2013) es solo un ejemplo de las múltiples posibilidades que ofrece la técnica de potenciales evocados para el estudio del lenguaje. El uso de esta técnica ha permitido descubrir numerosos componentes vinculados al procesamiento y representación del lenguaje. A continuación, se describen brevemente algunos de los más estudiados y que están más estrechamente relacionados con aspectos lingüísticos.

3.2. Potenciales evocados relacionados con el procesamiento y representación del lenguaje

3.2.1. Potencial de disparidad: Fonología

El potencial de disparidad (*mismatch negativity*, *MMN*, en inglés) es un componente de polaridad negativa, que aparece entre 100 y 200 milisegundos tras la presentación de un estímulo auditivo (véase Figura 5). Este potencial se asocia al procesamiento de estímulos auditivos de cualquier tipo, incluyendo sonidos lingüísticos. Se manifiesta al presentar un sonido inesperado o que difiere en alguna propiedad con respecto a otros sonidos presentados inmediatamente antes. Por ejemplo, es posible observar un MMN si, tras presentar una secuencia de sonidos idénticos, se reproduce de forma inesperada un sonido que se diferencia de los sonidos anteriores en su tono o duración. Esta particularidad del MMN lo convierte en un recurso útil para el estudio de la percepción del habla (véase Näätänen et al. 2007, para una revisión), aunque también se ha usado, en menor medida, para estudiar el acceso léxico y los procesos sintácticos (véase Pulvermüller y Shtyrov 2006, para una revisión). En general, se asume que la modulación de este componente responde a la diferencia entre el sonido que se está presentando al participante y la huella de memoria que ha dejado el sonido anterior.

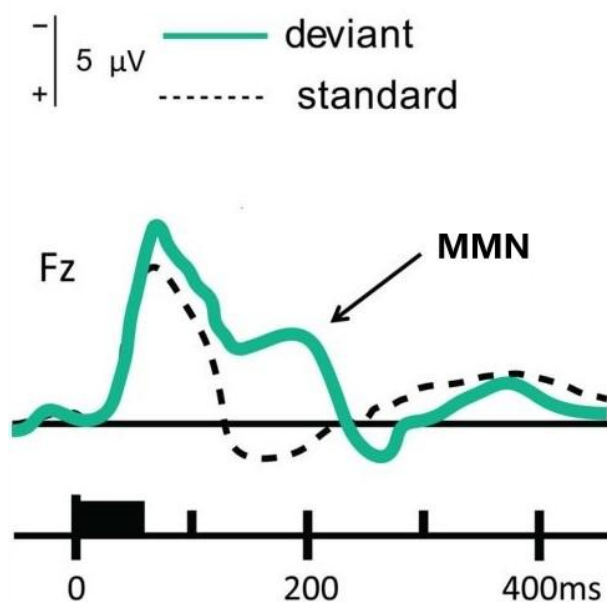


Figura 5. Representación gráfica de un registro del potencial de disparidad (MMN), extraída de Chennu y Bekinschtein (2012: 2). Esta figura y las sucesivas se presentan con la polaridad invertida.

El MMN se ha relacionado con la habilidad de los hablantes para discriminar fonemas que pertenecen a la misma o distinta categoría fonológica. Normalmente se observa un MMN de mayor amplitud al discriminar fonemas que pertenecen a distintas categorías fonológicas respecto a fonemas que forman parte de la misma categoría (p.ej., Dehaene-Lambertz, 1997). También se han encontrado modulaciones en este componente al discriminar entre fonemas de la lengua nativa y de otras lenguas. Por ejemplo, Näätänen et al. (1997) informaron de un incremento en el componente MMN al exponer a los participantes a un fonema diferente a los presentados en una secuencia de fonemas idénticos, pero este incremento solo se dio cuando el fonema discordante formaba parte del repertorio de fonemas de la lengua nativa del hablante. Por el contrario, no encontraron ningún efecto en el MMN cuando el fonema discordante no pertenecía a su lengua nativa. Otra interesante línea de investigación en la que se ha examinado este componente es en el estudio de la percepción del habla en bebés. Cheour et al. (1998) examinaron a partir de qué edad los bebés pierden la capacidad para discriminar fonemas que no forman parte de su lengua nativa y en qué momento incrementan la capacidad para discriminar los fonemas de su lengua nativa. En los resultados de su estudio se pudo observar un incremento del MMN en bebés de 6 meses al discriminar tanto fonemas de su lengua nativa como de otras lenguas. Sin embargo, cuando se volvió a examinar a esos mismos bebés a la edad de 12 meses, se apreció una reducción significativa de la amplitud del MMN, con respecto a la primera evaluación, cuando se les presentaron fonemas de una lengua diferente de la nativa. En cambio, la amplitud del MMN se incrementó en relación con la primera evaluación al presentarles fonemas de la lengua nativa. Estos resultados sugieren que alrededor de los 12 meses los bebés ven disminuida su capacidad para discriminar sonidos de otras lenguas y, al mismo tiempo, incrementan su capacidad para discriminar sonidos de su lengua materna. Por otra parte, hay evidencia de que la amplitud del MMN refleja procesos de integración de información visual y auditiva durante la percepción de fonemas; por ejemplo, esto se ha observado en tareas donde a los participantes se les presenta un fonema al mismo tiempo que se les facilita información visual sobre la articulación del fonema (Möttönen et al. 2002). Además, se

ha podido comprobar que este componente es sensible a la probabilidad fonotáctica (Bonte et al. 2005), esto es, la probabilidad de que un sonido o secuencia de sonidos esté presente en un determinado idioma. En resumen, tanto los resultados obtenidos con bebés como los registrados en adultos muestran que el MMN es un recurso de gran utilidad para examinar el desarrollo de las representaciones de sonidos lingüísticos, así como los procesos de percepción y producción del habla.

3.2.2. N400: Semántica

El componente N400 es posiblemente uno de los más estudiados en relación con el procesamiento y representación del lenguaje. Se trata de un componente de polaridad negativa, de distribución centro-parietal, que aparece entre los 200 y 600 milisegundos y que alcanza su pico de mayor amplitud en torno a los 400 milisegundos tras la presentación de estímulos visuales y auditivos (véase Figura 6). Se asocia, sobre todo, al procesamiento semántico de estímulos lingüísticos de diversa complejidad, por ejemplo, palabras, enunciados y discursos (véase Kutas y Federmeier 2011, para una revisión), aunque también se han observado efectos en la N400 asociados al procesamiento morfosintáctico, como es el caso de la concordancia verbal (Mancini et al. 2011). Este componente fue descubierto por Kutas y Hillyard en 1980. En este estudio pionero examinaron la actividad eléctrica cerebral al presentar al final de una oración una palabra, cuyo grado de relación con el contexto generado por la oración variaba. Algunas palabras estaban ligeramente relacionadas con el contexto: *He took a sip from the waterfall* (Él bebió un sorbo de la cascada), mientras que otras no estaban relacionadas: *He took a sip from the transmitter* (Él bebió un sorbo del transmisor). La actividad eléctrica generada por estas palabras fue comparada con la de palabras apropiadas al contexto, por ejemplo, *It was his first day at work* (Era su primer día de trabajo). Los resultados mostraron un aumento de la negatividad del componente N400 durante la lectura de palabras inapropiadas al contexto con respecto a palabras apropiadas al contexto. Además, este incremento fue mayor para las palabras nada relacionadas respecto a las ligeramente relacionadas.

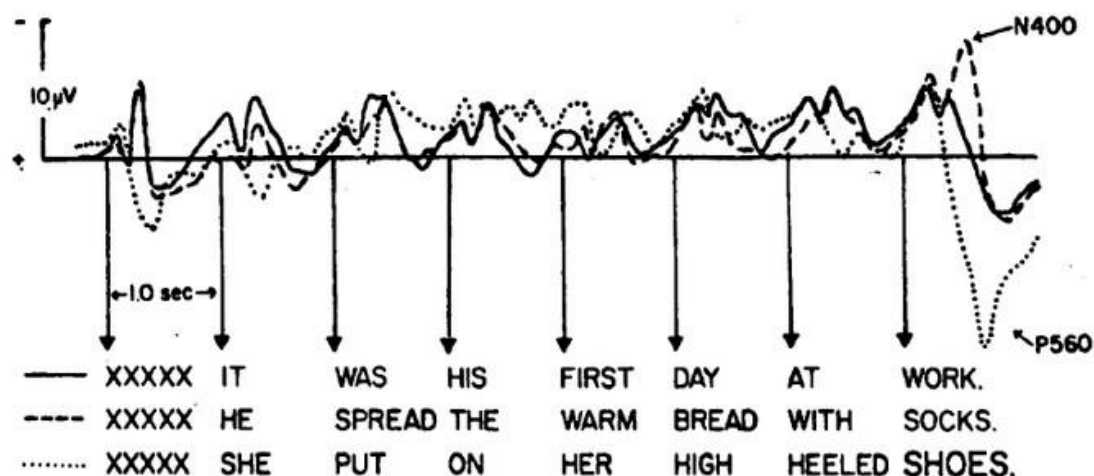


Figura 6. Representación gráfica de un registro del componente N400 (Kutas y Hillyard 1980: 203)

Existen, al menos, dos posibles interpretaciones de este efecto. Una de ellas sugiere que, durante la lectura de un enunciado, el lector va formulando hipótesis sobre la palabra que aparecerá a continuación, en un intento de predecir y lograr integrar dicha palabra en el contexto generado por el enunciado. De este modo, la lectura se entiende como un proceso incremental de acumulación de evidencias y, por tanto, las diferencias observadas en la N400 entre palabras apropiadas e inapropiadas al contexto se deben a que el significado de la palabra inapropiada no se ajusta a las hipótesis generadas por el lector. En este sentido, el incremento en el componente N400 ante palabras incongruentes al contexto reflejaría una disonancia entre la predicción del lector y la palabra presentada, así como los intentos de integrar esa palabra en el contexto semántico de la frase (Brown y Hagoort 1993). Otra hipótesis sugiere que las diferencias en la N400 reflejan la cantidad de preactivación semántica de la palabra (Kutas et al. 1984). Según esta hipótesis, la representación semántica de la palabra va recibiendo activación de forma inconsciente y automática durante la lectura de las palabras previas. Cuanto mayor es la relación entre la palabra y las palabras previas, más activación recibirá dicha palabra y menor será la cantidad de activación necesaria para integrarla en el contexto. Así, las diferencias en la N400 indicarían que las palabras incongruentes, al no haber recibido apenas activación del resto de palabras que componen el enunciado, requerirán un mayor esfuerzo de procesamiento para lograr una activación suficiente que permita su comprensión e integración en el contexto. En cambio, la preactivación de las palabras congruentes será más alta, por lo que hará falta menos activación para lograr integrarlas.

También se han observado efectos de la N400 durante el procesamiento de palabras precedidas por un contexto mínimo, esto es, por el contexto generado por una palabra presentada inmediatamente antes. Por ejemplo, se han examinado los efectos en la N400 mediante el paradigma de priming semántico. Este paradigma consiste en presentar un estímulo (*prime*) que mantiene algún tipo de relación semántica con un estímulo que se presenta a continuación y al que los participantes deben responder (*target*). El *prime* puede presentarse o bien subliminalmente (muy brevemente, con una duración de apenas 50 milisegundos o menos, impidiendo que el participante logre percibirlo conscientemente) o bien de forma visible. Si el paradigma de *priming* se utiliza, por ejemplo, con una tarea de decisión léxica, el participante debe indicar si el *target* (p.ej., *gato*) es una palabra o no. Dicho *target* puede ir precedido por un *prime* relacionado semánticamente (p.ej., *perro*) o por un *prime* no relacionado semánticamente (p.ej., *silla*). De esta manera, se mide la latencia de respuesta en la condición congruente (p.ej., *perro-gato*) y esta se compara con la latencia de respuesta de la condición incongruente (p.ej., *silla-gato*). Así, se asume que cualquier diferencia entre condiciones en la latencia de respuesta refleja la influencia que ejerce el *prime* sobre el *target*. Usando este paradigma con la tarea de decisión léxica se ha observado que los *targets* precedidos por *primes* semánticamente relacionados muestran una N400 de menor amplitud que los *targets* precedidos por *primes* no relacionados (p.ej., Holcomb 1993). Esto sucede incluso cuando los *primes* son presentados subliminalmente y, por tanto, no son percibidos y procesados de forma consciente por los participantes (p.ej., Kiefer 2002). Toda esta evidencia sugiere que las diferencias en la N400 reflejan el grado de preactivación que recibe la representación semántica del *target* por parte del *prime*. A mayor relación semántica entre *prime* y *target*, mayor activación recibe la representación semántica del *target* antes incluso de que sea presentado y, en consecuencia, menor cantidad de información semántica del *target* será necesaria para poder reconocerlo.

Numerosos estudios sugieren que la amplitud de la N400 es también una medida de la calidad y cantidad de la información semántica de una palabra, lo que la convierte en una valiosa herramienta para examinar la representación y acceso al significado de las palabras. Esto se ha podido comprobar, sobre todo, en estudios donde se ha examinado el procesamiento de palabras aisladas (esto es, sin contexto previo) mediante la tarea de decisión léxica. Por ejemplo, existe evidencia de que (i) las palabras concretas generan amplitudes N400 mayores que las palabras abstractas (Kounios y Holcomb 1994); (ii) las palabras con mayor cantidad de rasgos semánticos se asocian con amplitudes N400 más elevadas que las palabras con pocos rasgos semánticos (Rabovsky et al. 2012); (iii) las palabras con un gran número de asociados léxicos (palabras que suelen concurrir juntas; p.ej., *gato-negro*) muestran una N400 mayor que las palabras con pocos asociados léxicos (Laszlo y Federmeier 2011), y (iv) las palabras ambiguas muestran una N400 mayor que las no ambiguas (Haro et al. 2017).

En definitiva, existe numerosa evidencia que muestra la utilidad del componente N400 para el análisis del procesamiento semántico, tanto de palabras embebidas en contextos como en palabras aisladas, así como para estudiar los efectos de la riqueza semántica en el procesamiento léxico.

3.2.3. P600: Sintaxis

El componente P600 es un componente de polaridad positiva, de distribución posterior, que suele emerger alrededor de 500 milisegundos después del inicio de la presentación de un estímulo lingüístico y cuya duración es de aproximadamente 200 milisegundos (véase Figura 7). Además, su pico de mayor amplitud se manifiesta en torno a los 600 milisegundos.

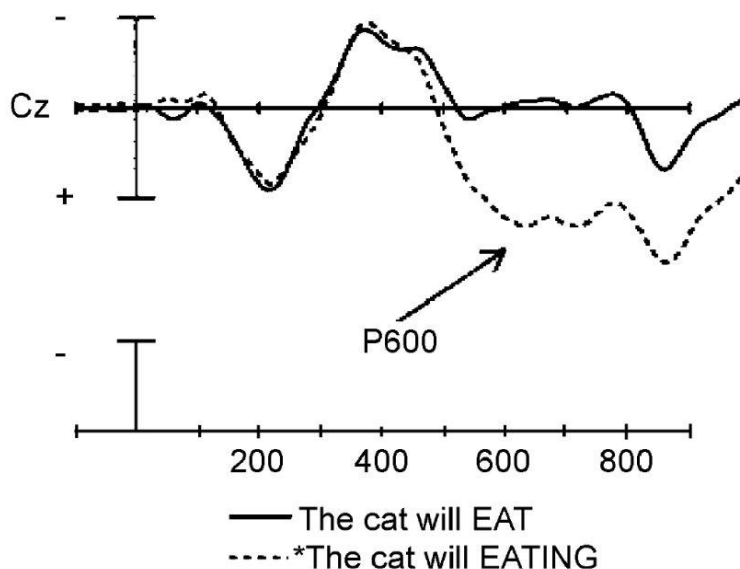


Figura 7. Representación gráfica de un registro del componente P600 (Osterhout et al. 2008: 511).

El descubrimiento de este componente se remonta al estudio de Osterhout y Holcomb (1992). Este estudio ejemplifica el tipo de efectos que se pueden observar en el

componente P600 y las manipulaciones experimentales que dan lugar a dichos efectos. En el primer experimento del estudio, los autores presentaron frases como las siguientes:

- (1) *The woman struggled to prepare the meal* (La mujer se esforzó para preparar la comida)
- (2) *The woman persuaded to answer the door* (La mujer persuadió para contestar la puerta).

Como se puede observar, la frase (1) es gramaticalmente correcta, mientras que la (2) no lo es. Dado que *persuade* es un verbo transitivo, requiere un objeto directo para dar sentido a la oración. En tal caso, al leer la preposición *to* de la oración (2), el analizador sintáctico se encontraría ante un incumplimiento de las propiedades de subcategorización del verbo *persuade*, algo que no ocurriría en la oración (1). Esta incongruencia sintáctica se vio reflejada en el registro de PE de Osterhout y Holcomb (1992). En concreto, se observó un incremento de voltaje de polaridad positiva entre los 500 y 800 milisegundos tras leer la preposición *to* en oraciones agramaticales como la presentada en el ejemplo (2) en comparación con oraciones gramaticales como la del ejemplo (1).

El estudio de Osterhout y Holcomb (1992) sugiere que el componente P600 es un indicador de las dificultades del analizador sintáctico al lidiar con ciertas anomalías o incongruencias sintácticas. En general, los efectos en la P600 se manifiestan cuando la continuación sintáctica de una frase es poco o nada plausible gramaticalmente. Se han observado efectos en el componente P600 ante una gran diversidad de anomalías sintácticas: errores de concordancia entre el verbo y el sujeto de una oración (p.ej., Hagoort et al. 1993), anomalías en la estructura de una oración (Hahne y Friederici 1999), errores de concordancia de caso (Müntz et al. 1998), de género (Gunter et al. 2000) y de número (Müntz et al. 1997) y errores de inflexión del verbo (Gunter et al. 1997). Además, se ha encontrado una modulación de la P600 en frases gramaticalmente correctas, pero cuya estructura sintáctica es compleja o bien no refleja la opción sintáctica preferida por los hablantes (Kaan et al. 2000), así como en oraciones que presentan una ambigüedad sintáctica temporal, en las cuales existen varios análisis sintácticos correctos durante su procesamiento (Kaan y Swaab 2003). Por último, también cabe destacar que algunos estudios han observado efectos en la P600 no relacionados estrictamente con el procesamiento sintáctico (para profundizar más véase Bornkessel-Schlesewsky y Schlewsky 2008).

4. Cómo llevar a cabo un estudio de potenciales evocados

Para finalizar este trabajo, se ilustra el proceso de diseño, administración y análisis de un experimento de potenciales evocados. Para ello se describirá el procedimiento que seguimos en un estudio realizado en nuestro laboratorio (Haro et al. 2017), en el cual se comparó el procesamiento de palabras ambiguas (p.ej., *banco*) y de palabras no ambiguas (p.ej., *sandía*). Cabe puntualizar que los pasos que se describen a continuación no abordan de forma exhaustiva todo el procedimiento, ni tampoco pretenden mostrar la forma ideal de llevarlo a cabo; es simplemente una breve guía que recoge algunas recomendaciones para aquellos investigadores que se enfrentan por primera vez a la implementación y análisis de un experimento de potenciales evocados.

Existe evidencia de que las palabras ambiguas se reconocen más rápido que las no ambiguas en tareas de decisión léxica (p.ej., Pexman et al. 2004). Se ha propuesto que esta facilitación se debe a que las palabras ambiguas, al poseer más de una representación

semántica, generarían una mayor cantidad de activación semántica que las no ambiguas durante su procesamiento (p.ej., Borowsky y Masson 1996; Hino y Lupker 1996). Dicho incremento en la activación de las palabras ambiguas aumentaría la familiaridad de estas palabras, lo que en última instancia aceleraría su reconocimiento. Para poner a prueba esta hipótesis, se examinó el componente N400 durante una tarea de decisión léxica. Como se ha expuesto anteriormente, hay indicios de que el componente N400 se ve modulado por la cantidad y calidad de la información semántica. Esto es, cuanto mayor es la cantidad o calidad de la información semántica, más elevada es la amplitud de la N400 (p.ej., Laszlo y Federmeier 2011). Por tanto, si la facilitación de las palabras ambiguas se debe a que estas activan una mayor cantidad de información semántica durante su procesamiento, sería de esperar que generasen una amplitud de la N400 superior a la de las palabras no ambiguas.

Además de lo anterior, también se analizó si la relación entre los significados de las palabras ambiguas influye en su procesamiento. Existen palabras ambiguas de significados relacionados (esto es, polisémicas; p.ej., *aguja*) y palabras ambiguas de significados no relacionados (esto es, homónimas; p.ej., *heroína*). Algunos estudios han mostrado que las palabras homónimas se reconocen más lentamente que las polisémicas (p.ej., Rodd et al. 2002). Esta inhibición en el reconocimiento de las palabras homónimas se ha interpretado como una evidencia de que los significados no relacionados de estas palabras están representados de forma separada en la memoria y que compiten durante el procesamiento (Rodd et al. 2004). Para poner a prueba esta hipótesis, se examinó la amplitud del componente N400 durante el reconocimiento de palabras polisémicas y homónimas. De existir diferencias representacionales o de procesamiento entre estas palabras, sería esperable observar un patrón de resultados distinto entre ellas en el componente N400 durante la tarea de decisión léxica. En concreto, en línea con algunos estudios previos (p.ej., Beretta et al. 2005), se esperaría una mayor amplitud de la N400 en palabras homónimas respecto a palabras polisémicas.

Las variables de interés en este experimento fueron, por tanto, el número de significados y la relación entre los significados (ambas basadas en los juicios subjetivos de los participantes). De modo que se seleccionó un conjunto de palabras que diferían en estas variables. En total se usaron 76 palabras ambiguas y 76 no ambiguas. De las 76 ambiguas, la mitad eran homónimas y la otra mitad eran polisémicas. En este punto hay que hacer un breve inciso. Es muy importante que el número de estímulos por condición en experimentos de PE sea elevado. Se recomienda un mínimo de 30 estímulos por condición. La razón de esto es que el registro EEG de donde se extraen los componentes PE es muy ruidoso, es decir, gran parte de la actividad eléctrica recogida en este registro no tiene relación con el proceso que se está examinando. Para reducir todo este ruido y poder extraer los componentes PE, es necesario obtener un gran número de registros de cada uno de los estímulos. De esta forma, se logra mejorar la proporción entre la señal (la actividad EEG que nos interesa) y el ruido (la actividad EEG que no nos interesa). Además, dado que el objetivo del estudio era evaluar únicamente el efecto del número de significados y de la relación entre significados, se igualaron los conjuntos de palabras en todas aquellas variables que podían tener un efecto en el registro de PE: por ejemplo, frecuencia léxica, número de letras, grado de concreción, edad de adquisición, etc. De no haber igualado estas variables entre los conjuntos, es posible que el registro de PE se hubiera visto “contaminado” por su efecto.

Pasemos ahora al procedimiento que debemos seguir para administrar el experimento. Un estudio como este requiere (i) un ordenador para la presentación de los estímulos del experimento y el registro de las respuestas conductuales (tiempos de respuesta y errores); (ii) otro ordenador para el registro EEG; (iii) un conjunto de electrodos y un gorro donde irán acoplados estos electrodos (en Haro et al. 2017 se usó un *Acticap* de 32 electrodos de la marca *Brain Products*), y (iv) un amplificador de la señal EEG (en Haro et al. 2017 se usó un *Actichamp*, también de *Brain Products*), al cual se debe conectar tanto el conjunto de electrodos como el ordenador de registro EEG. Por supuesto, también será necesario un enlace de conexión entre el ordenador de presentación de estímulos y el de registro EEG, para así poder identificar los segmentos del registro EEG que se corresponden con la presentación de cada estímulo. Además, se requiere un par de electrodos para registrar artefactos oculares. Los artefactos oculares se producen cuando el participante realiza movimientos horizontales o verticales de los ojos que alteran el registro de EEG. Por ejemplo, un parpadeo produce una alteración en el registro de EEG que afecta al registro de bastantes electrodos. Por último, para reducir la resistencia eléctrica de los electrodos, es preciso disponer de un gel conductor, que se administra sobre el cuero cabelludo mediante una jeringa.

Si se dispone de todo lo anterior, se puede proceder a la preparación del participante. El participante ha de sentarse en un asiento cómodo, donde permanecerá durante toda la sesión experimental. Se le coloca el gorro con electrodos sobre la cabeza (en Haro et al. 2017 se empleó un gorro de 32 electrodos), asegurando que el electrodo central (CZ) se sitúa justo en el centro de la parte superior de su cráneo, en línea con sus orejas. Se verifica que el gorro está bien ajustado a su cráneo, sin arrugas y firmemente sujeto. Ahora se conecta el electrodo de toma de tierra, el cual se suele colocar en la parte frontal y se utiliza para reducir las interferencias producidas por el ruido de la red eléctrica, y los electrodos o electrodo de referencia. Un lugar habitual donde colocar el electrodo de referencia es el lóbulo de la oreja o bien el hueso mastoide, situado detrás de la oreja. Entonces se comienza a aplicar el gel mediante la jeringa en cada uno de los electrodos. Los gorros disponen de una entrada en cada electrodo para facilitar la administración del gel. Es muy recomendable comenzar por el electrodo de toma de tierra y los electrodos de referencia. Durante el proceso de administración del gel es importante tener conectado el ordenador de registro, el cual indica la impedancia de cada electrodo, esto es, la resistencia eléctrica que existe entre el electrodo y el cuero cabelludo. Para asegurar un buen registro, es necesario conseguir que la impedancia de los electrodos sea inferior a 5 k Ω . Una vez se ha logrado que la resistencia de los electrodos se sitúe por debajo de ese umbral, se colocan los electrodos que se encargarán de registrar los artefactos oculares. Un lugar habitual para colocarlos es en la mejilla izquierda y en la sien derecha. También se debe reducir la impedancia de estos electrodos.

Tras completar el paso anterior, es momento de poner en marcha el experimento (en el ordenador de presentación de estímulos) y de iniciar el registro EEG. Es importante verificar que la actividad de cada electrodo es normal, esto es, que no hay una cantidad anómala de ruido, que la amplitud de todos ellos es similar y que su línea de registro no se desvía de su canal. Si aparece alguna anomalía, se deberá comprobar que los electrodos de referencia y de toma de tierra funcionan correctamente y que la impedancia de todos los electrodos está por debajo del umbral recomendado (5 k Ω).

Tras obtener el registro EEG de cada participante, se debe realizar una limpieza de datos. En primer lugar, hay que seguir una serie de criterios para eliminar datos EEG en función de la respuesta conductual de los participantes. En concreto, en Haro et al. (2017) se eliminaron los datos EEG de los participantes con más de un 15% de errores en la tarea de decisión léxica y también los tiempos de respuesta de cada participante que excedían dos desviaciones típicas de su media de tiempos de respuesta. También se eliminaron de los datos EEG los registros correspondientes a ensayos de respuesta incorrecta o de no respuesta. Para el resto de los pasos se puede usar el software *BrainVision Analyzer 2* (de la marca *Brain Products*). Primero se especifica la actividad eléctrica de referencia a partir de la cual se calculará la actividad de cada canal de registro (p.ej., el promedio de la actividad de los dos electrodos de referencia). Después se aplica un filtro de frecuencias para eliminar las frecuencias excesivamente altas o bajas del registro EEG, por ejemplo, se puede utilizar un *zerophase shift digital filter* de 0,1 a 30 Hz. Seguidamente se especifica el periodo de actividad eléctrica que servirá como línea base, a partir del cual se recalculará la actividad eléctrica de cada ensayo (100 milisegundos en Haro et al.), y después se delimita el rango temporal de actividad eléctrica que se va a analizar en cada ensayo (empezando desde el inicio de la presentación del estímulo). El rango temporal debe ser lo suficientemente amplio para que incluya los componentes que se desea analizar, pero evitando que se solape con la actividad eléctrica del ensayo siguiente (p.ej., un periodo de 800 milisegundos desde el inicio de la presentación del estímulo). A continuación, se deben eliminar las posibles anomalías del registro. Estas comprenden (i) artefactos producidos por movimientos bruscos de los ojos (p.ej., parpadeos); (ii) amplitudes de voltaje excesivamente altas (mayores a 75 microvoltios o inferiores a -75 microvoltios en Haro et al.) y (iii) variaciones de voltaje excesivamente elevadas (mayores a 150 microvoltios o -150 microvoltios en Haro et al.). Tras esto, se seleccionan los segmentos de cada condición experimental y se calcula el promedio de actividad eléctrica de cada una de ellas. Además, hay que seleccionar el rango temporal donde se encuentra el componente que queremos analizar. Por ejemplo, en Haro et al. se seleccionó el rango comprendido entre 350 y 450 milisegundos, donde se visualizaba una modulación del registro compatible con el componente N400. Por último, se vuelcan los datos en un archivo, el cual debe incluir el promedio de voltaje de cada electrodo en el rango temporal seleccionado.

Después de realizar todo el proceso de limpieza, filtrado y volcado de datos, se puede proceder a analizar los datos obtenidos. Se abre el archivo donde se han volcado los datos con el software que se usará para el análisis de datos. Dependiendo de los objetivos del estudio o bien de las particularidades o distribución de cada componente, se puede seleccionar un conjunto concreto de electrodos a analizar o bien seleccionarlos todos. En Haro et al. se analizaron todos los electrodos en diferentes análisis de la varianza (ANOVA). En concreto, se realizaron dos ANOVAs de medidas repetidas, en los cuales se incluyeron diversos factores intra-sujetos. El primer ANOVA tenía como objetivo examinar las diferencias entre palabras ambiguas y no ambiguas. En este se incluyeron los factores ambigüedad (palabras ambiguas y no ambiguas) y electrodo (28 electrodos). El análisis reveló un efecto principal del factor ambigüedad, $F(1, 23) = 5,07$, $p = 0,034$. Las palabras ambiguas mostraron una mayor amplitud en la N400 (-1,70 microvoltios) que las palabras no ambiguas (-1,20 microvoltios). No se halló interacción entre los factores ambigüedad y electrodo, $F(27, 621) = 1,53$, $p = 0,20$. La interpretación que se dio a este resultado fue que, dado que la amplitud de la N400 es un indicador del grado de activación semántica de las palabras, las palabras ambiguas lograron activar una mayor

cantidad de información semántica que las no ambiguas, facilitando esto su reconocimiento en la tarea de decisión léxica. Por otra parte, en el segundo ANOVA se examinaron las diferencias entre palabras polisémicas y homónimas. En el ANOVA se introdujeron los factores tipo de ambigüedad (palabras polisémicas y palabras homónimas) y electrodo (28 electrodos). No se observó un efecto del factor tipo de ambigüedad, $F(1, 23) = 0,16, p = 0,70$. Las palabras homónimas y polisémicas mostraron amplitudes similares en la N400 (-1,75 y -1,62 microvoltios, respectivamente). Tampoco se observó interacción entre los factores tipo de ambigüedad y electrodo, $F(27, 621) = 1,41, p = 0,24$. Este resultado sugeriría que la activación semántica generada por las palabras polisémicas y homónimas es similar.

Como se puede observar, llevar a cabo un experimento de potenciales evocados, aunque entraña algo más dificultad que un experimento conductual, no es una tarea excesivamente compleja. Si se está interesado en profundizar más, recomendamos consultar el trabajo de Luck (2005), donde se abordan con más detalle todos los pasos involucrados en la planificación, administración y análisis de un experimento de potenciales evocados.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una breve introducción al uso de los potenciales evocados en el estudio del lenguaje. En resumen, la principal ventaja del registro de PE es su resolución temporal, dado que permite realizar un seguimiento milisegundo a milisegundo del procesamiento de estímulos lingüísticos. Se ha demostrado su utilidad para examinar diferentes niveles de procesamiento y representación del lenguaje, por ejemplo, la fonología, la semántica y la sintaxis. Además, permite arrojar luz sobre algunas cuestiones en las que las medidas conductuales muestran resultados inconsistentes. Esto la convierte en una medida que, lejos de reemplazar a las medidas conductuales, puede ser de gran utilidad para complementar los datos obtenidos mediante aquellas. De hecho, el registro de PE también se ha utilizado en combinación con otro tipo de medidas, por ejemplo, de seguimiento de movimientos oculares (p.ej., Henderson et al., 2013), la magnetoencefalografía (Wang et al., 2020) o la resonancia magnética funcional (Geukes et al., 2013). Pero no todo son ventajas. Su principal limitación es su baja resolución espacial, por lo que no es la medida más recomendable si se está interesado en examinar la localización cerebral de los procesos cognitivos. Por otra parte, la preparación, administración y análisis de un experimento de potenciales evocados no requiere demasiados conocimientos técnicos. Como se ilustra en el ejemplo presentado anteriormente, un experimento de este tipo se puede llevar a cabo sin demasiados problemas si seguimos una serie de pasos en el orden adecuado.

Referencias

- Balota, David A.; Abrams, Richard A. 1995. Mental chronometry: beyond onset latencies in the lexical decision task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 21.5: 1289-1302.
- Barber, Horacio A.; Otten, Leun J.; Kousta, Stavroula-Thaleia; Vigliocco, Gabriella. 2013. Concreteness in word processing: ERP and behavioral effects in a lexical decision task. *Brain and language* 125.1: 47-53.
- Beretta, Alan; Fiorentino, Robert; Poeppel, David. 2005. The effects of homonymy and polysemy on lexical access: An MEG study. *Cognitive Brain Research* 24.1: 57-65.
- Berger, Hans. 1929. Über das elektroencephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten* 87.1: 527-570.
- Bonte, Milene L.; Mitterer, Holger; Zellagui, Nadia; Poelmans, Hanne; Blomert, Leo. 2005. Auditory cortical tuning to statistical regularities in phonology. *Clinical Neurophysiology* 116.12: 2765-2774.
- Bornkessel-Schlesewsky, Ina; Schlewsky, Matthias. 2008. An alternative perspective on “semantic P600” effects in language comprehension. *Brain research reviews* 59.1: 55-73.
- Borowsky, Ron; Masson, Michael E. 1996. Semantic ambiguity effects in word identification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 22.1: 63-85.
- Brown, Colin; Hagoort, Peter. 1993. The processing nature of the N400: Evidence from masked priming. *Journal of cognitive neuroscience* 5.1: 34-44.
- Chennu, Srivas; Bekinschtein, Tristan A. 2012. Arousal modulates auditory attention and awareness: insights from sleep, sedation, and disorders of consciousness. *Frontiers in psychology* 3: 65.
- Cheour, Marie; Ceponiene, Rita; Lehtokoski, Anne; Luuk, Aavo; Allik, Jüri; Alho, Kimmo; Näätänen, Risto. 1998. Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature neuroscience* 1.5: 351-353.
- Dehaene-Lambertz, Ghislaine. 1997. Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *NeuroReport* 8.4: 919-924.
- Donchin, Emanuel; Ritter, Walter; McCallum, W. Cheyne. 1978. Cognitive psychophysiology: Endogenous components of the ERP. En E. Callaway, P. Tueting; y S. H. Koslow, eds. *Event-related brain potentials in man*. New York: Academic Press, pp. 349-411.

- Garrod, Simon. 2006. Psycholinguistic research methods. En K. Brown, ed. *Encyclopedia of Language and Linguistics*. Amsterdam: Elsevier, pp. 251-257.
- Geukes, Sebastian; Huster, René J.; Wollbrink, Andreas; Junghöfer, Markus; Zwitterlood, Pienie; Dobel, Christian. 2013. A large N400 but no BOLD effect—comparing source activations of semantic priming in simultaneous EEG-fMRI. *PloS one* 8.12: e84029.
- Gunter, Thomas C.; Friederici, Angela D.; Schriefers, Herbert. 2000. Syntactic gender and semantic expectancy: ERPs reveal early autonomy and late interaction. *Journal of cognitive neuroscience* 12.4: 556-568.
- Gunter, Thomas C.; Stowe, Laurie A.; Mulder, Gusbertus. 1997. When syntax meets semantics. *Psychophysiology* 34.6: 660-676.
- Hagoort, Peter; Brown, Colin; Groothusen, Jolanda. 1993. The syntactic positive shift (SPS) as an ERP measure of syntactic processing. *Language and cognitive processes* 8.4: 439-483.
- Hahne, Anja; Friederici, Angela D. 1999. Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis: Early automatic and late controlled processes. *Journal of cognitive neuroscience* 11.2: 194-205.
- Hammond, Constance; Esclapez, Monique. 2015. The chemical synapses. En C. Hammond, ed. *Cellular and Molecular Neurophysiology*. Amsterdam: Academic Press, pp. 121-144.
- Haro, Juan; Demestre, Josep; Boada, Roger; Ferré, Pilar. 2017. ERP and behavioral effects of semantic ambiguity in a lexical decision task. *Journal of Neurolinguistics* 44: 190-202.
- Henderson, John M.; Luke, Steven G.; Schmidt, Joseph; Richards, John E. 2013. Co-registration of eye movements and event-related potentials in connected-text paragraph reading. *Frontiers in systems neuroscience* 7: 28.
- Hino, Yasushi; Lupker, Stephen J. 1996. Effects of polysemy in lexical decision and naming: An alternative to lexical access accounts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 22.6: 1331-1356.
- Holcomb, Phillip J. 1993. Semantic priming and stimulus degradation: Implications for the role of the N400 in language processing. *Psychophysiology* 30.1: 47-61.
- Kaan, Edith; Harris, Anthony; Gibson, Edward; Holcomb, Phillip. 2000. The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Language and cognitive processes* 15.2: 159-201.

- Kaan, Edith; Swaab, Tamara Y. 2003. Repair, revision, and complexity in syntactic analysis: An electrophysiological differentiation. *Journal of cognitive neuroscience* 15.1: 98-110.
- Kiefer, Markus. 2002. The N400 is modulated by unconsciously perceived masked words: Further evidence for an automatic spreading activation account of N400 priming effects. *Cognitive Brain Research* 13.1: 27-39.
- Kounios, John; Holcomb, Phillip J. 1994. Concreteness effects in semantic processing: ERP evidence supporting dual-coding theory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 20.4: 804-823.
- Kutas, Marta; Federmeier, Kara D. 2011. Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology* 62: 621-647.
- Kutas, Marta; Hillyard, Steven A. 1980. Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207.4427: 203-205.
- Kutas, Marta; Lindamood, Timothy E.; Hillyard, Steven A. 1984. Word expectancy and event-related brain potentials during sentence processing. En E.S. Kornblum y J. Requin, eds. *Preparatory states and processes*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc, pp. 217-237.
- Laszlo, Sarah; Federmeier, Kara D. 2011. The N400 as a snapshot of interactive processing: Evidence from regression analyses of orthographic neighbor and lexical associate effects. *Psychophysiology* 48.2: 176-186.
- Luck, Steven J. 2005. *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, MA: MIT Press
- Mancini, Simona; Molinaro, Nicola; Rizzi, Luigi; Carreiras, Manuel. 2011. A person is not a number: Discourse involvement in subject-verb agreement computation. *Brain research* 1410: 64-76.
- Möttönen, Riikka; Krause, Christina M.; Tiippana, Kaisa; Sams, Mikko. 2002. Processing of changes in visual speech in the human auditory cortex. *Cognitive Brain Research* 13.3: 417-425.
- Münté, Thomas F.; Heinze, Hans-Jochen; Matzke, Mike; Wieringa, Bernardina M.; Johannes, Sönke. 1998. Brain potentials and syntactic violations revisited: No evidence for specificity of the syntactic positive shift. *Neuropsychologia* 36.3: 217-226.
- Münté, Thomas F.; Szentkúti, Andras; Wieringa, Bernardina M.; Matzke, Mike; Johannes, Sönke. 1997. Human brain potentials to reading syntactic errors in sentences of different complexity. *Neuroscience Letters* 235.3: 105-108.

- Näätänen, Risto et al. 1997. Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature* 385.6615: 432-434.
- Näätänen, Risto; Paavilainen, Petri; Rinne, Teemu; Alho, Kimmo. 2007. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clinical neurophysiology* 118.12: 2544-2590.
- Nunez, Paul L.; Silberstein, Richard B.; Cadusch, Peter J.; Wijesinghe, Ranjith S.; Westdorp, Andrew F.; Srinivasan, Ramesh. 1994. A theoretical and experimental study of high resolution EEG based on surface Laplacians and cortical imaging. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 90.1: 40-57.
- Osterhout, Lee; Holcomb, Phillip J. 1992. Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of memory and language* 31.6: 785-806.
- Osterhout, Lee, Poliakov, Andrew, Inoue, Kayo, McLaughlin, Judith, Valentine, Geoffrey, Pitkanen, Ilona; Frenck-Mestre, Cheryl; Hirschensohn, Julia. 2008. Second-language learning and changes in the brain. *Journal of neurolinguistics* 21.6: 509-521.
- Petsche, Hellmuth; Etlinger, Susan C. 1998. *EEG and thinking - power and coherence analysis of cognitive processes*. Vienna: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften
- Pexman, Penny M.; Hino, Yasushi; Lupker, Stephen J. 2004. Semantic ambiguity and the process of generating meaning from print. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 30.6: 1252-1270.
- Pulvermüller, Friedemann; Shtyrov, Yury. 2006. Language outside the focus of attention: the mismatch negativity as a tool for studying higher cognitive processes. *Progress in neurobiology* 79.1: 49-71.
- Rabovsky, Milena; Sommer, Werner; Rahman, Rasha Abdel. 2012. Depth of conceptual knowledge modulates visual processes during word reading. *Journal of Cognitive Neuroscience* 24.4: 990-1005.
- Rodd, Jennifer; Gaskell, Gareth; Marslen-Wilson, William. 2002. Making sense of semantic ambiguity: Semantic competition in lexical access. *Journal of Memory and Language* 46.2: 245-266.
- Rodd, Jennifer.; Gaskell, Gareth; Marslen-Wilson, William. 2004. Modelling the effects of semantic ambiguity in word recognition. *Cognitive science* 28.1: 89-104.
- Silverman, Daniel. 1963. The rationale and history of the 10-20 system of the International Federation. *American Journal of EEG Technology* 3.1: 17-22.
- Sun, Yi; Wei, Changwei; Cui, Victoria; Xiu, Meihong; Wu, Anshi. 2020. Electroencephalography: Clinical applications during the perioperative period. *Frontiers in Medicine* 7: 251.

- Walter, W. Grey. 1936. The location of cerebral tumours by electro-encephalography. *The Lancet* 2: 305-308.
- Walter, William Grey; Dovey, Vivian Joan. 1944. Electro-encephalography in cases of sub-cortical tumour. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry* 7.3-4: 57-65.
- Wang, Lin; Wlotko, Edward; Alexander, Edward; Schoot, Lotte; Kim, Minjae; Warnke, Lena; Kuperberg, Gina R. 2020. Neural evidence for the prediction of animacy features during language comprehension: Evidence from MEG and EEG Representational Similarity Analysis. *Journal of Neuroscience* 40.16: 3278-3291.
- Yeom, Seul-Ki; Fazli, Siamac; Müller, Kaus-Robert; Lee, Swong-Whan. 2014. An efficient ERP-based brain-computer interface using random set presentation and face familiarity. *PLOS ONE* 9.11: e111157.