



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
MAESTRÍA EN CIENCIAS (NEUROBIOLOGIA)
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGIA

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL LOCAL DE CAMPO (LFP) EN UNA TAREA DE
TOMA DE DECISIÓN**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

KARLA NAYELI AYALA MERCADO

TUTOR PRINCIPAL

DR. VICTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR

DR. LUIS ALBERTO TÉLLEZ LIMA
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

DR. RANIER GUTIÉRREZ MENDOZA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS, IPN

CIUDAD DE MÉXICO FEBRERO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

RESUMEN

ANÁLISIS DEL POTENCIAL LOCAL DE CAMPO (LFP) EN UNA TAREA DE TOMA DE DECISIÓN

Cuando hablamos de decisión perceptual, nos referimos a un proceso a partir del cual se elige una opción de un conjunto de alternativas, con base en la información sensorial con la que se cuenta.

La tarea de movimiento aleatorio de puntos (RDM, por sus siglas en inglés), es muy utilizada para estudiar este tipo de decisión; el estímulo presentado en esta tarea consiste en un conjunto de puntos, de los cuales un porcentaje se mueve coherentemente hacia una dirección y el resto se mueve aleatoriamente. El sujeto de estudio debe decidir hacia cual dirección se mueve el estímulo presentado.

Las bases neuronales de este proceso han sido ampliamente estudiadas por medio del análisis de neurona única en diversas áreas cerebrales; sin embargo, hay pocos estudios que hacen uso de los potenciales locales de campo (LFP). Por lo que en el presente trabajo se utilizan los LFP's, para identificar si esta señal codifica la toma de decisión y si tienen alguna relación con el análisis neuronal; las señales utilizadas en este trabajo corresponden a dos monos Rhesus registrados previamente en el área lateral intraparietal (LIP) y medial intraparietal (MIP) mientras realizaban la tarea de movimiento aleatorio de puntos.

Para caracterizar la señal utilizamos un método temporal, mejor conocido como Potencial Relacionado a Eventos, en el cual se observa una dependencia de la señal hacia la dirección y coherencia del estímulo, mismo resultado observado en el análisis neuronal.

Finalmente hicimos uso de un método temporo-frecuencial, a partir del cual, se aprecia que diferentes etapas del bloque de toma de decisión se encuentran moduladas por diferentes bandas de frecuencia. Dentro de estas bandas, la que más llama la atención es gamma, ya que pareciera estar emulando la respuesta que tiene una neurona característica en el bloque antes mencionado.

ABSTRACT

LOCAL FIELD POTENTIAL ANALYSIS IN A DECISION MAKING TASK

We can define perceptual decision as a process by which a subject is required to choose an option of a set of alternatives; the principal characteristic of this decision is that it is made based on the sensory information disposable.

The random dot motion task (RDM) is a well-known task to study this decision type; the stimuli presented in this task consist of a set of points, which whom a percentage is going to move coherently, and the other percentage will move randomly. The subject of the study is required to decide the direction of the stimuli.

The neuronal basis of this process has been well studied in spike analysis in various cerebral areas. However, local field potentials (LFP) are not as used as the formers. In this project, we use LFP to see if this signal codes for decision making and its relation with the spike analysis; signals used in the present project are from two rhesus monkeys, registered previously in the lateral intraparietal area (LIP) and medial intraparietal area (MIP) while they were performing the RDM task.

To characterize the signal, we use a temporal method, best known as Event-Related Potential; with this method, we observed a signal dependency to the direction and coherency of the stimuli, characteristic also seen in the spike analysis.

Finally, we use a temporal and frequency method, with this one we were available to appreciate that different segments on the decision making section were modulated by different frequency bands. Interestingly, one of these bands was gamma, presenting a modulation similar to those seen in a characteristic neuron.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Becario No: 860967

A la dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM
Alumna: 519010253

Al Mtro. Edgar Bolaños Aquino, Técnico Académico del Laboratorio de Sistemas Sensoriales y Planeación Motora, B-05, por su trabajo y apoyo.

A la Mtra. Leonor Casanova Rico, Dra. Nuri Aranda López, y Ma. Carmen Mendoza López, de la unidad de enseñanza del Instituto de Neurobiología, por su amabilidad y disposición para resolver nuestras dudas administrativas.

A la Lic. Lourdes Ayala de la Unidad de Videoconferencia.

A mi tutor Dr. Victor de Lafuente y mi comité tutor Dr. Luis Téllez y Dr. Ranier Gutiérrez, por el tiempo dedicado a escuchar mi proyecto; así como por las observaciones, comentarios y aportaciones que permitieron mejorar el proyecto y mi formación académica.

Especialmente a mi mamá y hermana, a quienes amo, por siempre estar en primera fila apoyando mis decisiones, aconsejándome y dándome ánimos para continuar.

A mis amigas de baile Flor, Chivis, Simonée, Maggie, quienes me han enseñado millones de cosas nuevas y se han vuelto una parte muy importante en mi vida.

A mis amigas y compañeros del laboratorio, Ana Mari, Adri, Marisol, por tantas horas compartidas de buenos momentos y aprendizaje.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | ii |
| ABSTRACT..... | iii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 4 |
| 2.1. Corteza Parietal..... | 4 |
| 2.2. Área Lateral Intraparietal (LIP)..... | 6 |
| 2.3. Corteza Medial Intraparietal (MIP)..... | 7 |
| 2.4. Toma de decisión..... | 8 |
| 2.5. Decisión Perceptual..... | 10 |
| 2.6. Potencial Local de Campo..... | 12 |
| 2.7. Trabajo previo..... | 15 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 18 |
| 4. OBJETIVOS..... | 19 |
| 4.1. Objetivo General..... | 19 |
| 4.2. Objetivos Específicos..... | 19 |
| 5. HIPÓTESIS..... | 20 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 21 |
| 7. TAREA EXPERIMENTAL..... | 22 |
| 8. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL..... | 23 |
| 9. RESULTADOS..... | 24 |
| 9.1. Raster Plot..... | 24 |
| 9.2. Potenciales Relacionados a Evento (ERP)..... | 26 |
| 9.3. Espectrograma y Dinámica..... | 32 |
| 10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 36 |
| 11. CONCLUSIONES..... | 39 |
| REFERENCIAS..... | 40 |
| ANEXO A..... | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.- Vista lateral del cerebro de un mono | 4 |
| Figura 2.- Se muestra lateralmente la mitad posterior del cerebro de un mono | 5 |
| Figura 3.- Ejemplo del estímulo presentado en la tarea RDM | 10 |
| Figura 4.- EEG | 13 |
| Figura 5.- Análisis de conducta..... | 15 |
| Figura 6.- Respuesta de dos neuronas representativa..... | 16 |
| Figura 7.- Evolución de la respuesta neuronal | 17 |
| Figura 8.- Etapas de un ensayo de la tarea de puntos aleatorios | 22 |
| Figura 9.- Diagrama de flujo..... | 23 |
| Figura 10.- Raster plot: LIP-ojo..... | 24 |
| Figura 11.-Raster plot: MIP-mano | 25 |
| Figura 12.- ERP para LIP - ojo | 26 |
| Figura 13.- ERP para MIP - mano..... | 27 |
| Figura 14.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para LIP-ojo..... | 28 |
| Figura 15.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para MIP-mano..... | 29 |
| Figura 16.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para LIP-ojo..... | 30 |
| Figura 17.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para MIP-mano | 31 |
| Figura 18.- Espectrograma para LIP-ojo..... | 33 |
| Figura 19.- Gráfica de caja y eje para LIP-ojo | 34 |
| Figura 20.- Espectrograma para MIP-mano | 34 |
| Figura 21.- Gráfica de caja y eje para MIP-mano | 35 |
| Figura 22.-ERP para LIP - mano,..... | 44 |
| Figura 23.-ERP para MIP - ojo | 44 |
| Figura 24.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para LIP-mano..... | 45 |
| Figura 25.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para MIP-ojo | 45 |
| Figura 26.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para LIP-mano | 46 |
| Figura 27.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para MIP-ojo..... | 46 |
| Figura 28.- Espectrograma para LIP-mano | 47 |
| Figura 29.- Gráfica de caja y eje para LIP-mano | 47 |
| Figura 30.- Espectrograma para MIP-ojo..... | 48 |
| Figura 31.- Gráfica de caja y eje para MIP-ojo..... | 48 |

1. INTRODUCCIÓN

Podemos definir a la toma de decisión como un proceso a partir de la cual información sensorial (que es continuamente acumulada hasta alcanzar un determinado criterio de decisión) es empleada para llevar a cabo una conducta determinada. Este proceso involucra el reclutamiento de información a través de los sentidos, evaluación e integración de dicha información con base a los objetivos establecidos; y finalmente hacer uso de todos estos elementos para ejecutar una respuesta motora (Hauser & Salinas, 2014a; Polanía, Krajbich, Grueschow, & Ruff, 2014).

De manera general, las tareas que son utilizadas para analizar las bases neuronales de la toma de decisión constan de la presentación de un estímulo sensorial, el cual debe ser analizado de acuerdo con los parámetros que se hayan establecido en la tarea y finalmente la decisión tomada debe ser reportada llevando a cabo una acción motora en particular. Una de las tareas comúnmente utilizadas, y que cumple con los parámetros anteriormente mencionados, es la tarea de discriminación de movimiento de puntos aleatorios (RDM, por sus siglas en inglés); este tipo de estímulo resulta muy útil debido a que el juicio perceptual puede ser controlado variando el porcentaje de coherencia con que los puntos se mueven (Hauser & Salinas, 2014a; Shadlen & Newsome, 1996).

Sin embargo, el estudio de las bases neuronales de la toma de decisión utilizando la tarea de RDM, generalmente es llevado a cabo por medio del análisis de unidades neuronales.

Para esta investigación se cuenta con las señales electrofisiológicas del registro extracelular en el área lateral Intraparietal (LIP) y área medial intraparietal (MIP), de dos monos Rhesus (*Macaca mulatta*) mientras realizaban la tarea de RDM. Para estos datos, los investigadores previamente realizaron el análisis de unidades neuronales (de Lafuente, Jazayeri, & Shadlen, 2015), para identificar como es que la toma de decisión se lleva a cabo en diferentes áreas cerebrales, que se sabe presentan patrones de respuestas neuronales selectivas al efector con que se realice la elección.

Por lo que en este proyecto se pretende analizar el potencial local de campo (LFP, por sus siglas en inglés), de las señales antes mencionadas, para evaluar la posible existencia de algún patrón característico que codifique la toma de decisión y asemeje lo encontrado con el análisis que se realizó con unidades neuronales.

2. ANTECEDENTES

2.1. Corteza Parietal

Anatómicamente se encuentra posicionada entre la corteza frontal y occipital; es una región donde convergen múltiples entradas sensoriales tanto visuales, auditivas como somatosensoriales. La corteza parietal (Figura 1) es considerada una interfaz importante para la atención e integración de múltiples señales sensoriales que pueden ser utilizadas para llevar a cabo un plan motor (Birbaumer & Flor, 2000; Werf, 2015).

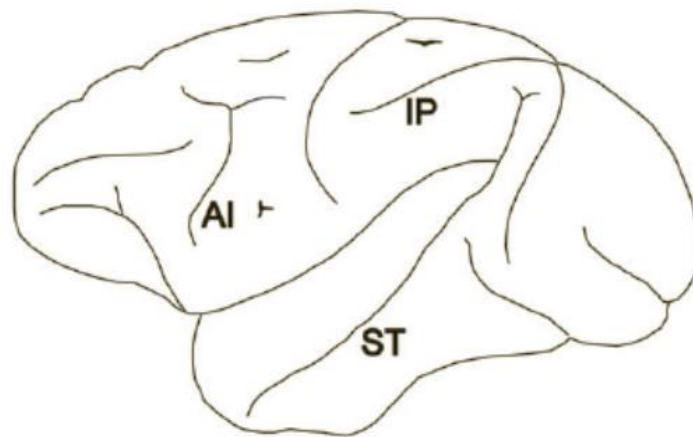


Figura 1.- Vista lateral del cerebro de un mono; en siglas se muestra el surco arqueado inferior (AI), surco intraparietal (IP) y surco superior temporal (ST). Tomada de (Rozzi & Coudé, 2015).

El lóbulo parietal, se encuentra situado entre áreas sensoriales (visual, táctil y auditiva) y contiene células que responden a estímulos conductuales relevantes; esta área también se encuentra activa cuando los individuos se preparan para ver o moverse hacia un estímulo, y como se mencionó anteriormente, está fuertemente conectado con el lóbulo frontal, donde se planean las acciones (Patel, He, & Corbetta, 2009).

De esta forma, el lóbulo parietal se encuentra situado para realizar operaciones que no son estrictamente sensoriales ni motoras; más bien operaciones que integran información tanto sensorial como motora, es decir, que el lóbulo parietal tiene una naturaleza integrativa (Patel et al., 2009).

La actividad neuronal descrita en esta área se encuentra relacionada con atención, alcance, prensión o movimientos sacádicos (Kandel, 2013; Lewis & Van Essen, 2000; Ptak & Müri, 2013).

La característica más sobresaliente de esta corteza es el surco Intraparietal (IPS; figura 2), el cual divide la corteza parietal posterior (PPC) en lóbulo superior e inferior (Patel et al., 2009; Ptak & Müri, 2013). Este surco, se encuentra conformado por varias subestructuras altamente involucradas en el procesamiento sensor y motor; ya que estas reciben entradas de otras

estructuras cerebrales involucradas en el procesamiento de información visual, táctil y auditiva, y pueden enviar información a las mismas áreas y/o a áreas de planeación motora (Patel et al., 2009).

Estas son nombradas de acuerdo a su localización respecto a IPS, encontrando de esta forma las áreas intraparietales anterior (AIP), lateral (LIP), medial (MIP), caudal (CIP) y ventral (VIP). Estas subregiones integran información de los diferentes sentidos de tal forma que influyen sobre la conducta en un entorno de trabajo (Werf, 2015).

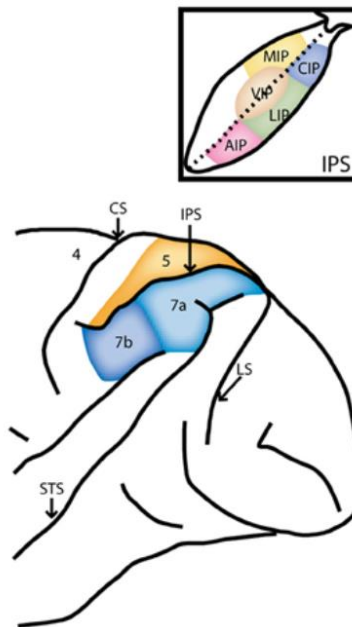


Figura 2.- Se muestra lateralmente la mitad posterior del cerebro de un mono; mostrando el surco intraparietal de forma desdoblada en la imagen insertada. Las siglas son mencionadas en el texto. Tomada y modificada de (Katsuki & Constantinidis, 2012).

AIP se encuentra involucrada en movimientos de agarres, es decir, que las neuronas en este sitio disparan ante la presentación y manipulación de un objeto.

CIP recibe entradas visuales, y se cree se encuentra involucrada en la percepción 3D que pueden guiar una acción.

VIP recibe entradas de varias modalidades sensoriales, y se cree que representa la percepción de auto-movimiento y objetos que se encuentran en el espacio peri-personal.

A continuación, se describen con mayor detalle las áreas LIP y MIP, dado que son las áreas donde se llevaron a cabo los registros que se analizarán en el presente estudio.

2.2. Área Lateral Intraparietal (LIP)

El área lateral intraparietal se localiza, como su nombre lo indica, en el banco lateral de IPS. Recibe entradas, en su mayoría, de corteza occipital, aunque también de áreas frontales como el campo ocular frontal (FEF, por sus siglas en inglés). Tiene proyecciones que van a áreas corticales oculomotoras frontales, como campo ocular suplementario y corteza prefrontal dorso lateral (Werf, 2015).

Se encuentra organizada topográficamente, es decir, que cada neurona tiene un punto/segmento de espacio visual preferido. Siendo la respuesta neuronal más fuerte cuando el estímulo visual se presenta en medio de este espacio visual, y será cada vez más débil conforme se va alejando de este punto. En la mayoría de las neuronas de LIP, el campo receptivo (RF, por sus siglas en inglés, espacio donde la neurona es más responsiva) se encuentra fijado a la dirección de la mirada, y generalmente es contralateral al hemisferio registrado (Werf, 2015).

Por su conectividad y propiedades de respuesta de neuronas únicas, se cree está involucrada en procesamiento visual predictivo, atención visuoespacial y en la programación de movimientos sacádicos (Ben Hamed, Duhamel, Bremmer, & Graf, 2001). Las neuronas de esta área describen los targets para movimientos sacádicos y proyectan al campo visual frontal (Kandel, 2013).

Estas neuronas codifican para señales visuales y señales de memoria visual (Duhamel, Colby, & Goldberg, 1992), es decir, varias neuronas de esta área modulan su nivel de actividad cuando hay suficiente información para planear un movimiento sacádico, aun cuando la ejecución de la sacada se retrasada por varios segundos (Shadlen & Newsome, 2001).

Shadlen y Newsome (Shadlen & Newsome, 1996) encontraron que es factible que neuronas en esta área participen en el proceso de decisión, ya que generan actividad sostenida que predice hacia donde se realizará el movimiento sacádico, y, por tanto, la decisión del mono.

Las neuronas de LIP también responden a estímulos visuales que nos son targets para la planeación de un movimiento sacádico, pero es relevante para la tarea, Por ejemplo, si al mono se le indica que debe de mantener la fijación en un punto central, e indicar con su mano cuando un estímulo en la periferia ligeramente se atenúe, las neuronas LIP que representa la locación de este estímulo continúan disparando hasta que la tarea es completada (Patel et al., 2009).

Por lo anterior, se puede decir que LIP se encuentra altamente involucrada en una transformación sensorimotora.

2.3. Corteza Medial Intraparietal (MIP)

Desde un punto de vista sensoriomotor, un movimiento de alcance que se realiza hacia un target espacial, no es muy diferente de un movimiento sacádico, ya que, de manera general, en ambos casos se debe seleccionar un target y transformar esta elección en un comando motor (Werf, 2015). Sin embargo, en (Snyder, Batista, & Andersen, 1997) encontraron una separación entre dos clases de neuronas, lo que les llevo a concluir que existen diferentes tipos neuronales para diferentes tipos de acción en la corteza parietal posterior (PPC, por sus siglas en inglés), es decir, una neuronas que responden a movimientos oculares, localizadas en LIP, y otras que responden a movimientos de alcance, localizadas en la región parietal de alcance (PRR, por sus siglas en inglés) (Werf, 2015); esta última región, a su vez es dividida en sub-áreas, dentro de las cuales encontramos a MIP.

La organización espacial de PRR está basada en coordenadas centradas en la vista, lo que implica que lo que está siendo codificado es la intención de mover el brazo a una locación espacial, y no el movimiento del brazo como tal. Lo anterior ha sido probado por varios estudios que muestran que la actividad de PRR refleja la selección de targets (Werf, 2015).

MIP, como su nombre lo indica, se encuentra localizada en el banco medial de IPS, recibe entradas de áreas visuales y propioceptivas (Rajalingham & Musallam, 2017); representa los targets para movimientos de alcance y proyecta al área frontal que genera la señal premotora para dichos movimientos (Kandel, 2013). Estas neuronas tienen una mayor tasa de disparo en respuesta a un estímulo espacial cuando se tiene la intención de moverse con el brazo contralateral (Werf, 2015).

Las neuronas de esta área se encuentran involucradas en circuitos que median la planeación, ejecución y monitoreo de movimientos de alcance, además de ser parte de la región parietal de alcance; de manera más específica estas neuronas presentan actividad dependiente de la dirección del movimiento de la mano hacia un objetivo visual, es decir, su actividad se ve involucrada en la coordinación del movimiento manual y objetivos visuales (Grefkes & Fink, 2005).

Dichas neuronas llevan a cabo una transformación de las coordenadas espaciales de los objetivos a ser alcanzados, a una representación que pueda ser empleada por el sistema motor para que pueda calcular el movimiento que se tiene que ejecutar. También se cree que las neuronas de esta área participan en la red neuronal que detecta movimientos erróneos o cambios de posición de un objetivo de tal manera que las correcciones puedan llevarse dentro de un tiempo adecuado (Grefkes & Fink, 2005).

2.4. Toma de decisión

La toma de decisión hace referencia a la capacidad, de los humanos y otros animales, de elegir entre cursos de acción, basándose en el valor relativo de sus consecuencias (Balleine, 2007). Para iniciar a hablar de la toma de decisión, es importante diferenciar entre dos conceptos que son a menudo utilizados como sinónimos: decisión y elección (Schall, 2001).

Elección: Una elección es requerida cuando a un organismo se le presentan alternativas, para las cuales se debe realizar una acción para adquirir o evitar más alternativas, con base a un deseo, objetivo o preferencia. De manera general, una elección es una acción llevada a cabo en un contexto de alternativas, cuya explicación en términos de propósito, podría ser o no ser dada. Si se tienen conocimiento previo de las alternativas, las elecciones se pueden predecir (Hauser & Salinas, 2014a; Schall, 2001).

Decisión: cuando se habla de elección, se hace referencia al resultado final, mientras que al hablar de decisión hace alusión a la deliberación que se llevó a cabo respecto a las alternativas. Una característica muy importante de la toma de decisión es que esta no se puede predecir, ya que si es posible predecirla entonces se estaría hablando de una elección (Hauser & Salinas, 2014a).

La toma de decisión es un proceso sensor y motor donde una acción es requerida; dichas decisiones son seleccionadas a lo largo de varias hipótesis competitivas (generalmente 2), donde cada una de ellas representa un estado de nuestro entorno (Gold & Shadlen, 2007); es decir, que este proceso es de tipo integrativo, ya que hace uso de diversos procesos cognitivos a través de los cuales se codifican las relaciones causales entre acciones, consecuencias, costos y se mantienen en la memoria de trabajo junto con un proceso encargado de determinar el valor y/o utilidad de las acciones (Balleine, 2007).

Los elementos de la toma de decisión pueden ser descritos haciendo uso de la teoría de la probabilidad y/o teoría de la decisión. Esta teoría propone que los humanos y animales deciden que hacer en una situación dada evaluando el valor relativo de cada posible respuesta, por lo que quien toma la decisión debe de tener algún conocimiento de dos variables ambientales: la ganancia esperada como resultado del acto ejecutado y la probabilidad de que la ganancia esperada se lleve a cabo (Platt & Glimcher, 1999).

Existen diversos modelos matemáticos para describir la toma de decisión, pero de manera general, este proceso puede ser descrito a partir de un modelo probabilístico, el cual consiste en (Gold & Shadlen, 2007):

- Probabilidad, probabilidad de que la hipótesis H_i sea verdadera antes de obtener cualquier evidencia acerca de esta; lo podemos ver como prejuicios que pueden sesgar nuestro juicio. Probabilidad predicha de ver un determinado estímulo u obtener recompensa en el siguiente ensayo ('Frecuencia de ocurrencia de ensayos anteriores').
- Evidencia, se refiere a la información. Actividad neuronal que representa atributos recordados o inmediatos de un estímulo sensorial. Solo es útil si puede ser

interpretado en términos de probabilidad; valores que la evidencia puede tomar cuando hi es verdadera.

- Valor, es un costo beneficio subjetivo que puede ser atribuido a todas las posibles salidas del proceso de decisión, puede ser manipulado dando retroalimentación explícita y/o recompensa.
- Variable de decisión, que es el conjunto de los puntos anteriores, interpretado por la regla de decisión para producir una elección.

La decisión/se lleva a cabo acumulando evidencia temporal hasta que el valor total sobrepase un criterio subjetivo (conocido como umbral de decisión) asociado con una u otra opción de respuesta (Roberts & Hutcherson, 2019).

Las tareas perceptuales son útiles para estudiar la formación de la decisión, ya que es posible controlar la cantidad y calidad de la evidencia sensorial. Un punto clave al estudiar las bases neurológicas de la toma de decisión es tener en cuenta que las partes cerebrales encargadas de selección y/o planeación de cierta conducta, pueden jugar un papel importante en la toma de decisión (Gold & Shadlen, 2007).

2.5. Decisión Perceptual

Podemos definir la toma de decisión perceptual como el acto de elegir una opción o realizar una acción de un conjunto de alternativas, basándose en la evidencia sensorial; de esta forma, cuando se está tomando una decisión, la información sensorial debe ser interpretada y transformada en una conducta (Heekeren, Marrett, & Ungerleider, 2008; Sterzer, 2016).

Este proceso involucra la asociación de información a través de los sentidos, evaluándola e integrándola de acuerdo al objetivo en cuestión y el estado interno del sujeto, para proceder a una respuesta motora; de manera general, lo que se busca es determinar como una neurona o un conjunto de neuronas asociadas con una modalidad sensorial contribuyen a la conducta (Hauser & Salinas, 2014a; Kiebel, n.d.).

Una de las tareas ampliamente utilizada para estudiar este tipo de decisión, se lleva a cabo mediante la presentación de un conjunto de puntos aleatorios que tienen un movimiento coherente (Yu, 2014). Como su nombre lo indica, en esta tarea el estímulo consiste de un conjunto de puntos, de los cuales, una porción se moverá coherentemente hacia una dirección y el resto se moverá de forma aleatoria; basándose en el estímulo, el sujeto debe elegir la respuesta apropiada indicando la dirección percibida del movimiento coherente en el estímulo; generalmente la respuesta se da a conocer por medio de un movimiento sacádico, y típicamente hay dos posibles direcciones de movimiento (Shadlen & Newsome, 2001; Yu, 2014).

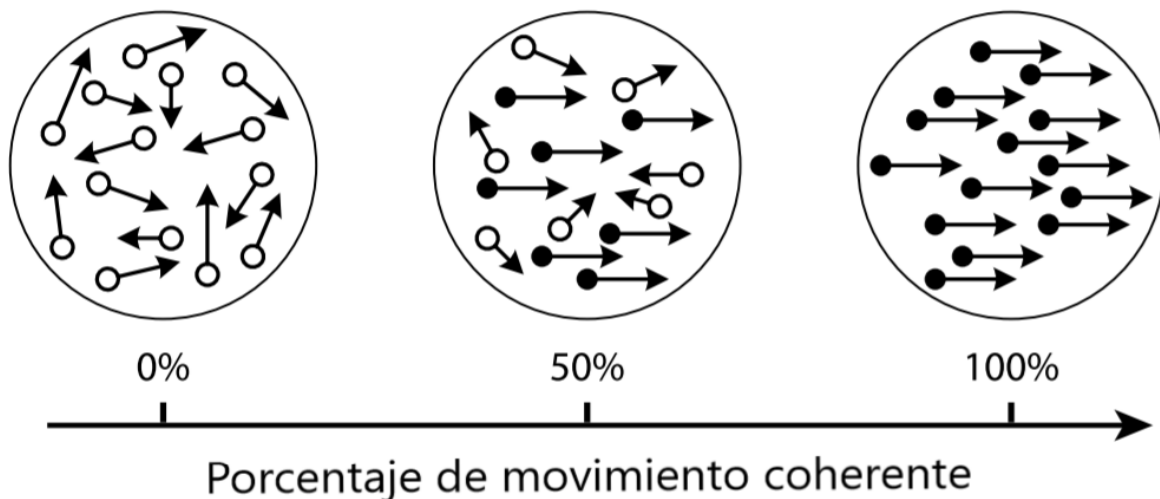


Figura 3.- Se muestra un ejemplo del estímulo presentado en la tarea RDM para diferentes coherencias. Tomada de (Zhang, 2012)

Este tipo de estímulo es muy útil debido a que la dificultad del juicio perceptual puede ser controlado por medio de la variación de la coherencia; además de que hay un área cerebral específica para analizar el movimiento visual. En estudios iniciales, Newsome y colaboradores registraron neuronas en área MT en monos mientras realizaban la tarea de movimiento aleatorio de puntos (RDM, por sus siglas en inglés), realizando dos

observaciones importantes: la primera, conforme los puntos se mueven hacia la derecha o izquierda, un grupo de neuronas era más activo que otro y la diferencia en la actividad variaba en función de la coherencia; la segunda observación hace referencia a una correlación entre la tasa de disparo neuronal y la elección del mono en ensayos individuales, particularmente en aquellos ensayos que eran ambiguos (cero coherencia) (Hauser & Salinas, 2014a).

El desempeño del sujeto en la tarea antes mencionada, generalmente depende de al menos cuatro factores (Hauser & Salinas, 2014b):

- Estímulo sensorial
- Capacidad perceptual del sujeto
- Capacidad motora del sujeto
- Estado interno del sujeto, el cual se puede ver influenciado por la motivación y/o atención; pudiendo afectar la capacidad motora y perceptual.

Estudios anteriores en decisión perceptual en primates no humanos han encontrado dos principios computacionales: el primero, hace referencia a que la decisión perceptual depende de una comparación de conjuntos neuronales sintonizados para cada característica sensorial de cada una de las opciones; y el segundo, indica que la influencia de la información sensorial, que directamente generan la elección no es instantánea, sino acumulada gradualmente a lo largo del tiempo (Hauser & Salinas, 2014b).

2.6. Potencial Local de Campo

Las espigas son generadas cuando una neurona es despolarizada; esta despolarización es provocada por la suma de la entrada de potenciales excitatorios (potenciales post-sinápticos, PSP's) de otras neuronas. Cuando un PSP llega a la dendrita de una neurona genera una corriente eléctrica intracelular primaria; cuando muchas de estas corrientes se suman y pasan un umbral, se genera un potencial de acción. El potencial local de campo (LFP, por sus siglas en inglés) representa las fluctuaciones extracelulares del potencial de membrana de un grupo de neuronas (Werf, 2015); dicha señal refleja potenciales sinápticos, post potenciales y oscilaciones membranales dependientes de voltaje (Fries, Schröder, Roelfsema, Singer, & Engel, 2002).

En particular, cuando se habla de LFP, se está haciendo referencia a una actividad que refleja la suma lineal de varios campos traslapados, mismos que son generados por fuentes (corriente que va del espacio intracelular al extracelular) y sumideros (corriente que va del espacio extracelular al intracelular) distribuidos a lo largo de las células (Buzsáki, n.d.).

Lo más característico de estas señales son los potenciales relacionados a eventos (ERP, por sus siglas en inglés) los cuales tienden a ser muy pequeños, por lo que usualmente se debe promediar la actividad a lo largo de varios ensayos para poder observarlos, y las oscilaciones (Werf, 2015).

Las oscilaciones (Figura 4), también conocidas como actividad neuronal oscilatoria, se puede definir como una actividad sincrónicamente rítmica de un grupo de neuronas (Werf, 2015; "What are Neural Oscillations?," n.d.). Estas oscilaciones son globales en el cerebro, pero varían en fuerza y frecuencia, dependiendo de su localización y naturaleza; y se cree que estas moldean la forma en que el cerebro procesa la información sensorial (Arnal, Poeppel, & Giraud, 2015). De acuerdo a la frecuencia presentada, estas oscilaciones se pueden dividir en 5 o 6 grupos (Freeman & Quian Quiroga, 2013; Uhlhaas et al., 2009):

- Delta (0.5-3.5 Hz). – Son oscilaciones características de estados de sueño profundo, y dependiendo de su morfología, localización y ritmicidad, pueden ser consideradas normales o anormales.
- Theta (4-8 Hz). - En mamíferos esta oscilación es prominente en hipocampo, aunque también ocurre en regiones extra-hipocampales; en roedores han sido asociadas a navegación espacial y a memoria de trabajo. Estas oscilaciones también son típicas mientras se está durmiendo, y juegan un papel importante en la infancia.
- Alfa (8-12 Hz). – Fue el primer ritmo en ser descubierto por Berger en 1924; esta actividad es más prominente en corteza occipital cuando los ojos están cerrados y el sujeto se encuentra relajado.
- Beta (13-30 Hz). – Ocurre en todas las áreas corticales y varias estructuras subcorticales incluyendo núcleos talámicos, hipocampo, ganglios basales y bulbo olfatorio. Se pueden apreciar mejor en regiones centrales y frontales, con menor amplitud que las oscilaciones alfa; son apreciadas de mejor manera durante cálculos mentales, expectantica y tensión a lo largo de toda la corteza.

- Gamma baja (30-60 Hz en humanos y 30-80 Hz en animales). – Esta banda cobro mayor popularidad cuando se propuso que tenía un rol en el enlace entre características de un estímulo y su percepción. Actualmente varios trabajos han mostrado una correlación entre actividad gamma y diferentes procesos sensoriales y cognitivos.
- Gamma alta. (80- 120+ Hz). –También es conocido como ritmo épsilon.
- Mu. – Tiene una frecuencia similar a alfa, pero se localiza principalmente en áreas centrales y está relacionado a funciones motoras.

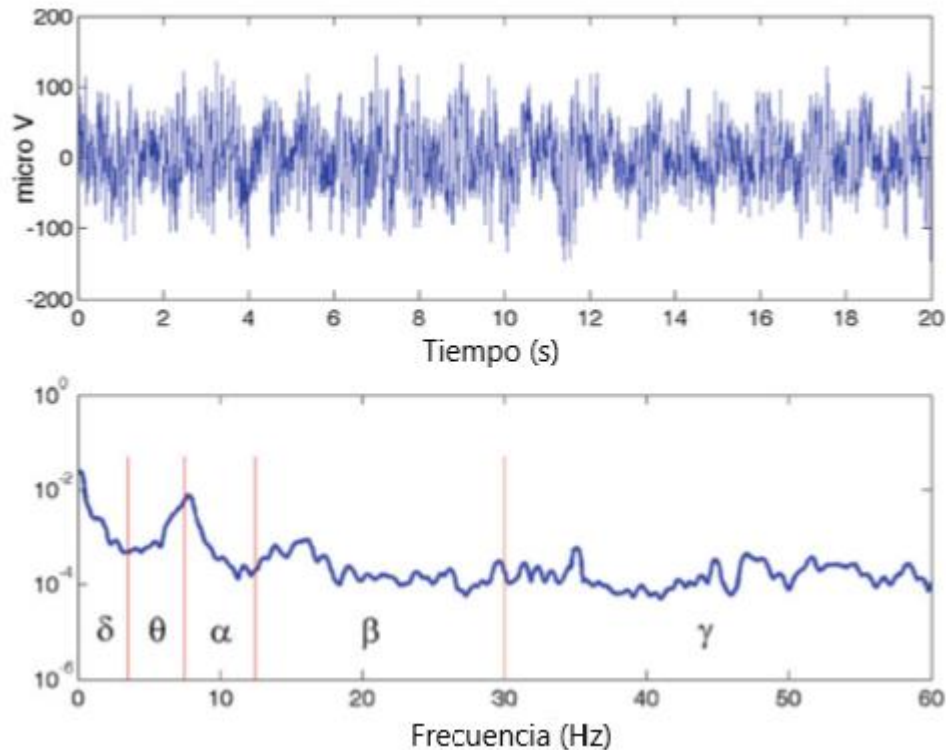


Figura 4.- EEG: En la parte superior de la imagen se muestra un segmento de un electroencefalograma, el cual es muy parecido al LFP; en la parte inferior se muestra el espectro de dicha señal, señalando con líneas verticales rojas el segmento correspondiente a cada una de las bandas mencionadas anteriormente. Tomada de (Freeman & Quiñan Quiroga, 2013).

Otra de las características que está presente tanto en el LFP como en el electroencefalograma, es que su espectro de potencia presenta una forma conocida como $1/f$, es decir que a mayor frecuencia menor potencia (Bédard, Kröger, & Destexhe, 2004).

Esta actividad cerebral, generalmente es adquirida con electrodos que se colocan en la profundidad del cerebro, lo que les confiere una mejor resolución espacial en comparación con aquellos electrodos que se colocan en el cuero cabelludo para adquirir el electroencefalograma (EEG). La señal extracelular adquirida, varía dependiendo del tamaño y lugar del electrodo, es decir, que si tenemos un electrodo muy fino, se estaría adquiriendo la señal de hasta cientos de neuronas (Buzsáki, n.d.).

Se ha mostrado que el LFP contiene una gran variedad de información, así como información estructurada temporalmente que refleja procesos conductuales; dentro de las ventajas de utilizar LFP encontramos (Wong & Pesaran, 2015):

- Es un método más fácil y estable con el cual realizar los registros.
- Capturan procesos sinápticos integrativos.
- Son sensibles a oscilaciones de redes neuronales.

En los últimos años, ha cobrado gran importancia debido a que ha sido demostrado que la estructura temporal de esta señal refleja características relacionadas a aspectos sensoriales y motores modulados por procesos cognitivos; así mismo, provee información adicional con respecto a la actividad neuronal (Scherberger, Jarvis, & Andersen, 2005).

2.7. Trabajo previo

Como se mencionó, los datos que se analizan en este trabajo fueron adquiridos anteriormente y el estudio llevado a cabo en unidades neuronales puede ser consultado en (de Lafuente et al., 2015). A continuación, se mencionan algunos de los resultados obtenidos en dicho trabajo.

Las decisiones pueden ser comunicadas de diversas maneras, como si varias áreas cerebrales tuvieran un papel en la acumulación de evidencia para tomar una decisión; por lo que Lafuente y colaboradores, se preguntan si cada área es reclutada selectivamente de acuerdo a la selección requerida o si todos los circuitos potenciales son reclutados paralelamente. Por esto, hipotetizan que las neuronas en MIP representarán la acumulación de evidencia en una decisión indicada por el movimiento de la mano.

Para esto se entrenaron a dos monos en la tarea de RDM, donde el mono podía indicar su decisión con la mano o el ojo; posteriormente obtuvieron los registros de corteza parietal derecha (MIP y LIP).

Primero se verificó la exactitud del mono, por medio de una función psicométrica, misma que mostró que el desempeño de discriminación fue similar para cuando contestó con el ojo que con la mano (Figura 5). Al comparar la pendiente de las funciones psicométricas se observa que no hay efecto por parte de la modalidad motora empleada.

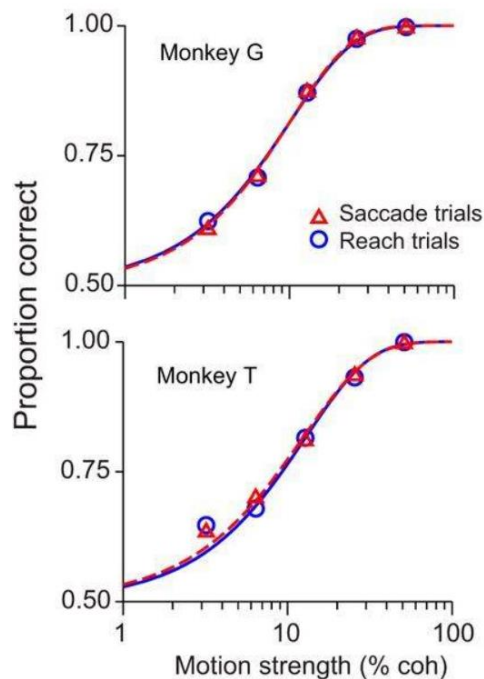


Figura 5.- Análisis de conducta, se muestran las curvas psicométricas para ambos monos y para ambos efectores (en azul para ensayos donde se contestó con la mano y en rojo cuando se contestó con una sacada). En el eje x se muestra la intensidad del estímulo (% de coherencia) y en el eje y la proporción de respuestas correctas. Tomada de (de Lafuente et al., 2015).

Encontraron que las neuronas en MIP representan evidencia sensorial acumulada cuando el mono tiene que contestar con la mano. Dicha actividad, relacionada a decisión fue atenuada en MIP cuando se tenía que efectuar una respuesta con un movimiento sacádico; mientras que las neuronas de LIP respondieron fuertemente para ambas modalidades.

Neuronas en LIP tienen una respuesta visual fuerte al despliegue de los targets, seguido de una actividad sostenida hasta el inicio del estímulo. En cuanto a las neuronas de MIP, no responden al despliegue de los targets (Figura 6).

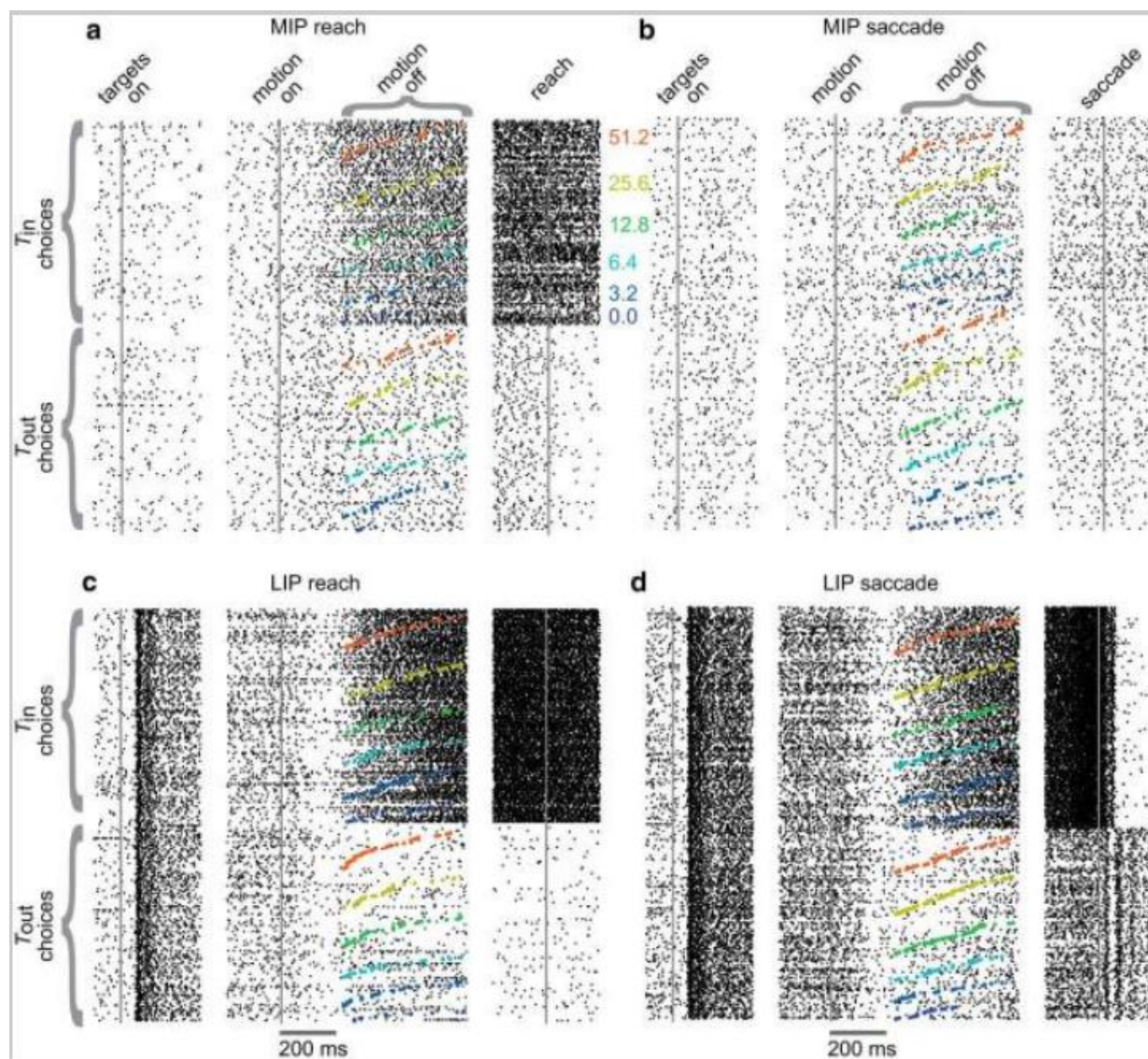


Figura 6.- Respuesta de dos neuronas representativa, los puntos de color señalan el final del estímulo. a, b, respuesta de una neurona de MIP registrada en bloques de alcance y sacada. c, d, respuesta de una neurona de LIP registrada en bloques de alcance y sacada, respectivamente. Tomada de (de Lafuente et al., 2015).

También sugieren que, el mono integra evidencia de intensidad para alcanzar su decisión y hacen esto basándose principalmente en la información presentada temporalmente en el

ensayo. La tasa de disparo presenta un aumento o decremento gradual y una dependencia en fuerza y dirección del estímulo (Figura 7).

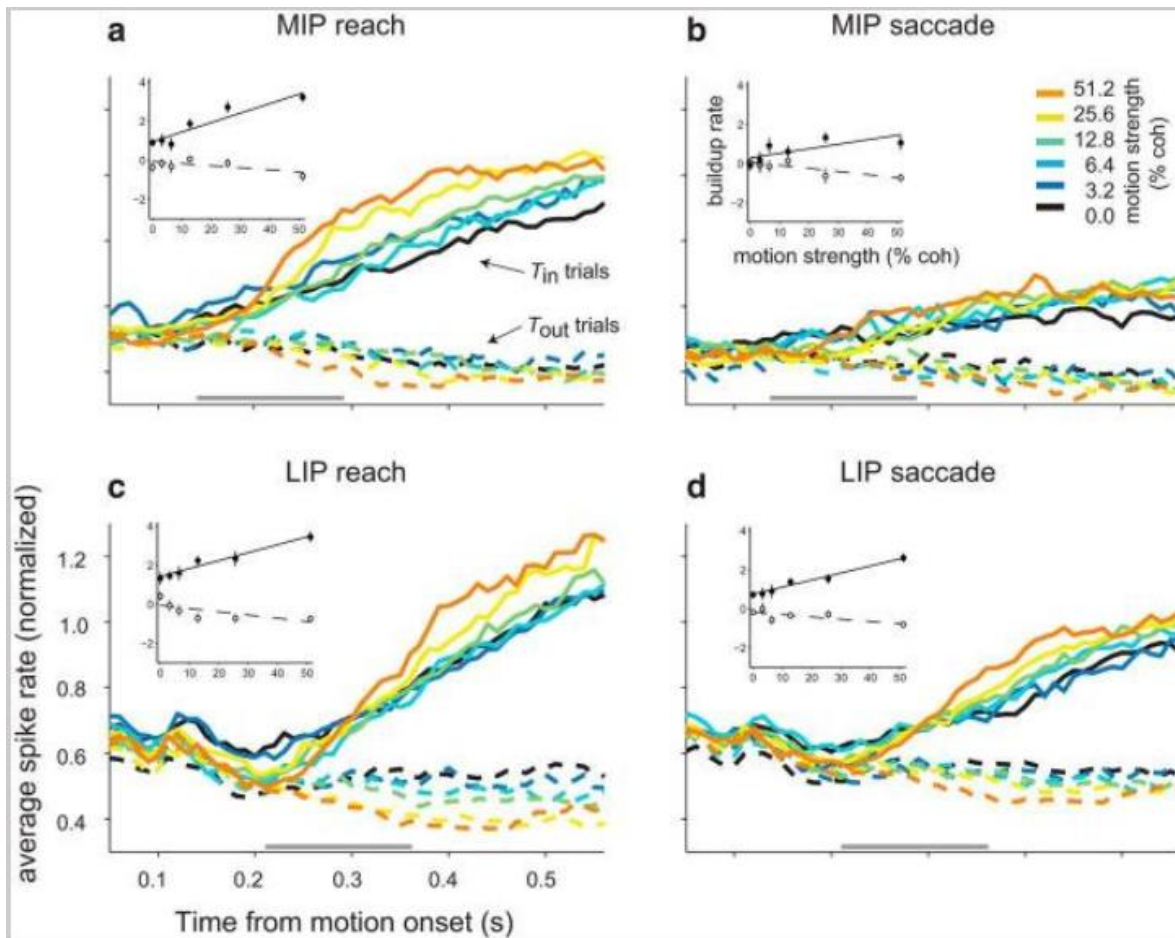


Figura 7.- Evolución de la respuesta neuronal, los ensayos fueron separados por intensidad del estímulo. a, b, muestran la tasa de disparo de neuronas en MIP para mano y ojo respectivamente. c, d, muestran la tasa de disparo de neuronas en LIP para mano y ojo respectivamente. Los inset de las gráficas muestran el efecto de la intensidad del estímulo de los primeros 150 ms de integración (indicado por la barra gris). Tomada de (de Lafuente et al., 2015).

3. JUSTIFICACIÓN

En este proyecto se analizan las señales electrofisiológicas correspondientes a los potenciales locales de campo (LFP, por sus siglas en inglés) de dos monos Rhesus (*macaca mulatta*) mientras realizaban una tarea de toma de decisión.

En general, el análisis que suele hacerse para esta tarea es el de unidades neuronales, por lo cual en este proyecto se propone analizar la señal correspondiente a los potenciales locales de campo; esto con la finalidad de identificar la posible existencia de patrones que correspondan a la toma de decisión perceptual, así como similitudes con lo ya encontrado en el análisis de unidades neuronales.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Caracterizar las modulaciones del potencial local de campo durante una tarea de decisión perceptual, para identificar si esta señal codifica la formación de la decisión y su posible relación con lo encontrado en el análisis neuronal.

4.2. Objetivos Específicos

Filtrar la señal electrofisiológica.

Adquirir los potenciales relacionados a evento.

Ver como se modulan las diferentes frecuencias a lo largo del bloque de decisión.

5. HIPÓTESIS

Los potenciales locales de campo obtenidos del área parietal lateral y medial (LIP y MIP, respectivamente) presentan características que pueden ser asociadas a la toma de decisión; dichas características son observadas como modulaciones temporales de diferentes bandas de frecuencias.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Es importante tener en cuenta que el objetivo de este trabajo es analizar la señal local de campo durante la tarea de movimiento de puntos, y la adquisición de las señales no fue parte de este proyecto; por lo cual, las señales electrofisiológicas con las que se trabaja fueron proporcionadas por parte de los investigadores que realizaron el análisis de unidades neuronales, cuyos resultados pueden ser consultados con mayor detalle en (de Lafuente et al., 2015).

Para investigar las bases neuronales de un proceso de decisión simple, se utilizó una tarea psicofísica que relaciona la representación sensorial de la dirección del movimiento con la representación motora de un movimiento (Shadlen & Newsome, 1996). Para este trabajo, el movimiento se puede llevar a cabo con la mano o con el ojo.

En el trabajo que se usa como base se entrenaron 2 monos Rhesus (*Macaca mulatta*) en la tarea de puntos aleatorios (de Lafuente et al., 2015; Shadlen & Newsome, 2001). Posteriormente fueron registrados en el área medial Intraparietal (MIP) y área lateral Intraparietal (LIP), mientras realizaban la tarea experimental citada anteriormente y descrita a continuación.

La cámara para el registro extracelular fue colocada en la corteza parietal derecha con las siguientes coordenadas: 6 mm posterior al cero de la ‘*ear bar*’, y a 9 mm de la línea medial.

7. TAREA EXPERIMENTAL

La tarea consiste en la presentación, en un monitor, de un conjunto de puntos que se mueven con una determinada coherencia (0%, 3.2%, 6.4%, 12.8%, 25.6%, 51.2%) hacia una dirección dada, durante duración variable; después de que desaparece dicho estímulo hay un retraso antes de pedirle al mono que ejecute su decisión. El mono puede responder con el ojo o con la mano dependiendo de con que efector se le pidió que respondiera.

Un ensayo (Figura 8) inicia cuando el mono fija la vista en un punto pequeño (punto de fijación, FP), mostrado en la parte superior del monitor; y toca con la mano izquierda un círculo de mayor diámetro, colocado en la parte inferior del monitor, debajo del FP. En seguida se presentan en el monitor los targets de decisión, los cuales fueron colocados de tal manera que uno de ellos se encuentre dentro del campo de respuesta de la neurona, y están localizados al lado derecho e izquierdo del punto de fijación; posteriormente hay un retraso de entre 500 a 1000 milisegundos, seguido de la presentación del estímulo visual (puntos moviéndose aleatoriamente, con un determinado porcentaje de coherencia), el cual puede durar de 240 a 1000 milisegundo, antes de que el estímulo sea apagado. Posteriormente, los monos deben mantener la fijación del ojo y de la mano de 500 a 1000 ms, y en seguida se les da la indicación de cuál es el efector (ojo o mano) con el que deben responder. Al momento de responder, el mono debe de mantener en el punto de fijación el efector con el cual no debe de responder.

Para más información de la tarea consultar (de Lafuente et al., 2015).

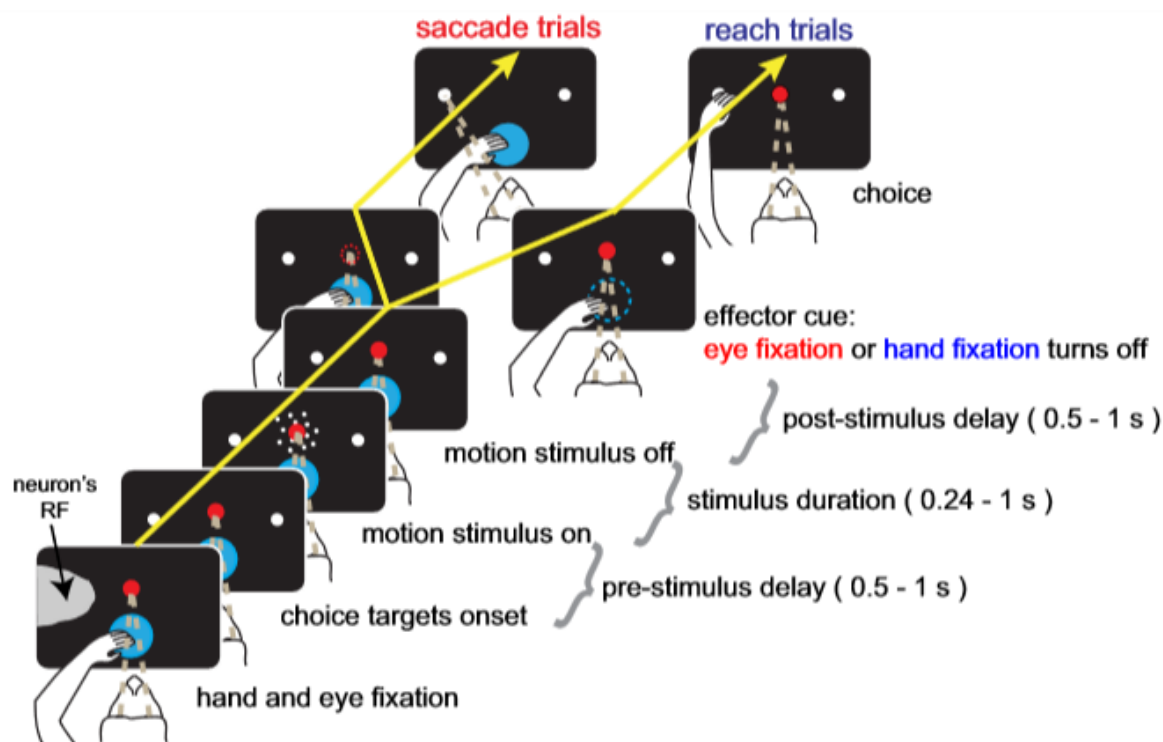


Figura 8.- Etapas por las cuales se conforma un ensayo de la tarea de puntos aleatorios Tomada de (de Lafuente et al., 2015).

8. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

Para el procesamiento de la señal se hace uso del software MATLAB versión R2015a, así como como los siguientes toolboxes: chronux (Bokil, Andrews, Kulkarni, Mehta, & Mitra, 2010), y fieldtrip (Oostenveld, Fries, Maris, & Schoffelen, 2011).

A continuación, se muestra un diagrama de flujo (Figura 6) con los pasos que se siguieron para el análisis de los datos correspondientes al potencial local de campo.



Figura 9.- Diagrama de flujo de cómo se llevará a cabo el análisis de los LFP's.

9. RESULTADOS

En esta sección se mostrarán las imágenes obtenidas al aplicar los pasos a partir del número 4 del diagrama mostrado en la figura 9.

Para visualizar de una mejor manera los resultados obtenidos, en esta sección solo se presentarán los datos correspondientes a aciertos de cada una de las áreas registradas con su respectivo efector, es decir, para LIP se muestra cuando el mono contestó con el ojo y para MIP cuando contestó con la mano.

Los resultados para cuando fueron respuestas correctas y se registró en LIP con efector mano y para cuando se registró MIP con efector ojo se muestran en el anexo A.

Como se ha mencionada anteriormente, los LFP's son señales de voltaje que varían en el tiempo, y la decodificación de estas señales se puede llevar a cabo utilizando la variación que tiene en el tiempo o transformando la señal en un conjunto de características. Uno de los métodos más empleados dentro del grupo de transformación, es la técnica espectral de tiempo-frecuencia (Wong & Pesaran, 2015).

9.1. Raster Plot

Esta técnica es una forma fácil de apreciar cómo se ven los distintos ensayos a lo largo de una sesión, es decir, se puede apreciar la variabilidad de la señal ensayo a ensayo; así mismo nos permiten identificar si la señal tiene alguna tendencia (Figura 10, 11). En el eje x de estas gráficas se muestra el tiempo y el eje y corresponde a un ensayo.

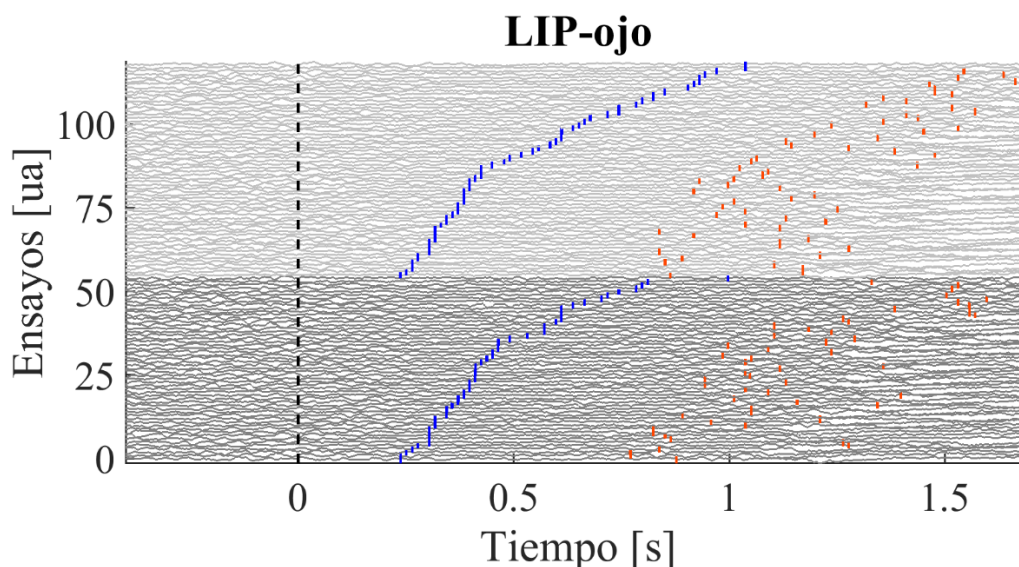


Figura 10.- Raster plot: Muestra un ejemplo de los ensayos correspondientes a cuando el efector empleado fue el ojo y el área de registro fue LIP. Los ensayos se encuentran alineados a la presentación del estímulo (línea negra punteada); las marcas azules indican el fin de la presentación del estímulo y las marcas naranjas indican el inicio del movimiento.

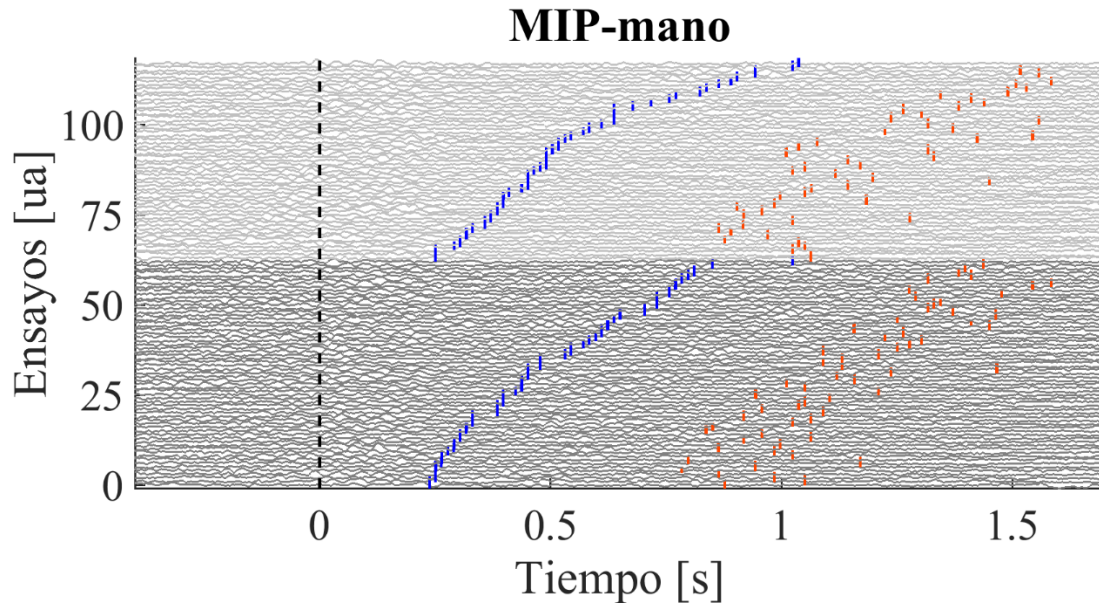


Figura 11.-Raster plot: Muestra un ejemplo de los ensayos correspondientes a cuando el efector empleado fue la mano y el área de registro fue MIP. Los ensayos se encuentran alineados a la presentación del estímulo (línea negra punteada); las marcas azules indican el fin de la presentación del estímulo y las marcas naranjas indican el inicio del movimiento.

En las gráficas anteriores se puede apreciar que después de la presentación del estímulo hay un pequeño aumento de amplitud, este aumento de amplitud es más notorio en la figura 11, seguido de este aumento hay una disminución de la misma.

9.2. Potenciales Relacionados a Evento (ERP)

Es una técnica en el dominio temporal que consiste básicamente en promediar la señal, es ampliamente utilizada ya que mejora o realza aquellas señales que están ligadas a un periodo de tiempo específico. Los ERP son voltajes muy pequeños y surgen en respuesta a eventos o estímulos específicos (Figura 12 y 13).

9.2.1. Señal separada por dirección del estímulo

En el eje x de estas gráficas se muestra el tiempo en segundos (s) y en el eje y se muestra la amplitud en milivolts (mV).

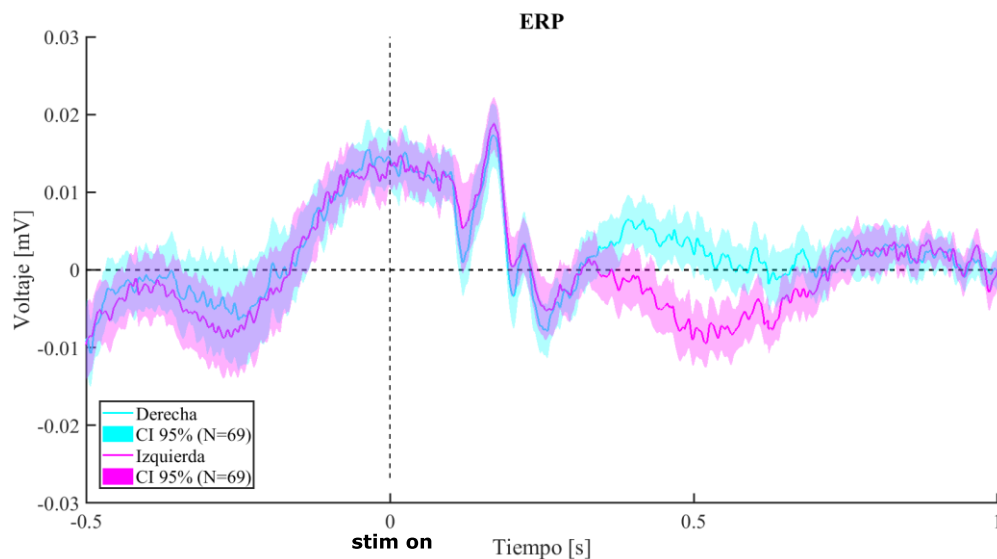


Figura 12.- ERP para LIP - ojo, se encuentran separados para cuando el estímulo se movió hacia la derecha (azul) y a la izquierda (rosa). Las señales se encuentran alineadas a la presentación del estímulo.

En la figura 12 se puede apreciar que hay un aumento de amplitud en la señal, independientemente de la dirección del estímulo, alrededor de los 200 ms, indicándonos que LIP es un área sensitiva al tipo de estímulo presentado; también es notable que tanto la señal correspondiente a izquierda y a derecha siguen el mismo curso hasta alrededor de los 400 ms, donde hay una notable separación.

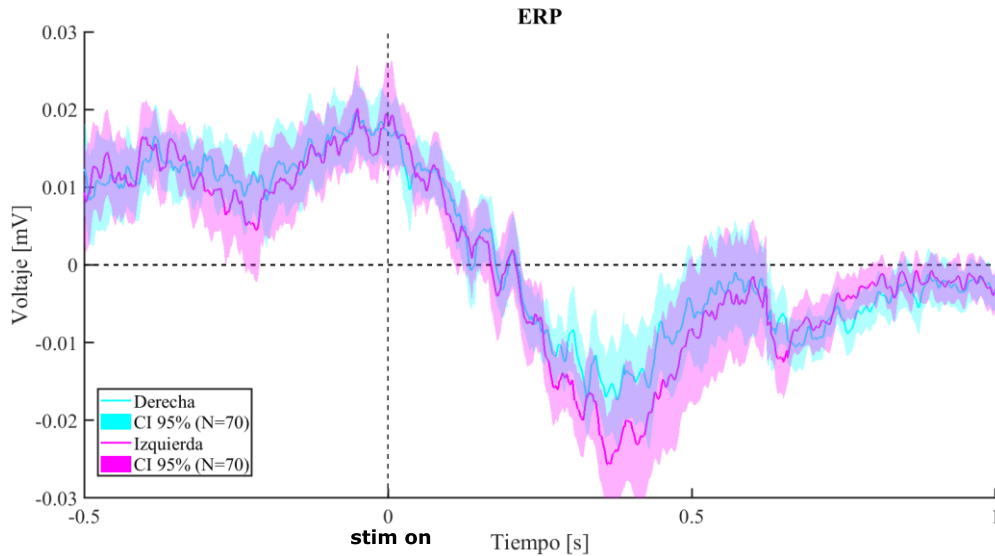


Figura 13.- ERP para MIP - mano, se encuentran separados para cuando el estímulo se movió hacia la derecha (línea azul) y a la izquierda (línea rosa). Las señales se encuentran alineadas a la presentación del estímulo.

En la figura 13 la señal derecha e izquierda siguen un curso temporal muy similar y alrededor de los 1500 ms hay una muy ligera separación de las señales en comparación con la que se puede observar en la figura 12. Otro de los aspectos notables de esta figura es que no hay un aumento notable en la potencia de la señal después de la presentación del estímulo (línea negra punteada de la imagen).

Como se mencionó anteriormente, se observa una dependencia de la señal a la dirección del estímulo, siendo dicha dependencia más evidente para LIP que para MIP. Por esto, nos preguntamos si esta dependencia se mantenía, aunque la señal fuera separada de acuerdo a la coherencia y si la señal mostraba una doble dependencia, hacia la dirección y coherencia del estímulo.

Por lo anterior se separa la señal de acuerdo a la dirección y coherencia del estímulo, obteniendo como resultado las figuras 14 y 15.

Así mismo se observa un aumento gradual de la amplitud en la señal, antes de la presentación del estímulo, por lo cual también se realizó un ajuste a este segmento de la señal con la finalidad de identificar diferencias entre aciertos y errores y ver si esta pendiente está involucrada con un proceso de atención, teniendo influencia en el resultado final del ensayo (acierto/ error); estos resultados son mostrados en las figuras 16 y 17.

9.2.2. Ajuste de la señal separada por coherencia y dirección del estímulo

Para identificar el punto en el tiempo a partir del cual se iba a tomar el segmento al cual se iba a realizar el ajuste se utilizó la función ‘findchangepts’ de Matlab que sirve para identificar cambios abruptos en una señal; y para determinar la duración del segmento se identifica hasta donde la señal sigue teniendo una clara separación.

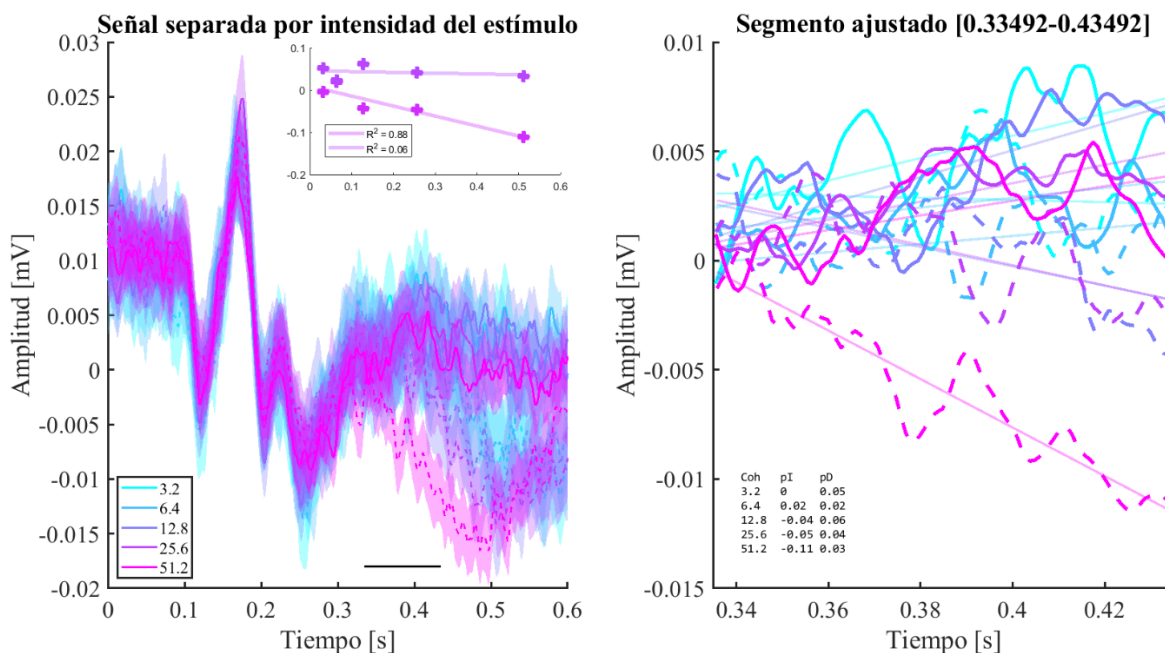


Figura 14.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para LIP-ojo, del lado izquierdo vemos la señal separada de acuerdo a la dirección y coherencia del estímulo, las líneas continuas corresponden a cuando el estímulo fue al lado izquierdo (preferente) y las punteadas a la derecha (no preferente); los diferentes colores indican la coherencia del estímulo, la línea negra inferior horizontal indica el segmento ajustado (el cual se muestra en la imagen de la derecha). En el inset de la imagen se muestra la relación entre coherencia (eje x) y pendiente del segmento ajustado (eje y). La imagen del lado derecho muestra un acercamiento al segmento de la señal al cual se le realizó el ajuste.

En la figura anterior (figura 14) se observa que para LIP – ojo la dependencia de la señal a la dirección del estímulo se sigue manteniendo, sin embargo, la dependencia de la señal a la coherencia o intensidad del estímulo es bastante clara para cuando el estímulo va a la derecha, pero para cuando va a la izquierda no.

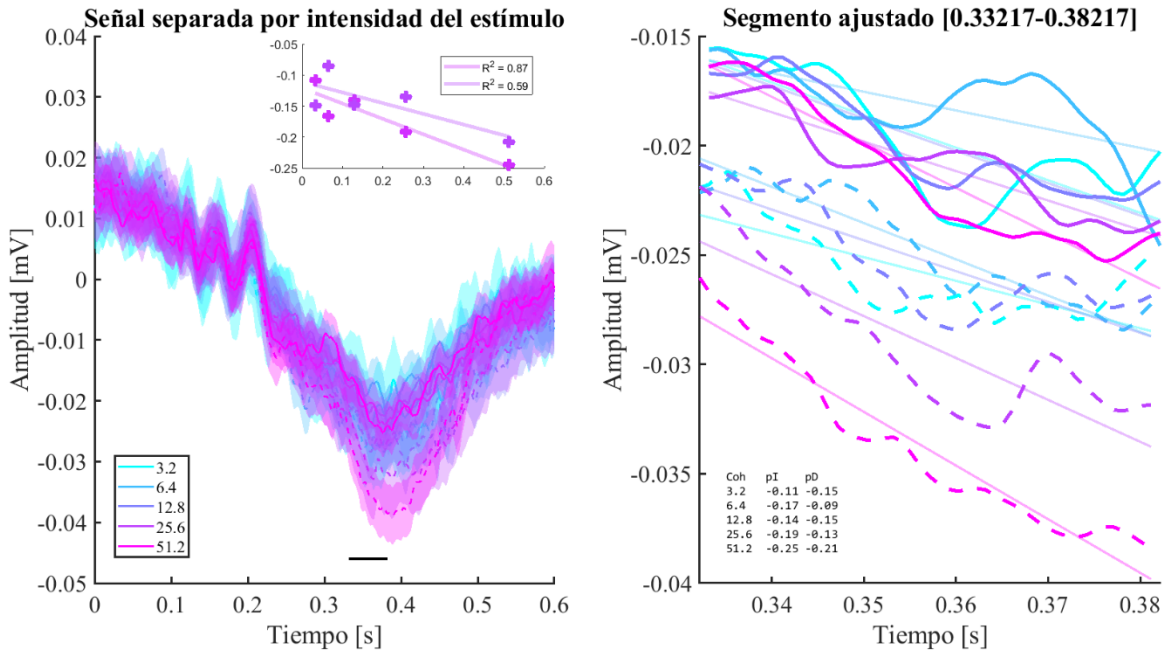


Figura 15.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para MIP-mano, del lado izquierdo vemos la señal separada de acuerdo a la dirección y coherencia del estímulo, las líneas continuas corresponden a cuando el estímulo fue al lado izquierdo (preferente) y las punteadas a la derecha (no preferente); los diferentes colores indican la coherencia del estímulo, la línea negra inferior horizontal indica el segmento ajustado (el cual se muestra en la imagen de la derecha). En el inset de la imagen se muestra la relación entre coherencia (eje x) y pendiente del segmento ajustado (eje y). La imagen del lado derecho muestra un acercamiento al segmento de la señal al cual se le realizó el ajuste.

Al igual que en la figura 14, en 15 se observa que la dependencia de la señal a la dirección del estímulo se mantiene para la señal correspondiente a MIP-mano, así mismo la dependencia a la coherencia del estímulo se observa para cuando la dirección del estímulo fue derecha; esta última, no es tan clara para cuando el estímulo fue a la izquierda.

Esta dependencia de la señal a la dirección y coherencia del estímulo también fue observada en el análisis neuronal.

9.2.3. Ajuste antes de la presentación del estímulo

Para realiza este ajuste, la señal se encuentra separada de acuerdo a la dirección del estímulo y si fue acierto o error; de estas señales se toma un segmento de 200 milisegundos antes de la presentación del estímulo y se realiza un ajuste lineal. Se seleccionó este intervalo temporal ya que es a partir de este tiempo donde la señal comienza a aumentar su amplitud gradualmente.

Esta pendiente que se presenta antes de la estimulación podría estar indicando un proceso de atención, y de haber diferencia entre ensayos correctos y erróneos nos podría indicar el motivo de los últimos.

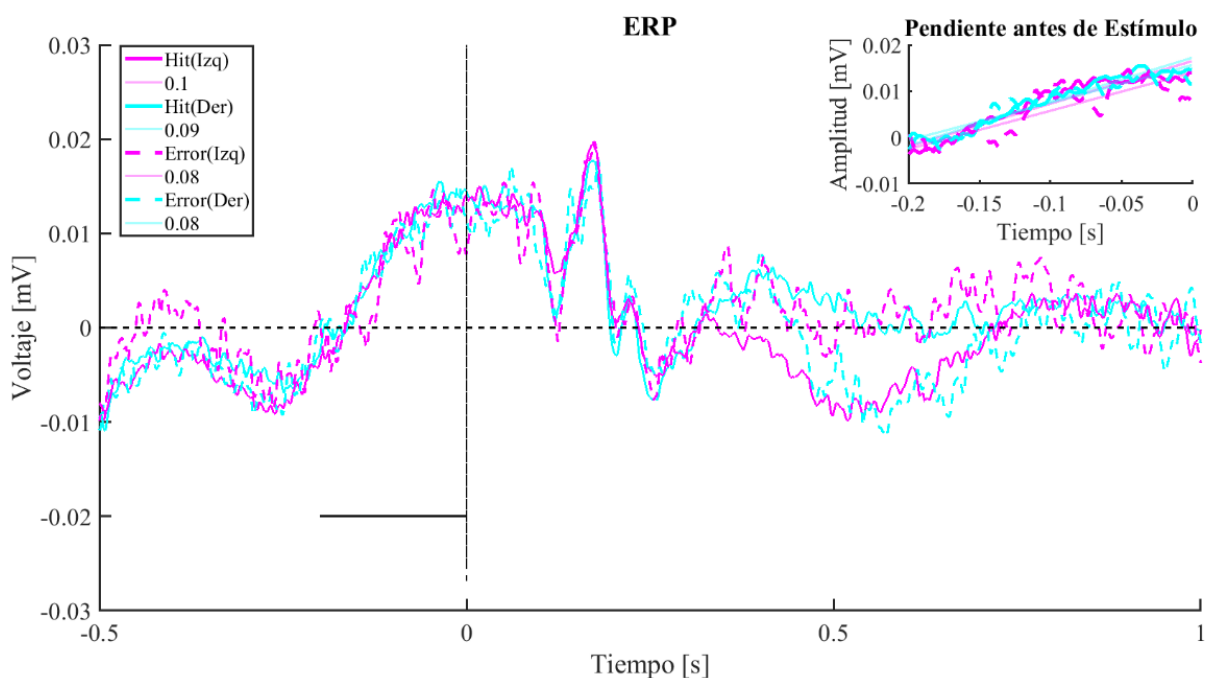


Figura 16.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para LIP-ojo, la señal se encuentra separada de acuerdo a la dirección del estímulo (izquierda color magenta y derecha color cyan) y si la respuesta del ensayo fue correcta (líneas continuas) o errónea (líneas punteadas); la línea horizontal negra muestra el segmento al cual se realizó el ajuste. En el inset de la gráfica se muestra el segmento de la señal ajustado.

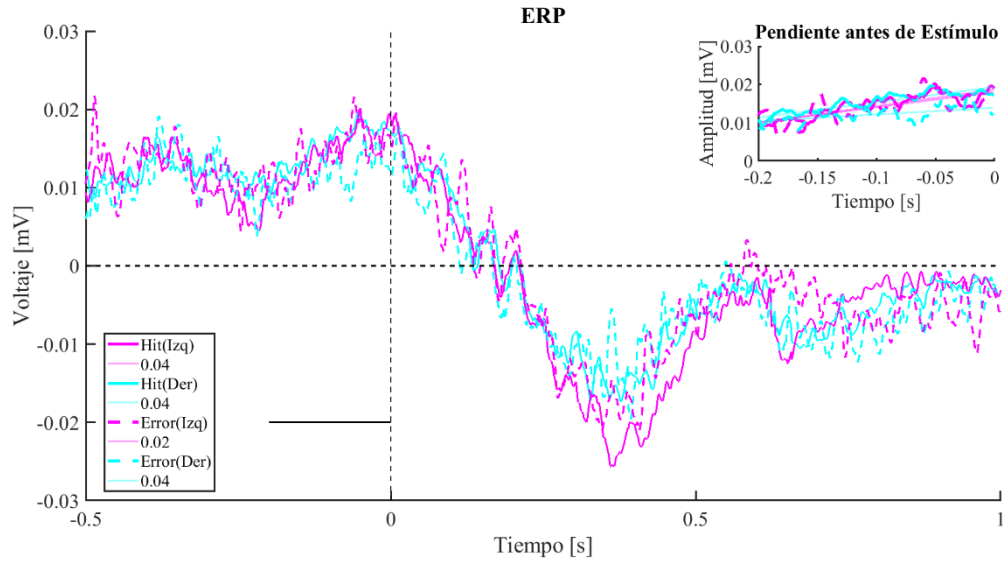


Figura 17.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para MIP-mano, la señal se encuentra separada de acuerdo a la dirección del estímulo (izquierda color magenta y derecha color cyan) y si la respuesta del ensayo fue correcta (líneas continuas) o errónea (líneas punteadas); la línea horizontal negra muestra el segmento al cual se realizó el ajuste. En el inset de la gráfica se muestra el segmento de la señal ajustado.

De acuerdo con las imágenes mostradas anteriormente, no hay diferencia en el segmento correspondiente a los 200 milisegundos antes de la presentación del estímulo, lo que podría indicar que los errores cometidos por los animales no son debido a falta de atención a la tarea, más bien son errores honestos, es decir, el animal realmente no sabe o le es complicado identificar la dirección del estímulo (en este caso).

9.3. Espectrograma y Dinámica

Los espectrogramas son una técnica de caracterizar los LFP's, este método nos permite obtener información tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia (Ramos-Aguilar, Olvera-López, & Olmos-Pineda, n.d.), es decir, nos dice como varían las diferentes frecuencias a lo largo del tiempo, en este caso, la duración del ensayo.

Los espectrogramas mostrados a continuación son el promedio de todas las sesiones, en el eje x se muestra el tiempo, en y la frecuencia y la tercera dimensión (color) representa la amplitud (contenido espectral).

De manera similar a las señales electroencefalográficas, los LFP's pueden ser descritos por medio de bandas de frecuencia, por lo que cuando hablamos de dinámica en este trabajo, nos referimos a como es el curso de estas bandas a lo largo del ensayo. Las bandas que se analizan son:

- Alfa (8 a 12 Hz)
- Beta (12 a 30 Hz)
- Gamma (30 a 70 Hz)

En las figuras que corresponden a la dinámica, se puede apreciar en el eje x el tiempo, en el eje y la amplitud de la banda y cada uno de los colores representa una banda.

Las figuras que a continuación se presentan (figura 18 y 20), están divididas en cuatro secciones; en las dos superiores (a, b) se muestran los espectrogramas de la señal separada de acuerdo a la dirección del estímulo, en c se muestra la dinámica de las tres bandas mencionadas anteriormente y en d se muestra el raster plot obtenido por Lafuente y colaboradores de una neurona característica.

La actividad presentada en los espectrogramas se encuentra normalizada respecto a la duración del segmento de toma de decisión, que está definido como aquel periodo que se encuentra 200 ms antes de la presentación del estímulo y una muestra antes de que se presente la pista para que el animal emita su respuesta.

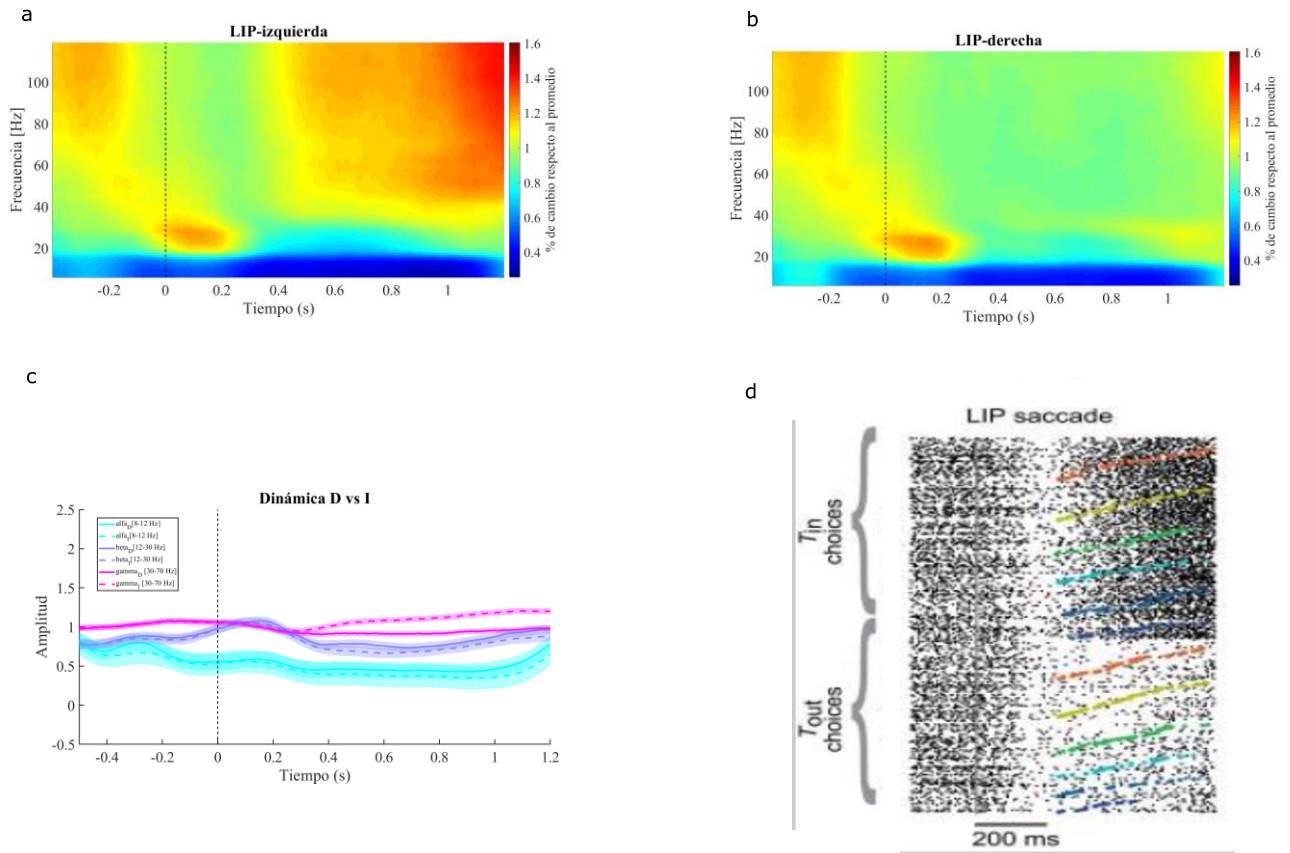


Figura 18.- Espectrograma para LIP-ojo. a) cuando el estímulo va a la izquierda, b) cuando el estímulo va a la derecha. En c) se muestra la dinámica de las bandas igualmente separadas para cuando el estímulo va a la derecha (línea continua) e izquierda (línea punteada), d) raster plot de una neurona característica de LIP para ensayos donde se contestó con un movimiento sacádico.

En alfa se ve una disminución de la amplitud respecto al promedio, esta disminución dura el segmento completo de toma de; sin embargo, beta muestra un aumento de amplitud seguido de la presentación del estímulo seguido de una disminución de la misma.

Finalmente, gamma pareciera que tiene una mayor amplitud antes de la presentación del estímulo, seguido de un decremento después de la presentación del estímulo y finalmente un aumento notorio alrededor de los 1500 ms, esta actividad es similar a la actividad presentada por la neurona característica (18 d).

Dado que gamma es la banda donde visualmente hay mayor diferencia, se realizó la comparación de esta banda a lo largo de las diferentes sesiones y se realizó una prueba estadística para determinar si hay diferencias significativas, obteniendo como resultado la figura 19 para LIP-ojo; en dicha figura podemos observar que si hay diferencia significativa en gamma cuando se separa la señal de acuerdo a la dirección del estímulo, de la misma manera es notorio que los datos correspondientes a cuando el estímulo fue a la derecha son menos dispersos que cuando el estímulo fue a la izquierda.

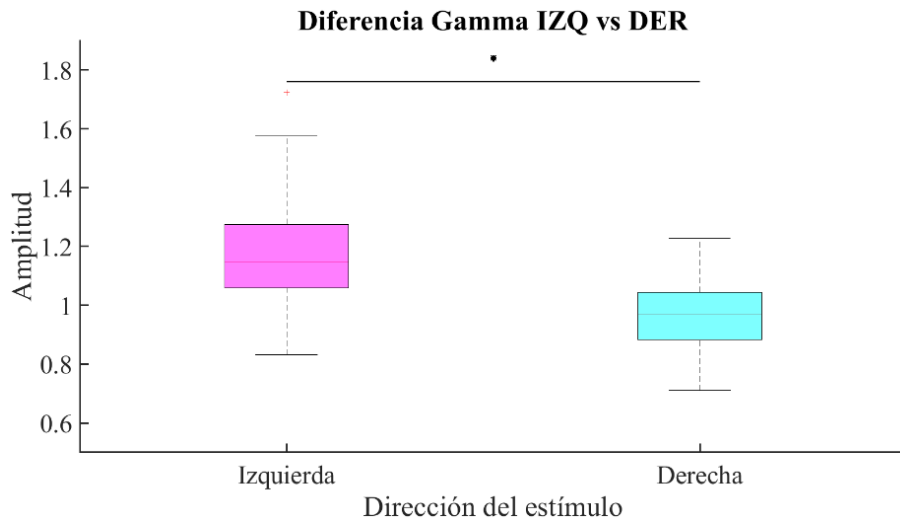


Figura 19.- Gráfica de caja y eje comparando la banda de frecuencia gamma, para LIP-ojo, de acuerdo a la dirección del estímulo; en magenta para cuando el estímulo fue a la izquierda y en cyan cuando fue a la derecha.

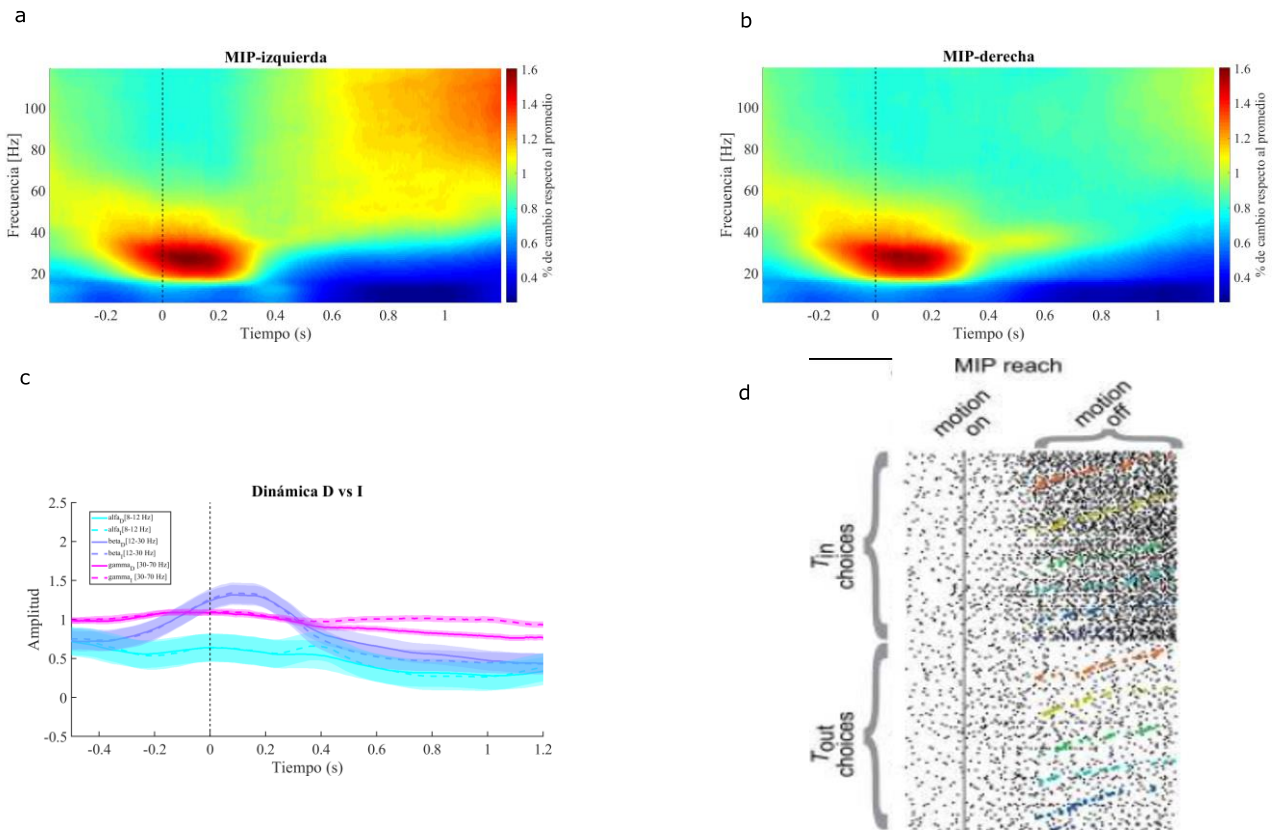


Figura 20.- Espectrograma para MIP-mano. a) cuando el estímulo va a la izquierda, b) cuando el estímulo va a la derecha. En c) se muestra la dinámica de las bandas igualmente separadas para cuando el estímulo va a la derecha (línea continua) e izquierda (línea punteada), d) raster plot de una neurona característica de MIP para ensayos donde se contestó con un movimiento de alcance.

Al igual que en la figura 18 se ve que alfa presenta una amplitud baja respecto al promedio a lo largo del segmento de toma de decisión; de la misma forma, beta presenta un aumento muy notorio de actividad seguido de la presentación del estímulo.

En cuanto a gamma, esta, presenta una actividad promedio a lo largo de todo el segmento cuando el estímulo va hacia la derecha, mientras que cuando el estímulo va a la izquierda hay un aumento en la amplitud alrededor de los 600 ms; esta actividad es similar a la obtenida en el raster plot de una neurona característica de MIP para ensayos de alcance (figura 20 d).

De los espectrogramas y dinámica mostrados anteriormente se puede concluir que las tres bandas mencionadas en un inicio pueden en conjunto describir el segmento de toma de decisión, además de que gamma emula la actividad neuronal, indicando que probablemente esta banda se encuentra codificando la toma de decisión o plan motor del mono.

En la figura 21 se muestra la gráfica de caja y eje para MIP-mano, donde observamos que también hay diferencia significativa entre este grupo de datos; y al igual que en la figura 19 los datos correspondientes a cuando el estímulo fue a la derecha son menos dispersos que cuando el estímulo fue a la izquierda.

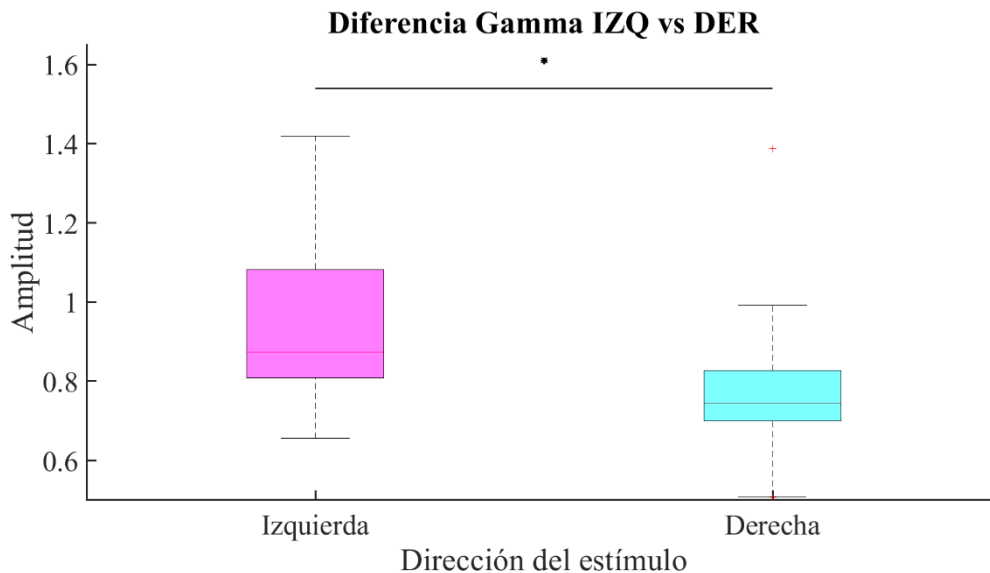


Figura 21.- Gráfica de caja y eje comparando la banda de frecuencia gamma, para MIP-mano, de acuerdo a la dirección del estímulo; en magenta para cuando el estímulo fue a la izquierda y en cian cuando fue a la derecha.

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de este proyecto consistió en la caracterización de los potenciales locales de campo durante una tarea conocida como movimiento aleatorio de un conjunto de puntos (RDM); esto con la finalidad de identificar posibles patrones que estuvieran presentes en la señal de campo que codificaran para toma de decisión. De la misma forma se compararon los resultados con los obtenidos por Lafuente y colaboradores en el análisis neuronal, esto con la finalidad de identificar visualmente similitudes y diferencias entre dichas señales.

Para llevar a cabo el presente proyecto, se hizo uso de técnicas en el dominio del tiempo y tiempo-frecuencias; dichas técnicas fueron utilizadas con la señal separada de acuerdo a la dirección y coherencia del estímulo.

Con las técnicas temporales se obtuvieron los potenciales relacionados a evento (ERP) observándose las siguientes particularidades

- Dependencia de la señal a la dirección del estímulo
- Pico alrededor de los 200 milisegundos
- Dependencia de la señal a la coherencia del estímulo
- Una pendiente antes de la presentación del estímulo

En cuanto a la dependencia de la señal a la dirección del estímulo, es una característica muy notable para todas las condiciones en el análisis neuronal, mientras que, en los potenciales locales de campo, dicha dependencia es más evidente para los ensayos correspondientes a movimientos sacádicos en comparación con los movimientos de alcance; dicha separación o dependencia de la señal ocurre alrededor de 300 milisegundos después de la presentación del estímulo. Esta dependencia de la señal podría estar indicando el plan motor o decisión del animal.

El pico que se ve alrededor de 200 milisegundos después de la presentación del estímulo, es un potencial relacionado a evento conocido, este puede ocurrir dentro de un rango de tiempo que va de 150 a 250 milisegundo aproximadamente. Este pico generalmente ocurre después de la presentación de algún estímulo objetivo; comúnmente es auditivo, aunque también hay respuesta después de eventos somatosensoriales o visuales (“P200 - NeuRA Library,” n.d.). Este potencial, refleja el procesamiento perceptual y está asociado con atención (Bourisly & Shuaib, 2018).

La dependencia de la señal a la coherencia del estímulo es una característica que se aprecia tanto en el análisis neuronal como en los LFP's; esta dependencia en el análisis neuronal es clara para cuando la dirección del estímulo es hacia el lado preferente como al no preferente, sin embargo, la dependencia que muestra la señal del campo a la coherencia solo es evidente para cuando el estímulo fue al lado preferente. Otra diferencia muy resaltante entre las señales es la inversión de las mismas, con esto nos referimos a que en el caso del análisis de neuronas únicas, se aprecia como se separa la señal, siendo aquella con el nivel de coherencia más alto la que tiene una mayor pendiente y la de menor coherencia una menor pendiente; sin embargo en los LFP's las pendientes obtenidas son negativas, siendo la pendiente más negativa de la

señal con mayor coherencia y la pendiente menos negativa para la señal con menor coherencia. Por la anterior, se podría decir que las señales están inversamente relacionadas, esto puede ser debido al origen de los LFP's, de los cuales se cree provienen principalmente de la actividad dendrítica, por lo que proveen una medida de la entrada a, y procesamiento local en un área (Nir et al., 2007). Otra posible razón del porque hay una relación inversa entre las señales, puede ser debido al sitio de registro, es decir si el electrodo se encuentra cerca de una fuente (locaciones, donde el flujo de cargas positivas sale al medio extracelular) o sumidero (entrada de cationes del medio extracelular al intracelular) (Buzsáki, Anastassiou, & Koch, 2012).

Finalmente, para esta técnica de caracterización temporal, se realizó un ajuste en el segmento que comprende 200 milisegundos antes de la presentación del estímulo, ya que este segmento podría estar indicando algún aspecto relacionado con la atención. Por lo que, si las pendientes en ensayos correctos e incorrectos fueran diferentes, nos podría dar una alternativa del por qué los animales están cometiendo errores y estarían relacionados a la falta de atención; sin embargo, este no fue el caso, de tal forma que podemos afirmar que los ensayos incorrectos son errores honestos, es decir que el animal no sabe realmente cual es la dirección del estímulo.

Como se mencionó anteriormente, los métodos de caracterización en el orden de tiempo-frecuencia, nos permiten ver como se modulan un conjunto de frecuencias a lo largo de un segmento temporal, para este trabajo se utilizó el toolbox de Matlab 'chronux', el cual hace uso de multitapers para obtener los espectrogramas. Con esta técnica se observaron las siguientes características:

- 3 bandas de frecuencia
- Dependencia de la señal a la dirección del estímulo

Al obtener los espectrogramas para las diferentes condiciones del estudio, nos percatamos que el bloque de toma de decisión, el cual va desde 200 milisegundos antes de la presentación del estímulo hasta antes de indicarle al animal que puede contestar, presenta modulación de tres bandas de frecuencia: alfa (8 a 12 Hz), beta (12 a 30 Hz) y gamma (30 a 70 Hz); siendo alfa y beta quienes presentan un curso muy similar en todas las condiciones del estudio.

Alfa presenta una potencia menor respecto al promedio a lo largo de todo el ensayo, mientras beta tiene una actividad que oscila en el promedio antes de la presentación del estímulo y aumenta alrededor de los 150 ms para posteriormente disminuir, este aumento de potencia puede ser debido al estímulo sensorial presentado.

Al observar el comportamiento de gamma en los espectrogramas y los raster plot de las neuronas representativas, nos percatamos de que esta banda se encontraba emulando la actividad neuronal para cada una de las condiciones.

Es muy evidente la diferencia existente en la banda gama después de la presentación del estímulo, ya que cuando la respuesta del animal fue del lado preferente la actividad de dicha banda se ve aumentada respecto al promedio, es decir, hay mayor actividad cuando el estímulo va a la izquierda. Esto muy probablemente puede ser debido a que la cámara de

registro se colocó en el hemisferio derecho y la respuesta se daba con la mano derecha, debido a que no hay registros en el hemisferio izquierdo, no se pueden comparar los efectos contra e ipsilaterales.

Para identificar si los resultados obtenidos se encontraban altamente influenciados por la información que aportaba la espiga a la señal, se analizó el canal adyacente, para el cual se observó:

Los ERP obtenidos siguen un curso similar, mostrando el pico característico en LIP seguido de la presentación del estímulo, sin embargo, la separación de las señales que ocurre alrededor de los 300 ms ocurre para ambas áreas y efectores; siendo estas separaciones más evidentes cuando el efector empleado fue el ojo.

A diferencia de los espectrogramas obtenidos del canal que contiene la espiga, estos presentan una mayor potencia en beta para LIP efector mano en comparación con LIP efector ojo; sin embargo, se sigue manteniendo lo observado en MIP, la cual sigue presentado una mayor potencia en gamma, para cuando el efector empleado fue la mano.

En cuanto a la separación de la señal de acuerdo a la intensidad del estímulo, el gradiente observado en el canal de la espiga no es tan claro en el canal adyacente, además de que cuando se separa también de acuerdo a la dirección del estímulo no hay una segregación en la señal obtenida.

Finalmente, la diferencia observada en los espectrogramas en la banda de frecuencia gamma también se observa en ambas áreas, excepto en LIP cuando el efector fue el ojo, donde gamma presenta una actividad similar independientemente de la dirección del estímulo.

11. CONCLUSIONES

Los potenciales relacionados a evento presentan varias características en el bloque de toma de decisión, dentro de las más resaltables se encuentran:

- Pendiente antes de la presentación del estímulo, probablemente asociada a atención.
- Potencial en 200 ms, asociado al estímulo
- Dependencia de la señal a la dirección del estímulo, lo cual estaría codificando el plan motor o toma de decisión del animal.

De la misma forma, podemos afirmar que en el análisis tiempo-frecuencia diferentes etapas del bloque de toma de decisión parecen estar moduladas por diferentes bandas:

- Frecuencias menores a 20 Hz asociadas a la etapa antes de la estimulación.
- Frecuencias de 20 a 40 Hz parece que están asociadas a la etapa de estimulación.
- Frecuencias mayores a 40 Hz (dentro del rango de gamma) presentan una modulación similar a la respuesta neuronal.

Además de que las diferentes etapas se encuentran moduladas por diferentes frecuencias, también se encontró que gamma probablemente se encuentre codificando la decisión, aparte de que es esta banda donde hay una relación entre espiga-LFP.

REFERENCIAS

- Arnal, L. H., Poeppel, D., & Giraud, A. L. (2015). A Neurophysiological Perspective on Speech Processing in “The Neurobiology of Language.” In *Neurobiology of Language* (pp. 463–478). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00038-9>
- Balleine, B. W. (2007, August 1). The neural basis of choice and decision making. *Journal of Neuroscience*, Vol. 27, pp. 8159–8160. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1939-07.2007>
- Bédard, C., Kröger, H., & Destexhe, A. (2004). Modeling Extracellular Field Potentials and the Frequency-Filtering Properties of Extracellular Space. *Biophysical Journal*, 86(3), 1829–1842. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(04\)74250-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(04)74250-2)
- Ben Hamed, S., Duhamel, J.-R., Bremmer, F., & Graf, W. (2001). Representation of the visual field in the lateral intraparietal area of macaque monkeys: a quantitative receptive field analysis. *Experimental Brain Research*, 140(2), 127–144. <https://doi.org/10.1007/s002210100785>
- Birbaumer, N., & Flor, H. (2000). *Psychobiology*.
- Bokil, H., Andrews, P., Kulkarni, J. E., Mehta, S., & Mitra, P. P. (2010). Chronux: a platform for analyzing neural signals. *Journal of Neuroscience Methods*, 192(1), 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.06.020>
- Bourisly, A. K., & Shuaib, A. (2018). Neurophysiological effects of aging: A P200 ERP study. *Translational Neuroscience*, 9(1), 61–66. <https://doi.org/10.1515/tnsci-2018-0011>
- Buzsáki, G. (n.d.). *Rhythms of the Brain*.
- Buzsáki, G., Anastassiou, C. A., & Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents--EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature Reviews. Neuroscience*, 13(6), 407–420. <https://doi.org/10.1038/nrn3241>
- de Lafuente, V., Jazayeri, M., & Shadlen, M. N. (2015). Representation of Accumulating Evidence for a Decision in Two Parietal Areas. *Journal of Neuroscience*, 35(10), 4306–4318. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2451-14.2015>
- Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1992). The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements. *Science (New York, N.Y.)*, 255(5040), 90–92. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1553535>
- Freeman, W. J., & Quian Quiroga, R. (2013). Imaging Brain Function with EEG. Advanced Temporal and Spatial Analysis of Electroencephalographic Signals. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fries, P., Schröder, J.-H., Roelfsema, P. R., Singer, W., & Engel, A. K. (2002). Oscillatory neuronal synchronization in primary visual cortex as a correlate of stimulus selection.

The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience, 22(9), 3739–3754. <https://doi.org/20026318>

Gold, J. I., & Shadlen, M. N. (2007). The Neural Basis of Decision Making. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 535–574. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.29.051605.113038>

Grefkes, C., & Fink, G. R. (2005). The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *Journal of Anatomy*, 207(1), 3–17. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2005.00426.x>

Hauser, C. K., & Salinas, E. (2014a). Perceptual Decision Making. In *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (pp. 1–21). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7320-6_317-1

Hauser, C. K., & Salinas, E. (2014b). Perceptual Decision Making. In *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (pp. 1–21). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7320-6_317-1

Heekeren, H. R., Marrett, S., & Ungerleider, L. G. (2008, June 9). The neural systems that mediate human perceptual decision making. *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 9, pp. 467–479. <https://doi.org/10.1038/nrn2374>

Kandel, E. R. (2013). *Principles of neural science* (5th ed.). Retrieved from <https://www.worldcat.org/title/principles-of-neural-science/oclc/795553723>

Katsuki, F., & Constantinidis, C. (2012, May 3). Unique and shared roles of the posterior parietal and dorsolateral prefrontal cortex in cognitive functions. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, Vol. 6, pp. 1–53. <https://doi.org/10.3389/fnint.2012.00017>

Kiebel, S. (n.d.). Perceptual Decision Making | Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences. Retrieved June 5, 2020, from <https://www.cbs.mpg.de/210701/perceptual>

Lewis, J. W., & Van Essen, D. C. (2000). Corticocortical connections of visual, sensorimotor, and multimodal processing areas in the parietal lobe of the macaque monkey. *The Journal of Comparative Neurology*, 428(1), 112–137. [https://doi.org/10.1002/1096-9861\(20001204\)428:1<112::AID-CNE8>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1096-9861(20001204)428:1<112::AID-CNE8>3.0.CO;2-9)

Nir, Y., Fisch, L., Mukamel, R., Gelbard-Sagiv, H., Arieli, A., Fried, I., & Malach, R. (2007). Coupling between Neuronal Firing Rate, Gamma LFP, and BOLD fMRI Is Related to Interneuronal Correlations. *Current Biology*, 17(15), 1275–1285. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.06.066>

Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J.-M. (2011). FieldTrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011, 156869. <https://doi.org/10.1155/2011/156869>

P200 - NeuRA Library. (n.d.). Retrieved October 28, 2020, from <https://library.neura.edu.au/schizophrenia/physical-features/functional-changes/electrophysiology/p200/>

- Patel, G. H., He, B. J., & Corbetta, M. (2009). Attentional Networks in the Parietal Cortex. In *Encyclopedia of Neuroscience* (pp. 661–666). <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.00205-9>
- Platt, M. L., & Glimcher, P. W. (1999). Neural correlates of decision variables in parietal cortex. *Nature*, *400*(6741), 233–238. <https://doi.org/10.1038/22268>
- Polanía, R., Krajbich, I., Grueschow, M., & Ruff, C. C. (2014). Neural Oscillations and Synchronization Differentially Support Evidence Accumulation in Perceptual and Value-Based Decision Making. *Neuron*, *82*(3), 709–720. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.03.014>
- Ptak, R., & Müri, R. M. (2013). The parietal cortex and saccade planning: lessons from human lesion studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 254. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00254>
- Rajalingham, R., & Musallam, S. (2017). Characterization of neurons in the primate medial intraparietal area reveals a joint representation of intended reach direction and amplitude. *PLOS ONE*, *12*(8), e0182519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182519>
- Ramos-Aguilar, R., Olvera-López, J. A., & Olmos-Pineda, I. (n.d.). *Analysis of EEG Signal Processing Techniques based on Spectrograms*.
- Roberts, I. D., & Hutcherson, C. A. (2019). Affect and Decision Making: Insights and Predictions from Computational Models. *Trends in Cognitive Sciences*, *0*(0). <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.04.005>
- Rozzi, S., & Coudé, G. (2015, July 14). Grasping actions and social interaction: Neural bases and anatomical circuitry in the monkey. *Frontiers in Psychology*, Vol. 6, p. 973. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00973>
- Schall, J. D. (2001). Neural basis of deciding, choosing and acting. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(1), 33–42. <https://doi.org/10.1038/35049054>
- Scherberger, H., Jarvis, M. R., & Andersen, R. A. (2005). Cortical Local Field Potential Encodes Movement Intentions in the Posterior Parietal Cortex. *Neuron*, *46*(2), 347–354. <https://doi.org/10.1016/J.NEURON.2005.03.004>
- Shadlen, M. N., & Newsome, W. T. (1996). *Motion perception: Seeing and deciding (motion perception psychophysics decision making parietal cortex)* (Vol. 93). Retrieved from [http://wexler.free.fr/library/files/shadlen \(1996\) motion perception. seeing and deciding.pdf](http://wexler.free.fr/library/files/shadlen%20(1996)%20motion%20perception.%20seeing%20and%20deciding.pdf)
- Shadlen, M. N., & Newsome, W. T. (2001). Neural Basis of a Perceptual Decision in the Parietal Cortex (Area LIP) of the Rhesus Monkey. *Journal of Neurophysiology*, *86*(4), 1916–1936. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.86.4.1916>
- Snyder, L. H., Batista, A. P., & Andersen, R. A. (1997). Coding of intention in the posterior parietal cortex. *Nature*, *386*(6621), 167–170. <https://doi.org/10.1038/386167a0>
- Sterzer, P. (2016, May 24). Moving forward in perceptual decision making. *Proceedings of*

the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 113, pp. 5771–5773. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605619113>

Uhlhaas, P., Pipa, G., Lima, B., Melloni, L., Neuenschwander, S., Nikolić, D., & Singer, W. (2009). Neural synchrony in cortical networks: history, concept and current status. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 3, 17. <https://doi.org/10.3389/neuro.07.017.2009>

Werf, J. Van Der. (2015). *Cortical oscillatory activity in human visuomotor integration*.

What are Neural Oscillations? (n.d.). Retrieved June 6, 2020, from http://learn.neurotechedu.com/neural_oscillations/

Wong, Y. T., & Pesaran, B. (2015). Decoding Field Potentials. In *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (pp. 965–968). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6675-8_704

Yu, A. J. (2014). Decision-Making Tasks. In *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (pp. 1–8). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7320-6_314-1

Zhang, J. (2012). The effects of evidence bounds on decision-making: Theoretical and empirical developments. *Frontiers in Psychology*, 3(AUG). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00263>

ANEXO A

A continuación, se muestran los análisis mencionados anteriormente para LIP cuando el efector empleado fue la mano y para MIP con efector ojo; esto solamente para los aciertos.

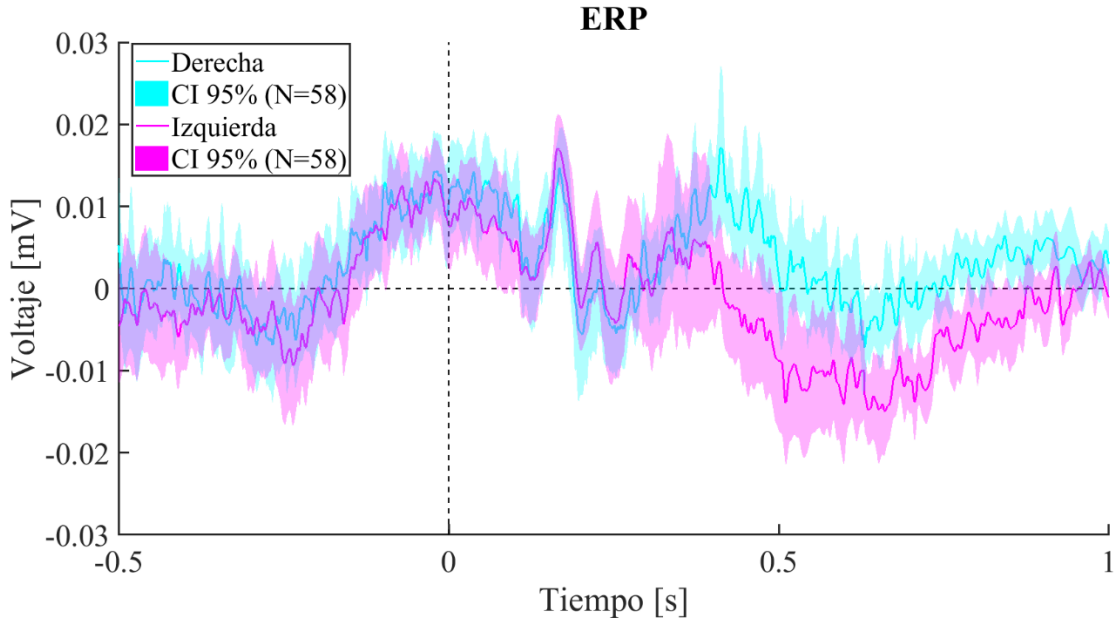


Figura 22.-ERP para LIP - mano, se encuentran separados para cuando el estímulo se movió hacia la derecha (azul) y a la izquierda (rosa). Las señales se encuentran alineadas a la presentación del estímulo.

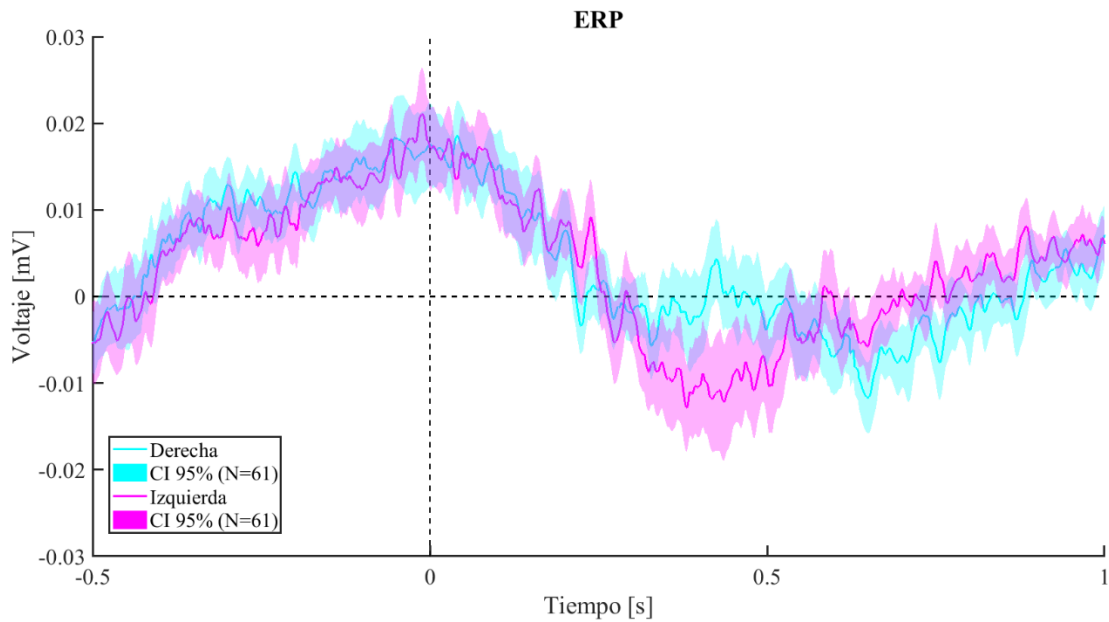


Figura 23.-ERP para MIP - ojo, se encuentran separados para cuando el estímulo se movió hacia la derecha (azul) y a la izquierda (rosa). Las señales se encuentran alineadas a la presentación del estímulo.

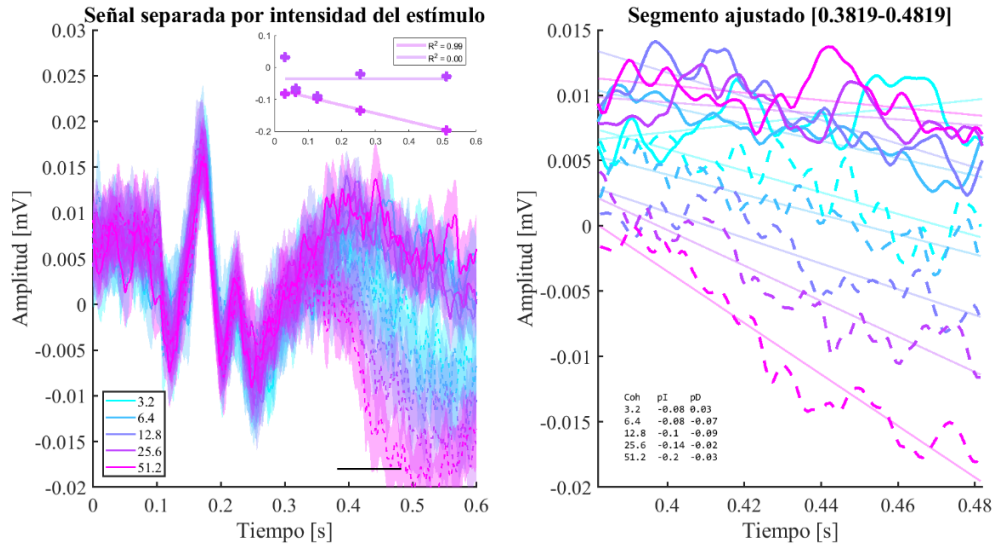


Figura 24.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para LIP-mano, del lado izquierdo vemos la señal separada de acuerdo a la dirección y coherencia del estímulo, las líneas continuas corresponden a cuando el estímulo fue al lado izquierdo (preferente) y las punteadas a la derecha (no preferente); los diferentes colores indican la coherencia del estímulo, la línea negra inferior horizontal indica el segmento ajustado (el cual se muestra en la imagen de la derecha). En el inset de la imagen se muestra la relación entre coherencia (eje x) y pendiente del segmento ajustado (eje y). La imagen del lado derecho muestra un acercamiento al segmento de la señal al cual se le realizó el ajuste.

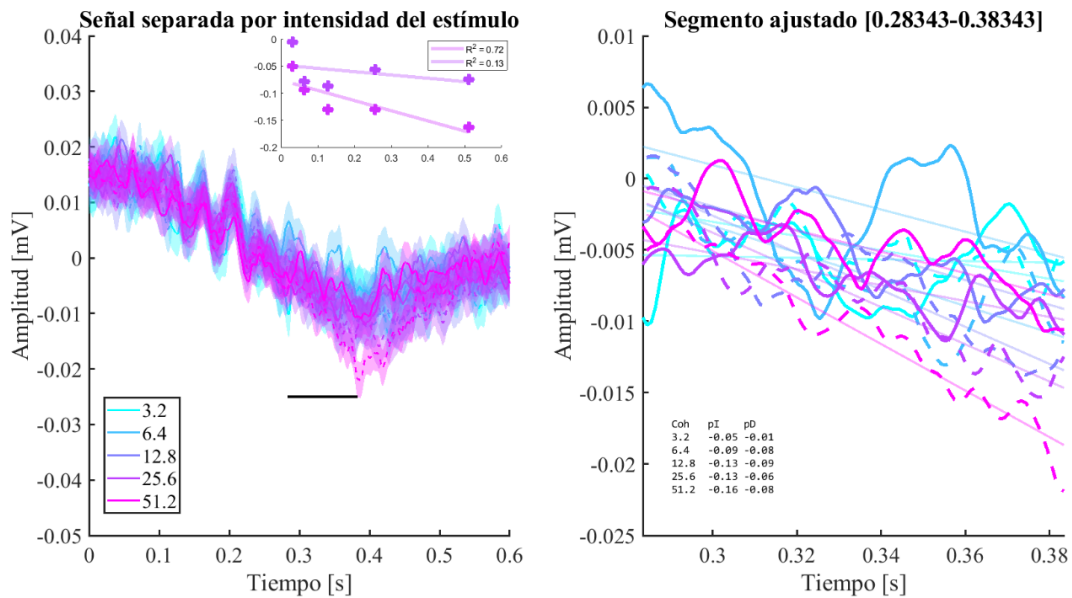


Figura 25.- Ajuste a la señal separada por coherencia y dirección del estímulo para MIP-ojo, del lado izquierdo vemos la señal separada de acuerdo a la dirección y coherencia del estímulo, las líneas continuas corresponden a cuando el estímulo fue al lado izquierdo (preferente) y las punteadas a la derecha (no preferente); los diferentes colores indican la coherencia del estímulo, la línea negra inferior horizontal indica el segmento ajustado (el cual se muestra en la imagen de la derecha). En el inset de la imagen se muestra la relación entre coherencia (eje x) y pendiente del segmento ajustado (eje y). La imagen del lado derecho muestra un acercamiento al segmento de la señal al cual se le realizó el ajuste.

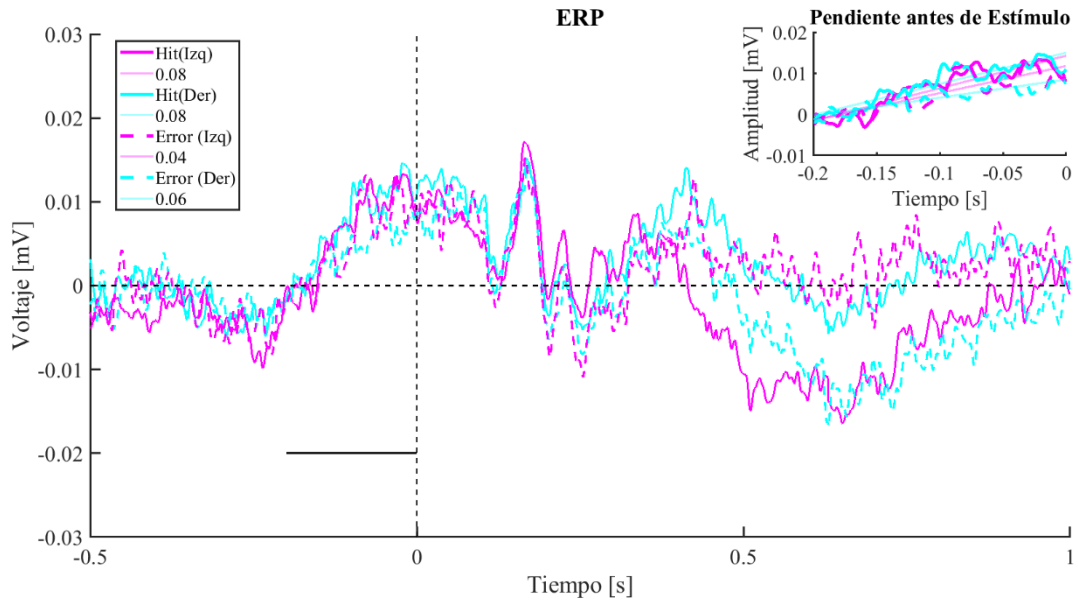


Figura 26.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para LIP-mano, la señal se encuentra separada de acuerdo a la dirección del estímulo (izquierda color magenta y derecha color cyan) y si la respuesta del ensayo fue correcta (líneas continuas) o errónea (líneas punteadas); la línea horizontal negra muestra el segmento al cual se realizó el ajuste. En el inset de la gráfica se muestra el segmento de la señal ajustado.

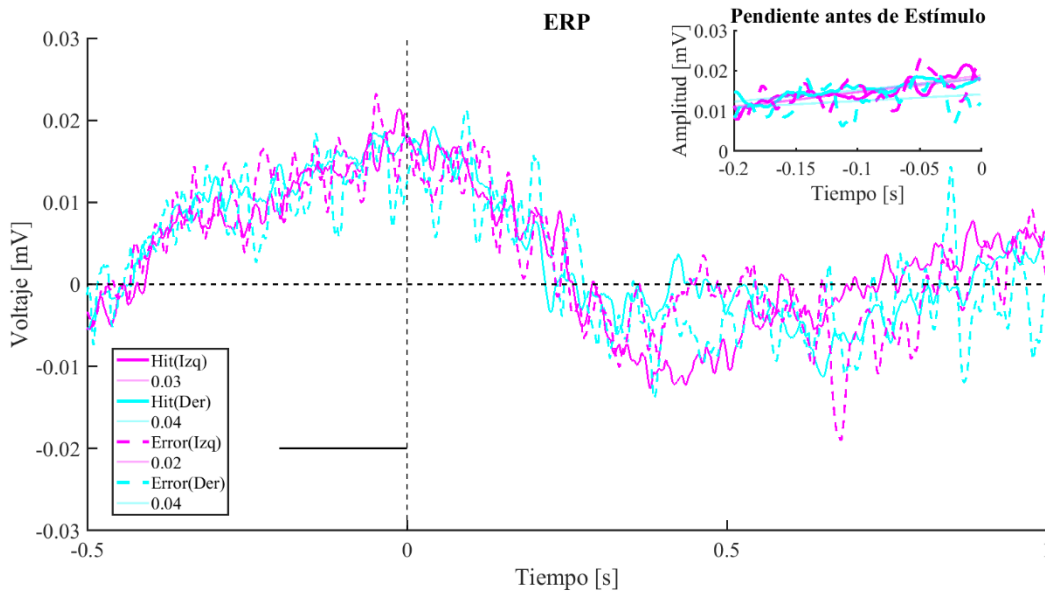


Figura 27.- Ajuste a la señal antes de la presentación del estímulo para MIP-ojo, la señal se encuentra separada de acuerdo a la dirección del estímulo (izquierda color magenta y derecha color cyan) y si la respuesta del ensayo fue correcta (líneas continuas) o errónea (líneas punteadas); la línea horizontal negra muestra el segmento al cual se realizó el ajuste. En el inset de la gráfica se muestra el segmento de la señal ajustado.

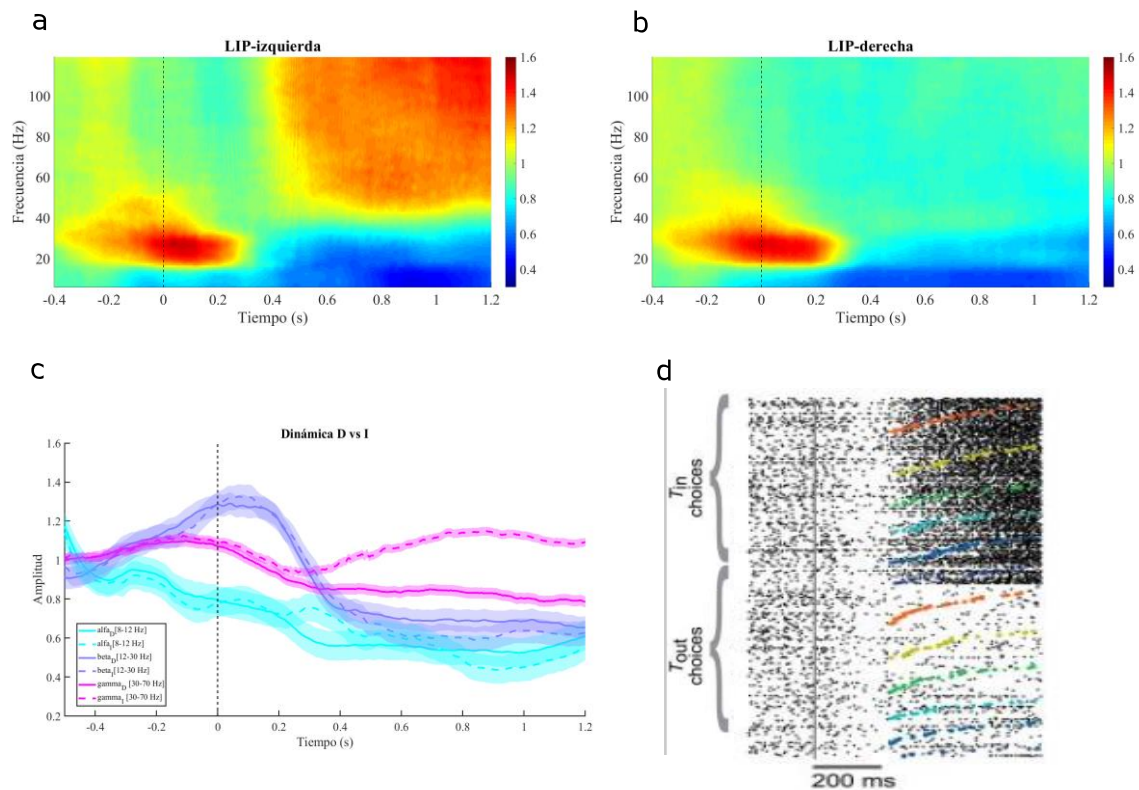


Figura 28.- Espectrograma para LIP-mano. a) cuando el estímulo va a la izquierda, b) cuando el estímulo va a la derecha. En c) se muestra la dinámica de las bandas igualmente separadas para cuando el estímulo va a la derecha (línea continua) e izquierda (línea punteada), d) raster plot de una neurona característica de LIP para ensayos donde se contestó con un movimiento de alcance.

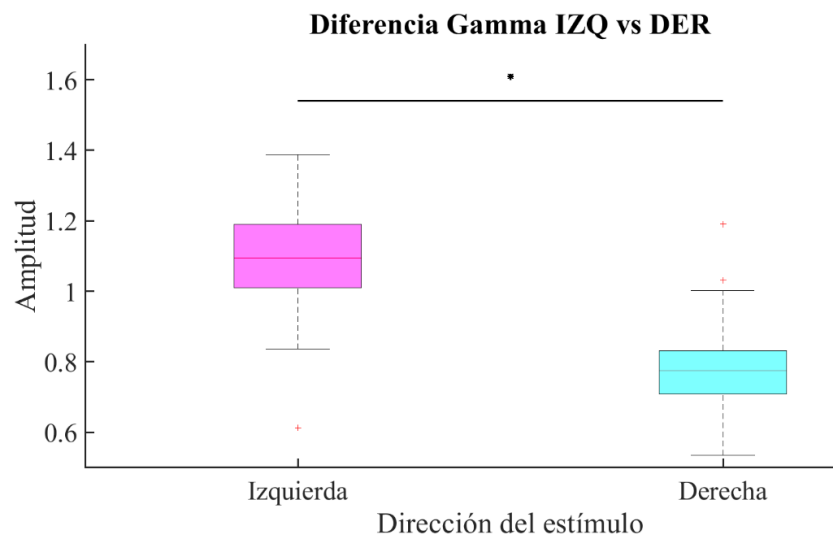


Figura 29.- Gráfica de caja y eje comparando la banda de frecuencia gamma, para LIP-mano, de acuerdo a la dirección del estímulo; en magenta para cuando el estímulo fue a la izquierda y en cyan cuando fue a la derecha.

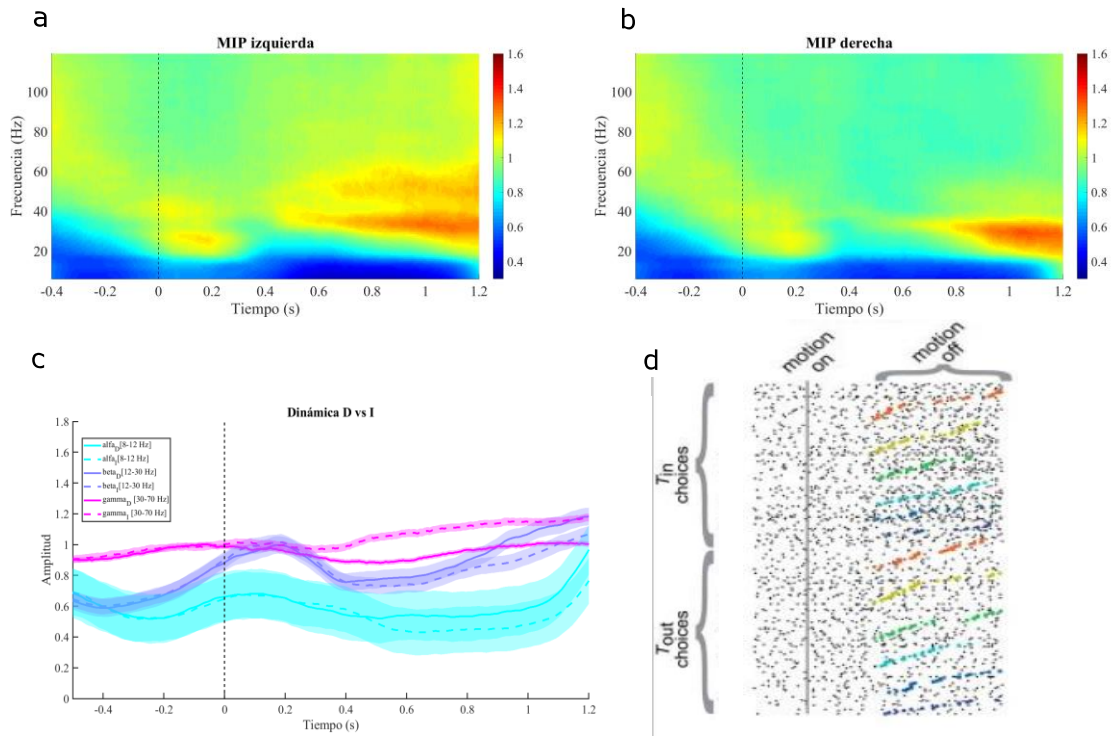


Figura 30.- Espectrograma para MIP-ojo. a) cuando el estímulo va a la izquierda, b) cuando el estímulo va a la derecha. En c) se muestra la dinámica de las bandas igualmente separadas para cuando el estímulo va a la derecha (línea continua) e izquierda (línea punteada), d) raster plot de una neurona característica de MIP para ensayos donde se contestó con un movimiento de alcance.

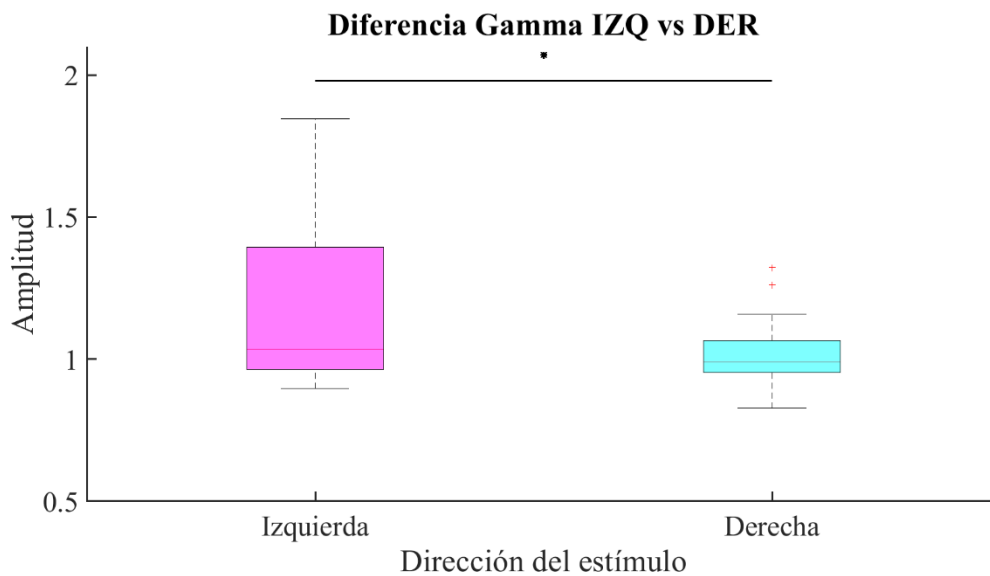


Figura 31.- Gráfica de caja y eje comparando la banda de frecuencia gamma, para MIP-ojo, de acuerdo a la dirección del estímulo; en magenta para cuando el estímulo fue a la izquierda y en cyan cuando fue a la derecha.