



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
SECRETARIA DE SALUD
INSTITUTO NACIONAL DE REHABILITACIÓN
Luis Guillermo Ibarra Ibarra

ESPECIALIDAD EN:

MEDICINA DE REHABILITACIÓN
CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL CORTICAL
ASOCIADO A MOVIMIENTO EN DOS PARADIGMAS
DE MOVIMIENTO DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR:
MOVIMIENTO HACIA UN OBJETIVO Y SIN OBJETIVO

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MÉDICO ESPECIALISTA EN:
MEDICINA DE REHABILITACIÓN

P R E S E N T A:
JOSÉ RAÚL PÉREZ SORIA

PROFESOR TITULAR
ROBERTO CORONADO ZARCO

DIRECTOR DE TESIS
JULIO JOSÉ MACÍAS GALLARDO



Ciudad de México

junio 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Caracterización del potencial cortical asociado a movimiento en dos paradigmas de movimiento de la extremidad superior: movimiento hacia un objetivo y sin objetivo

DR. ROBERTO CORONADO ZARCO
PROFESOR TITULAR

DR. JULIO JOSÉ MACÍAS GALLARDO
DIRECTOR DE TESIS

DR. JULIO JOSÉ MACÍAS GALLARDO
ASESOR DE TESIS

Caracterización del potencial cortical asociado a movimiento en dos paradigmas de movimiento de la extremidad superior: movimiento hacia un objetivo y sin objetivo

**DRA. MATILDE L. ENRÍQUEZ SANDOVAL
DIRECTORA DE EDUCACIÓN EN SALUD**

**DR. HUMBERTO VARGAS FLORES
SUBDIRECCIÓN DE EDUCACIÓN MÉDICA**

**DR. ROGELIO SANDOVAL VEGA GIL
JEFE DEL SERVICIO DE EDUCACIÓN MÉDICA DE POSGRADO**

Dedicatoria

A mi amada hija

Siempre llevas un lugar especial en mi corazón y eres mi mayor motivación.

Agradecimientos

A mi tutor, Dr. Julio Macías; quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su apoyo y disposición durante todo este proceso. Su guía ha sido fundamental para el éxito de este proyecto. Aprecio sinceramente su mentoría, el tiempo invertido en mi desarrollo y la oportunidad de aprender de usted. Gracias por el impacto positivo que ha tenido en mi crecimiento académico y profesional.

A mi compañera de vida, Berenice; por el amor incondicional que siempre he recibido de su parte, su cariño y aliento han sido una fuente de motivación y fortaleza durante mi formación profesional. Gracias por estar siempre a mi lado y el respaldo que me has brindado en cada paso del camino.

A mis hermanos, Roberto y Alejandro; porque siempre he contado con su amor y apoyo.

A mis queridos padres Paty y Raúl, no tengo palabras suficientes para expresar mi gratitud. Ustedes son mi mayor inspiración y ejemplo para seguir. Gracias por creer en mí, por alentarme en cada paso y por estar a mi lado en cada decisión importante. Su amor y apoyo incondicional son invaluable.

Índice

Resumen	1
Introducción	3
Objetivos.....	6
Hipótesis	6
Marco teórico	7
Justificación	11
Planteamiento del problema	11
Identificación y operacionalización de variables	12
Material y métodos.....	15
Resultados	18
Discusión.....	28
Conclusiones.....	31
Referencias	32
Anexos	35

Resumen

El Bereitschaftspotential (BP) o potencial cortical asociado al movimiento (PCAM) fue identificado por primera vez en 1965 por Kornhuber y Deecke. El BP presenta varios componentes, destacando uno premotor y otro postmotor. El componente premotor se caracteriza por una negatividad gradual y simétrica en ambos hemisferios cerebrales, seguida de una pequeña positividad antes del inicio del movimiento. Los componentes postmotores muestran una breve desviación negativa motora seguida de una marcada deflexión positiva. La magnitud y el curso temporal de la acción voluntaria están influenciados por varios factores, como el nivel de intención del sujeto y el estado preparatorio del sistema motor. La selección del movimiento ya sea intencionado o no intencionado, también afecta al BP. Se han estudiado principalmente los movimientos de la mano y los dedos en relación con estos potenciales. **Objetivos.** Caracterizar los PCAM en los músculos proximales de las extremidades superiores en sujetos jóvenes sin antecedentes clínicos relevantes. Se analizarán los componentes premotores y postmotores del potencial relacionado al movimiento. Además, se investigará si existen diferencias en estos movimientos según si hay un objetivo específico, como lanzar una pelota, o si se trata de un movimiento voluntario sin objetivo. **Material y métodos.** El estudio se llevó a cabo utilizando un enfoque transversal, observacional y analítico. Se reclutó a un total de 10 adultos, tanto hombres como mujeres, con edades entre los 25 y 35 años, sin antecedentes clínicos neuromusculares relevantes. Se llevaron a cabo tareas específicas, tanto simples como con objetivo, y se registraron los valores de los potenciales BP, N+160 y P+300 mediante la colocación de electrodos en el cuero cabelludo. Las principales características de estos potenciales fueron descritas en el estudio. **Resultados.** El potencial fue reproducible en 9 sujetos en ambos paradigmas de movimiento. Su replicabilidad fue mejor en los canales Cz y Pz, ya que el canal Fz es frecuentemente afectado por movimientos oculares. Los potenciales registrados en Cz muestran mayor amplitud que en Pz, tanto con objetivo como sin objetivo, esta diferencia se observó en el componente premotor (NS-MP) y en el componente postmotor (MP-PP) con una

significancia estadística con un valor de $p < 0.05$. Encontramos una correlación significativa ($r = -0.7$, $p < 0.05$) entre el nivel de actividad física medido en METs/semana y la latencia del componente positivo postmotor en la región parietal durante la tarea con objetivo. El componente postmotor N+160 fue identificable en 100% de las pruebas con objetivo y solo se identificó en 30% de las pruebas sin objetivo ($p < 0.05$). **Conclusiones** El PCAM es reproducible y factible de obtener en ambos paradigmas de movimiento. Se observaron diferencias topográficas y algunas relaciones entre el potencial con la actividad física de los sujetos. Las tareas motoras con objetivo promueven la integración de un PCAM más complejo y con una mejor morfología en el componente postmotor. Aunque observamos una tendencia hacia una mayor amplitud tanto en el componente premotor como en el componente postmotor en las tareas con objetivo, esta diferencia no alcanzó significancia estadística en este momento.

Palabras clave: Bereitschaftspotential (BP); Preparación de movimiento; Potencial de preparación (RP), Potenciales corticales asociados a movimiento (PCAM).

Abreviaturas: BP Bereitschaftspotential, PCAM Potencial cortical asociado a movimiento, NS' Pendiente negativa, MP Potencial motor, RAP Potencial referente, PP Potencial positivo postmotor, EMG Electromiografía, M1 Corteza motora primaria, SMA Área motora suplementaria.

Introducción

El estudio electrofisiológico más estudiado del movimiento voluntario se conoce como Bereitschaftspotential (BP) o potencial cortical asociado a movimiento (PCAM). Fue caracterizado por primera vez por Kornhuber y Deecke¹. Su morfología es de una onda de voltaje negativa que precede a la actividad electromiográfica (EMG) del movimiento voluntario, con una anticipación de aproximadamente 1-1.5 segundos. Ha sido estudiado en movimiento de los dedos y otros movimientos distales de las extremidades¹.

Los PCAM registrados en el cuero cabelludo se han clasificado en varios subcomponentes. Estos incluyen una negatividad gradual y simétrica bilateralmente conocida como Bereitschaftspotential (BP temprano) y una negatividad asimétrica más pronunciada llamada pendiente negativa (NS', BP tardío). El potencial negativo, que incluye el BP y NS', se conoce comúnmente como potencial de preparación (RP). También se encuentran una pequeña positividad pre-movimiento (PMP, P-50), una pequeña y rápida desviación negativa motora (potencial motor; MP o N-10) y una gran deflexión positiva (potencial reaferente; RAP)^{2,3}.

La importancia física de cada componente identificable, incluyendo el BP, aún no se ha esclarecido por completo. En un estudio realizado por Libet et al⁴, se solicitó a los participantes que recordaran el momento de su conciencia real de la intención de moverse al observar un reloj. Los resultados indicaron que la intención de moverse ocurrió mucho más tarde que el inicio del BP. Su informe ha traído a relucir una pregunta continua sobre su implicación fisiológica⁵.

El BP comienza aproximadamente 1.0 a 1.5 segundos antes del inicio del movimiento. Alcanza su máxima amplitud en el área centro-parietal de la línea media de manera simétrica y se distribuye ampliamente en el cuero cabelludo, independientemente de la

ubicación del movimiento. El tiempo de inicio del BP en relación con el inicio del movimiento varía significativamente entre diferentes condiciones de movimiento y entre individuos.

Aproximadamente 400 milisegundos antes del inicio del movimiento, el BP experimenta un aumento repentino en su pendiente. Debido a la distribución claramente diferenciada en el cuero cabelludo, con una pendiente más pronunciada en la etapa tardía y un desplazamiento más lento en la etapa temprana, Shibasaki et al. designaron a este segmento tardío como Pendiente negativa (NS'). Este se distingue del BP inicial debido al aumento abrupto en la pendiente registrada en el electrodo central correspondiente al movimiento de cada individuo⁶.

El BP tardío es máximo sobre el área central contralateral (aproximadamente C1 o C2 del Sistema Internacional 10-20) para el movimiento de la mano y en la línea media (aproximadamente Cz) para el movimiento del pie⁷.

En relación con el componente N-10, se encuentra localizado de manera precisa en una pequeña área contralateral central del cuero cabelludo, correspondiente al sitio específico del movimiento. Este componente se presenta justo antes del inicio del movimiento. En el caso del movimiento de la mano, se le denominó N-10 debido al intervalo de tiempo promedio desde su pico hasta el pico del EMG rectificado promediado, con un retraso de 10 ms. Por lo tanto, es muy probable que este componente represente la actividad de las neuronas en el tracto piramidal de la corteza motora primaria (M1).

En cuanto a los componentes posteriores del PCAM asociados con el movimiento de la mano, Shibasaki et al. asignaron nombres a los cuatro picos basándose en el intervalo de tiempo medido desde el pico del EMG promediado y rectificado hasta el pico de cada componente identificable⁶.

El componente N+50 es un pico negativo prominente localizado en la región frontal y corresponde a fpMP (pico frontal del potencial motor). El componente P+90 es predominante sobre la región parietal, más grande sobre el hemisferio contralateral. El componente N+160 se localiza en el área parietal contralateral, formando así un complejo localizado positivo-negativo con P+90. El componente P+300 corresponde al RAP y se ha reportado su predominio contralateral y la similitud de esta actividad con el componente tardío del potencial evocado somatosensorial^{1,6}.

En resumen, basándose en la distribución en el cuero cabelludo, se han identificado un total de 8 componentes, 4 antes y 4 después del inicio del movimiento. Estos componentes han sido denominados BP, NS', P-50, N-10, N+50, P+90, N+160 y P+300, y más estudiados para los movimientos de los dedos. En esta terminología, cada componente, excepto BP y NS', se nombraron de acuerdo con la polaridad de la superficie (P, positiva; N, negativa) y el intervalo de tiempo medio en milisegundos entre el pico de cada componente y el pico del promedio rectificado de EMG. Si el pico ocurre antes del pico del EMG, el intervalo se designa con signo aritmético menos (-), mientras que, si ocurre después, se designa con signo aritmético más (+)⁶.

Objetivos

El objetivo general de este estudio es caracterizar el potencial de acción relacionado a movimiento en dos tipos de movimientos: movimiento simple y complejo (con objetivo), en sujetos jóvenes sin antecedentes clínicos relevantes.

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la factibilidad y reproducibilidad del PCAM en los dos paradigmas de movimiento.
- Analizar las características del PCAM en su componente premotor y postmotor mediante la activación de los músculos de la extremidad superior en un movimiento complejo.
- Estudiar las diferencias en las características del potencial cortical asociado al movimiento de acuerdo con la presencia o ausencia de un objetivo para el movimiento .
- Correlacionar las características de este potencial con el nivel de actividad física realizado por el sujeto de manera rutinaria.

Hipótesis

Las características de latencia, amplitud y subcomponentes del potencial cortical asociado al movimiento pueden variar según las condiciones de movimiento en las que se realicen.

Marco teórico

La magnitud y el curso temporal de los PCAM registrados en la condición de autoaprendizaje están influenciados por diversos factores. Entre estos se encuentran el nivel de intención del sujeto, el estado preparatorio antes del movimiento, la selección del tipo de movimiento, el proceso de aprendizaje y adquisición de habilidades, el ritmo de repetición del movimiento, la praxis motora, el esfuerzo percibido por el individuo, la fuerza ejercida durante el movimiento, la velocidad y precisión del movimiento, la discreción y complejidad del movimiento, así como las lesiones patológicas en diferentes estructuras cerebrales⁸.

En un estudio realizado por Masaki et al. se compararon dos tareas: una que requería precisión en la producción de fuerza y otra tarea simple. Se encontró que el movimiento que requería precisión en términos de producción de fuerza estaba precedido por un BP tardío de mayor magnitud en comparación con la tarea simple. Sin embargo, la fuerza máxima y el tiempo para alcanzarla fueron similares en ambas tareas. Esto sugiere que el aumento en el potencial de preparación no fue debido a factores físicos, sino más bien a factores psicológicos asociados con la adición de intencionalidad motora².

En relación con la complejidad del movimiento, Benecke et al. encontraron que el BP tuvo una amplitud mayor antes de realizar movimientos complejos y coordinados que involucraban flexión del codo y flexión del dedo simultáneamente, en comparación con movimientos individuales de flexión del codo o flexión del dedo. Esto sugiere que la realización de movimientos más complejos y coordinados involucra una mayor activación cortical, como se refleja en la amplitud del BP⁹.

Por otro lado, Kitamura et al. examinaron los movimientos secuenciales del dedo medio seguido por el dedo índice (movimiento complejo) en contraste con los movimientos simultáneos del dedo medio e índice (movimiento simple), con los mismos músculos

involucrados y la misma duración de la actividad muscular en ambas condiciones. Como resultado, encontraron una mayor amplitud del BP tardío, no del BP temprano, en el movimiento secuencial en comparación con el movimiento simultáneo¹⁰.

La mayoría de los estudios han informado que el BP aumentó cuando el movimiento a ser ejecutado se volvió complejo y habilidoso. Taylor et al. informó que el BP se hizo gradualmente más grande durante la adquisición de tareas motoras especializadas y sugirió que las demandas de atención implicados en el aprendizaje motor podrían reflejarse en la amplitud del BP¹¹.

Utilizando secuencias de movimientos de la extremidad superior, Simonetta y col. también demostraron que, en el movimiento secuencial, hubo un inicio más temprano y una mayor amplitud del BP en comparación con la tarea de movimiento simple¹². Sin embargo, se encontró que el efecto del modo en la distribución espacial del BP es más complejo. Se observaron variaciones menos pronunciadas en la región precentral izquierda (C3), mientras que fueron más notables en el vértice (Cz) y en la región precentral derecha (C4). Estas diferencias podrían estar relacionadas con una mayor y posiblemente más temprana activación de la Área Motora Suplementaria (SMA, por sus siglas en inglés) durante la preparación de tareas motoras secuenciales complejas¹².

En el estudio realizado por Wheaton et al., se investigaron las diferencias entre un movimiento simple de aducción del pulgar, y un movimiento de pantomima. Se observaron diferencias significativas desde 3.0 s hasta 2.0 s antes del inicio de la EMG, donde la amplitud fue mayor para los movimientos más complejos. En promedio, se encontró que la negatividad comenzaba 3.0 s antes del inicio para los movimientos de praxis, mientras que para la aducción del pulgar solo comenzaba 1.7 s antes del inicio. Además, se observó que la negatividad en los movimientos complejos presentaba una distribución que comenzaba en el área parietal posterior del hemisferio izquierdo, mientras que los movimientos de

aducción del pulgar mostraban una distribución más anterior, en el área sensoriomotora bilateral¹³.

Bozzacchi et al. estudiaron el papel del significado de la acción en diferentes tareas dirigidas hacia un objetivo: agarre, agarre imposible (con las manos atadas) y movimiento de alcanzar. Los resultados revelaron que, en el movimiento de agarre, la preparación motora se originó en áreas parietales en ambos hemisferios. Por otro lado, el agarre imposible no mostró actividad parietal, pero se observó una intensa actividad prefrontal. No se encontró ninguna actividad parietal ni prefrontal durante el movimiento simple¹⁴.

Más tarde, los mismos autores evaluaron si la actividad cerebral que precede a una acción simple está modulada por las consecuencias esperadas de la acción misma. Se compararon los potenciales de preparación durante dos acciones de pulsación de tecla que eran idénticas desde el punto de vista motor pero diferentes en términos de significado y consecuencias. También se comparó una tercera condición (*agarre real*), en la que los sujetos realmente agarraron una taza, produciendo la misma acción presentada en un videoclip después de pulsar una tecla. Los resultados del estudio mostraron similitudes entre el agarre real y el virtual con relación al NS'. Sin embargo, se observó una diferencia notable en el inicio de BP entre las condiciones de pulsación de tecla y agarre virtual. Específicamente, se encontró que el inicio del BP ocurría de manera más temprana en el agarre virtual en comparación con el movimiento de pulsación de tecla¹⁵.

En un estudio reciente, Bardel y cols. investigaron el potencial de acción relacionado a movimiento (BP y NS') en pacientes con esclerosis múltiple (EM) y controles sanos. El objetivo era evaluar este potencial en dos tareas motoras con diferentes niveles de complejidad: extensiones del dedo índice derecho y una secuencia Luria ("*borde-puño-palma*"). Los resultados mostraron que los pacientes con EM presentaron un inicio más temprano del BP en la mayoría de las regiones del cuero cabelludo en comparación con los controles sanos. Esta diferencia también se observó durante la secuencia de Luria, pero solo

en las regiones centro-parietales. En cuanto a las amplitudes, los pacientes con EM mostraron amplitudes más grandes de BP en el área fronto-central derecha durante la extensión del dedo índice, y mayores amplitudes de BP1 y NS' en las regiones centro-parietales bilaterales y en la región central izquierda durante la tarea de Luria. Además, se encontró una correlación significativa entre la latencia del BP, la duración de la enfermedad y el rendimiento en pruebas de función ejecutiva ¹⁶.

Estas observaciones sugieren que, siempre que se emplee el BP para estudiar los mecanismos de control motor o su anomalía en condiciones patológicas, el efecto de la complejidad de la tarea o la dificultad subjetiva de los sujetos debe tenerse en cuenta como un factor de influencia importante¹⁷.

Justificación

El estudio de los potenciales asociados al movimiento es un campo aun en desarrollo en el área de electrofisiología. Aunque se ha progresado en su comprensión, aún hay preguntas fundamentales sin responder, como sus generadores y componentes, así como el papel que desempeña la actividad simultánea o secuencial de diferentes regiones cerebrales. Además, la posible aplicabilidad clínica del BP aún no se ha establecido.

Investigar la importancia del papel que tiene la realización de tareas enfocadas en la actividad neuronal a nivel cerebral puede representar avances futuros en los enfoques de tratamiento de rehabilitación.

Realizar este estudio permitirá a los investigadores adquirir experiencia en técnicas avanzadas de electrofisiología y análisis de señales cerebrales, lo que contribuirá al crecimiento y desarrollo del campo de la neurociencia.

Planteamiento del problema

El potencial relacionado a movimiento ha sido poco estudiado en grupos musculares proximales y en movimientos complejos de la extremidad superior, que sean cercanos a actividades cotidianas. Este potencial en teoría es de fácil adquisición, sin embargo, existe poca experiencia en nuestro medio para la obtención de este, por lo que inicialmente buscamos estudiar la factibilidad y reproducibilidad en su obtención. El PCAM ofrece información de la activación cortical durante el movimiento voluntario, sus aplicaciones clínicas aún son limitadas por lo que el continuar su estudio y conocer sus características en diferentes condiciones de movimiento es aún relevante. Nuestro trabajo también pretende estudiar si el agregar un objetivo al movimiento cambia la obtención de los PCAM y sus diferentes componentes.

Identificación y operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Tipo de variable	Unidad de medida	Categorías
Edad	Años desde el nacimiento hasta la fecha actual.	Cuantitativa, discreta	Años	18 a 99
Sexo	Condición genotípica XX ó XY.	Cualitativa, nominal dicotómica	Frecuencia absoluta o relativa de cada categoría	Masculino Femenino
Escolaridad	Máximo grado de estudios	Cualitativa, de escala ordinal.	Nivel educativo	Ninguna Primaria Secundaria Bachillerato Licenciatura Posgrado
Fuerza muscular del <i>bíceps brachii</i>	Capacidad que tiene el músculo de desarrollar tensión contra una carga en un único esfuerzo durante la contracción.	Cuantitativa, discreta	Grados de fuerza según escala de Daniels	0: contracción no visible 1: contracción muscular visible, pero sin movimiento de la extremidad 2: movimiento activo, pero no contra gravedad

				<p>3: movimiento activo contra gravedad</p> <p>4: movimiento activo contra gravedad y resistencia</p> <p>5: movimiento activo contra total resistencia</p>
Nivel de actividad física	Actividad o ejercicio que tenga como consecuencia el gasto de energía y que ponga en movimiento fenómenos a nivel corporal, psíquico y emocional en la persona que la realiza.	Cualitativa ordinal	Niveles de actividad física según criterios establecidos por la forma corta del Cuestionario Internacional de Actividad Física (SF-IPAQ) ¹⁸	Bajo Moderado Alto Según la cantidad de METs/semana
Latencia NS'	Tiempo desde la desviación mas prominente del BP hasta el pico de la actividad motora.	Cuantitativa, continua	Milisegundos	

Latencia N+160	Tiempo desde el pico EMG hasta el pico negativo postmotor	Cuantitativa, continua	Milisegundos	
Latencia P+300 (PP)	Tiempo desde el pico EMG hasta el valle positivo postmotor	Cuantitativa, continua	Milisegundos	
Amplitud NS´	Amplitud medida de línea de base a el pico negativo de la actividad cortical que coincida con el pico de la actividad EMG(MP)	Cuantitativa, continua	Milivoltios	
Amplitud MP - P+300	Amplitud medida desde MP al pico positivo (MP-PP)	Cuantitativa, continua	Milivoltios	

Material y métodos

El presente estudio es de tipo transversal, observacional y analítico. Nueve sujetos adultos (3 mujeres, 6 hombres) de entre 25 y 35 años sin antecedentes clínicos relevantes en el área neuromuscular, aceptaron participar en el estudio, previa firma de consentimiento informado. Todos con licenciatura en medicina y residentes de una especialización médica.

Los criterios de inclusión abarcaron sujetos de cualquier género dentro del rango de edad especificado. Por otro lado, los criterios de exclusión consideraron la presencia de antecedentes clínicos relevantes con diagnóstico médico de enfermedades con posibles implicaciones neuromusculares, tales como neuropatía, radiculopatía, plexopatía y miopatía. También se excluyeron aquellos sujetos que expresaron síntomas o signos de afectación neuromuscular, como debilidad y alteraciones sensoriales, durante el interrogatorio. Los criterios de eliminación se aplicaron a aquellos sujetos que no fueron capaces de realizar las pruebas o que presentaron dolor durante la realización del estudio.

El tamaño de muestra de 9 sujetos ofrece una capacidad de detectar anomalías con una prevalencia de 20% y con un intervalo de confianza de 80%. Esto de acuerdo con la fórmula para calcular tamaño de muestra para estudios piloto. Debido a que el principal objetivo de nuestro protocolo era estudiar la factibilidad de la obtención del PCAM con el paradigma de movimiento complejo, se consideró este nivel de confianza y probabilidad de detectar anomalías suficientes para un análisis inicial¹⁹.

Los estudios se llevaron a cabo en el departamento de electromiografía del Instituto Nacional de Rehabilitación "Luis Guillermo Ibarra Ibarra" en el año 2023.

Paradigmas de movimiento

Los participantes realizaron dos tipos de movimientos en bloques separados. En el primer paradigma, estando sentados de manera cómoda, con un punto de fijación visual colocado a una altura adecuada para evitar parpadeos y movimientos corporales no deseados, con el codo relajado y completamente extendido, se les indicó lanzar una pelota intentando acertar en una caja de 30 cm de altura, 40 cm de largo y 20 cm de ancho, la cual se encontraba ubicada a una distancia de un metro. Los lanzamientos se realizaron en intervalos irregulares superiores a 3 segundos, los cuales fueron indicados por el experimentador. En el segundo paradigma, se les pidió realizar flexiones de codo al mismo tiempo que extendían los dedos, manteniendo las mismas características de configuración e intervalos que en el primer paradigma.

Procedimiento

Un potencial asociado a movimiento se obtuvo promediando 30 movimientos no artefactados, esto se realizó dos veces, uno para cada paradigma de movimiento.

Registro electrofisiológico y procesamiento de datos

Se empleó un equipo de electromiografía Viking Nicolet EDX. Se realizaron registros a nivel de cuero cabelludo con electrodos principales en las ubicaciones Cz, Fz y Pz utilizando el sistema internacional 10-20. La impedancia de los electrodos no superó los 10 k Ω . Las señales de electrocorticales se filtraron con un filtro de paso de banda de 0.05 Hz – 30 Hz. La EMG se registró con electrodos de superficie colocados en la piel que recubre el músculo *biceps brachii* y se filtró con un filtro de paso de banda de 20 Hz – 2 kHz

En este estudio, se optó por seleccionar el músculo bíceps entre el deltoides, tríceps, flexor y extensor del carpo. Esta elección se basó en el hecho de que el músculo bíceps mostró una activación más temprana y una mayor amplitud en el registro electromiográfico de superficie durante el movimiento con objetivo, específicamente durante el lanzamiento de pelota. Estos hallazgos se ilustran en la figura 1.

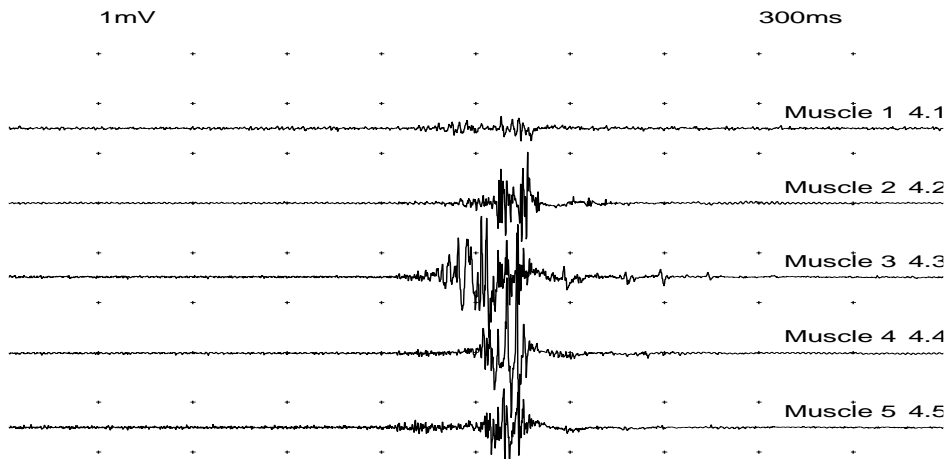


Fig 1. Registro electromiográfico de la extremidad superior durante el lanzamiento de pelota. Se observa una activación más temprana del músculo bíceps, así como una mayor amplitud. (1) *deltoides*, (2) *tríceps*, (3) *bíceps*, (4) *flexor radial del carpo*, (5) *extensor digitorum communis*.

Se promediaron los datos obtenidos de los potenciales registrados durante un intervalo específico de 2100 ms antes y 900 ms después del inicio del movimiento. El promedio se inició mediante un *trigger* que se activaba cuando el sujeto flexionaba el codo (activación del músculo bíceps).

La descripción general de las variables principales se realizó mediante medidas de tendencia central para variables cuantitativas (medias, mínimos- máximos) y frecuencias relativas (porcentajes) para variables nominales. Se emplearon pruebas de correlación (Spearman) para evaluar la asociación lineal entre dos variables cuantitativas continuas y/u ordinales. El coeficiente de correlación resultante (rho de Pearson) se elevó al cuadrado para obtener el coeficiente de determinación. Las variables cuantitativas fueron los parámetros neurofisiológicos de amplitud de los potenciales. Se utilizaron pruebas para diferencias de medias entre dos muestras no independientes, por el tamaño de la muestra se utilizaron pruebas no paramétricas, para analizar las diferencias entre las dos distribuciones topográficas, así como entre los dos paradigmas de movimiento.

Resultados

Se llevó a cabo el análisis de los registros de 9 sujetos, con una edad media comprendida entre los 27 y 33 años, incluyendo a 3 mujeres y 6 hombres. En este estudio, se investigaron la latencia de inicio del potencial NS' (pendiente negativa tardía del Bereitschaftspotential), su amplitud NS-MP (pico motor de la actividad electromiografía), la presencia del potencial postmotor, el potencial positivo postmotor (PP), y su amplitud MP-PP. Se realizaron un total de 30 promediaciones con movimiento dirigido a un objetivo y 30 promediaciones de movimientos sin objetivo.

Se realizaron estudios en los canales Cz y Pz debido a la presencia constante de artefactos en el canal Fz causados por movimientos oculares, lo cual dificultó su interpretación. A continuación, se presentan las medias, desviaciones estándar, así como los valores mínimos y máximos de todos los parámetros analizados (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Movimiento con objetivo

	Media	D.S	Min	Max	Unidad
Edad	30.3	1.8	27	33	Años
METs	2696.8	1829.2	805	5772	
Inicio de NS' (Cz)	580.4	161.7	305	839	milisegundos
P+300 (Cz)	442.1	94.3	339	634	milisegundos
Potencial postmotor (Cz)	141.2	39.7	92	197	milisegundos
Amplitud NS' (Cz)	19.6	7.9	10.6	33	microvolts
Amplitud NS'-PP (Cz)	20.3	8.2	11.4	33.7	microvolts
Inicio de NS' (Pz)	574.7	163.7	312	837	milisegundos
P+300 (Pz)	439.0	106.5	309	638	milisegundos
Potencial postmotor (Pz)	143.6	42.8	92	203	milisegundos
Amplitud NS' (Pz)	13.2	6.2	5.1	25	microvolts
Amplitud NS'-PP (Pz)	13.8	4.9	8.4	23.6	microvolts

Tabla 2. Movimiento sin objetivo

	Media	Desviación estándar	Min.	Max.	Unidad
Inicio de NS' (Cz)	539.8	188.7	250	822	milisegundos
P+300 (Cz)	430.1	93.1	297	560	milisegundos
Potencial postmotor (Cz)	224.5	122.3	138	311	milisegundos
Amplitud NS' (Cz)	16.5	9.3	1.5	29.8	microvolts
Amplitud NS'-PP (Cz)	16.1	6.5	8.1	26.5	microvolts
Inicio de NS' (Pz)	531.3	181.6	244	819	milisegundos
P+300 (Pz)	428.0	101.1	298	584	milisegundos
Potencial postmotor (Pz)	232.0	120.2	147	317	milisegundos
Amplitud NS' (Pz)	11.9	7.2	1.6	24.5	microvolts
Amplitud NS'-PP (Pz)	12.4	4.8	6.5	21.7	microvolts

Durante el análisis de las formas de onda de los potenciales corticales promediados durante los movimientos voluntarios de la extremidad superior, se observaron similitudes en la mayoría de los sujetos, aunque también se presentaron variaciones en algunos detalles de los potenciales tanto antes como después del inicio del movimiento.

El hallazgo más notable en nuestro estudio fue la evidencia de una diferencia en la distribución cortical, manifestada por una mayor negatividad en la región central (Cz) en comparación con Pz. Encontramos una tendencia hacia una mayor amplitud tanto en el componente premotor como en el componente postmotor en las tareas con objetivo en comparación con las tareas sin objetivo. Sin embargo, esta diferencia no alcanzó significancia estadística en nuestro estudio. Fig 2 y 3.

Después del pico de EMG, pudimos identificar un subcomponente negativo y uno positivo consistentes con N+160 y P+300. Como se observa en la Figura 3, tanto la replicación como la morfología y amplitud de estos componentes fueron variables entre los individuos.

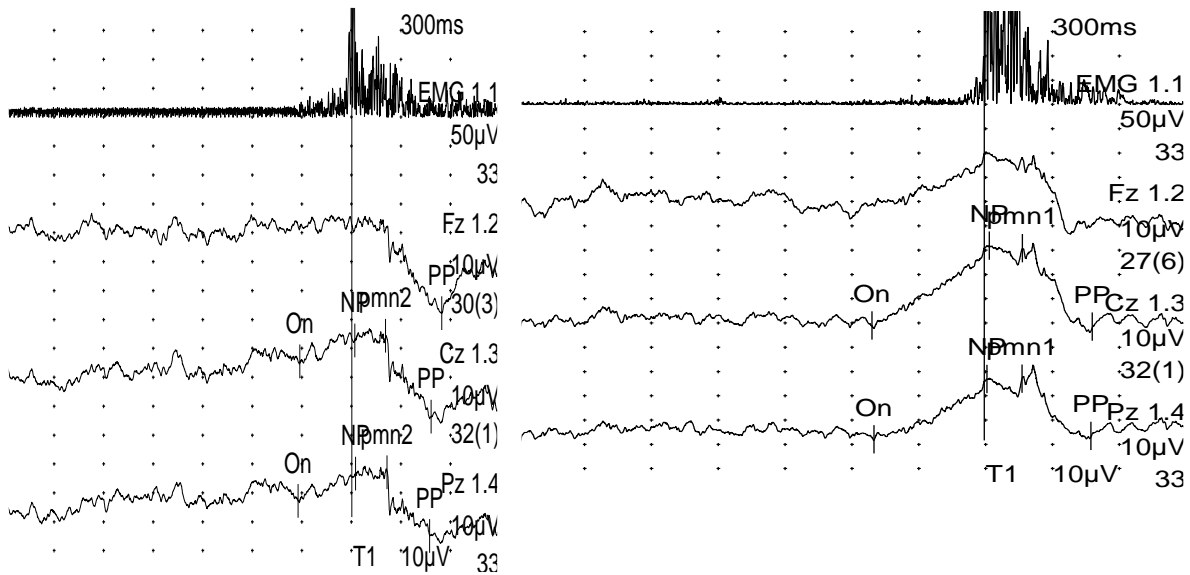


Fig 2. Registros promediados de potenciales corticales asociados con el movimiento simple (izquierda) y con objetivo (derecha). Se observan 30 promediaciones con un periodo de registro de 3 segundos en las que podemos identificar la aparición de una onda negativa distintiva sobre la región central y parietal aproximadamente 300 ms antes del pico de EMG en el movimiento simple. En el caso del movimiento con objetivo la aparición de NS' es de aproximadamente 500 ms. Registrado desde Fz, Cz, y Pz. Los componentes principales están etiquetados: NS' (On), MP (NP), N+160 (Pmn2), P+300 (PP). La línea vertical indica el pico de la actividad eléctrica del músculo biceps brachii, que se utilizó para medir el tiempo de inicio de los PCAM.

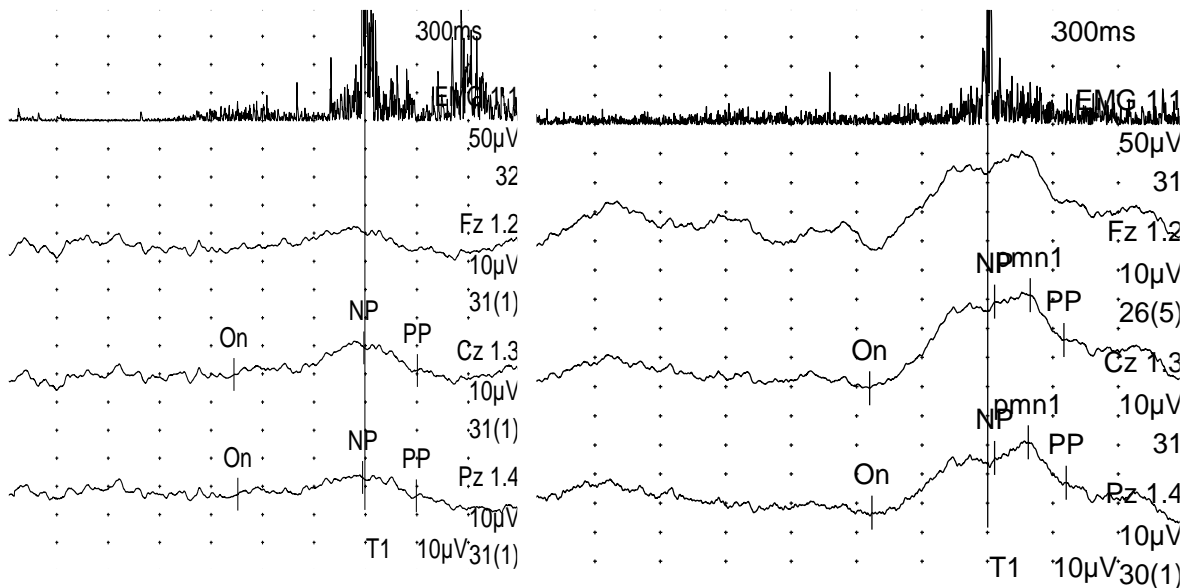


Fig. 3 Registros promediados de potenciales corticales asociados con el movimiento simple (izquierda) y con objetivo (derecha). Se observa la aparición de NS' aproximadamente 750 ms antes del pico de EMG en el movimiento simple, mientras que la aparición de BP en el movimiento complejo es aproximadamente 550 ms antes del pico de EMG. La amplitud, el inicio y la distribución en el cuero cabelludo del BP se compararon estadísticamente entre los 2 diferentes tipos de paradigmas de movimiento. En la mayoría de los sujetos, se observó una mayor replicabilidad en los componentes postmotores cuando realizaron un movimiento con objetivo. NS' (On), MP (NP), N+160 (pmn), P+300 (PP).

Bereitschaftspotential (BP)

Para el análisis de nuestros resultados, se seleccionó el tiempo de inicio del componente tardío (NS') debido a la dificultad de identificar con precisión el primer componente de la pendiente negativa. El tiempo promedio de inicio fue de 580 ms en Cz y de 574 ms en Pz durante el movimiento con objetivo, y de 539 ms en Cz y 531 ms en Pz durante el movimiento simple. Uno de los resultados más relevantes encontrados en este estudio fue que los potenciales registrados en Cz mostraron una amplitud mayor que en Pz en todas las mediciones de amplitud, tanto en las condiciones de tarea con objetivo como en las condiciones sin objetivo. Esta diferencia se observó tanto en el componente premotor (NS-MP) como en el componente postmotor (MP-PP) con una significancia estadística con un valor de $p < 0.05$ en las cuatro mediciones. (Tabla 3-5).

Tabla 3. Amplitudes medias de NS' en el canal Pz en ambos paradigmas de movimiento

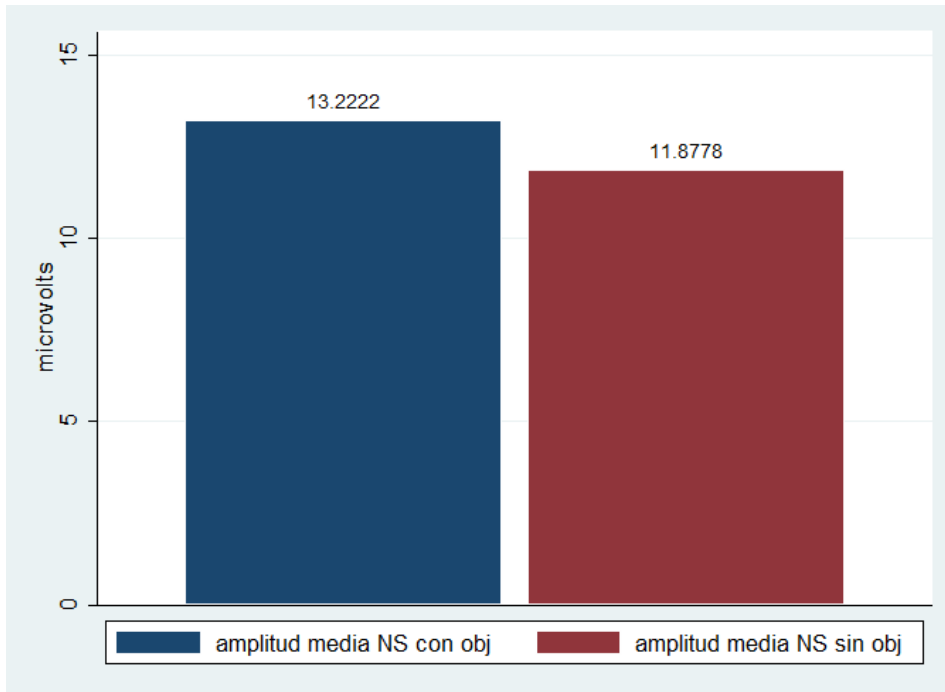


Tabla 4. Amplitudes medias de NS' en el canal Cz en ambos paradigmas de movimiento

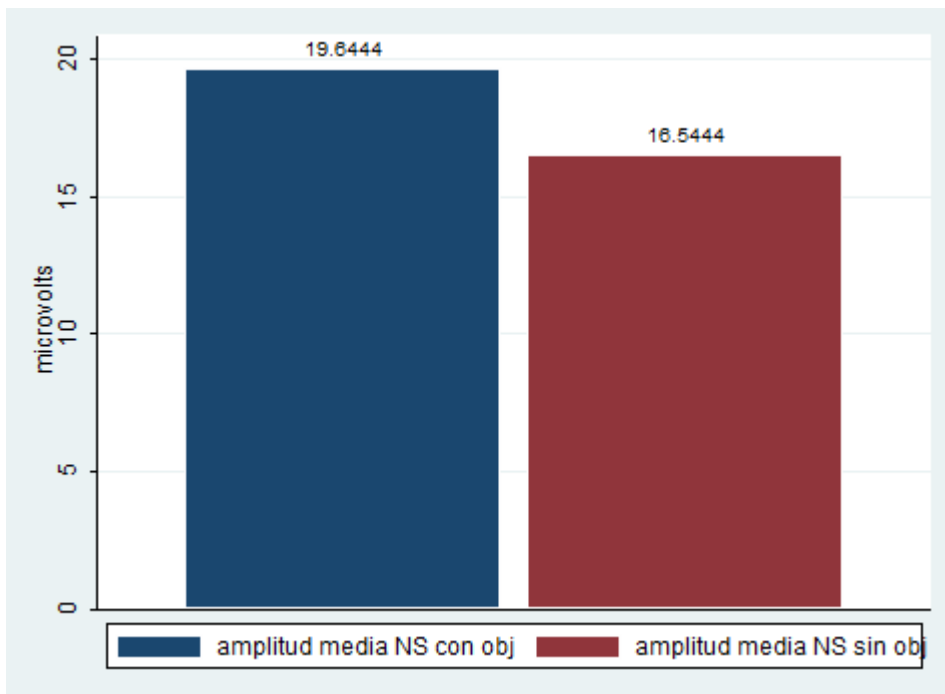
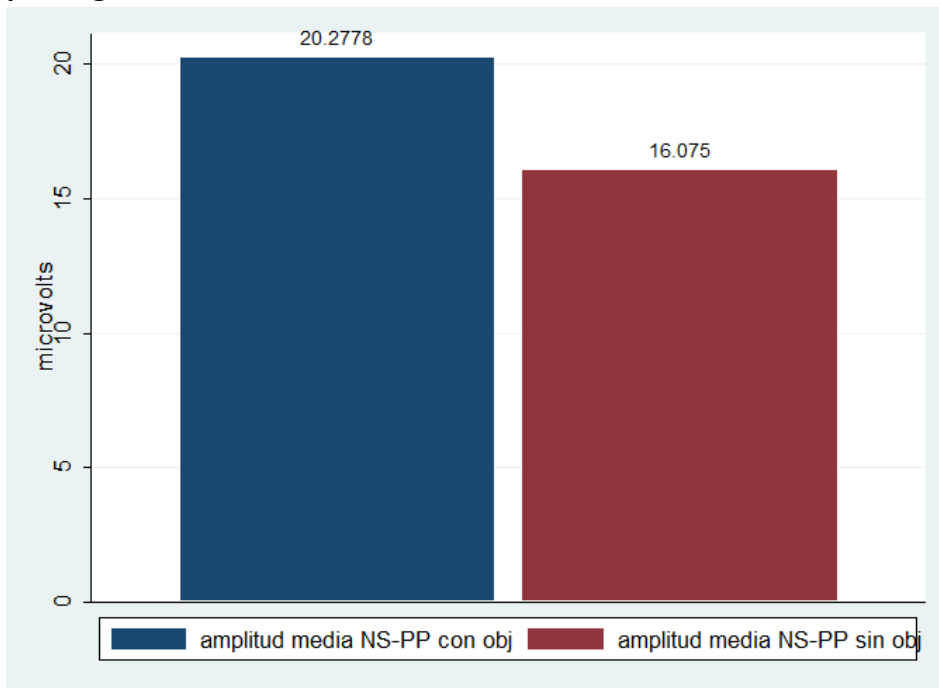


Tabla 5. Amplitudes medias de NS'-P+300 en el canal Cz en ambos paradigmas de movimiento



En la condición con objetivo, se registró una amplitud media de 19.6 μV en el electrodo Cz y 13.2 μV en el electrodo Pz. En la condición sin objetivo, las amplitudes medias fueron de 16.5 μV en Cz y 11.9 μV en Pz (Tabla 6 y 7). Es importante destacar que el componente NS' fue observado en todos los registros de los 9 sujetos analizados.

Tabla 6. Amplitudes de NS' en el movimiento sin objetivo

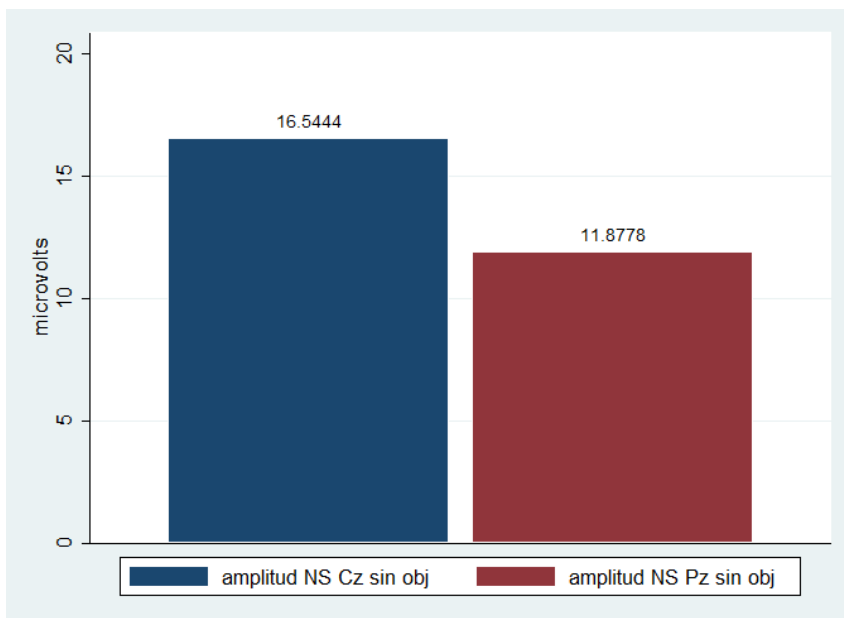
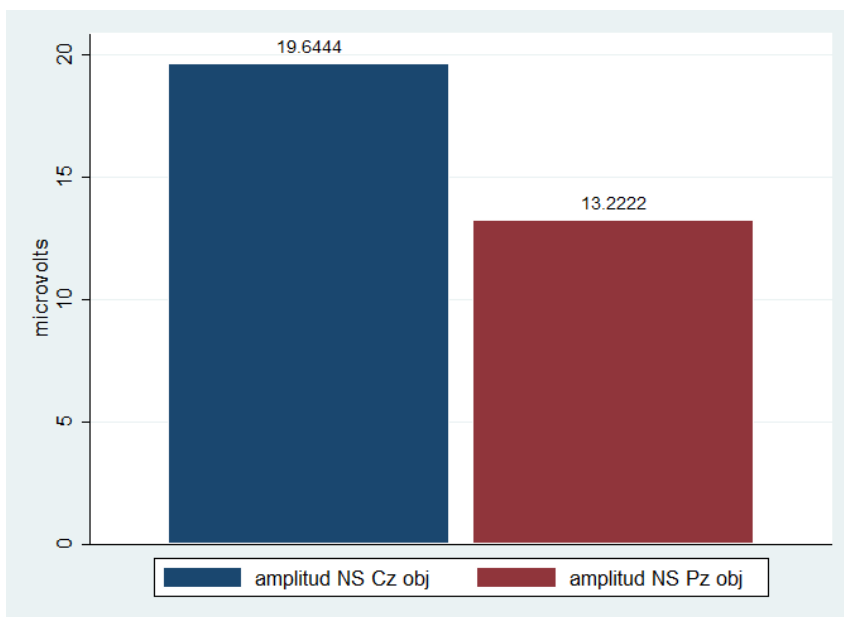


Tabla 7. Amplitudes de NS en el movimiento con objetivo

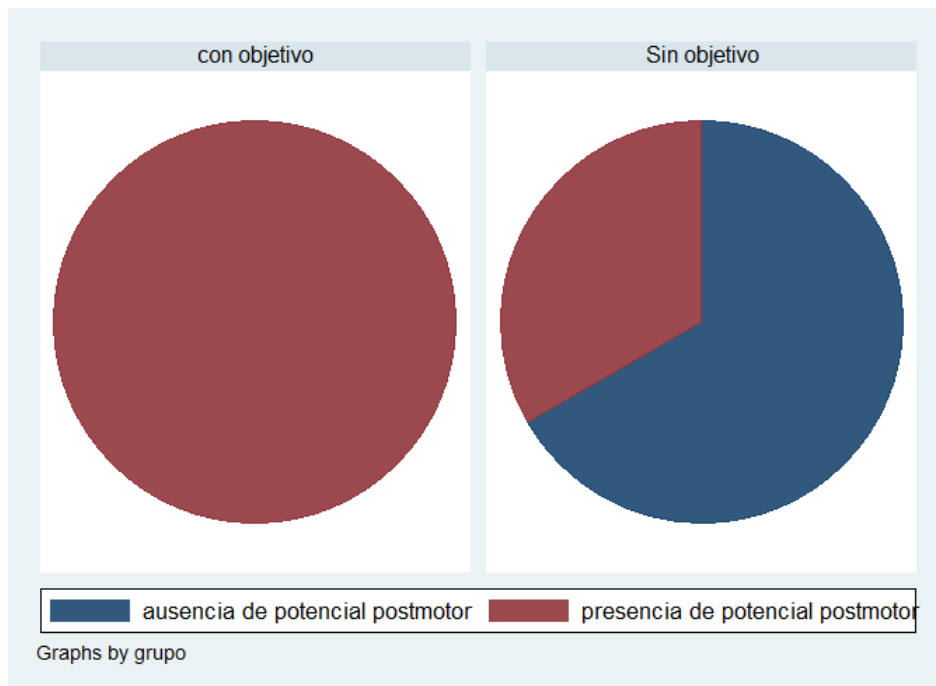


N+160

Este componente fue identificado en todos los sujetos durante el movimiento con objetivo, sin embargo, solo lo pudimos identificar en el 30% de los sujetos durante el movimiento simple, con una significancia estadística de $p < 0.05$ (Tabla 8).

El pico se produjo entre 92 y 197 ms después del pico de EMG, siendo el intervalo de tiempo medio de 141 ms después del pico de EMG.

Tabla 8. Presencia de N+160 en ambos paradigmas de movimiento



P+300

Con el método actual de análisis utilizando el tiempo de ventana posterior al disparo de EMG de 900 ms, el último componente caracterizado por una positividad grande y generalizada que se vio después de los componentes negativos anteriores se observó en todos los sujetos excepto en un registro durante el movimiento simple. El pico, definido por la terminación de esta fuerte pendiente positiva, ocurrió 309 ms a 634 ms después del pico EMG, con una media de 442 en el movimiento con objetivo; de 297 ms a 560 ms después del pico EMG, con una media de 430 en el movimiento sin objetivo. En la condición con objetivo, se registró una amplitud media de 20.3 μV en el electrodo Cz y 13.8 μV en el

electrodo Pz. En la condición sin objetivo, las amplitudes medias fueron de 16.1 μ V en Cz y 12.4 μ V en Pz.

Con respecto a los hábitos de actividad física realizada por los sujetos encontramos una correlación significativa ($r = -0.7$, $p < 0.05$) entre el nivel de actividad física medido en METs/semana y la latencia del componente positivo postmotor en el canal parietal durante la tarea con objetivo; en el canal Cz la correlación fue $r = -0.6$, $p 0.06$ (Tabla 9 y 10).

Tabla 9. Correlación entre el nivel de ejercicio medido en METs/semana con la latencia de P+300 en Pz

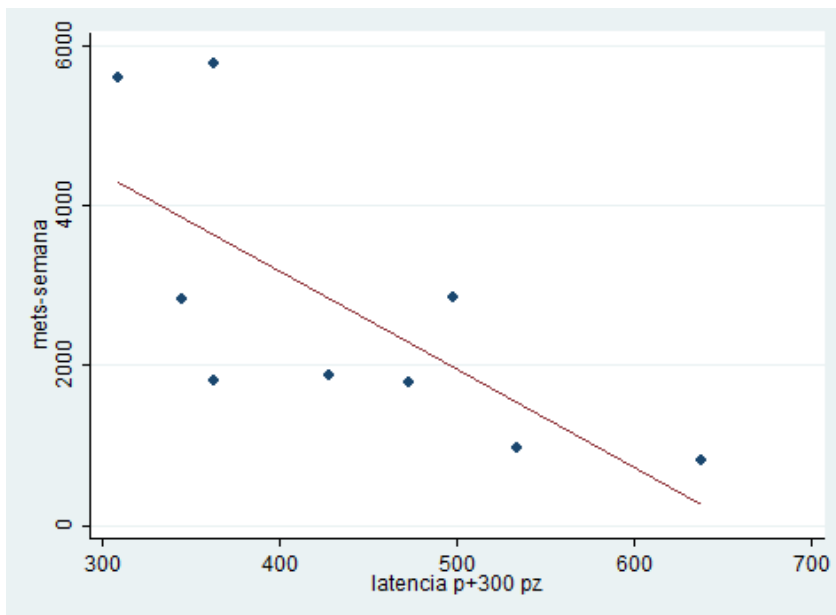
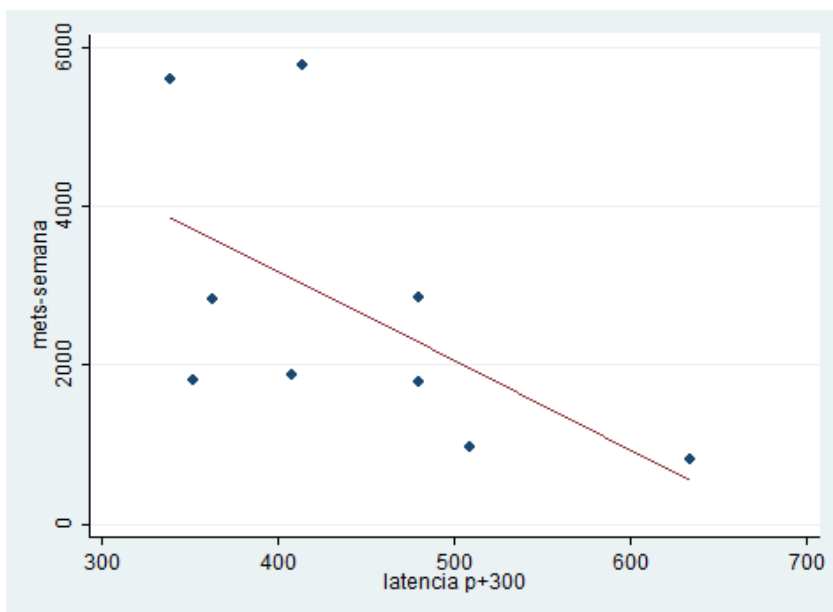


Tabla 10. Correlación entre el nivel de ejercicio medido en METs/semana con la latencia de P+300 en Cz



Discusión

Los Potenciales Corticales Asociados a Movimiento han sido investigados en el contexto de movimientos simples desde su descubrimiento por Kornhuber y Deecke¹. A medida que avanzó la investigación, se despertó el interés por demostrar que estos potenciales no solo se ven influenciados por parámetros simples como la fuerza y la velocidad^{19,20}, sino también por procesos motores de orden superior, como la complejidad del movimiento^{9,12} y la selección del modo de selección de movimiento, los cuales afectan tanto su latencia como su amplitud^{21,22,23,24}.

En las últimas décadas la investigación sobre la preparación motora se ha dirigido hacia el análisis de movimientos de mayor complejidad, tales como el agarre y el alcance, los cuales representan acciones habituales mediante las cuales los individuos interactúan con su entorno. Estas acciones conllevan procesos cognitivos superiores y transformaciones visomotoras que abarcan desde la percepción y reconocimiento del objeto hasta el logro de la meta última de la acción⁸.

Los cambios observados en nuestro estudio en el BP durante diferentes paradigmas de movimiento no concuerdan completamente con los resultados de investigaciones previas.

Aunque observamos una tendencia hacia una mayor amplitud tanto en el componente premotor como en el componente postmotor en las tareas con objetivo, es importante destacar que esta diferencia no alcanzó significancia estadística en nuestro estudio. Esto podría deberse a varios factores, como el número de promediaciones analizadas y el tamaño de nuestra muestra. Es posible que con un mayor número de promediaciones o con una muestra más grande, se puedan obtener resultados estadísticamente significativos y confirmar esta tendencia observada. Es necesario considerar estas limitaciones al interpretar los hallazgos.

Al comparar nuestros hallazgos con el estudio realizado por Kitamura et al.¹⁰, quienes encontraron que el componente NS' aparece antes y tiene una mayor amplitud durante los

movimientos secuenciales (complejos) en comparación con los movimientos simples, no encontramos diferencias significativas tanto en la latencia como en la amplitud del componente. Sin embargo, nuestros resultados respaldan su propuesta en relación con el incremento más pronunciado del componente NS' en el canal Cz, lo cual sugiere la implicación de las áreas motoras suplementarias (SMA) y las áreas sensoriomotoras en la generación y amplitud del NS'. Sigue existiendo controversia en cuanto a si la actividad de SMA precede a la de M1 o si ambas se activan de manera paralela, como sugiere Praamstra et al²⁴.

En las primeras teorías se pensó que el BP representaba una preparación general para el próximo movimiento por su distribución difusa en todo el cuero cabelludo. No obstante, investigaciones más recientes sugieren que podría ser específica del sitio de movimiento al menos dentro del SMA y la corteza premotora lateral²⁶. Su distribución simétrica máxima en la línea media probablemente se deba a la suma de los campos eléctricos generados a partir de áreas homólogas de ambos hemisferios a través de la conducción de volumen^{8,22}. Una limitación de nuestro estudio es que solo disponíamos de tres canales de registro, por lo que se decidió utilizar los ubicados en la línea media (Fz, Cz y Pz). Esto nos impidió realizar análisis de diferencias o asimetrías entre los hemisferios cerebrales.

Con respecto a los componentes postmotores, se han descrito N+50 y N+160. En nuestro estudio, observamos que el componente más replicable apareció aproximadamente a los 100 ms o después, posterior al pico de la acción motora, esto fue observado en el 100% de las pruebas de movimiento con objetivo. En estudios previos, la identificación del componente N+160 no ha sido consistente. El hecho de que nosotros lo hayamos encontrado podría deberse a la activación conjunta de diferentes regiones corticales y subcorticales más complejas como una suma de voltaje, pero también podría deberse a una dispersión temporal del componente durante la activación muscular asincrónica necesaria para realizar el lanzamiento de una pelota. En la descripción realizada por Shibasaki et al.⁶, se reportó que el componente N+160 se localiza en la región parietal ipsilateral,

extendiéndose con menor amplitud hacia la región precentral contralateral. Esta localización sugiere una posible función sensorial asociada a dicho componente. En contraste, en nuestro estudio encontramos una replicabilidad del componente en el 100% de los sujetos durante el lanzamiento de la pelota en la región central. Además, observamos una menor replicabilidad, alrededor del 30%, en el contexto de movimientos simples.

Nuestro estudio proporciona hallazgos consistentes con investigaciones anteriores con relación al potencial posterior P+300 o RAP. Coincidimos con otros autores que pudieron observar este potencial al analizar movimientos simples de la mano y el pie en todos los sujetos de su muestra.^{6,7} En nuestro estudio, identificamos este potencial en 100% de los movimientos con objetivo y en 88% de los registros en el movimiento simple.

Se ha descrito que la distribución de P+300 en el cuero cabelludo es simétrica y que presenta su pico máximo sobre la región precentral de la mano contralateral al movimiento (C1' y C2') y en el vértex para el movimiento del pie^{6,7}. Sin embargo nosotros encontramos con diferencia significativa una mayor amplitud en el registro de Cz en ambos paradigmas de movimiento.

Hasta donde tenemos conocimiento, no se ha investigado previamente la correlación entre el nivel de actividad física y los PCAM. En este estudio, se evidencia una correlación significativa entre el nivel de actividad física y la latencia del componente positivo postmotor. Específicamente, encontramos esta correlación en la región parietal durante la ejecución de la tarea con objetivo. Es importante destacar que se requieren más investigaciones para confirmar y profundizar en esta correlación. Este hallazgo es interesante, ya que sugiere que el nivel de actividad física puede tener un impacto en la activación cortical relacionada con la coordinación de los circuitos neuronales involucrados en la intencionalidad motora.

Conclusiones

El PCAM es reproducible y factible de obtener en ambos paradigmas de movimiento. Se observaron diferencias topográficas y se observaron relaciones entre el potencial con la actividad física de los sujetos.

Las tareas motoras con objetivo promueven la integración de un PCAM más complejo y con una mejor morfología en el componente postmotor. Aunque observamos una tendencia hacia una mayor amplitud tanto en el componente premotor como en el componente postmotor en las tareas con objetivo, esta diferencia no alcanzó significancia estadística en este momento. Estos hallazgos en las actividades motoras enfocadas apoyan la idea que estos movimientos generan un mayor voltaje eléctrico cortical, y requieren conexiones más diversas a nivel cortical o subcortical que las tareas simples, y podrían dar sustento a diseñar técnicas de rehabilitación con movimientos con tareas específicas.

El *Beriettschaftspotential* se distribuye más ampliamente en regiones centrales, específicamente en Cz. En términos de amplitud, hay una tendencia hacia valores mayores en las tareas con objetivo en comparación con las tareas simples. Mostramos que el nivel de actividad física del sujeto está relacionado con la morfología y latencia del componente postmotor.

Se requiere aumentar el tamaño de la muestra y en un futuro realizar estudios longitudinales en patologías específicas para que este potencial pueda llegar a tener una aplicabilidad clínica más relevante.

Referencias

- 1.- Kornhuber, Hans-Helmut, and L. Deecke. "Changes in the brain potential in voluntary movements and passive movements in man: readiness potential and reafferent potentials." *Pflugers Archiv fur die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 284 (1965): 1-17.
- 2.- Masaki, Hiroaki, Noriyoshi Takasawa, and Katuo Yamazaki. "Enhanced negative slope of the readiness potential preceding a target force production task." *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section* 108.4 (1998): 390-397.
- 3.- Libet, Benjamin, et al. "Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential)." *Brain* 106 (1983): 623-642.
4. Klein, Stanley. "Libet's research on the timing of conscious intention to act: a commentary." *Consciousness and Cognition* 11.2 (2002): 273-279.
- 5.- Eagleman, David M. "The where and when of intention." *Science* 303.5661 (2004): 1144-1146.
- 6.- Shibasaki, H., et al. "Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography." *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 49.3-4 (1980): 213-226.
- 7.- Shibasaki, H., et al. "Cortical potentials associated with voluntary foot movement in man." *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 52.6 (1981): 507-516.
- 8.- Lang, Wilfried. "Surface recordings of the Bereitschaftspotential in normals." *The Bereitschaftspotential* (2003): 19-34.
- 9.- Benecke, R., et al. "Increase of the Bereitschaftspotential in simultaneous and sequential movements." *Neuroscience letters* 62.3 (1985): 347-352.
10. Kitamura, Jun-ichi, Hiroshi Shibasaki, and Tohru Kondo. "A cortical slow potential is larger before an isolated movement of a single finger than simultaneous movement of two fingers." *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 86.4 (1993): 252-258.
11. Taylor, Margo J. "Bereitschaftspotential during the acquisition of a skilled motor task." *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 45.5 (1978): 568-576.

- 12.- Simonetta, M., M. Clanet, and O. Rascol. "Bereitschaftspotential in a simple movement or in a motor sequence starting with the same simple movement." *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section* 81.2 (1991): 129-134.
13. Wheaton, Lewis A., Satoshi Yakota, and Mark Hallett. "Posterior parietal negativity preceding self-paced praxis movements." *Experimental brain research* 163 (2005): 535-539.
- 14.- Bozzacchi, Chiara, et al. "Awareness affects motor planning for goal-oriented actions." *Biological psychology* 89.2 (2012): 503-514.
- 15.- Bozzacchi, Chiara, et al. "Similar cerebral motor plans for real and virtual actions." *PLoS One* 7.10 (2012): e47783.
16. Bardel, Benjamin, et al. "Motor preparation impairment in multiple sclerosis: Evidence from the Bereitschaftspotential in simple and complex motor tasks." *Neurophysiologie Clinique* 52.2 (2022): 137-146.
17. Shibasaki, Hiroshi, et al. "Both primary motor cortex and supplementary motor area play an important role in complex finger movement." *Brain* 116.6 (1993): 1387-1398.
18. Craig, Cora L., et al. "International physical activity questionnaire: 12-country reliability and validity." *Medicine & science in sports & exercise* 35.8 (2003): 1381-1395.
19. Viechtbauer, Wolfgang, et al. "A simple formula for the calculation of sample size in pilot studies." *Journal of clinical epidemiology* 68.11 (2015): 1375-1379.
20. Kutas, Marta, and Emanuel Donchin. "Preparation to respond as manifested by movement-related brain potentials." *Brain research* 202.1 (1980): 95-115.
21. McKinnon, Richard. "Constraints on movement phenomena in sentence processing: Evidence from event-related brain potentials." *Language and cognitive processes* 11.5 (1996): 495-524.
22. Jahanshahi, Marjan, et al. "Self-initiated versus externally triggered movements: I. An investigation using measurement of regional cerebral blood flow with PET and movement-related potentials in normal and Parkinson's disease subjects." *Brain* 118.4 (1995): 913-933.
23. Touge, T., et al. "Movement - related cortical potentials preceding repetitive and random - choice hand movements in Parkinson's disease." *Annals of Neurology: Official*

Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society 37.6 (1995): 791-799.

24. Praamstra, P., et al. "Dipole source analysis suggests selective modulation of the supplementary motor area contribution to the readiness potential." *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 98.6 (1996): 468-477.

25. Dirnberger, Georg, et al. "The mode of movement selection Movement-related cortical potentials prior to freely selected and repetitive movements: Movement-related cortical potentials prior to freely selected and repetitive movements." *Experimental Brain Research* 120 (1998): 263-272.

26. Shibasaki, Hiroshi, and Mark Hallett. "What is the Bereitschaftspotential?." *Clinical neurophysiology* 117.11 (2006): 2341-2356.

Anexos

Lista de tablas:

Tabla 1	18
Tabla 2	19
Tabla 3	22
Tabla 4	22
Tabla 5	23
Tabla 6	24
Tabla 7	24
Tabla 8	25
Tabla 9	26
Tabla 10	27

Lista de Figuras:

Fig 1	17
Fig 2	20
Fig 3	21