



Universidad Autónoma del Estado de Morelos

MAESTRÍA EN CIENCIAS COGNITIVAS

ACOPLAMIENTO DE FASE DE SEÑALES EEG EN PAREJAS DE GUITARRISTAS
DURANTE LA INTERACCIÓN MUSICAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS COGNITIVAS

PRESENTA:

Juan Manuel Esquivias Farías

Director de Tesis: Dr. Markus Franziskus Müller Bender

Comité Tutorial: Dr. Tom Froese

Mtra. Paola Vanessa Olguín García

Dr. Alberto Jorge Falcón Albarrán

Dr. Jorge Hermosillo Valadez

Índice general

1. Sincronización	1
1.1. Fundamentos	1
1.2. Características de una señal oscilatoria	2
1.3. Aplicación en sistemas reales	3
1.4. Tipos de sincronización	5
1.5. Sincronización como mecanismo clave de funcionamiento neuronal	6
2. Interacción social	9
2.1. Desarrollo de habilidades sociales	9
2.2. Formas de interacción social: Acción conjunta y coordinación interpersonal.	10
2.3. Sistemas cerebrales relacionados con procesos de interacción social.	18
3. Hyperscanning	20
3.1. Hyperscanning durante la coordinación interpersonal.	21
3.2. Hyperscanning durante la acción conjunta	23
3.3. Alcances y limitaciones de los estudios de hyperscanning	27
4. Metodología	30
4.1. Planteamiento del problema	30
4.2. Objetivo e Hipótesis	31
4.3. Diseño Experimental	31
4.4. Registro y Análisis de Datos	33
5. Resultados	37
5.1. Entre electrodos homólogos	37
5.2. Entre electrodos cruzados	45
6. Discusión y conclusiones	49

Resumen

La actividad eléctrica registrada en el EEG es una función de los patrones de actividad neuronal a través del tiempo. La actividad coordinada y sincronizada de diferentes sistemas neuronales, específicamente la sincronización isocrónica (simultánea), es el mecanismo a través del cual el cerebro comunica y procesa información.

En los últimos años se ha popularizado una técnica para registrar la actividad eléctrica de los cerebros de dos sujetos que realizan una tarea conjunta, dicha técnica es conocida como “*hyperscanning*”. Los hallazgos publicados utilizando este método sugieren que existen patrones de sincronización intercerebral que surgen durante la interacción social, reflejando mecanismos cerebrales y cognitivos propios de la acción en conjunto. Una interpretación alternativa de este fenómeno es que la sincronización intercerebral no refleja mecanismos de interacción interpersonal ni de cognición social, sino que es debida a procesos motores y perceptuales comunes en los participantes.

El presente trabajo busca poner a prueba ambas alternativas, para ello se realizó una propuesta experimental y un protocolo de análisis cuantitativo de registros de EEG en músicos mientras tocan de forma sincronizada con un estímulo externo o sincronizados con otro músico, con el objetivo de separar los efectos de la percepción conjunta, la acción simultánea y la interacción social durante la ejecución musical.

Se propone que si se observan patrones de conexión intercerebral cuantitativa o cualitativamente diferentes durante la interacción social pero no durante la percepción conjunta o la acción coordinada con un estímulo externo, se podría asumir que la interacción social por sí misma está asociada con la sincronización intercerebral, lo que puede reflejar la actividad de procesos cognitivos que no tienen lugar en cerebros aislados.

Los análisis muestran resultados altamente dependientes del tamaño de ventana de análisis y la técnica para estimar sincronización elegida. A pesar de ello, se observa actividad sincronizada específica de la interacción social en áreas frontales y parietales del primer sujeto y áreas centrales y temporales del segundo participante. Finalmente, los alcances y limitaciones del presente trabajo son discutidos.

Capítulo 1

Sincronización

1.1. Fundamentos

La sincronización es un fenómeno observado a diferentes escalas espacio-temporales en múltiples sistemas físicos, biológicos y sociales. Una definición simple es el ajuste de los ritmos de sistemas oscilatorios debido a su interacción (Pikovsky, Rosenblum y Kurths, 2003; Knoblich, Butterfill y Sebanz, 2011).

La sincronización fue descrita por primera vez en 1665, por el matemático holandés Christiaan Huygens. Este personaje, entre otras contribuciones notables, inventó el reloj de péndulo. Observó que dos relojes montados sobre un mismo soporte, al cabo de un tiempo, sincronizaban el movimiento de sus péndulos en perfecta anti-fase. Describió además que si el movimiento de los péndulos era perturbado, éstos volvían a sincronizar luego de un breve tiempo. La explicación de dicho comportamiento, también propuesta por Huygens, es que las oscilaciones de los péndulos transmiten vibraciones, apenas perceptibles, en el soporte común. A través de la fuerza ejercida sobre el soporte, el movimiento de un péndulo afecta el movimiento del otro, llegando a una regulación mutua de sus ritmos intrínsecos (Pikovsky et al., 2003).

Al igual que los relojes de péndulo, algunos sistemas oscilatorios en la naturaleza son osciladores auto-sostenidos. Un oscilador autosostenido es un sistema que oscila con un ritmo propio, determinado por sus propiedades intrínsecas. Es un sistema estable: ante la presencia de una perturbación, su ritmo natural tiende a restablecerse. Estos sistemas tienen una fuente de energía interna que compensa la disipación de la energía y los mantiene oscilando. Una característica fundamental de estos sistemas es que son capaces de funcionar de manera aislada, pero también pueden sincronizar entre sí. Es decir, pueden ajustar sus ritmos naturales a través de la interacción (Pikovsky et al., 2003).

En sistemas biológicos hay ejemplos de sincronización en diferentes escalas. La comunicación neuronal se da a través de patrones espaciotemporales de disparos sincronizados (Fries, 2015). La frecuencia cardíaca se ajusta a ritmos respiratorios o locomotores (Blain, Meste, Blain y Bermon, 2009). El ciclo circadiano es el acoplamiento de los periodos de vigilia y sueño de un organismo a claves ambientales que dependen del periodo de rotación de la tierra, como luz o temperatura (Buzsáki, 2006). Los periodos de migración de insectos, aves, peces o mamíferos están acoplados a los cambios climáticos cíclicos de las estaciones del año (Alerstam, Hedenström y Åkesson, 2003). Los patrones de brillo de comunidades de luciérnagas o el vuelo de las parvadas de pájaros también se explican por la sincronización entre individuos independientes (Duranton

y Gaunet, 2016). Como se discutirá más adelante, los seres humanos sincronizan de forma automática algunos comportamientos, ya sea a través de la mera observación de otros o a través de la interacción social (van Ulzen, Lamoth, Daffertshofer, Semin y Beek, 2008; Chartrand y Bargh, 1999).

1.2. Características de una señal oscilatoria

Para explicar cómo dos sistemas oscilatorios ajustan sus ritmos, es necesario describir algunas características de una señal oscilatoria. Consideremos el ejemplo del sistema oscilatorio más sencillo: el oscilador armónico. Un oscilador armónico es un sistema cuya dinámica es estable en todo momento tiempo, a menos que una fuerza externa intervenga en su movimiento. La amplitud de la oscilación de un oscilador armónico no es dependiente del tiempo (Quintero-Torres, Ocampo, Millán, Aragón y Naumis, 2007).

Un ejemplo es una masa en el extremo de un resorte que oscila en un espacio sin fricción. Normalmente, debido a la disipación de la energía la amplitud de la oscilación iría disminuyendo hasta que el resorte se detenga en el punto de reposo. Sin embargo, en un espacio sin fricción la oscilación permanecería invariante. La amplitud A (magnitud de la oscilación) y el periodo T (tiempo que tarda una oscilación) se mantendría constante si no interviene una fuerza externa. La frecuencia f (número oscilaciones por unidad de tiempo) de esta oscilación también sería estable (ver Figura 1.1).

Esta oscilación determinista puede ser descrita por una función sinusoidal de la forma:

$$x(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

En la función, φ_0 es la fase parcial de la oscilación, mientras que ω_0 indica la velocidad angular, relacionada con el periodo T por $\omega_0 = 2\pi/T$. La fase $(\omega_0 t + \varphi_0)$ determina el estado del sistema (la posición angular de la masa con respecto a cada oscilación) en cada momento del tiempo. La fase incrementa con una razón de 2π por oscilación. Una diferencia de fases de 2π corresponden al mismo estado físico, pues $\cos\varphi = \cos(\varphi + 2\pi)$. No obstante, la fase también puede analizarse reiniciando en cero con cada oscilación.

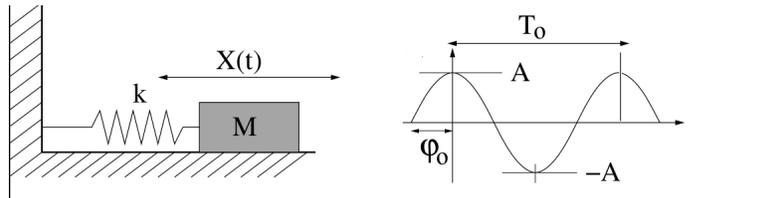


Figura 1.1: La dinámica del oscilador armónico, en este caso, un resorte oscilando en un espacio sin fricción, es estacionaria. Su amplitud, periodo o frecuencia no cambian a lo largo del tiempo. Su evolución temporal se da por la función $x(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ (Ríos-Herrera, 2017)

El estudio de la dinámica de un sistema puede abordarse desde el espacio de las frecuencias. Esto se logra a través de la Transformada de Fourier, que descompone una señal $x(t)$ en oscilaciones armónicas. La Transformada de Fourier de una señal oscilatoria representa la magnitud y la fase con la cual una oscilación armónica contribuye a la composición de la señal. El espectro del oscilador armónico mostraría una sola frecuencia, pues el movimiento del péndulo es estable en todo momento.

La dinámica de un sistema también se puede visualizar mediante su trayectoria en el espacio fase. Un espacio fase es una representación del conjunto mínimo de variables que son suficientes para explicar cualquier propiedad física del sistema, donde cada punto corresponde a un estado dinámico del sistema. La dinámica del oscilador armónico puede describirse por la evolución temporal de un par de variables $\{x, y\}$. En este ejemplo, ambas variables son determinadas por la posición y la velocidad del desplazamiento de la masa. La evolución de este par de variables puede representarse a través de coordenadas en el espacio fase (Pikovsky et al., 2003).

La proyección al eje x en el espacio fase se movería conforme la masa oscila alrededor del punto de reposo. Por otra parte, la posición en el eje y cambiaría conforme la velocidad del desplazamiento aumenta o disminuye. La velocidad es cero cuando la compresión del resorte es máxima. Aumenta gradualmente conforme el resorte se estira. Luego de pasar por el punto de reposo la velocidad disminuye hasta volver a cero cuando el estiramiento es máximo. Al iniciar a contraerse, la velocidad aumenta nuevamente, ahora en sentido contrario, conforme se acerca al punto de reposo. Posteriormente, la velocidad regresa a cero al alcanzar de nuevo la posición donde el resorte está más contraído.

Como cada oscilación se repite después de un periodo T , la representación de la dinámica del sistema en el espacio fase corresponde a una curva cerrada o ciclo. Esta trayectoria es llamada ciclo límite. El estado del sistema, su fase, corresponde a su posición a lo largo del ciclo límite. El oscilador armónico es un caso especial, no existente en la naturaleza, pero estos principios pueden aplicarse a osciladores o sistemas reales.

Si un oscilador autosostenido es perturbado por una fuerza externa, se observará una perturbación en su trayectoria en el espacio fase. Sin embargo, una vez que la fuerza externa deja de actuar sobre el oscilador, su trayectoria en el espacio fase regresa nuevamente al atractor. Se considera, pues, que el ciclo límite es el atractor del sistema. No obstante, aún cuando la perturbación en la amplitud ocasionada por esta fuerza externa decae con el tiempo, las perturbaciones en la fase del sistema se sostienen, nunca aumentan o decaen si el sistema no es perturbado nuevamente (Pikovsky et al., 2003).

Incluso una fuerza pequeña puede modificar la fase de un sistema. Debido a esta propiedad de los sistemas oscilatorios, dos osciladores autosostenido puede sincronizar entre si.

1.3. Aplicación en sistemas reales

El espectro de Fourier de la mayoría de sistemas oscilatorios en la naturaleza a menudo tienen más de una frecuencia, determinadas por el estado inicial del sistema o por las características de su evolución temporal, incluyendo el efecto de fuerzas externas o cambios propios del sistema. (Quintero-Torres et al., 2007). Además, las señales extraídas de estos sistemas suelen ser altamente ruidosas y no estacionarias (su comportamiento no puede predecirse). La amplitud no es estable a lo largo del tiempo y la fase no es una propiedad lineal dependiente de la amplitud.

No obstante, este tipo de sistemas pueden ser aproximadamente descritos mediante el comportamiento típico de un sistema lineal, como el oscilador armónico. Así pues, las observaciones del estado de un sistema se pueden representar como:

$$x(t) = A(t)\cos(\phi(t))$$

donde $\{A(t), \phi(t)\}$ representan la amplitud y la fase instantánea del sistema (Chávez, Besserve, Adam y Martinerie, 2006).

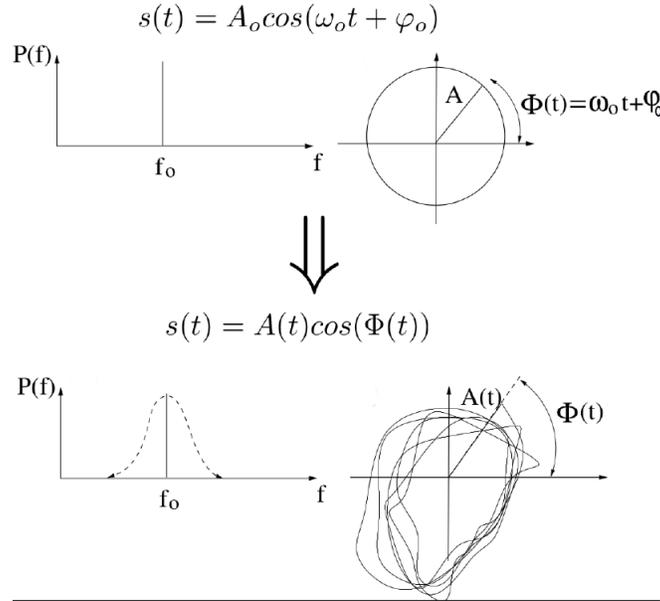


Figura 1.2: La señal de un oscilador armónico se compone de frecuencia única y presenta una trayectoria circular en el espacio fase. Las señales reales pueden componerse de más de una frecuencia armónica, por lo que deben ser filtradas de forma que preserven una frecuencia dominante. Su amplitud es variable a lo largo del tiempo y la fase no tiene una evolución lineal (Ríos-Herrera, 2017).

Una herramienta que permite extraer la amplitud y fase instantánea de un sistema es la Transformada de Hilbert:

$$H(x(t)) = \frac{1}{\pi} p.v. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(T)}{t-T} dT$$

que permite definir la señal analítica $\psi_x(t)$ como:

$$\psi_x(t) = x(t) + iH(x(t))$$

Aunque la Transformada de Hilbert se puede aplicar a cualquier señal arbitraria $x(t)$, la amplitud y fase instantáneas pueden no tener una interpretación derivada del oscilación armónico, como en la Figura 1.2. Esto es especialmente cierto en señales con un espectro de potencias ancho con más de una frecuencia dominante.

Es posible asignar un número infinito de pares $\{A(t), \phi(t)\}$ a una señal $x(t)$. Sin embargo, solo un par, conocido como par canónico, puede representar correctamente la amplitud y fase instantáneas de un sistema. Mientras más estrecha sea la banda de frecuencia de una señal, más probable es que el par canónico $\{A(t), \phi(t)\}$ es interpretable en el sentido del oscilador armónico para la señal $x(t)$. Generalmente, si una señal tiene una frecuencia dominante alrededor de la cual se distribuyen el resto de las frecuencias y es de banda estrecha, las propiedades extraídas con la transformada de Hilbert tienen significado físico (Chavez et al., 2006).

La evolución temporal del par $\{A(t), \phi(t)\}$ en el espacio fase, debe distribuirse alrededor de una curva con un centro claramente definido. La fase instantánea de un sistema se determina como un ángulo de la señal

analítica con respecto a este centro (ver Figura 1.2). En señales con más de una frecuencia dominante, la amplitud y fase instantáneas extraídas con la Transformada de Hilbert no son interpretables. Un ejemplo de como la fase instantánea de señales con más de una frecuencia dominante pierden su interpretación en el sentido de un oscilador armónico se muestra en la Figura 1.3.

Si se calcula la diferencia entre las fases instantáneas de las señales de dos sistemas reales (el valor del acoplamiento de fase), pero no tiene cuidado de filtrar banda estrecha, la diferencia de fase entre estas señales no tendría una interpretación.

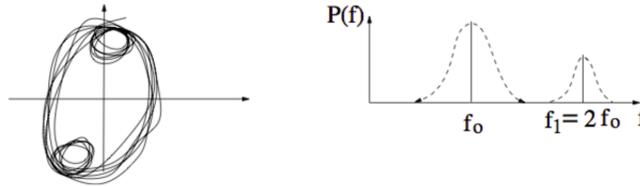


Figura 1.3: La amplitud y fase instantáneas de señales con más de una frecuencia dominante no puede ser interpretadas directamente en el mismo sentido que un oscilador armónico. El problema se acentúa si la señal se compone de múltiples frecuencias (Ríos-Herrera, 2017).

1.4. Tipos de sincronización

Incluso si dos sistemas tienen características similares, sus particularidades causan discrepancias en sus periodos oscilatorios. Si dos péndulos se ponen en movimiento simultáneamente desde la misma posición y posteriormente se observa su estado en cualquier momento en el tiempo, típicamente estarán en diferentes posiciones.

Sin embargo, cuando ambos sistemas se acoplan su ritmo se modifica. Dos osciladores con una frecuencia instantánea diferente, al interactuar, puede ocurrir que oscilen con una frecuencia común luego de un periodo transitorio. A esto se le conoce como acoplamiento frecuencia. Que dos sistemas sincronicen sus ritmos depende de dos factores: de la fuerza del acoplamiento, lo que siempre es difícil determinar en condiciones experimentales, y de la diferencia en sus frecuencias naturales (Pikovsky et al., 2003; Roseblum, Pikovsky y Kurths 1996).

La existencia de una relación estable entre las fases de dos osciladores se llama acoplamiento de fase. La sincronización es un proceso dinámico, no un estado. Por esta razón, pocas oscilaciones no son suficientes para inferir sincronización entre dos sistemas; las señales extraídas de estos sistemas deben tener un número suficiente de oscilaciones para determinar si están sincronizados en una escala temporal determinada.

En la sincronización de fase, la relación entre las fases instantáneas de los sistemas puede presentar diferentes regímenes. Retomemos el ejemplo de los relojes de péndulo. Puede suceder que se muevan siempre hacia la misma dirección al mismo tiempo, de tal forma que la posición del péndulo es la misma. En este caso, existe *sincronización en fase*. No obstante, puede que su movimiento sea opuesto, de tal forma que cuando un péndulo está en su posición más a la izquierda, el otro está en su posición más a la derecha, en cuyo caso hay *sincronización en anti-fase*. En general, podemos hablar de sincronización de fase si hay un ajuste en las fases instantáneas de los osciladores, aunque las amplitudes permanezcan no correlacionadas; de tal forma que $|\phi_1 - \phi_2| \leq Constante$ (Rosenblum et al., 1996).

Así pues, la sincronización o el acoplamiento de las fases de dos sistemas, sean lineales o caóticos, no implica que ambas fases sean iguales en todo momento. El acoplamiento de fase puede incluir cambios de fase constantes y pequeñas fluctuaciones en la diferencia de fase.

La sincronización de fase es un mecanismo energéticamente económico y eficiente para asegurar la coordinación entre dos sistemas. Por ejemplo, la sincronización de los relojes de péndulo se debe a las pequeñas vibraciones que ambos péndulos transmiten al soporte común. Esto se ha demostrado con modelos teóricos. Rosenblum et al., (1996) acoplaron dos sistemas Rössler, sistemas dinámicos que pueden exhibir una conducta caótica, variando dos parámetros: la diferencia entre sus frecuencias naturales $\Delta\omega$ y la fuerza del acoplamiento C . Para una diferencia de frecuencias fija ($\Delta\omega = 0.015$) y a medida que el acoplamiento aumentaba, las fases pasaron de rotar con su propio ritmo ($C=0.01$) a un estado sincronizado ($C=0.027$). En este régimen, la diferencia de fases instantáneas de ambos sistemas no aumentaba en el tiempo. No obstante, las amplitudes permanecieron no relacionadas. Cabe destacar que este régimen se lograba con valores relativamente pequeños del parámetro de acoplamiento. Sin embargo, a medida que la diferencia entre las frecuencias aumentaba, también aumentaba la fuerza de acoplamiento necesaria para lograr un régimen sincronizado.

Un acoplamiento fuerte entre osciladores tendería a hacer los estados dinámicos de ambos osciladores idénticos, afectando no solo la frecuencia sino las amplitudes de las señales. En este caso, hablaríamos de sincronización completa. No obstante, la observación de sincronización completa es rara en la naturaleza.

Otra distinción útil tiene que ver con las causas de la sincronización (Pikovsky et al., 2003; Burgess, 2013). Hemos definido *sincronización* como el ajuste en los ritmos de dos sistemas debido a su interacción, es decir, a su influencia recíproca. Además, podemos hablar de *sincronización unidireccional* sucede cuando un oscilador es afectado por otro que es completamente independiente. El ciclo circadiano es un ejemplo de este tipo de sincronización. La regulación de los ritmos biológicos de sistemas vivos es afectada por señales ambientales como luz o temperatura, que a su vez están determinadas por el periodo de rotación de la tierra. En la ausencia de estas señales, estos ritmos tienen su propia frecuencia natural que no es de 24 horas. Finalmente, en situaciones naturales, más de un sistema oscilatorio interactúa. Un ejemplo son los patrones de luz sincronizados de las luciérnagas, o las ovaciones multitudinarias en seres humanos. En este caso hablamos de *acoplamiento global*.

La observación de que dos sistemas están sincronizados no implica necesariamente que están interactuando. Puede existir *sincronización inducida o espuria*, que se presenta cuando existe coincidencia en el ritmo de dos sistemas oscilatorios debido a que ambos se acoplan al ritmo de un tercer sistema. La modulación de ondas cerebrales en diferentes sujetos ante la percepción pasiva de estímulos rítmicos es un ejemplo de este tipo de acoplamiento. Por otra parte, se habla de sincronización espuria cuando, debido a que sus parámetros internos y su frecuencia natural son similares, dos sistemas oscilatorios presentan una conducta rítmica similar durante un cierto periodo de tiempo.

1.5. Sincronización como mecanismo clave de funcionamiento neuronal

La neurona, el elemento básico del cerebro, es un sistema excitable que interactúa con otros sistemas del mismo tipo, otras neuronas. La excitabilidad de estos sistemas tiene un comportamiento oscilatorio, relacionado con cambios en el potencial de la membrana celular. La interacción entre neuronas se da a través de potenciales de acción (sinapsis) inhibitorios y excitatorios. Un potencial de acción genera cambios abruptos en el potencial

de la membrana postsináptica que se extienden a lo largo de toda la célula. Los potenciales de acción postsinápticos modifican el flujo de iones de una neurona entre el interior y el exterior de una célula, y por ende, en el potencial del espacio extracelular (Speckman y Elger, 2005).

La actividad global de potenciales postsinápticos en grupos neuronales se puede estudiar a través de potenciales de campo locales (LFP). Los potenciales de campo locales reflejan cambio cíclicos en la excitabilidad de las neuronas en la vecindad de un electrodo. Es decir, reflejan cambios en la sensibilidad neuronal a estímulos aferentes y en la probabilidad de presentar una respuesta a estos inputs (Thut, Miniussi y Gross, 2012).

Herramientas como el EEG registran cambios en el potencial eléctrico local de células piramidales en la corteza cerebral. Diferentes patrones de disparo en poblaciones neuronales se traducen en oscilaciones del potencial de campo de diferente amplitud y frecuencia (Speckman y Elger, 2005). La amplitud de la actividad eléctrica registrada en el EEG se asocia con patrones sincronizados de activación y desactivación de poblaciones neuronales. Si durante una tarea se observa mayor amplitud en la banda alfa que durante el *resting state*, se asume que hay más poblaciones de neuronas o conjuntos más grandes con una actividad sincronizada en dicha frecuencia durante esta condición. La fase de la actividad EEG, por otra parte, puede reflejar ajustes temporales de la actividad neuronal a estímulos ambientales o procesos cognitivos. Puede modificarse ante la detección de un estímulo relevante, por ejemplo un ritmo. También puede reflejar el intercambio de información entre procesos globales y redes locales durante el funcionamiento cerebral. Por ejemplo, puede observarse acoplamiento de fase entre áreas frontales y parieto-temporales durante la memoria de trabajo (Buzsáki y Draguhn, 2004; Sauseng y Klimesch, 2008).

Durante la percepción de un estímulo o la realización de una tarea, el cerebro debe coordinar la actividad paralela de millones de neuronas en diferentes áreas para dar una respuesta coherente. Por ejemplo, un estímulo visual elicitaba respuestas en muchas neuronas espacialmente distribuidas en el área visual primaria (V1), cada una de las cuales codifica un aspecto del objeto (contorno, color, profundidad, orientación, movimiento) (Singer, 1993; Singer y Gray, 1995). ¿Cómo esta actividad neuronal extendida genera una experiencia unificada? Existe evidencia de que esto se logra a través de la actividad sincronizada de ensamblajes neuronales cuyos elementos se encuentran distribuidos en la corteza (Gray, König, Engel y Singer, 1989; Roelfsema Engel, König y Singer, 1997; Chawla, Friston y Lumer, 2001; Hummel y Gerloff, 2005).

La actividad neuronal coordinada se repite a múltiples escalas anatómicas, por ejemplo, en columnas celulares dentro de una vecindad en la misma área cortical o entre áreas anatómicamente distantes (Gray et al., 1989; Roelfsema et al., 1997). Diferentes partes de la corteza visual en gatos sincronizan su actividad eléctrica durante la percepción de un estímulo. Más aún, esta sincronización está influenciada por las propiedades del estímulo: dos electrodos en columnas diferentes podían estar sincronizados ante la observación de dos estímulos moviéndose en la misma dirección, pero dejar de estarlo si se movían en direcciones opuestas. (Gray et al., 1989). Sin embargo, en una tarea visomotora similar a la anterior, la actividad de áreas visuales y parietales de la corteza de gatos sincronizaba durante la atención a estímulos. Cuando se daba la respuesta motora, la actividad entre áreas parietales y motoras se acoplaba. La fuerza del acoplamiento era modulada por características del estímulo, por ejemplo, si era un estímulo móvil o estacionario. (Roelfsema et al., 1997).

Así, la sincronización de actividad eléctrica entre áreas corticales puede utilizarse para estudiar los sustratos neuronales de procesos cognitivos (Sauseng y Klimesch, 2008). Durante el funcionamiento cognitivo, elementos neuronales espacialmente distribuidos establecen una relación temporal precisa que les permite formar parte de una red particular y distinguirse de otras redes (Singer, 1993). Esto permite además que varios ensamblajes neuronales estén activos simultáneamente en una misma área.

A través de la actividad sincronizada se asegura que el output de una población neuronal alcance a otras poblaciones en su fase de máxima excitabilidad, lo que permite la comunicación neuronal (Fries, 2005). Si no hay coherencia entre la actividad de dos grupos de neuronas, los inputs llegan en momentos aleatorios y tienen menos probabilidad de generar una respuesta. La conectividad efectiva requiere de la sincronización entre grupos presinápticos y postsinápticos, así como la coherencia entre estos últimos. La comunicación selectiva entre una red neuronal se implementa a través de la coherencia selectiva de la actividad rítmica de sus elementos (Fries, 2015).

El funcionamiento de la corteza visual es un ejemplo de esto. Bosman et al., (2012), presentaban a monos dos estímulos visuales. Cada estímulo generaba actividad neuronal diferenciada en la corteza visual primaria (V1). A su vez, esta actividad inducía ritmos específicos en la corteza visual asociativa (V4). Cuando por su relevancia conductual el mono atendía un estímulo e ignoraba otro, se observaba una respuesta no diferenciada en V1, pero sólo el ritmo asociado al estímulo atendido se acoplaba con la actividad en V4. El estímulo ignorado inducía actividad rítmica en V1, pero esta actividad no se propagaba a otras áreas corticales.

Por otra parte, la estimulación transcraneal por corriente directa en áreas parietales y frontales de seres humano se asocia con un mejor desempeño en memoria de trabajo si ambas áreas se estimulan de forma sincronizada, pero con un deterioro si se estimulan con ritmos diferentes (Polanía, Nitsche, Korman, Batsikadze y Paulus, 2012).

En estudios con EEG, se ha observado que la integración entre información visual y somatosensorial se asocia con acoplamiento de la actividad en las cortezas visuales y sensoriomotoras en diferentes bandas de frecuencia (Hummel y Gerloff, 2005). Por otra parte, una vasta literatura sugiere que la coherencia entre áreas prefrontales y parietotemporales se asocia con procesos cognitivos como atención, anticipación de eventos y memoria de trabajo (Sarnthein, Petsche, Rappelsberger, Shaw, & Von Stein, 1998; Weiss y Rappelsberger, 2000; Gross et al., 2004; Sauseng, Klimesch, Gruber, y Birbaumer, 2008).

Más aún, en sujetos con deterioro cognitivo leve o en pacientes con Alzheimer hay un decremento en el acoplamiento de fase entre áreas cerebrales. Este decremento se relaciona con el grado de deterioro (Stam, Van Der Made, Pijnenburg y Scheltens, 2003; Jeong, 2004).

Así, existe evidencia convincente de que la sincronización es un mecanismo fundamental para el funcionamiento y la organización del sistema nervioso (Sporns, Tononi y Edelman, 2002; Plankar, Brežan y Jerman, 2013). Este mecanismo coordina eficientemente la actividad de millones de células nerviosas a un bajo coste energético (Rosenblum et al., 1996) y permite la integración de poblaciones neuronales relevantes para una tarea y la segregación de las no relevantes (Buzsáki y Draguhn, 2004).

Capítulo 2

Interacción social

2.1. Desarrollo de habilidades sociales

El abordaje de la interacción social desde las ciencias cognitivas o las neurociencias es relativamente nuevo, pues el estudio sistemático y controlado de los procesos conductuales, neuronales y cognitivos involucrados en la interacción social plantea retos considerables (Konvalinka y Roepstorff, 2012). Estos retos incluyen la implementación de tareas con validez ecológica, es decir, tareas con un paralelo directo con situaciones de la vida cotidiana. El registro confiable de variables fisiológicas, cerebrales o conductuales durante la interacción entre individuos en tiempo real también representa desafíos considerables.

Existen ejemplos de conducta social y auto-organización en diversas especies, incluyendo insectos, peces, aves o mamíferos (Weitekamp, Libbrecht y Keller, 2017; Giardina, 2008). Por su similaridad con los seres humanos, las especies del orden de los primates han sido estudiadas más extensamente. Existe evidencia de que los chimpancés son capaces de razonamiento social de alto nivel, por ejemplo, pueden inferir cuando no pueden completar una tarea por sí mismos, pueden seleccionar a los colaboradores más indicados para completar la tarea donde hay una recompensa de por medio, o pueden ayudar a otros a completar una tarea de forma altruísta, es decir, sin recibir una recompensa (Melis, Hare y Tomasello, 2006; Warneken, Hare, Melis, Hanus, & Tomasello, 2007). Además, son capaces de elegir la estrategia más ventajosa durante acciones colectivas, como durante la cacería o defensa de su territorio (Wilson, Hauser y Wrangham, 2001).

Los seres humanos tienen una inclinación especial a acoplarse a estímulos sociales y presentan conductas sin paralelo en otras especies animales (Knoblich et al., 2011). El caso del lenguaje o la música son ejemplos de lo anterior. El comportamiento humano está moldeado y embebido en el ambiente físico y social en el que se desarrollan (Hari y Kujala, 2009). Desde su nacimiento y durante los primeros años de vida, los humanos dependen de otros miembros del grupo social, especialmente de sus progenitores, para su supervivencia y su adecuado desarrollo físico y mental (Hasson, Ghazanfar, Galantucci, Garrod, y Keysers, 2012). Muchas de sus conductas son aprendidas a través de la observación y la interacción con otros individuos. La cultura, el lenguaje, el desarrollo y transmisión de conocimiento, el desarrollo de rasgos de personalidad, la formación de opiniones y estereotipos, el aprendizaje de normas de convivencia, e incluso la formación del sentido de agencia, únicamente son posibles y dependen críticamente de la interacción social (Lieberman, 2007; Tomasello, Kruger y Ratner, 1993; Hoff, 2006; Gros-Louis, West, Goldstein y King, 2006; Vygotsky y Luria, 1993; Bandura, Ross y Ross, 1961; Bleidorn et al., 2010; Mead, 1934; Bandura, 2001).

Las habilidades cognitivas necesarias para la interacción social son algunas de las primeras en desarrollarse en los seres humanos. Niños recién nacidos muestran preferencia a observar caras que objetos inanimados (Simion y Giorgio, 2015). La atención conjunta, la detección de movimiento biológico, y la imitación son apreciables desde antes de los cuatro meses de nacimiento (Hood, Willen y Driver, 1998; Kuhlmeier, Troje y Lee, 2010; Meltzoff y Moore, 1989). Entre los cinco y ocho meses de edad los niños pueden dirigir su mirada a los objetivos de las acciones de otras personas (Woodward, 1998). Entre el primer y segundo año de vida pueden comunicarse a través de gestos para transmitir información relevante en el ambiente que un adulto ignora, realizar acciones sencillas para ayudar a adultos desconocidos a realizar una tarea, o completar acciones que otra persona dejó inconclusas (Liszkowski, Carpenter y Tomasello, 2008; Warneken et al., 2007; Frith y Frith, 1999). Entre los tres y cuatro años empiezan a atribuir estados mentales a otros seres animados y a inferir que una tarea conjunta requiere de la colaboración de múltiples partes (Saxe, Carey y Kanwisher, 2004; Gräfenhain, Behne, Carpenter y Tomasello, 2009). Desde los cinco años pueden predecir la conducta de un individuo en diferentes situaciones basándose en sus rasgos de personalidad (Heyman y Gelman, 1998).

Los humanos tienen una disposición especial para la adquisición del lenguaje verbal. El lenguaje es una forma de interacción social por sí mismo, pero también es un componente clave de muchas formas de interacción social. Durante la acción conjunta, por ejemplo, permite especificar y modificar de forma flexible los roles de los miembros de un equipo (Knoblich et al., 2011). Ya entre los 7 y 12 meses de edad los niños imitan el ritmo, el tono y la estructura del lenguaje al que son expuestos (Goldstein y Schwade, 2010). Además, el reforzamiento social es clave para su desarrollo (Goldstein y Schwade, 2010; Gros-Louis et al., 2006). Cuando los sistemas de comunicación convencionales no están disponibles o no son efectivos, los humanos son capaces de crear nuevos sistemas de comunicación. Durante la introducción de esclavos africanos con diferentes lenguas nativas a América, estos generaron proto-lenguajes para comunicarse entre ellos (Castellanos, 1990; Tria, Servedio, Mufwene, y Loreto, 2015). Durante tareas de computadora cooperativas que no permiten la comunicación directa entre sus participantes, estos generan nuevos sistemas de comunicación con los elementos disponibles en el juego (Galantucci, 2009; Healey et al., 2007).

2.2. Formas de interacción social: Acción conjunta y coordinación interpersonal.

La interacción social involucra comunicación entre individuos en todas sus formas: cooperación, competencia, imitación, ayuda, juego, etc. (Hari y Kujala, 2009). Varios autores distinguen entre al menos dos niveles de interacción social: coordinación planeada o acción conjunta y coordinación emergente o interpersonal (Knoblich et al., 2011; Marsh, Richardson y Schmidt, 2009; Sängner, Lindenberger y Müller, 2011; Keller, Novembre y Hove, 2014). Existe evidencia de que ambos tipos de coordinación están basados en estrategias cognitivas diferentes.

La coordinación emergente hace referencia a la correlación no accidental de la conducta de dos o más individuos (Sängner et al., 2011). Es automática y no consciente (Knoblich et al., 2011). Puede describirse como un acoplamiento interpersonal de conductas rítmicas. Este tipo de coordinación puede suscitarse de forma inducida si diferentes personas son expuestas a estímulos o tareas similares, lo que elicitaba en ellos procesos cognitivos similares (Marsh et al., 2009). Si se pide a dos sujetos que muevan su dedo al ritmo de una pieza en 160 bpm, cualquier correlación en su movimiento no será debida a la interacción entre ellos, sino al acoplamiento a un estímulo externo. Estaríamos ante un caso de sincronización espuria. Por coordinación emergente se entenderá el acoplamiento perceptual y motor entre individuos únicamente durante la interacción social

(Hasson et al., 2012). Esta es también una forma de acoplamiento del aparato cognitivo de un individuo a estímulos ambientales. No obstante, tiene la particularidad de que los estímulos a los que se acopla un individuo son producidos por el sistema motor de otro (Hasson et al., 2012). Como se argumentará más adelante, este tipo de coordinación es clave para cualquier tipo de acción conjunta (Marsh et al., 2009).

La coordinación planeada o acción conjunta tiene lugar cuando se coordinan de las acciones de dos o más individuos en el espacio y el tiempo de acuerdo un set de reglas compartido para lograr un objetivo común (Sebanz, Bekkering y Knoblich, 2006; Hasson et al., 2012). Requiere de un sistema de comunicación entre los individuos (Hasson et al., 2012); y de un conocimiento general de los roles y normas explícitas e implícitas de la coordinación (Vesper, Butterfill, Knoblich y Sebanz, 2010). En la mayoría de casos de acción conjunta, las acciones de un individuo no pueden ser entendidas de forma aislada de las acciones de los otros; o bien, acciones que pueden realizarse individualmente son más rápidas y precisas si se realizan en equipo (Woodworth, 1939). Depende de metas preestablecidas por los sujetos involucrados en la acción conjunta y de cierta planeación de las acciones a ejecutar, por lo que se asume basada en representaciones (Knoblich et al., 2011).

Tanto la música como los deportes en equipo son buenos ejemplos de acción conjunta, pues requieren de la conducta coordinada y organizada de varias personas para el logro de un fin común, imposible además para un individuo solitario. Durante un juego de fútbol cada jugador debe ajustar sus acciones a las acciones de sus compañeros y del equipo contrario. Tiene que anticipar y completar los movimientos de otros para dar o recibir un pase, ganar un balón, marcar a un rival o anotar un gol. Las acciones de cada jugador y su rango de movimientos son determinados por el desarrollo de los eventos en tiempo real y por la distribución de tareas o asignación de roles previamente acordados (portero, defensa, etc.), así como por el marco normativo del deporte. La ejecución musical también requiere que cada miembro del conjunto actúe de forma coordinada con el resto. Cada músico ejecuta y monitorea sus acciones en el contexto de las acciones grupales, tanto para atender cambios y variaciones en el ritmo o la melodía como para corregir errores de ejecución o sincronía (Goebel y Palmer, 2009; Loehr, Kourtis, Vesper, Sebanz y Knoblich, 2013). Al igual que los deportistas, los músicos deben actuar en conjunto para lograr una meta determinada, y la acción colectiva brinda contexto y significado a la acción individual.

2.2.1. Coordinación interpersonal o emergente:

El aparato cognitivo humano está profundamente acoplado con el ambiente en el que está inmerso. El acoplamiento a los mismos estímulos ambientales o la elicitación de procesos cognitivos similares durante una tarea pueden ocasionar correlación en las acciones de dos personas. La teoría de los “affordances” presenta ejemplos claros de esto. Los affordances son las posibilidades de acción que un objeto o estímulo ofrece (Gibson, 1977). Dependen de las características físicas del objeto y de las posibilidades de acción del observador, estas últimas determinadas por su estructura biológica y por su experiencia (Chemero, 2003). La teoría de los affordances asume que las habilidades cognitivas y motoras de un agente emergen a través de la interacción con las superficies y objetos del mundo real, como tal, son complementarias (Marsh et al., 2009). Así, las herramientas y objetos usados intensivamente se vuelven parte de la estructura cognitiva del sujeto (Hari y Kujala, 2009). Un affordance común, donde un mismo objeto ofrece las mismas posibilidades de acción a diferentes sujetos, puede generar correlación en su conducta (Knoblich et al., 2011). Por ejemplo, la conducta patear ante la observación de una pelota, o la conducta bailar al escuchar una pieza musical determinada. En estos casos, la similaridad en la conducta no está relacionada con la interacción entre sujetos, sino con la interacción de sujetos individuales con estímulos en el ambiente.

No obstante, existen muchos ejemplos de coordinación emergente durante la interacción social. Se ha descrito que durante tareas interactivas que involucran movimientos rítmicos sencillos, los participantes sincronizan su movimiento. Por ejemplo, durante el balanceo de péndulos, durante tareas de “*finger tapping*” o en tareas que requieren movimientos corporales gruesos (Schmidt y O’Brien, 1997; Oullier y Kelso, 2008; Richardson, Marsh, Isenhower, Goodman y Schmidt, 2007). La coordinación se presenta incluso cuando los sujetos son instruídos a mantener su propio ritmo e ignorar las acciones de sus compañeros (Schmidt y O’Brien, 1997).

Durante la caminata conjunta, los peatones ajustan la frecuencia o amplitud de sus pasos a un ritmo común (van Ulzen, et al., 2008). También se puede observar coordinación emergente en conductas sociales a gran escala. Durante ovaciones largas en teatros o salas de conciertos, la audiencia sincroniza el ritmo de sus aplausos, con episodios alternados de conducta sincronizada y desincronizada que dependen del nivel de ruido en la sala (Neda, Ravasz, Brechet, Vicsek y Barabási, 2000).

Un requisito fundamental para que este tipo de coordinación tenga lugar es el intercambio de información entre las personas que interactúan. Por ejemplo, en las tareas de oscilación de péndulos o de mecedoras, la sincronización desaparece tan pronto como se dejan de observar las acciones del otro (Schmidt y O’Brien, 1997; Richardson, Marsh y Baron 2007). Requiere que los individuos perciban regularidades rítmicas en las acciones de otros y que ellos mismos estén produciendo un movimiento rítmico (Phillips-Silver, Aktipis y Bryant, 2010; Keller et al., 2014). Además, la coordinación emergente no puede explicarse únicamente por las características de los objetos o estímulos utilizados durante la tarea, como en el caso de la coordinación espuria. En estudios donde sujetos lado a lado oscilan en una mecedora, los participantes tienden a sincronizar su movimiento incluso si las sillas tienen una diferente frecuencia natural (Richardson et al., 2007).

Una sugerencia importante en la literatura de coordinación emergente es que algunos principios dinámicos que describen la coordinación de las extremidades de un organismo biológico son apreciables durante la coordinación entre individuos (Knoblich et al. 2011). Lo anterior se ha estudiado a través de la aplicación de modelos de coordinación intrapersonal a situaciones de coordinación social, como el modelo de Haken-Kelso-Bunz (HKB) de coordinación bimanual, o la ley de Fitt, que modela la velocidad de movimientos precisos, considerando la magnitud del desplazamiento y el tamaño de la región hacia el movimiento es dirigido (Haken, Kelso y Bunz 1985; Schmidt, Carello y Turvey, 1990; Mottet, Guiard, Ferrand y Bootsma, 2001). Parejas de sujetos que caminan en fila siguen sus propio ritmo si no hay retroalimentación de ningún tipo entre ellos, sin embargo, si están acoplados visual y/o mecánicamente, su patrón de pasos se asemeja al del paso de algunos cuadrúpedos (Harrison y Richardson, 2009). Durante una tarea donde los participantes debían mover de lugar unas placas, la razón entre la longitud de la placa con respecto a la longitud de la mano de un participante determinaba si este utilizaba una o ambas manos para levantarla. De igual forma, la razón entre el tamaño de la placa y la longitud de los brazos de los participantes determinaba si la placa era levantada individualmente o en equipo (Richardson, Marsh y Baron, 2007).

Durante la interacción verbal, los humanos imitan la conducta no verbal de su interlocutor (Chartrand y Bargh, 1999). Además algunas propiedades dinámicas del habla también se ajustan entre los interlocutores, como la elección de palabras, la tasa de pronunciación, la intensidad del habla, las pausas entre diálogos o los patrones de acentuación (Shockley, Baker, Richardson y Fowler, 2007). Ahora bien, incluso en condiciones donde existe comunicación verbal sin contacto visual, los humanos pueden ajustar la frecuencia de sus movimientos a las propiedades dinámicas del lenguaje (Shockley, Santana y Fowler, 2003; Shockley et al., 2007). Así, la coordinación emergente puede establecerse únicamente a través de la comunicación entre sujetos, aún si el contenido de la comunicación no está relacionado con las acciones de los interlocutores (Shockley,

Richardson y Dale, 2009). Además, la coordinación de movimientos oculares durante la interacción verbal puede ser un indicador de comunicación exitosa (Shockley et al., 2009). Por ejemplo, la correlación entre los movimientos oculares de locutores y oyentes durante la narración de una historia predice la comprensión de la historia en cuestión (Richardson y Dale, 2005).

Un mecanismo que posibilita la emergencia de coordinación durante la interacción social es la tendencia a imitar acciones observadas. La imitación brinda una ventaja adaptativa invaluable, permitiendo el aprendizaje rápido de conductas pertinentes para la supervivencia o la resolución de problemas. Durante la observación de otros, los humanos modifican sus propias acciones para hacerlas más congruentes con las observadas. Esta tendencia está relacionada con la actividad de un Sistema de Neuronas Espejo (SNE) en el cerebro humano, que ante la observación de una acción activa los recursos neuronales necesarios para realizar la conducta observada (Häberle, Schütz-Bosbach, Laboisière y Prinz, 2008; Di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese y Rizzolatti, 1992; Oberman, Pineda y Ramachandran, 2007).

Este tipo de coordinación está causalmente relacionado con la emergencia de empatía entre individuos; con la afiliación a un grupo y con la conducta prosocial (Bernieri, 1988; Hove y Risen, 2009; Miles, Nind y Macrae, 2009; Wiltermuth y Heath, 2009). Durante una tarea de *finger tapping* individual, parejas de participantes se sincronizaban cada uno con una clave perceptual diferente, en este caso, metrónomos en diferentes tempos. Posteriormente a la realización de la tarea, los participantes que respondían a señales más similares reportaban mayor empatía entre ellos. (Hove y Risen, 2009). Caminar de forma sincronizada aumenta la disposición a cooperar y la cohesión de grupo (Wiltermuth y Heath, 2009). En un montaje experimental donde los participantes eran deliberadamente imitados, estos ayudaban más a los experimentadores luego de tirar, aparentemente de forma incidental, lápices al piso. De igual forma, los sujetos que eran más imitados en un café, dejaban más propinas a los meseros al retirarse (van Baaren, Holland, Steenaert y van Knippenberg, 2003, van Baaren, Janssen, Chartrand y Dijksterhuis. 2009).

2.2.2. Acción conjunta o coordinación planeada:

La coordinación planeada, como su nombre lo indica, depende de planes de acción que guían la conducta de los individuos que interactúan (Knoblich et al., 2011). Por planes o representaciones de acción entendemos un modelo neuronal de las acciones a realizarse, una relación espacio-temporal de actividad neuronal que modela eventos futuros en el ambiente y predispone al sistema motor a la ejecución de acciones dirigidas a un objetivo (Graybiel, 1998; Handjaras et al., 2015).

Previo al inicio de la acción conjunta, cada individuo involucrado tiene una representación neuronal del rol que debe desempeñar y las acciones que debe realizar (Knoblich et al., 2011). Estos planes no necesariamente especifican precisamente las acciones de cada individuo a lo largo del tiempo. La distribución de roles puede ser suficiente para primar un conjunto de acciones asociados a ese rol (Graybiel, 1998). Sin embargo, la representación de movimientos es de naturaleza dinámica, modificándose y actualizándose conforme la acción es desarrollada (Freyd, 1987, Land, Volchenkoy, Bläsing y Schack, 2013).

La pertinencia de hablar de planes de acción durante la coordinación planeada puede ilustrarse con la ejecución musical. Un músico debe conocer de antemano una melodía para poder tocarla. Debe existir una representación neuronal, a través de un patrón espacio-temporal específico de actividad, de la secuencia de sonidos de una pieza y de los movimientos necesarios para producirla. Aunque la ejecución musical es un proceso *'online'*, donde cada acción es influenciada por las acciones inmediatas anteriores y por la evaluación

de su impacto en el ambiente, siempre es guiada por una meta predefinida. (Koch, Keller y Prinz, 2004; Keller y Koch, 2008).

Existe evidencia de que los humanos representan las acciones o la perspectiva de otros durante la acción en conjunto, aún en condiciones que perjudican su desempeño individual (Samson, Apperly, Braithwaite, Andrews y Bodley-Scott, 2010; Dolk et al., 2003). Por ejemplo, se ha reportado que incluso durante tareas individuales, las acciones de otras personas interfieren con el rendimiento de un individuo. El efecto Simon, el efecto SNARC (Spatial Numerical Association of Response Codes) y el efecto Flanker en contextos sociales son ejemplos de esto.

El efecto Simon tradicional se observa en una tarea donde un participante debe responder a un estímulo con la tecla izquierda de un tablero y a otro con la tecla derecha. Los estímulos son presentados a la izquierda o a la derecha de una pantalla. Si la ubicación del estímulo es congruente con la ubicación de la tecla de respuesta, las respuestas son más rápidas que en ubicaciones incongruentes (Hommel, 2011). En una modificación de esta tarea, dos participantes sentados lado a lado respondían presionando una tecla a solo un estímulo cada uno, mientras ignoraban el otro, de forma similar a una prueba “go/no-go” (Sebanz, Knoblich y Prinz, 2003). Los estímulos eran presentados en la punta de un dedo que apuntaba aleatoriamente a la izquierda o a la derecha. Aunque las acciones del coparticipante no eran relevantes, la respuesta era más lenta si el dedo apuntaba a la otra persona. Pero si un participante hacía la tarea mientras otra persona permanecía sentado a su lado sin participar, el efecto desaparecía. Este efecto tampoco se observaba en sujetos que sin ver al coparticipante asumían que estaban interactuando con un programa de computadora, pero sí en aquellos que asumían que interactuaban con otro ser humano (Tsai, Kuo, Hung y Tzeng, 2008). Más aún, si la tarea se realiza con un robot humanoide el efecto se observa siempre y cuando los participantes asuman que está diseñado para reaccionar de forma similar a un humano (Liepelt et al., 2012).

El efecto SNARC, por otra parte, refleja la organización espacial de números en el aparato cognitivo humano (Fias et al., 1996). Se observa cuando en una tarea los humanos son más rápidos para responder a cantidades pequeñas con la tecla izquierda de un teclado y a cantidades grandes con la tecla derecha, independientemente de la lateralidad de los participantes. Si la tarea se realiza en un contexto social, con una persona respondiendo a números pares y otra respondiendo a impares, el participante ubicado a la izquierda es más rápido para responder a cantidades pequeñas mientras que su compañero es más rápido para responder a cantidades grandes (Atmaca, Sebanz y Prinz, 2008).

El efecto Flanker es utilizado para estudiar la inhibición de respuestas no relevantes durante una tarea. Durante la tarea, el participante debe responder la dirección hacia la que una flecha apunta. La flecha puede estar rodeada de estímulos congruentes, incongruentes o neutros, es decir, flechas apuntando hacia la misma dirección, hacia la dirección opuesta, o estímulos irrelevantes. La tarea también puede adaptarse sustituyendo las flechas por letras, colores u otros estímulos. En una adaptación social de la tarea realizada por Atmaca, Sebanz y Knoblich (2011), los participantes respondían a diferentes estímulos objetivo e ignoraban estímulos no relevantes. Los estímulos no relevantes para un sujeto eran estímulos objetivo para el otro. En estas condiciones, los participantes fueron más lentos para responder a los estímulos objetivo si estos estaban rodeados de estímulos que eran irrelevantes para ellos, pero posibles objetivos para el coparticipante. Más aún, el efecto se sostuvo si los participantes realizaban la tarea de forma individual, pero creían que otro ser humano estaba realizando la parte complementaria de la tarea.

A pesar de lo anterior, en tareas colaborativas el tomar en cuenta las acciones del otro suele incrementar el rendimiento en las pruebas. Por ejemplo, en una tarea individual donde los participantes deben responder

únicamente a un estímulo presentado por una modalidad sensorial e ignorar los estímulos presentados por otras modalidades, la inhibición de estímulos irrelevantes interfiere en sus tiempos de reacción. Aparentemente esto es debido a que los participantes deben inhibir los estímulos no relevantes. No obstante, si la tarea se hace en parejas, y cada participante responde a estímulos de modalidades sensoriales diferentes, este efecto de interferencia disminuye (Heed et al., 2010). Tareas de rastreo visual también se resuelven de forma más eficiente si se realizan en equipo (Brennan et al., 2008).

Parece ser que los humanos toman a otros agentes como punto de referencia para la producción de sus propias acciones (Heed, Habets, Sebanz y Knoblich, 2010). Por ejemplo, tareas de rotación mental son más sencillas si se realizan frente a una que se limita a observar, de tal forma que rotaciones grandes desde la perspectiva del participante que hace la rotación mental son pequeñas desde la perspectiva del observador, pero la tarea es más difícil en el caso contrario (Böckler, Knoblich y Sebanz 2011).

La representación de acciones de otros individuos permite modular el procesamiento de estímulos, monitorear y anticipar la conducta del compañero, y responder adecuadamente durante la acción conjunta (Capozzi, Becchio, Garbarini, Savazzi y Pia 2016; Müller, 2016; Loehr et al., 2013). Los planes de acción individuales son modificados para adaptarse a la participación de un compañero. Sujetos que debían manipular objetos para colocarlos sobre una mesa mostraron mayor velocidad de movimiento comparados con sujetos que debían entregar los objetos en la mano de otra persona. Los movimientos más lentos en la condición social facilitarían la respuesta del compañero y la adaptación mutua de las acciones de los participantes (Becchio, Sartori, Bulgheroni, y Castiello, 2008). No obstante, no está claro como las representaciones de acciones comunes y de metas compartidas estaría anatómica o temporalmente representadas en el cerebro (Konvalinka y Roepstorff, 2012).

Durante una tarea, la acción conjunta también puede reclutar procesos automáticos, como ante la presencia de affordances conjuntos. Un affordance conjunto existe cuando un objeto representa posibilidades de acción para dos o más personas al mismo tiempo, pero para ninguno de ellos de forma aislada (Knoblich et al., 2011). Un ejemplo paradigmático sería el juego mecánico conocido como 'sube y baja'. En una tarea donde los participantes debían cambiar placas de lugar, el paso de acción personal a grupal se daba automáticamente dependiendo de la longitud y peso de la viga a levantar (Richardson et al., 2007b). Más aún, los individuos consideraban las capacidades físicas de los coparticipantes para decidir si cargaban una viga individualmente o entre dos personas. Lo anterior está en línea con la noción de que la planeación de acciones es un proceso dinámico y con la evidencia de que los humanos además de representar sus propias acciones, representan las acciones de otros sujetos durante la acción conjunta.

2.2.3. Procesos claves para la interacción social: percepción conjunta y simulación motora

Ambos tipos de coordinación social dependen de dos mecanismos claves: la percepción conjunta o intercambio de información sensorial de algún tipo, y la implementación de modelos internos en el sistema nervioso de los involucrados en la interacción (Knoblich et al., 2011).

La percepción conjunta y la retroalimentación sensorial tiene un rol crucial para la adaptación de acciones en tiempo real. Ajustar las propias acciones a las acciones de otros solo es posible si se puede evaluar lo que los otros realizan o perciben. En los estudios de sincronización emergente la sincronización se establece tan pronto como hay retroalimentación visual y se pierde en caso contrario (Schmidt y O'Brien, 1997; Richardson et al., 2007). Durante ovaciones, la emergencia o pérdida de sincronización de los aplausos depende de la

retroalimentación auditiva, la sincronización se pierde cuando el nivel de ruido en el auditorio imposibilita la percepción de un ritmo común (Neda et al., 2000).

Además de los ejemplos anteriores, se ha reportado que el desempeño en una tarea de rastreo visual conjunta es mejor que el desempeño individual solo si los participantes comparten la misma información de la escena visual (Bahrami et al., 2010). Participantes colaborando en una tarea de rastreo visual distribuyen el espacio de búsqueda, dirigiendo su atención a zonas donde el otro participante no está mirando (Brennan, Chen, Dickinson, Neider y Zelinsky, 2008). Durante la ejecución musical, parejas de pianistas utilizan claves visuales y auditivas para coordinar su conducta. Si se les priva de retroalimentación auditiva, pueden seguir tocando de forma coordinada, al sobrecompensar con información visual realizando movimientos de manos más ostentosos (Goebel y Palmer, 2009).

Percibir las acciones, sensaciones o emociones de otros activa representaciones corticales que serán similares a las del otro (Keisers y Gazzola, 2009). Esta activación puede sostener la conducta coordinada a lo largo del tiempo a través de la implementación de modelos internos (Sänger et al., 2011). Un modelo interno es la simulación de acciones, ya sean propias o de otras personas, y sus resultados esperados. Se considera que existen dos tipos de modelos internos: los modelos directos, la asociación entre un comando motor y sus consecuencias; y modelos inversos, la asociación entre un resultado deseado y los movimientos necesarios para lograr ese resultado (Cooper, 2010). Son un componente clave para la planeación, monitoreo y anticipación de acciones coordinadas en el tiempo durante la interacción social (Wolpert et al., 2003; Keller et al., 2014). Los humanos utilizan su propio sistema motor para simular las acciones de otros, lo que facilita respuestas similares, permite adaptar sus acciones a las acciones del otro, e induce expectativas y tendencias de acción similares en diferentes individuos (Wolpert, Doya y Kawato; Sebanz y Knoblich, 2009; Knoblich et al., 2011).

La observación de acciones facilita la posterior ejecución de acciones similares de forma más rápida y precisa. Observar movimientos de dedo mejora los tiempos de reacción si el participante debe responder con un movimiento congruente (Brass, 2001). Por el contrario, observar movimientos incongruentes provoca mayor variabilidad en los movimientos propios si quien ejecuta las acciones es otro ser humano, pero no si observan los movimientos de un agente artificial (Kilner, Paulignan y Blakemore, 2003). Más aún, los seres humanos no solo imitan acciones gruesas, sino que incluso algunos parámetros finos, como la velocidad y forma del movimiento, suelen ser imitados. Griffiths y Tipper (2009) diseñaron una tarea de imitación donde los voluntarios debían asir objetos luego de observar las acciones de un experimentador. Las acciones del experimentador eran asir el objeto de manera simple, o hacerlo con movimientos de mano exagerados. Pues bien, los participantes hacían movimientos con mayor amplitud en los ensayos donde observaban movimientos exagerados. Además, las personas hacen movimientos compensatorios involuntarios al observar acciones que no corresponden con sus expectativas de acción, por ejemplo, al observar a alguien manteniendo el equilibrio sobre un rodillo (Sebanz y Shiffrar, 2007; Häberle et al., 2008).

Los modelos internos se establecen a través de la asociación de acciones a sus consecuencias sensoriales por medio de la repetición. Una vez que esta asociación se establece, se pueden anticipar las consecuencias de una acción aún antes de ejecutarla (Hari y Kujala, 2009). Por ejemplo, bailarines profesionales muestran una mayor activación en áreas motoras al observar movimientos de baile que suelen realizar ellos mismos, comparados con movimientos de baile con los que están familiarizados pero no ejecutan personalmente, por ejemplo, los pasos que corresponden al sexo opuesto (Calvo-Merino, Glaser, Grèzes, Passingham y Haggard 2005). También está relacionada con el contexto de la acción observada, es decir, si la conducta observada va dirigida a un objetivo; o si el movimiento observado es de naturaleza biológica (Casile, Caggiano y Ferrari,

2011; Stanley, Gowen y Miall, 2007).

Se ha sugerido que durante la interacción, un individuo modela de forma paralela sus propias acciones, las de su compañero y la interfaz entre las acciones de ambos (Sänger et al., 2011). El monitoreo y adaptación de acciones se da de forma dinámica y en tiempo real a través de la comparación entre los efectos esperados y los efectos obtenidos de las acciones de un equipo (Cooper, 2010). Por ejemplo, en la ejecución musical conjunta, el conocimiento de la parte de un coactor sin conocer su estilo de ejecución, conlleva predicciones de las acciones del otro basadas en el propio estilo musical. Conforme se acumula experiencia en el estilo de ejecución del coactor, cada músico aprende a simular las acciones del otro de forma más precisa (Raggert et al., 2013). Así pues, el modelaje de las acciones de otros humanos mejora con la experiencia y con la observación (Lalazar y Vaadia, 2008).

Además, existen propuestas que defienden que esta simulación conductual es la base del mundo interno, necesaria para simular los estados internos de otras personas (intenciones, creencias, etc) (Lieberman, 2007; Hari y Kujala, 2009). Por ejemplo, durante una tarea dos participantes respondían con determinadas acciones a claves de color. Cuando un participante observaba un color que indicaba que era turno del coactor, se activan las áreas cerebrales asociadas a la ejecución de la tarea, pero también áreas relacionadas con la atribución de estados mentales (Ramnani y Miall, 2004).

2.2.4. Regulación mutua de coordinación planeada y emergente durante la interacción social.

El estudio de la coordinación planeada suele abordarse desde una perspectiva representacionista (Fuchs y De Jaegher, 2009), que considera que los individuos crean modelos mentales de la realidad exterior, y que estas representaciones son la base de los procesos cognitivos. Pone énfasis en los procesos internos que generan la conducta y asume que la cognición puede entenderse no solo estudiando mentes individuales, sino relativamente aisladas de su entorno ecológico (Konvalinka, 2012). Por otra parte, el estudio de la coordinación emergente está más en línea con una perspectiva dinámica e interactiva (Marsch et al., 2009). La perspectiva dinámica asume que los procesos cognitivos son evocados a través de la interacción de un organismo con el ambiente (Froese y Di Paolo, 2010). Como tal, dependen de las características y demandas de una tarea específica en un contexto determinado. Esta perspectiva enfatiza que la esencia de la interacción social está en el aspecto dinámico de la interacción misma, más que en el cerebro individual de los sujetos (Schilbach et al., 2013; Froese et al., 2014). A través de la interacción social pueden extenderse las posibilidades de acción de un organismo, emergen conductas que no son posibles para individuos aislados (Froese et al., 2013). La perspectiva dinámica enfatiza que durante la interacción los humanos actúan como una unidad acoplada que no puede estudiarse ni entenderse adecuadamente a través del estudio de sujetos aislados (Schilbach et al., 2013; Konvalinka y Roepstorff, 2012).

Ambas posturas se enfocan en aspectos separados de la interacción social y de los procesos que subyacen a esta interacción. Por lo expuesto hasta el momento, parece claro que la representación de planes de acción es un mecanismo clave de la ejecución de acciones individuales o conjuntas. Estos planes de acción son dependientes del contexto y de la tarea. Pero la emergencia de fenómenos conductuales o cognitivos exclusivos de la interacción social, como los ejemplos mencionados en la coordinación emergente, también está ampliamente documentado.

Cualquier acción conjunta, para ser exitosa, involucra la regulación mutua de ambos tipos de coordinación. Esta interacción permite la existencia de conductas coordinadas precisas y flexibles (Knoblich et al., 2011;

Keller et al., 2014). La interacción planeada permite la distribución de diferentes partes de una tarea y prima un repertorio conductual apropiado para el rol que se desempeña. La interacción planeada tiene también un rol importante en la modulación y el monitoreo de las acciones propias y ajenas de acuerdo a los roles de los participantes en la interacción. Además, permite ajustes de alto nivel a la estrategia de interacción, modificando roles y conductas a través del lenguaje u otras claves comunicativas (Knoblich et al. 2011). Por otra parte, la interacción emergente es independiente de los planes de acción de los individuos, pero es clave para lidiar con los aspectos temporales de la interacción. Posibilita la ejecución precisa de acciones, la corrección de movimientos en tiempo real, y la anticipación a las acciones del otro (Keller et al., 2014; Knoblich et al., 2011).

Se ha reportado que inducir coordinación emergente mejora el rendimiento en tareas conjuntas posteriores. Participantes que oscilaban en mecedoras uno al lado del otro mostraban mayor sensibilidad para percibir el movimiento de otras entidades y su desempeño en una tarea donde debían colaborar para mover una pelota por un laberinto se veía mejorado en comparación con sujetos que se habían medido sin retroalimentación de las acciones del compañero (Valdesolo, Ouyang y DeSteno, 2010).

Otro estudio que ilustra como la coordinación emergente y la coordinación planeada juegan un rol complementario durante la acción conjunta fue realizado por Müller et al., (enviado). En el experimento, equipos de futbolistas semiprofesionales jugaban partidos de práctica mientras escuchaban estímulos rítmicos. Como se ha explicado, los seres humanos tienden a acoplarse a estímulos externos. Así, se manipulaba la coordinación emergente entre los miembros del equipo a través de los estímulos rítmicos. Todos los miembros del equipo escuchaban el mismo estímulo con el mismo tempo o cada jugador escuchaba el estímulo en tempos diferentes. Los equipos que escuchaban el ritmo en el mismo tempo mostraron un mejor desempeño, determinado por el número de goles y pases efectivos, que los equipos que escuchaban estímulos en tempos diferentes.

2.3. Sistemas cerebrales relacionados con procesos de interacción social.

Un conjunto de áreas cerebrales se han asociado con la evaluación y anticipación de acciones y sus resultados, así como con procesos de imitación. El surco temporal superior posterior, el lóbulo parietal inferior, el cortex premotor, y el giro frontal inferior juegan un rol importante en las habilidades de detección y reconocimiento de movimiento biológico, así como la descripción de acciones de otros (Allison, Puce y McCarthy, 2000; van Overwalle, 2009). Por otra parte, el cortex prefrontal lateral, el cortex parietal lateral y el cortex parietal inferior se relacionan con el procesamiento de información propioceptiva y el control motor, pero también con la observación, representación e imitación de acciones (Tanji y Hoshi, 2008; Gottlieb, 2007). De hecho, se ha propuesto que el sistema de neuronas espejo tiene áreas en el el cortex prefrontal lateral, el cortex parietal lateral y el surco temporal superior (Rizzolati y Craighero, 2004). Si bien el sistema de neuronas espejo responde igual para acciones ejecutadas y observadas, parece ser que un subconjunto especializado responde solo ante la percepción de acciones de otros (Keysers y Perret, 2004). Se ha sugerido además que el cortex premotor es clave para la anticipación de acciones de otros, modelando los trayectos de acciones percibidas dentro del propio sistema motor (Iacoboni, 2005).

Además de las áreas ya mencionadas, la unión temporoparietal y el surco temporal superior se han relacionado con la inferencia de metas e intenciones de acciones específicas de otras personas, pero también con otros procesos relevantes para la interacción social, como el sentido de agencia y la toma de perspectiva (van

Overwalle, 2009; Vander Wyk, Sobel, Pelphrey, Hudac y Carter, 2009; Pelphrey, Morris y McCarthy, 2004). Mientras la unión temporoparietal se relaciona con la anticipación de los resultados de una acción y con la anticipación de eventos físicos, el cortex prefrontal medial se asocia con la inferencia de objetivos globales, planes y estrategias de un conjunto o secuencia de acciones, así como los rasgos psicológicos asociados a estas acciones. El cortex prefrontal medial también juega un rol en la evaluación de la conducta de un agente a lo largo del tiempo y bajo múltiples circunstancias (Ma, Vandekerckhove, van Hoeck y van Overwalle, 2012; van overwalle, 2009; Krueger, Barbey y Grafman, 2009). Tanto la unión temporoparietal como el cortex prefrontal medial tienen un rol fundamental y complementario con la inferencia y evaluación de planes de acción en diferentes escalas temporales, y en la atribución de estados mentales a otras personas (de Lange, Spronk, Willems, Toni y Bekkering, 2008).

El cortex prefrontal medial tiene un alto grado de interconectividad con otras áreas cerebrales, con conexiones aferentes del cortex prefrontal dorsolateral, el surco temporal superior, la unión temporoparietal y otras áreas (Amodio y Frith, 2006). Es relevante para el establecimiento de normas de conducta interpersonal y juicios sociales (van Overwalle, 2009). La parte dorsal del cortex prefrontal medial está relacionada con la evaluación de rasgos de personalidad, ya sea a partir de las acciones de otros o a partir de la integración de experiencias pasadas (Mitchell, 2004)

Además de la formación juicios sociales e inferencia de metas conductuales, la actividad del cortex prefrontal tiene relación con procesos de control y regulación durante la interacción social. El cortex prefrontal ventral lateral está relacionado con la inhibición de la propia experiencia para separarla de la de otros (Samsong, Apperly, Kathirgamanathan y Humphreys, 2005). El cortex dorsal del cíngulo anterior se asocia con la detección de conflictos entre los resultados esperados de una acción y los resultados obtenidos, así como con la regulación de respuestas prepotentes (Botvinick, Collen y Carter, 2004; Botvinick, 2007). El cortex prefrontal lateral se asocia con el mantenimiento de metas en la memoria de trabajo durante el desarrollo de una acción y con la atención selectiva a estímulos sociales; así como la inhibición de estímulos y respuestas no relevantes (Lieberman, 2007; Park, Van Bavel, Hill, Williams y Thayer, 2016).

Así, el estudio de la actividad cerebral en áreas prefrontales y motoras, además de la unión temporoparietal y áreas adyacentes, parece importante para comprender cómo nuestro sistema nervioso lidia con los requerimientos de la interacción social.

Capítulo 3

Hyperscanning

En las últimas décadas se ha popularizado la idea de que la sincronización de actividad cerebral entre distintas personas tiene un rol prominente durante la interacción social (Dumas, Lachat, Martinerie, Nadel y George, 2011, Sanger et al., 2011, Babiloni y Astolfi, 2014). Dichos patrones de sincronizaci3n intercerebral se conocen como hiperconexiones. Sin embargo, los primeros intentos de probar la existencia de sincronizaci3n intercerebral se remontan a la d3cada de 1960, mientras que los primeros estudios sistemáticos se realizaron en la d3cada de 1980 y 1990 en M3xico. Estos estudios pioneros buscaban demostrar la existencia de fen3menos parapsicol3gicos, como la percepci3n o comunicaci3n extrasensorial (Duane y Behrendt, 1965; Grinberg-Zylberbaum y Ramos, 1987; Grinberg-Zylberbaum et al., 1993).

El inter3s en la sincronizaci3n intercerebral ha resurgido a partir de la aparici3n de la t3cnica de registro simult3neo de actividad cerebral conocida como hyperscanning y del desarrollo de nuevas herramientas de an3lisis que permiten inferir conectividad funcional cerebral a partir de se˜ales registradas en diferentes 3reas. El hyperscanning es el registro simult3neo de la actividad cerebral de dos o m3s personas de manera simult3nea, usando cualquier t3cnica de neuroimagen. Dentro de la literatura en el campo, los dise˜os que utilizan EEG o fNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy) son los m3s comunes.

El procesamiento y transmisi3n de informaci3n intracerebral es a trav3s de patrones de actividad neuronal sincronizada. En la teor3a de sistemas din3micos se puede entender dos osciladores acoplados como un solo sistema. Ahora bien, a trav3s de la interacci3n social dos o m3s personas se acoplan, por lo que puede aplicarse la misma idea al estudio de fen3menos sociales. Una propuesta interesante es que el sistema formado a trav3s de la interacci3n social puede depender de los mismos principios que un sistema aislado, es decir, un cerebro individual. Es posible que la transmisi3n y procesamiento de informaci3n social tambi3n dependa de patrones de actividad neuronal sincronizada entre las diferentes personas que interactúan. Este tipo de fen3menos pueden estudiarse a trav3s del hyperscanning.

Un problema dentro de los estudios de neuroimagen durante la coordinaci3n social antes del desarrollo de esta t3cnica era que en pocas ocasiones se utilizaban tareas que no involucraban la interacci3n social directa. La conducta social se estudiaba a trav3s de la presentaci3n de videos o im3genes de interacciones sociales o de relevancia social, p.e., im3genes de rostros con contenido emocional (Dumas et al., 2011). A pesar de que la existencia de un sistema de neuronas espejo en el cerebro humano es poco discutida, no tiene fundamento asumir que las demandas f3sicas y cognitivas que requieren observar o juzgar una interacci3n social y formar

parte de la interacción social son siempre las mismas. El hyperscanning permite sobrepasar estas limitaciones al hacer viable la interacción social directa entre participantes.

El EEG es ideal para estudios de hyperscanning durante tareas que requieren gran precisión temporal, debido a que registra la actividad eléctrica cortical con una alta definición en el tiempo. Comparado con otras técnicas de neuroimagen, como la resonancia magnética funcional, que solo permite hacer registros con una frecuencia alrededor de 1 Hz, el EEG provee registros con frecuencias superiores a los 1000 Hz. Además es una técnica no invasiva y permite mayor libertad de movimiento que el fMRI (funcional Magnetic Resonance Imaging), el PET (Positron Emission Tomography) o el MEG (Magnetic Encelography). Su principal desventaja es la pobre resolución espacial que es capaz de lograr. Por su pertinencia para el presente documento de tesis, a continuación se presentará una revisión comprehensiva de la literatura de hyperscanning con EEG publicados hasta la fecha. Se dejará de lado, de manera injusta quizá, la basta literatura de hyperscanning utilizando fNRIS u otras técnicas de neuroimagen.

3.1. Hyperscanning durante la coordinación interpersonal.

Existen algunos estudios de hyperscanning con EEG durante el acoplamiento conductual. En uno de los primeros trabajos en utilizar la técnica de hyperscanning (Tognoli, Lagarde, DeGuzman, y Kelso, 2007), se pedía a parejas de participantes mover sus dedos con su ritmo preferido en dos condiciones: con y sin visión del coparticipante. Al igual que en estudios previamente referidos, la visión de las acciones del coparticipante provocaron sincronización de los movimientos de ambos miembros de la pareja. Aunque no se realizaron análisis de sincronización de señales intercerebrales, los autores reportan que un par de componentes espectrales entre 9 y 13 Hz ubicados en zonas centroparietales, principalmente derechas, distinguen de forma robusta la conducta sincronizada de la no sincronizada. Estos componentes fueron denominados en conjunto phi complex. Específicamente, el componente denominado phi-1, entre 9.2 y 11.8 Hz, aumenta durante la conducta sincronizada, mientras que un segundo componente phi-2, entre 11.8 y 13 Hz aumenta durante la conducta no sincronizada.

Siguiendo un procedimiento similar al de Tognoli, Naeem, Prasad, Watson y Kelso, (2012), pidieron a parejas de participantes hacer movimientos de dedos bajo tres condiciones: sincronizando en fase, sincronizando en antifase, y siguiendo su propio ritmo. Los análisis espectrales mostraron que la supresión de potencia en la banda alfa rápida, entre 10 y 12 Hz, es mayor durante la sincronización en antifase y disminuye sistemáticamente al pasar a la condición en fase y a la condición intrínseca. La supresión dependiente de la tarea se presentó en todos los electrodos, pero fue especialmente marcada en electrodos centroparietales derechos. En otra publicación del mismo experimento de *finger tapping*, Naeem et al., (2012), confirmaron estos resultados. Reportaron una disminución de potencia en alfa entre 10 y 12 Hz en ambos hemisferios durante la coordinación, acentuada en el hemisferio derecho durante los periodos de coordinación en anti-fase, lo que presumiblemente estaría relacionado con un aumento en la dificultad de la tarea.

Dumas, Nadel, Soussignan, Martinerie y Garnero, (2010), por otra parte, pidieron a parejas de participantes hacer movimientos manuales frente a una cámara, mientras observaban a través de una pantalla y en tiempo real los movimientos del coparticipante. Posteriormente, clasificaron las señales EEG con respecto a episodios de conducta sincronizada y no sincronizada; y con respecto a si el episodio correspondía a un sujeto que iniciaba una acción (modelo) o a un sujeto que la imitaba. Durante la sincronización de movimientos manuales, reportaron mayor sincronización intercerebral en la banda alfa en regiones parietales derechas de ambos sujetos (P8), en la banda beta en regiones centrales del modelo (FC1, Cz) y regiones parietooccipitales en el

seguidor (P8, PO2, PO10); y en la banda gamma en áreas frontales derechas del modelo (F4, FC2, Cz, C4, CP6) y en áreas parietales derechas del imitador (CP2, Pz, P4, P8, PO2).

Otro estudio relevante exploró la sincronización involuntaria de movimientos manuales en parejas de participantes antes y después de una serie de sesiones de sincronización intencional, así como su relación con la actividad EEG de los sujetos (Yun, Watanabe y Shimojo, 2012). Durante los registros de sincronización involuntaria, los participantes debían mantener su brazo extendido y estático mientras permanecían de pie frente a frente. A pesar de la instrucción de permanecer inmóviles, durante estas sesiones se observó una alta correlación de micromovimientos involuntarios, que fue mayor y más estable después de la sincronización intencional y que no estaba presente al comparar los datos de parejas aleatorias. El aumento en la sincronización luego del entrenamiento se relacionó además con mayores hiperconexiones en áreas frontocentrales, parietales y temporales principalmente en las bandas theta y beta.

Konvalinka et al., en una publicación de 2014, registraron la actividad EEG de parejas de participantes mientras realizaban una tarea de *fingertapping*. Durante la tarea, los participantes estaban sincronizados con una computadora o sincronizados entre sí: recibían retroalimentación auditiva de las acciones del otro participante o de un metrónomo. Durante la tarea se reportó una supresión de potencia en 10 Hz en electrodos centrales izquierdos y frontales. La supresión era significativamente mayor durante la condición interactiva que durante la sincronización con computadora. Además, durante la interacción se observó una supresión en beta lenta, entre 13 y 15 Hz, en electrodos frontocentrales y centroparietales. Aunado a lo anterior, la supresión de alfa estaba asociada al rol que los sujetos desempeñaban durante la tarea. Los líderes mostraban mayor supresión en 10 Hz, principalmente en electrodos frontales derechos. La supresión en la banda alfa podría estar relacionada con un cambio en el foco atencional para el monitoreo de las propias acciones.

También se ha explorado la actividad EEG durante la interacción con humanos y la interacción con robots. Durante un experimento un participante observaba movimientos de naturaleza biológica, es decir, realizados por otro humano, o no biológica, implementados por un robot (Ménoret et al., 2013). La tarea tenía una condición interactiva, donde el participante debía realizar una acción complementaria a la observada; y una condición de no interacción, donde se limitaba a observar. Después del inicio de la acción, las señales EEG tanto del actor como del observador mostraban supresión en la banda beta. Esta supresión era mayor en el contexto interactivo en áreas centrales, frontocentrales y centroparietales (C4, CP6, F3, FC1 para actor y CP1, Cz, FC2 y C4 para observador), especialmente en el electrodo C4. No obstante, la supresión no era exclusiva de acciones biológicas, por lo que probablemente refleja la preparación del sistema motor para realizar la acción complementaria.

Se han explorado los procesos de coordinación emergente durante tareas de lenguaje. En Kawasaki, Yamada, Ushiku, Miyauchi y Yamaguchi, (2013), se pidió a parejas de participantes pronunciar de forma alternativa las letras del alfabeto mientras su actividad eléctrica cerebral era registrada. Es importante mencionar que en una condición de control la tarea se hacía con un robot mientras el coparticipante observaba. Durante la interacción entre humanos, la duración e intervalos entre vocalizaciones estuvo correlacionada entre los sujetos, sin embargo, esto no sucedía en la condición de interacción con robot. Los autores reportaron un aumento en la actividad espectral entre 6 y 12 Hz en áreas frontales durante toda la tarea (C3, T7, CP1, CP2). Además, estimaron la correlación intercerebral de las amplitudes de las señales EEG de ambos sujetos entre 6 y 12 Hz. Durante la interacción entre humanos había una mayor correlación en áreas frontales del hemisferio izquierdo, en áreas temporales y en áreas centroparietales de ambos hemisferios (F7, FC5, T7, T8, CP1 y CP2). De forma crítica, los coeficientes de correlación entre electrodos parietales y temporales correlacionaban a su vez

con la sincronización del lenguaje entre los participantes. Además, durante la observación del coparticipante interactuando con un robot, también se reportó correlación intercerebral en electrodos frontales y temporales izquierdos, así como en centroparietales de ambos hemisferios (F7, T7, CP1 y CP2).

Kuhlen, Allefeld y Haynes (2012), diseñaron un experimento donde registraban la actividad EEG de participantes mientras contaban una historia breve. Los locutores eran videograbados y posteriormente superponían las imágenes de los videos de dos locutores contando historias diferentes eran presentados a otros participantes, con la instrucción de prestar atención a solo uno de los narradores. Reportan un componente específico en frecuencias muy lentas, por debajo de 3 Hz, extraído a través de una Análisis de Componentes Independientes (ICA), común entre todos los participantes que observaban la misma narración, con principal participación de áreas centroparietales, centrorfrontales, frontales derechas y temporales derechas. Más aún, la actividad de este componente estuvo significativamente correlacionada con un retraso, de alrededor de 12 segundos, entre áreas frontales derechas de los locutores y frontocentrales de los escuchas. Presumiblemente este retraso estaba asociado con el periodo de tiempo necesario para que un narrador relate unidades grandes de información semántica.

3.2. Hyperscanning durante la acción conjunta

Existe una literatura más extensa durante paradigmas que incluyen tareas de acción conjunta y/o cognición social, entendida como una simulación o inferencia de los procesos cognitivos y emocionales de otras personas.

Se han utilizado paradigmas clásicos en neurociencias sociales en diseños de hyperscanning, como el dilema del prisionero, el juego de la gallina y el Third Party Punishment Paradigm (TPPP).

El dilema del prisionero plantea una situación hipotética a una pareja de participantes: Ambos son una pareja de criminales que han sido arrestados. Si durante el interrogatorio ninguno de los dos incrimina al otro, ambos irían a prisión por un corto periodo de tiempo. Sin embargo, si uno de los dos confiesa, el otro iría a prisión con una sentencia larga mientras que el traidor saldría libre. Pero si ambos criminales confiesan, ambos irían a prisión con una sentencia larga. Así, está en el mejor interés de ambos prisioneros cooperar entre ellos. Sin embargo, esto no siempre sucede (Axelrod, 1980). En situaciones de laboratorio, se suelen asignar recompensas y castigos económicos en cada ensayo. Si ambos participantes eligen cooperar, ambos reciben una recompensa económica pequeña. Si uno elige cooperar y el otro no, quien no coopera recibe una recompensa económica grande mientras que el otro recibe un castigo económico grande. Sin embargo, si ninguno coopera, ambos reciben un castigo económico.

En De Vico Fallani et al., (2010) parejas de participantes jugaron el dilema del prisionero iterativo mientras su actividad EEG era registrada. Posteriormente se estimó la conectividad funcional intercerebral y algunas medidas derivadas de la teoría de gráficas, como eficiencia global, modularidad y divisibilidad de la red intercerebral. Durante los ensayos donde ninguno de los participantes cooperó, la eficiencia de la red intercerebral fue mínima, mientras que la modularidad y divisibilidad de la red fue máxima para todas las bandas de frecuencia. Por el contrario, cuando ambos participantes cooperaban la eficiencia de transmisión de información fue máxima y la modularidad y divisibilidad mínima. Además de lo anterior, durante episodios en los cuales ninguno de los participantes cooperó, la conectividad intracerebral en áreas centrales y fronto-polares (BA10, ACC) para las bandas beta y gamma fue menor que durante otros ensayos.

Previamente Babiloni et al., (2007), siguieron un procedimiento similar, pero se limitaron al análisis de la red intracerebral. En este caso, usando una medida direccional, midieron el outdegree (número de conexiones

del electrodo j hacia el resto de electrodos de la red) e indegree (número de conexiones de los electrodos de la red al electrodo j) de la red intracerebral. Sus resultados mostraron una mayor conectividad de áreas centrales (córtex cingulado anterior) con áreas frontales (áreas de Brodmann 8 y 9) cuando ambos jugadores no cooperaban. Durante esta condición había una mayor conectividad indegre en áreas frontales (BA8) y una mayor conectividad outdegree en áreas centrales (ACC) en la banda alfa. Así mismo, la eficiencia global de la red (bajo número de relevos para que la información del nodo j llegue a cualquier otro nodo de la red) aumentó durante los episodios de no cooperación.

Astolfi et al., 2009, también usaron una tarea de dilema del prisionero para explorar la actividad eléctrica intracerebral durante la interacción. El análisis del espectro de potencias indicó que durante la cooperación hubo activación en áreas temporales en las bandas theta y alfa, comparado con *resting state*. Durante la no cooperación, la activación se extendió a áreas parietocentrales, parietales y frontales en las mismas bandas.

Una tarea similar al dilema del prisionero es el juego de la gallina. El planteamiento es el siguiente: dos pilotos manejan una contra el otro por una carretera de una sola vía. Si ninguno frena ambos tendrían una pérdida económica grande; si uno frena y otro no, el que frena tiene una pérdida grande mientras que el que no frena tiene una ganancia grande; si ambos frenan, ambos tienen una pequeña ganancia. Quien frena es considerado la “gallina” (Rapoport y Chammah, 1966). Durante la cooperación en esta tarea, Astolfi et al., (2010), reportaron una mayor actividad espectral en la banda beta, especialmente en áreas frontales izquierdas (áreas de Brodmann 44/45 y 10/11). Durante los ensayos de no cooperación, por otra parte, observaron que la activación del lóbulo frontal lateral izquierdo se intensificó aún más llegando a alcanzar áreas motoras. Así mismo, reportaron mayor conectividad intracerebral entre las áreas de Brodmann 10, 7 y el área motora del cíngulo durante la cooperación en la banda theta.

También se ha utilizado el hyperscanning durante paradigma común para el estudio de la empatía, el TPPP (Astolfi et al., 2015). Durante dicho paradigma, una pareja de sujetos realizan otra tarea conocida como juego del dictador mientras un tercero observa. Cada ensayo inicia con 20 puntos que solo uno de los jugadores, designado como el dictador, puede repartir entre los miembros de la pareja de forma justa (10/10), injusta (14/6) o hyperinjusta (18/2). El sujeto que observa, a su vez, cuenta con 4 puntos de castigo que puede usar a lo largo de la prueba. Por cada punto de castigo utilizado el dictador pierde 3 puntos y el otro participante gana 1. Los roles fueron asignados al azar en cada grupo. Para la mitad de los ensayos una computadora asumió el rol del dictador. Durante el análisis, se centraron en la actividad EEG del miembro de la pareja que no tomaba las decisiones y el observador. Los autores reportaron más hyperconexiones en la banda alfa durante los ensayos injustos entre el miembro de la pareja que no tomaba decisiones y el observador. De forma consistente con publicaciones anteriores, la divisibilidad de la red fue mayor y la densidad de conexiones menor cuando la computadora tomaba decisiones injustas comparado con cuando un humano tomaba dichas decisiones. Además, decisiones más injustas se relacionaron con mayor hiperconectividad y menor divisibilidad de la red intercerebral.

Yun, Chung y Jeong, (2008), registraron a parejas de participantes mientras jugaban el “Ultimatum Game” donde dos jugadores deben repartirse una cierta suma. Uno de los participantes hace una propuesta de cómo distribuir la suma. Si el otro acepta, ambos reciben el dinero de acuerdo a la propuesta, pero si rechaza la propuesta, ninguno recibe nada. Durante la tarea, los participantes mostraron mayor actividad espectral en zonas frontales derechas en las bandas beta y gamma, así como hyperconexiones en zonas frontocentrales de ambos participantes.

Durante una adaptación de una tarea conocida como “Matching pennies”, Flexer y Makeig, (2007), registraron

la actividad EEG de parejas de participantes. En la tarea cada participante muestra una cara de una moneda. Si ambos muestran la misma cara, el participante A gana; de lo contrario el participante B gana. (ver camerer, 2003). Utilizando un Análisis de Componentes Independientes (ICA), reportaron una activación en regiones fronto-centrales en la mayoría de los participantes durante la tarea.

En uno de los estudios más recientes utilizando paradigmas de cognición social, Chung, Yun y Jeong, (2015), pidieron a grupos de cinco participantes jugar una tarea denominada “Public goods game” durante un registro de hyperscanning. En dicho juego, cada participante tiene una cantidad determinada y debe decidir si aporta dicha cantidad a un fondo común o si lo guarda para si mismo. Una vez que cada participante ha decidido, se añade un bono al fondo común y se reparte equitativamente entre los participantes, independientemente de su decisión. Así, la colaboración es una estrategia que beneficia a todos los miembros del grupo, pero se pueden obtener grandes beneficios si se decide no colaborar. Derivado de sus análisis, perturbaciones espectrales entre 12 y 50 Hz en áreas centroparietales y temporales pueden predecir la disposición de los participantes a cooperar o no cooperar en cada trial.

Existe un estudio, reportado en múltiples ocasiones, de conectividad intercerebral durante un juego de cartas (Babiloni et al., 2006; Babiloni et al., 2007; Astolfi et al., 2010). En este experimento cuatro sujetos jugaban en parejas un juego conocido como “Tressette”. El análisis de la conectividad intracerebral mostró mayores conexiones outdegree en áreas centrales y motoras (córtex del cíngulo anterior y área motora del cíngulo), y mayores conexiones indegree en áreas fronto-laterales (áreas de Brodmann 10, 9/46, 8) para las bandas theta, alfa, beta y gamma. Así mismo, solo los jugadores del mismo equipo mostraron conectividad intercerebral significativa, con hiperconexiones de áreas frontales del primer jugador a áreas parietales y centrales del segundo en la banda beta, y de áreas frontales a áreas centrales y parietales izquierdas en la banda gamma.

También se ha explorado la conectividad intercerebral en tareas que simulan escenarios reales. Por ejemplo, con simuladores de vuelo. Bezerianos et al., (2015), registraron la actividad EEG de parejas de pilotos mientras usaban un simulador en dos niveles de dificultad, que diferían en la cantidad de ajustes necesarios durante la tarea. Los análisis revelaron que durante la condición difícil hubo mayores hiperconexiones entre 1 y 30 Hz desde áreas motoras centrales y parietales del copiloto hacia áreas frontales del piloto, pero no había diferencias en las hiperconexiones de piloto a copiloto.

Astolfi et al., (2011, 2012), también utilizaron un simulador de vuelo para registrar parejas de piloto durante una serie de tareas. Reportaron un aumento en la densidad espectral en la banda theta en electrodos frontales (F3, Fz y F4) y menor actividad en la banda alfa en áreas parietales (P3, Pz y P4) de los participantes. Así mismo, identificaron hiperconexiones en la banda alfa entre áreas frontales y parietales de los pilotos durante las tareas que requerían mayor coordinación, como durante el despegue, comparado con tareas que requerían acciones individuales.

Utilizando la misma tarea de simulación de vuelo, Toppi et al., 2016, reportaron que durante el despegue hubo mayor activación en zonas parietales y frontales centrales en el piloto en la banda theta, y en zonas frontocentrales en piloto y copiloto durante la fase de aterrizaje en la misma banda. Además, en línea con los resultados de estudios anteriores, observaron mayor hiperconectividad en áreas frontales y parietales de piloto y copiloto en las bandas theta y alfa durante las tareas que requerían mayor demanda cognitiva, es decir, durante el despegue y el aterrizaje de la aeronave, pero especialmente durante esta última fase. Adicionalmente, crearon parejas aleatorias de pilotos para hacer una comparación con el número de hiperconexiones en parejas reales. Solo se observó una diferencia significativa entre parejas reales y parejas aleatorias durante la fase de aterrizaje. Cabe resaltar que en fases de poca interacción, la sincronización intercerebral fue menor

en parejas reales que en parejas aleatorias, y solo era mayor cuando ambos tenían que coordinar de forma efectiva.

Uno de los estudios mejor controlados, en el sentido de que separan efectos sensoriomotores e ideomotores de efectos debidos a la interacción social, fue elaborado por Astolfi et al., en 2014. Ellos utilizaron una tarea de interacción por computadora que consistía en arrastrar un balón a una zona determinada en la parte superior de una pantalla. El balón estaba sobre una barra, para cargarlo, cada participante debía manipular una parte de la barra. Para hacer la tarea más complicada, había un obstáculo en el medio de la pantalla. Parejas de participantes completaron la tarea bajo una de tres condiciones: de forma conjunta, de forma individual, donde un solo individuo manejaba ambos extremos de la barra; y una condición control donde los individuos creían que completaban la tarea con una computadora, pero en realidad la completaban junto con otro participante. Los autores reportaron que durante la condición conjunta hubo una alta conectividad intercerebral en la banda theta que disminuía durante la condición de juego con computadora y durante la condición individual, mientras que al mismo tiempo la divisibilidad de la red se redujo significativamente durante la condición conjunta. Sus resultados sugieren que la atribución de agencia, asumir que se interactúa con otro ser humano, es un componente clave de la interacción social.

Sinha, Maszczyk, Zhang, Tan y Dauwels, (2017), registraron la actividad EEG de parejas de participantes durante una tarea virtual en contexto competitivo o cooperativo. En el contexto competitivo, los participantes se enfrentaban en un juego de ping-pong virtual. Durante la cooperación ambos participantes actuaban como un equipo, cada uno a cargo de una parte de la cancha, para derrotar a un programa de computadora. Una modificación innovadora es que manipularon la presencia física de los participantes durante las tareas, puesto que algunas parejas estuvieron presentes en el mismo espacio y otras estaban en localizaciones diferentes, interactuando a través de internet. Sus resultados mostraron que la sincronización intercerebral promedio fue significativamente mayor durante la cooperación que durante la competencia, con conexiones significativas entre áreas parietales y frontales de ambos sujetos en la primer condición en las bandas alfa y beta. No obstante, la sincronización intercerebral fue significativamente mayor cuando los sujetos estuvieron en lugares separados comparados con las interacciones en el mismo espacio físico en todas las bandas de frecuencia.

En el primer estudio publicado de hyperscanning durante tareas musicales (Lindenberger, Bruber y Müller, 2009), se examinó la actividad cerebral de guitarristas tocando una pieza en conjunto, precedidos por 4 pulsos de metrónomo. Encontraron que la sincronización de fase intercerebral entre 3 y 8 Hz en electrodos frontales y centrales se incrementa durante los pulsos del metrónomo y al inicio de la ejecución musical conjunta. En sus resultados, la sincronización intra e intercerebral estuvo fuertemente acoplada a estímulos ambientales significativos, como los pulsos del metrónomo o la señal de inicio para la ejecución. Estos resultados fueron replicados por el mismo equipo de investigación utilizando una pieza a dos voces (Sänger, Müller y Lindenberger, 2012) y durante la improvisación musical (Müller, Sänger y Lindenberger, 2013).

Existen otros trabajos de hyperscanning con música. En Babiloni et al., (2011, 2012) registraron a cuartetos de saxofonistas mientras ejecutaban u observaban la ejecución de una pieza musical. Además, aplicaron una medida de empatía a los músicos que participaron en el estudio. Los resultados mostraron que durante la ejecución musical, la potencia en la banda alfa decreció con respecto al *resting state* en varias áreas corticales (Fz, Cz, Pz), mientras que la actividad en la banda beta aumentó. En individuos más empáticos se observó menor activación con respecto al control, inferida por la distribución espectral de las señales, en áreas frontales centrales y laterales durante la observación y la ejecución musical en la banda alfa. En individuos menos empáticos, por otra parte, se reportó que había mayor actividad con respecto al control durante la

observación en zonas frontales bilaterales en alfa lenta (8-10 Hz), mientras que la actividad en alfa rápida se limitaba al hemisferio derecho (10-12Hz). Durante la ejecución hubo un decremento en ambas bandas alfa con respecto al control en áreas frontales. Además, hubo una correlación significativa entre el puntaje en la prueba de empatía y la activación o desactivación con respecto al control en áreas frontales.

3.3. Alcances y limitaciones de los estudios de hyperscanning

La sincronización intercebral cuando dos personas realizan una acción de forma conjunta implica que la diferencia de la fase instantánea de las señales cerebrales de ambos individuos es constante a través del tiempo (Rosenblum et al., 1996).

La literatura revisada hasta el momento sugiere que los patrones de conectividad intercerebral durante la interacción social se dan entre áreas frontales, centrales y temporoparietales de los participantes. Como se discutió en el capítulo anterior, algunas de estas áreas son especialmente relevantes para la conducta social, como el córtex prefrontal lateral, el córtex del cíngulo o la unión temporoparietal. No obstante, hay menos homogeneidad en cuanto a cuáles bandas de frecuencia son importantes para la interacción social. Es posible que la emergencia de patrones de sincronización intercerebral en diferentes bandas de frecuencia esté relacionado con las demandas cognitivas de cada tarea en particular. No obstante, observaciones interesantes en las bandas theta y alfa son mencionadas con frecuencia en la literatura de hyperscanning, particularmente asociadas con la carga cognitiva que la tarea implica o con la diferenciación de conducta coordinada o cooperativa. Adicionalmente, es frecuente que se reporte actividad sincronizada en las bandas beta y gamma.

Un problema común en la literatura de hyperscanning es que se asume de antemano que la interacción social explica la sincronización intercerebral, y se pone poca atención a separar los efectos de estímulos y tareas comunes durante esta interacción. Es decir, se asume que las hiperconexiones son debidas al acoplamiento intercerebral y no al acoplamiento de diferentes cerebros a estímulos ambientales comunes. Pocos estudios comparan sus resultados con los de una tarea control individual que implique demandas cognitivas similares a la tarea conjunta. Así, no se puede asegurar que los patrones de sincronización descritos no sean debidos únicamente a procesos cognitivos similares elicitados por una misma tarea.

Recordemos que dos sistemas oscilatorios pueden presentar estados similares debido a diferentes causas. La sincronización por interacción se da cuando los ritmos de dos sistemas se ajustan debido a su influencia recíproca. La sincronización inducida se presenta cuando existe coincidencia en el ritmo de dos sistemas oscilatorios debido a que ambos se acoplan al ritmo de un tercer sistema. Existe evidencia de que la actividad eléctrica cerebral puede modificarse por estímulos ambientales o debido a las demandas cognitivas de una tarea (Thut et al., 2012). Los potenciales evocados son un ejemplo claro de esto. Un potencial evocado es una respuesta específica de la actividad EEG relacionada con la anticipación o percepción de estímulos, con la toma de decisiones o con otros procesos cognitivos (Luck, 2005). Esta respuesta se puede observar en diferentes sujetos que son expuestos al mismo estímulo o a la misma tarea, y es muy similar en términos de tiempo (p.e., 300 ms después de la aparición del estímulo), polaridad (positiva o negativa) y amplitud (magnitud de la actividad).

Will y Berg (2007) diseñaron una tarea donde presentaban diferentes secuencias de estímulos rítmicos a sus voluntarios. La actividad EEG en la mayoría de los participantes se modificó de forma similar en respuesta a los diferentes estímulos rítmicos. Aunque no determinaron si existía sincronización intercerebral durante la presentación de estímulos, si hubo una gran sincronización entre la actividad cerebral de los diferentes

sujetos y el ritmo de los estímulos rítmicos que eran presentados. Este acoplamiento entre actividad EEG y estímulos se presentó principalmente en los rangos de actividad de las bandas delta y theta. Gómez-Ramírez, Bleichner, Jaeger, Thorne y Debener, (2011) reportaron que la atención a estímulos periódicos auditivos o visuales modula la actividad de las bandas theta y alfa. Recientemente, Bauer et al., (2018), mostraron que existía acoplamiento entre la fase de señales EEG y la fase de estímulos rítmicos auditivos de diferente duración presentados a los participantes. Este acoplamiento se presentó en bandas de frecuencias lentas, en 3 y 6 Hz principalmente; fue mayor al inicio de la estimulación y en electrodos centroparietales y en el surco temporal superior.

Existe evidencia más amplia de sincronización entre sujetos en tareas individuales en diseños de fMRI, ya sea durante tareas de comprensión de lenguaje o de observación de películas o secuencias de imágenes o videos (Hasson, Nir, Levy, Fuhrmann y Malach, 2004; Wilson, Molnar-Szakacs y Iacoboni, 2008; Jääskeläinen et al., 2014; Hanson, Gagliardi y Hanson 2009). Curiosamente, las áreas cerebrales que eran reportadas como sincronizadas durante estas tareas eran áreas que también se reportan como significativamente sincronizadas en la literatura de hyperscanning durante la interacción social, como el cortex temporal superior, áreas fronto-laterales, si bien la sincronización entre sujetos se extendía ampliamente a áreas visuales, debido seguramente a la naturaleza de las tareas.

El acoplamiento de la actividad EEG de diferentes sujetos durante una tarea puede explicarse por el ajuste de la fase de las oscilaciones cerebrales a estímulos transitorios (Thut, Schyns y Gross, 2011). Puesto que los esfuerzos para separar sincronización por interacción social de sincronización inducida por la tarea son escasos, asumir de antemano que la actividad observada en el EEG de diferentes personas durante la interacción social es excesivo y debe demostrarse empíricamente.

Las técnicas de análisis utilizadas para inferir sincronización intercerebral también han sido acusadas de algunas carencias (Burgess, 2013), por lo que es pertinente utilizar también otras estrategias de análisis. Burgess (2013) estimó la hiperconectividad entre registros de EEG durante tareas individuales, de tal forma que no se esperaba ningún tipo de sincronización entre las señales de los sujetos. Con estos datos comparó el rendimiento de diferentes medidas para estimar sincronización. Sus resultados mostraron que las medidas utilizadas más frecuentemente, como el PLV, son susceptibles de presentar resultados espurios, sobreestimando el número e intensidad de hiperconexiones. Por el contrario, una medida alternativa, conocida como correlación circular, mostró resultados más consistentes, con pocos patrones de sincronización intercerebral. La detección de correlaciones espurias es especialmente acuciada en bandas lentas, como theta y alfa. Puesto que el PLV es una de las medidas más utilizadas para inferir sincronización entre señales cerebrales, los resultados de estos estudios deben ser tomados con precaución.

Otro problema tiene que ver con el tamaño de la ventana de tiempo que se utiliza para analizar los datos. Los estudios referidos utilizan ventanas de análisis de entre 300 milisegundos y 3 segundos. Al analizar señales oscilatorias, como el EEG, es importante tener un número suficiente de oscilaciones en una ventana de análisis para poder estimar cualquier relación entre señales de forma segura. Por ejemplo, utilizar una ventana de análisis de 800 milisegundos para analizar la banda delta implicaría que en la señal puede no haber ni siquiera una oscilación, dado que delta se compone de oscilaciones entre 1 y 3 Hz. Recordemos que sincronización de fase se define como una constancia en la diferencia de las fases instantáneas de dos señales. Para afirmar que existe sincronización de fase entre dos señales, debe contarse con un número suficiente de oscilaciones en la ventana de análisis. Así, entre menos oscilaciones se tienen dentro de la ventana de análisis, más probable es que se sobreestime el valor de sincronización o acoplamiento entre las señales. Lo anterior ha

sido sugerido por análisis previos en nuestro laboratorio (sin publicar) derivados de los resultados obtenidos en Olguín (2015), quien estimó la sincronización intercerebral en pares de registros de participantes que hacían tareas no relacionadas. En tales parejas cualquier sincronización significativa podría asumirse como espuria. Utilizó tres tamaños de ventana de análisis: 3 segundos, 5 segundos y 2 minutos. Los valores de sincronización intercerebral disminuyeron conforme el tamaño de la ventana aumentaba, con grandes valores de acoplamiento entre las señales cerebrales en ventanas de análisis pequeñas.

Otro problema técnico poco atendido tiene que ver con el filtrado de las señales. Como se abordó en el primer capítulo, en Chávez (2006) se plantea que para estimar la sincronización entre dos señales, deben cumplirse una serie de condiciones estrictas. Uno es el filtrar las señales en bandas de frecuencia estrechas, de tal forma que su espectro de potencias tenga una sola frecuencia dominante alrededor de la cual se distribuyan el resto de las frecuencias, y que su proyección al espacio fase mantenga una trayectoria cíclica con un centro único. De lo contrario, el sentido físico de la medida, la relación entre las fases de dos señales, se perdería. Ahora bien, la mayoría de trabajos utiliza datos filtrados en bandas tradicionales. Así, los resultados reportados en tales estudios deberían tomarse con precaución y en la medida de lo posible, estas observaciones deberían atenderse al momento de analizar datos de hyperscanning.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Planteamiento del problema

El objetivo del presente trabajo es comparar la interconectividad cerebral durante una tarea musical, separando los efectos de la interacción social de los efectos perceptuales y motores comunes durante una tarea similar pero sin el componente social. Como se desarrolló anteriormente, existe evidencia de acoplamiento intercerebral durante la interacción social, donde la regulación mutua de acciones, la simulación de acciones de otros y a la implementación de planes de acción compartidos juegan un rol importante. Pero también existe evidencia de acoplamiento intercerebral durante tareas individuales, debido a las demandas perceptuales, motoras y cognitivas comunes durante una tarea particular. No obstante, la literatura de hyperscanning asume comunmente que la interacción social es causa del acoplamiento intercerebral, pocos estudios están diseñados para contrastar sus resultados con controles adecuados.

Si la interacción social juega un rol causal en el acoplamiento intercerebral, nos encontraríamos con un caso de sincronización por interacción. Si los factores comunes durante una tarea son causantes del acoplamiento cerebral entre individuos, la sincronización intercerebral sería un caso de sincronización inducida. Así, existen dos explicaciones alternativas para el mismo fenómeno.

Aunque la primera alternativa aportaría evidencia adicional de que la interacción social daría lugar a procesos cognitivos emergentes que no están presentes en individuos aislados, puesto que no dependen únicamente de los parámetros de funcionamiento de cada cerebro, sino de la interacción entre estos. El funcionamiento cognitivo no solo depende de la interacción de un sujeto con el ambiente, también depende de la interacción con otros sujetos. Reforzaría la noción de que los procesos cognitivos que intervienen en la interacción social no pueden estudiarse en individuos aislados. Un corolario de esta explicación es que fenómenos sumamente complejos, como la organización social de los seres humanos u otras especies, pueden estar cimentados en fenómenos físicos básicos, bien estudiados y descritos. En este caso la sincronización de sistemas oscilatorios a través de la transmisión de información en un ambiente común.

No obstante, la evidencia disponible hasta la fecha no permite afirmar o negar de forma tajante una u otra explicación. Buscamos evidencia de que el acoplamiento intercerebral y la interacción social están causalmente relacionados. Para ello es necesario que la sincronización intercerebral no exista o sea significativamente menor durante la ejecución de acciones individuales comparado con acciones homólogas conjuntas.

4.2. Objetivo e Hipótesis

Objetivo

I. Determinar si existen patrones de sincronización intercerebral relacionados exclusivamente con la interacción social, comparando las siguientes condiciones con la percepción pasiva de un estímulo musical y la imaginación motora de dichos estímulos:

a) La dinámica de la actividad eléctrica cerebral de guitarristas durante la ejecución musical individual coordinada con un estímulo externo.

b) La dinámica de la actividad eléctrica cerebral de parejas de guitarristas durante la ejecución musical conjunta.

II. Comparar diferentes técnicas de análisis para inferir sincronización intercerebral, específicamente Correlación, Phase Locking Value y Correlación Circular.

Hipótesis

Si la sincronización intercerebral está relacionada con la interacción social, las señales EEG entre ambos guitarristas estarán significativamente más sincronizadas durante la ejecución musical conjunta que durante la ejecución musical individual.

Por otra parte, si la sincronización intercerebral es mejor explicada por las demandas sensoriales e ideomotoras de la ejecución musical, las señales EEG estarán igualmente acopladas durante la ejecución individual y la ejecución conjunta de la pieza musical, de tal forma que son estadísticamente indistinguibles.

4.3. Diseño Experimental

Condiciones

Ejecución musical:

Ejecución conjunta: Los sujetos son instruidos a ejecutar una pieza musical coordinándose con un coparticipante. Tres pulsos de metrónomo sirven como señal de inicio para la ejecución coordinada. Durante la ejecución, los participantes tienen acceso a la partitura de la pieza musical.

Ejecución individual: Se pide a los participantes ejecutar una pieza musical coordinándose con un estímulo externo, en este caso, con un versión en MIDI de la melodía, al igual que en la condición conjunta, la pieza es precedida por tres pulsos de metrónomo. La partitura de la pieza está presente frente a los participantes durante la ejecución musical.

Condiciones sin movimiento o pasivas:

Percepción: Los sujetos son instruidos a prestar atención a la pieza musical manteniendo los ojos abiertos.

Imaginación motora: Las instrucciones son las mismas que en la condición anterior añadiendo la instrucción de imaginar que ejecutan la pieza que están escuchando.

Estímulos

Una melodía corta para guitarra -Allegretto en C, de Ferdinando Carulli- con una duración de 90 segundos fue utilizada en los experimentos. El tempo de la melodía era 120 bpm. Una versión MIDI de la pieza musical, así como la tablatura y partitura correspondientes, se proveyó a cada participante previo a las sesiones experimentales. No obstante, no se controló ni el número de ensayos ni el dominio sobre la melodía. Durante la sesión experimental, la melodía era reproducida a través de un par de bocinas durante las condiciones individuales. El volumen de la pieza era fijado por cada participante previo al inicio de las mediciones. La pieza fue reproducida por computadora a través de unas bocinas marca Pixxo (6 W de potencia, 60Hz-20KHz de frecuencia de respuesta).

La melodía era precedida por 3 pulsos de metrónomo que servían como clave para el inicio de la ejecución o para fijar la atención de los participantes en las condiciones pasivas. En la condición social, únicamente se reproducía la clave para el inicio de la ejecución, es decir, los tres pulsos del metrónomo.

Participantes

En total se registraron 4 parejas de voluntarios, 3 parejas fueron músicos amateurs y 1 pareja fueron músicos profesionales. El promedio de edad fue 23.8 años y el promedio de años de experiencia musical fue 8. Todos los participantes fueron de sexo masculino. Los sujetos fueron pareado en términos de edad, experiencia y formación musical. Para su selección se consideraron los siguientes criterios:

Criterios de inclusión: Músicos profesionales o amateurs con experiencia, diestros, entre 18 y 40 años fueron considerados para el estudio.

Criterios de exclusión: Historial de traumatismo craneoencefálico, antecedentes de enfermedad mental o nerviosa, e historial prolongado de abuso de sustancias.

Protocolo:

La tarea consistió en tres fases en el siguiente orden: fase individual para el sujeto A de cada pareja, fase social (sujeto A y B juntos), y fase individual para el sujeto B. Los roles A y B fueron asignados de forma aleatoria y no implicaban jerarquía o liderazgo durante la ejecución conjunta. Previo al inicio del experimento se explicó a los participantes el procedimiento de registro y se recogió un consentimiento informado por escrito.

Las fases individuales se componían de tres bloques de tareas. Cada bloque consistía en una tarea de percepción pasiva, una tarea de imaginación motora y una tarea de ejecución musical. El orden de las tareas

en cada bloque se determinó de forma aleatoria y contrabalanceada. Cada tarea iniciaba con tres pulsos del metrónomo, que servía para fijar la atención de los participantes o para marcar el inicio de la ejecución musical.

Durante la fase social se siguió el mismo procedimiento que durante la fase individual, si bien la única tarea que implicaba una diferencia sustancial con las tareas de la parte individual fue la de ejecución conjunta, donde únicamente se reproducían los tres pulsos de metrónomo como señal de inicio para la ejecución conjunta.

4.4. Registro y Análisis de Datos

La adquisición de señales EEG se realizó con un amplificador EEG g.Hlamp de g.Tech de 80 canales, usando un montaje de 19 electrodos pasivos según el sistema 10/20, con una frecuencia de muestreo de 512 Hz y con una impedancia menor a 20 Ohms para todos los sujetos.

Los montajes fueron referenciados al electrodo A1 correspondiente, es decir, al lóbulo del oído izquierdo de cada participante. Dos electrodos adicionales registraron los movimientos oculomotores de los participantes y uno más monitorear la actividad cardíaca.

Adicionalmente, un sensor piezoeléctrico fue utilizado para registrar señales de audio con baja calidad en canales EEG no utilizados en el montaje. El registro de los pulsos del metrónomo antes del inicio de cada tarea fue utilizado para alinear las señales EEG durante el análisis de señales individuales.

Los pulsos del metrónomo eran registrados en un canal EEG con un sensor piezoeléctrico adaptado para tal fin. Posteriormente, los pulsos eran utilizados para alinear las señales EEG de los registros individuales. El margen de error para la alineación de los registros individuales fue de 2 milisegundos.

Pre-procesamiento

Se tomaron segmentos de 92 segundos de actividad EEG en las condiciones de ejecución individual, percepción e imaginación musical. Este segmento corresponde a 1 segundo antes del inicio de la tarea, 90 segundos de la duración del estímulo musical, y 1 segundo posterior al final de la pieza. En la ejecución social la longitud de los datos variaba entre 89 y 95 segundos, puesto que cada pareja hace pequeñas modificaciones temporales en la pieza musical (Sogorski, Geisel y Priesemann, 2018), lo que afecta la relación temporal de los sonidos la pieza ejecutada y su duración total. Además estos parámetros varían de una ejecución a otra. Cuando pertinente, los artefactos oculomotores o cardíacos fueron corregidos utilizando un Análisis de Componentes Independientes.

Siguiendo los lineamientos de Chávez et al., (2006), las señales fueron filtradas en bandas estrechas de 1 Hz usando un filtro Butterworth del 4^o orden. El filtrado se realizó entre 0.5 y 20.5 Hz. Así, la banda de frecuencia de 1 Hz abarca frecuencias entre 0.5 y 1.5 Hz, la banda de 2Hz entre 1.5 y 2.5 Hz y así sucesivamente (Ver figuras 4.1 y 4.2).

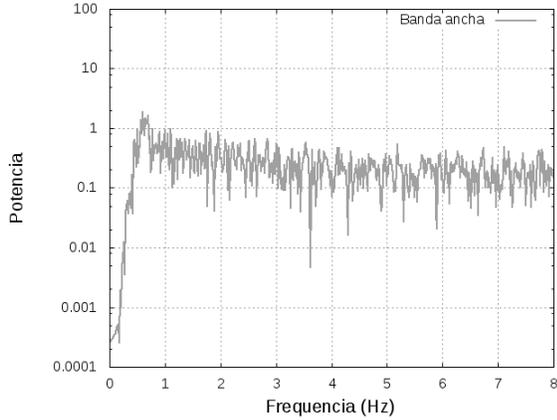


Figure 4.1: Segmento de un espectro de potencias en banda ancha de una señal EEG durante la percepción de la pieza musical.

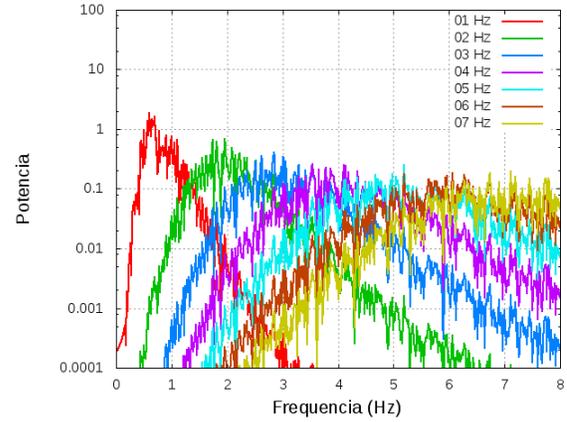


Figure 4.2: Espectros de potencias filtrados en bandas de 1 Hz de una señal EEG durante la percepción de la pieza musical.

Por su similitud con el rango de frecuencias de actividad muscular, las frecuencias superiores a 20.5 Hz fueron omitidas del análisis. A pesar de que la actividad en las bandas beta y gamma es relevante, tomando en cuenta que la naturaleza implica movimiento se optó por una aproximación más conservadora.

Herramientas para estimar sincronización

Phase Locking Value (PLV) o Mean Phase Coherence (MPC).

Estima la constancia en la diferencia de fase instantánea de dos señales a lo largo del tiempo. Las fases instantáneas son calculadas a través de la transformada de Hilbert, basada en la transformada de Fourier. Se determina restando la fase instantánea de la señal y a la fase instantánea de la señal x para cada observación en el tiempo. Cada diferencia entre las fases instantáneas de las señales puede tener un valor entre 0 y 2π . Si estas diferencias se distribuyen de manera aleatoria, es decir, si se reparten de forma uniforme entre 0 y 2π , el PLV toma un valor cercano a 0. Por el contrario, si esta diferencia se distribuye de forma estrecha alrededor de un valor particular en este rango, toma un valor cercano a 1. Se define como:

$$PLV_{x,y} = \frac{1}{T} \left| \sum_{t=1}^T \exp[-i(\phi_x(t) - \phi_y(t))] \right| ,$$

donde T es el total de datos en la ventana de análisis, ϕ_x es la fase instantánea de la señal x en el tiempo t y ϕ_y la fase instantánea de la señal y en el tiempo t .

Coefficiente de Correlación (Corr)

Estima la similitud entre dos variables. Indica como los valores de una variable x se modifican con respecto a los valores de una variable y . Su valor oscila entre -1 y 1. Cuando el conjunto de observaciones de x con respecto a y se distribuye aleatoriamente con una distribución uniforme, el valor de la correlación es cercano a 0. Cuando esta distribución se ajusta a una recta, el valor es cercano a 1. Es positivo cuando los valores de x aumentan y disminuyen simultáneamente que los valores de y , de tal forma que se ajustan a una recta con pendiente positiva. Cuando esta pendiente es negativa, indica que la variable x aumenta cuando la variable y disminuye.

Se calcula dividiendo la covarianza de x y y entre la varianza de x por la varianza de y . De tal forma que:

$$Cor(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - \mu_x][y(n) - \mu_y]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [x(n) - \mu_x]^2 \sum_{n=1}^N [y(n) - \mu_y]^2}},$$

donde $x(n)$ es el dato n de la señal x y $y(n)$ el dato n de la señal y , mientras que μ_x y μ_y denotan el promedio de la señal x y y respectivamente.

Correlación Circular (CCor)

Es una medida similar a la correlación pero que considera únicamente las fases instantáneas de dos señales x y y . La covarianza x, y se define como la sumatoria sobre el tiempo del seno de cada fase instantánea de la señal x menos la media de las fases de x multiplicado por el seno de cada fase instantánea de y menos la fase promedio de y . La varianza de cada señal, por otra parte, se determina calculando la raíz cuadrada de la sumatoria del seno cuadrado de cada fase instantánea menos su respectivo promedio. Al igual que la correlación, su valor es determinado por la división de la covarianza de las fases instantáneas de las señales x y y entre el producto de la varianza de las fases instantáneas de x y la varianza de las fases instantáneas de y .

$$CCor(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N \text{sen}(\phi_x(n) - \mu_{\phi_x}) \text{sen}(\phi_y(n) - \mu_{\phi_y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \text{sen}^2(\phi_x(n) - \mu_{\phi_x})} \sqrt{\sum_{n=1}^N \text{sen}^2(\phi_y(n) - \mu_{\phi_y})}}$$

En la fórmula, $\phi_x(n)$ y $\phi_y(n)$ representan la fase instantánea de la señal $x(n)$ y de la señal $y(n)$ respectivamente, mientras que μ_{ϕ_x} y μ_{ϕ_y} son las fases promedio.

Análisis estadístico

Durante las tareas de percepción pasiva e imaginación motora, así como durante la ejecución musical individual, se utilizaba el mismo estímulo para cada ensayo. La secuencia de eventos sensoriomotores relevantes durante estas tareas estuvo acoplada al mismo estímulo externo (el audio de “Allegretto en C”). Esto permite comparar la actividad EEG de cualquier pareja posible de guitarristas durante estas condiciones, ya que la interacción social no jugaba un rol importante, pero si la interacción entre individuos y un estímulo externo determinado.

Al analizar datos EEG durante tareas cognitivas, hay que asegurar que las mediciones se correspondan de forma temporalmente precisa con un evento sensorial o cadena de eventos sensoriales. Puede ser la presentación de una imagen, un tono, una pregunta, etc. Para comparar estas condiciones entre diferentes individuos de forma confiable, se acoplaron los registros EEG a los tres pulsos del metrónomo que iniciaban la pieza musical. Así, todos los registros utilizados para el análisis tenían la misma duración.

Sin embargo, con el fin de preservar los efectos de la interacción social, durante la ejecución en conjunto sólo se compararon los datos de sujetos de la misma pareja en el mismo trial.

Para cada medida, se construyó una matriz que refleja las interacciones entre electrodos homólogos para cada banda de frecuencia. Así, se obtuvo una matriz de 19 x 20 elementos (19 electrodos x 20 bandas). En las condiciones de ejecución individual, percepción e imaginación motora, se obtuvo una matriz para cada pareja virtual posible. En total para cada una de estas condiciones se crearon 252 matrices de parejas virtuales. Un ejemplo de como se determinaron las parejas virtuales puede apreciarse en el Anexo 1. Para la condición de ejecución conjunta se calcularon 12 matrices para cada medida, considerando parejas reales durante el mismo ensayo (4 parejas x 3 ensayos).

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre condiciones, se utilizó la prueba de comparación de rangos de Mann-Whitney-Wilcoxon. La comparación entre condiciones se hizo por cada banda de frecuencia en primer lugar, y después para cada pareja de electrodos homólogos en cada banda de frecuencia.

Para combatir el efecto de múltiples comparaciones, en la comparación entre bandas de frecuencia el valor de significancia se determinó dividiendo el umbral tradicional ($p < 0.05$) entre el número de bandas, siguiendo el criterio de Bonferroni. Se consideraron significativas diferencias estadísticas con un valor $p < 0.0025$. No obstante, en la comparación entre cada electrodo en cada banda de frecuencia donde la corrección adecuada era dividir el umbral tradicional entre el número de elementos en la matriz, se conservó como umbral $p < 0.0025$, pues la alternativa rigurosa, $p < 0.00013$, resultaba demasiado exigente.

Posteriormente se buscó determinar si existía acoplamiento entre electrodos no homólogos, es decir, electrodos colocados sobre zonas anatómicamente diferentes de la corteza cerebral. Para cada pareja en cada condición se obtuvo una matriz de 19×19 , repitiendo el proceso para cada banda de frecuencia (19 electrodos de un sujeto \times 19 electrodos de otro). La comparación estadística entre condiciones para cada pareja de electrodos en cada banda de frecuencia se realizó también utilizando la prueba de Mann-Whitney. Puesto que la corrección de Bonferroni fija un umbral de significancia de $p < 0.000006$ en estas comparaciones, lo que hace aún más estricto el criterio estadístico, se optó por utilizar el umbral $p < 0.0025$, al igual que en las comparaciones anteriores.

Debido a que la tarea con mayor similitud a la condición de interacción social era la ejecución individual, la comparación entre estas condiciones era de especial interés. Esto se volvió especialmente relevante luego de la inspección visual de los resultados: a simple vista se observan pocas diferencias entre las condiciones de ejecución individual y ejecución conjunta, pero diferencias claras si se comparan las dos primeras con las condiciones pasivas, es decir, durante la imaginación motora y la percepción de la pieza musical.

Para determinar si la ejecución musical acoplada a estímulos externos, sin importar si eran o no de naturaleza social, inducía sincronización intercerebral, se compararon las condiciones de ejecución con las condiciones de percepción e imaginación motora. Si ambas condiciones de ejecución mostraban diferencias estadísticamente significativas con la condición de percepción y con la condición de imaginación motora, se consideró que las diferencias reflejan el acoplamiento intercerebral inducido por la tarea. Para la comparación entre electrodos homólogos, se indican en color rojo las diferencias significativas comunes entre la ejecución conjunta comparada con la percepción musical y con la imaginación motora, y entre la ejecución individual comparada con la percepción musical y con la imaginación motora.

Para determinar si existía sincronización intercerebral asociada específicamente a la interacción social, además de ser significativamente diferente de la percepción y la imaginación motora de la pieza, la condición de ejecución conjunta debía mostrar diferencias significativas con la condición de ejecución individual, donde los participantes tocaban acoplados al mismo estímulo externo. Para la comparación entre electrodos homólogos, en color negro se indican las diferencias significativas entre la ejecución conjunta comparada con la ejecución individual, con la percepción musical y con la imaginación motora.

Para la comparación entre electrodos cruzados, únicamente se grafican las diferencias significativas entre la ejecución conjunta y el resto de las condiciones. Se grafican en color rojo los casos donde la sincronización en la condición conjunta fue significativamente superior que el resto de condiciones, y en color azul los casos donde la sincronización durante la ejecución conjunta fue significativamente menor que el resto de las condiciones.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Entre electrodos homólogos

5.1.1. Phase Locking Value

El efecto del tamaño de la ventana se ilustra en la figura 5. En el eje x se grafican diferentes tamaños de ventana de análisis en segundos. La ventana de análisis se recorría a lo largo de todo el registro y se obtenía el promedio sobre todo el registro. El solapamiento para cada tamaño de ventana fue de la mitad de su tamaño. El eje y representa las diferentes bandas de frecuencia. Las imágenes muestran el promedio de todas las parejas en cada banda de frecuencia para cada condición. Conforme a lo esperado, en ventanas cortas el valor de la sincronización es mayor. Esto es especialmente cierto para las frecuencias lentas. Para frecuencias lentas y ventanas cortas, el número de oscilaciones dentro de la ventana de análisis es insuficiente para determinar si existe una relación entre las fases de las señales y aumenta la posibilidad de detectar sincronización espuria si no se hacen las comparaciones estadísticas adecuadas. Por ejemplo, para una ventana de 2 segundos y una banda de 1 Hz, se tendrían dos oscilaciones por cada ventana de análisis. Conforme el número de oscilaciones aumenta, el valor de la sincronización disminuye. Sin embargo, para ventanas largas y frecuencias rápidas, el valor de la sincronización tiende a subestimarse y hace difícil observar diferencias. No existe un criterio objetivo para determinar un tamaño ideal de ventana para cada banda de frecuencia. La literatura revisada utiliza ventanas de menos de 3 segundos. Basta decir que la elección de este parámetro puede tener un impacto considerable en los resultados finales.

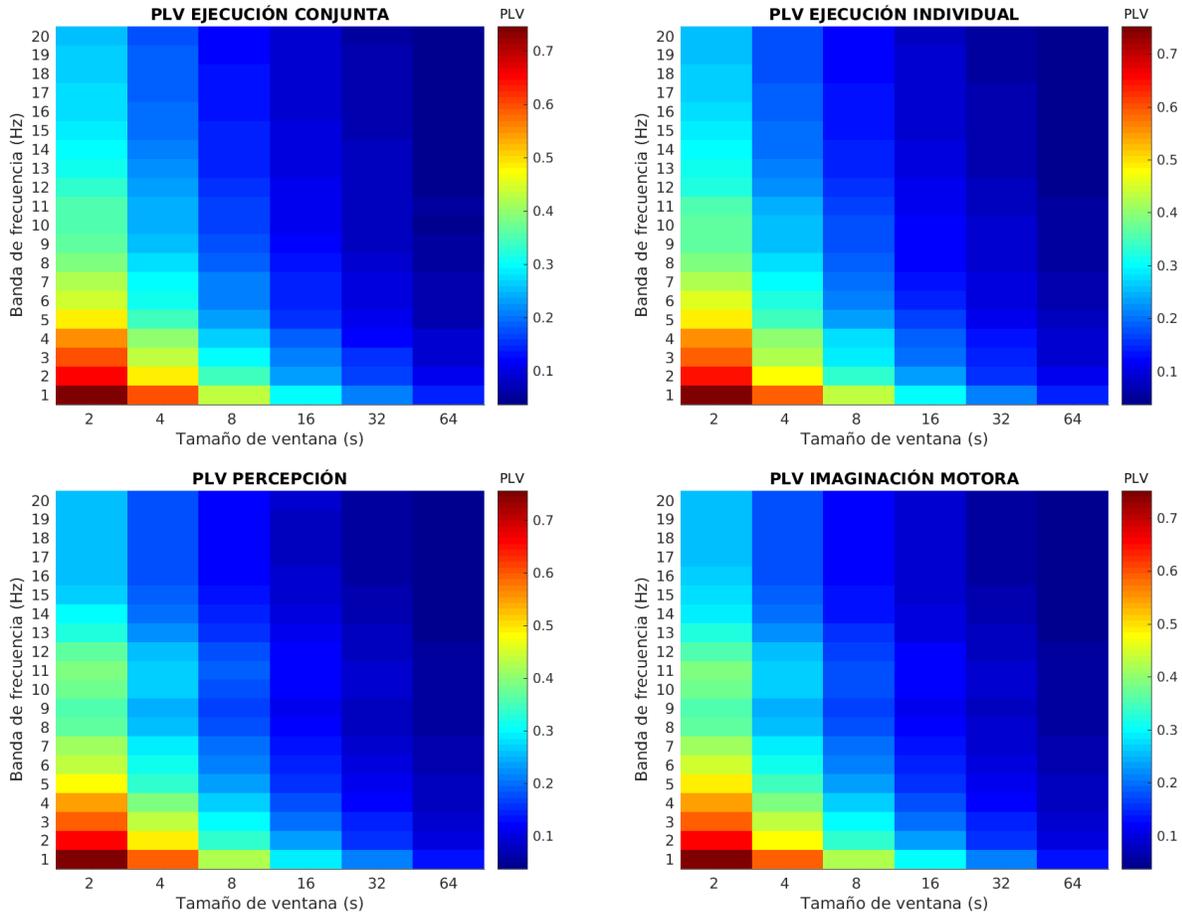


Figura 5.1: Relación entre el tamaño de la ventana de análisis y el valor estimado de la sincronización entre electrodos homólogos para cada banda de frecuencia. El PLV disminuye con el aumento en el tamaño de la ventana y la banda de frecuencia.

La figura 5.2 muestra diferencias significativas entre las diferentes condiciones para cada banda de frecuencia. De forma congruente a lo mostrado en la figura 5. 1, el PLV disminuye conforme el tamaño de la ventana aumenta. Las diferencias significativas son sensibles a los diferentes tamaño de ventana, pero es importante resaltar que la dinámica de los valores se conserva. Se pueden apreciar diferencias significativas debidas a la ejecución musical en las bandas de frecuencia correspondientes a alfa y a beta para la mayoría de las ventanas de análisis. Contrario a lo esperado, la sincronización en alfa rápida, entre 10 y 13 Hz, disminuye durante la ejecución musical. En 10 Hz se observa una disminución significativa durante la ejecución conjunta para la mayoría de ventanas de análisis. Sin embargo, se observa un ligero aumento en la sincronización durante la ejecución a partir de los 14 Hz, con diferencias significativas durante la ejecución musical en algunas bandas de frecuencia para la ejecución conjunta, por ejemplo, en la banda de 14 Hz y 18 Hz.

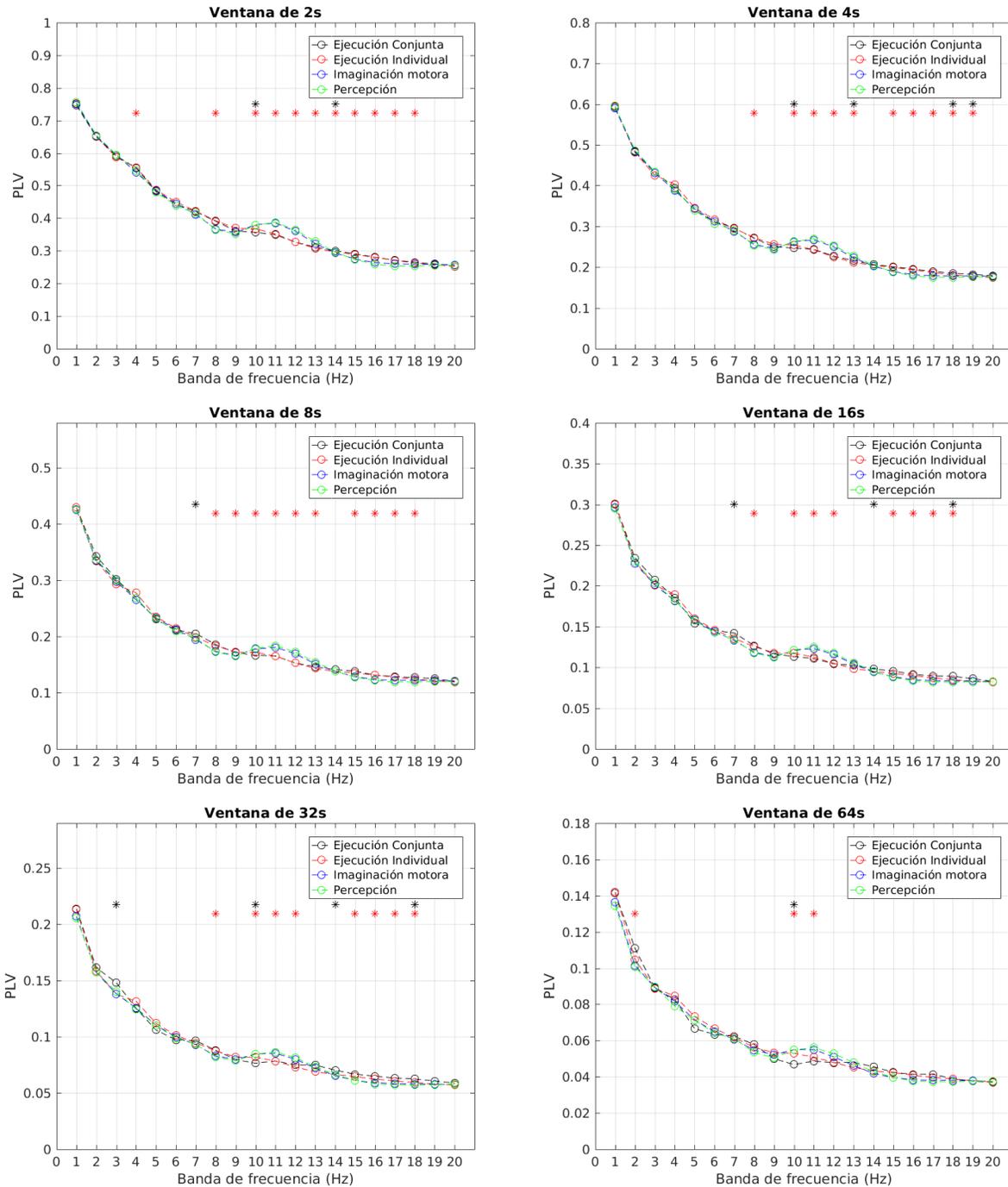


Figura 5.2: Diferencias significativas para PLV dependiendo del tamaño de la ventana de análisis para diferentes bandas de frecuencia. En negro se señalan diferencias significativas entre ejecución conjunta y el resto de condiciones, mientras que en rojo se muestran diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva. Nótese el cambio de escala entre las diferentes figuras.

La estructura de las matrices cuyos elementos son el PLV de electrodos homólogos se conserva para los diferentes tamaños de ventana, cambiando únicamente la escala de valores. Un ejemplo de esta estructura

para diferentes ventanas de análisis se puede observar en el Anexo 2.

Las figuras 5.3 y 5.4 muestran diferencias significativas entre las condiciones de ejecución musical, independientemente del contexto, y las condiciones percepción musical e imaginación motora. Dichas figuras corresponden a una ventana de análisis de 4 y 8 segundos respectivamente. Las diferencias se concentran en las bandas de frecuencia de 11, 12 y 16 Hz para una ventana de análisis de 4 segundos, y en las bandas de frecuencia de 11, 12 y 15 Hz para una ventana de análisis de 8 segundos. En las bandas mostradas, no se encontraron diferencias significativas entre la ejecución conjunta y el resto de condiciones, sin embargo, se encontró una diferencia significativa específica de la ejecución musical en los electrodos homólogos Fp1 para una banda de frecuencia de 7 Hz y una ventana de análisis de 8 segundos. Debido a que esta diferencia fue aislada no se grafica en las tablas siguientes, pero puede apreciarse en la figura 5.10.

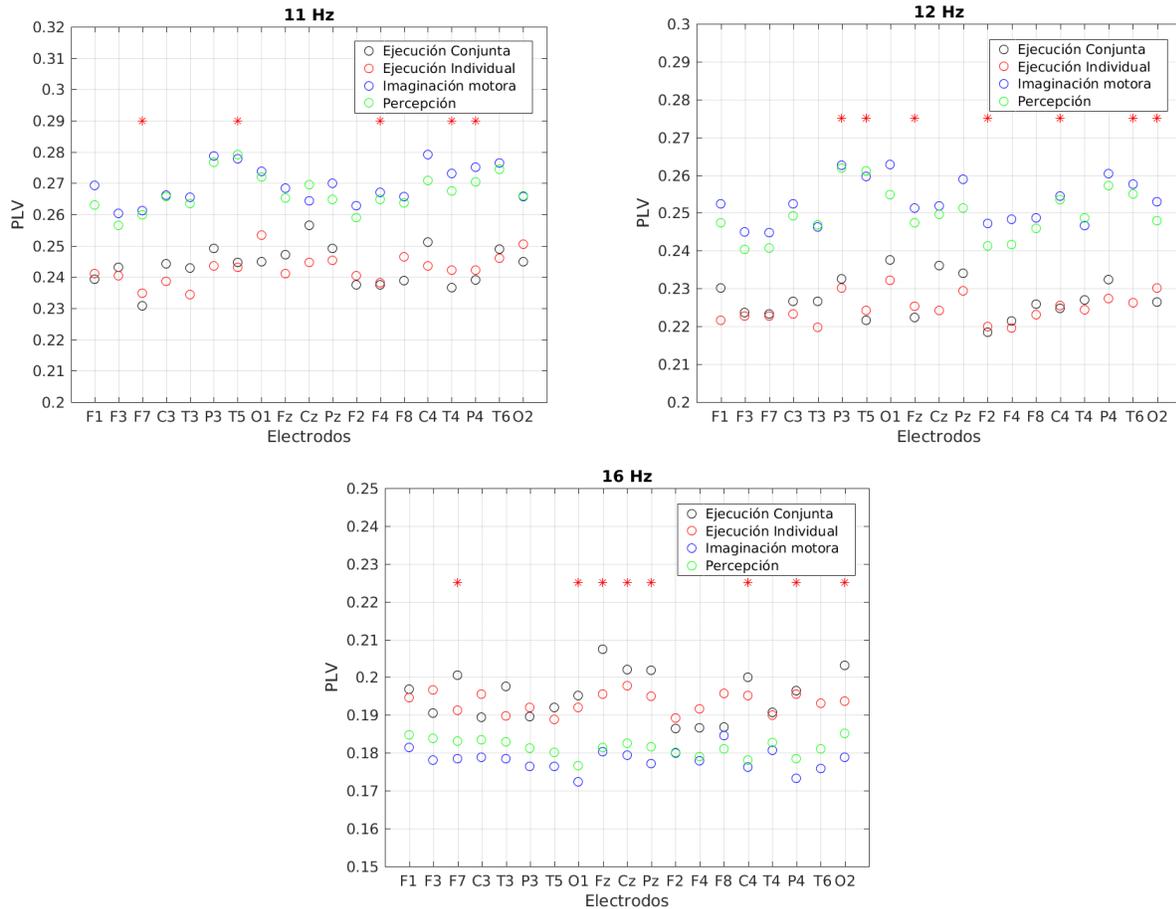


Figura 5.3: Diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva, para electrodos homólogos en diferentes bandas de frecuencia con una ventana de análisis de 4 segundos. Nótese el cambio de escala entre las figuras.

Cabe resaltar, además, que durante la ejecución musical, los valores PLV tienden a disminuir, comparados con las condiciones de percepción e imaginación motora, mientras que para las bandas de 15 y 16 Hz, y presumiblemente para todas las bandas de frecuencia en el rango de beta, los valores de PLV son sistemáticamente superiores durante la ejecución musical. A simple vista se observan diferencias entre varios pares de electrodos entre el valor medio de PLV durante la ejecución conjunta y la ejecución individual, a pesar de

esto, las diferencias no alcanzaron un nivel de significancia estadística.

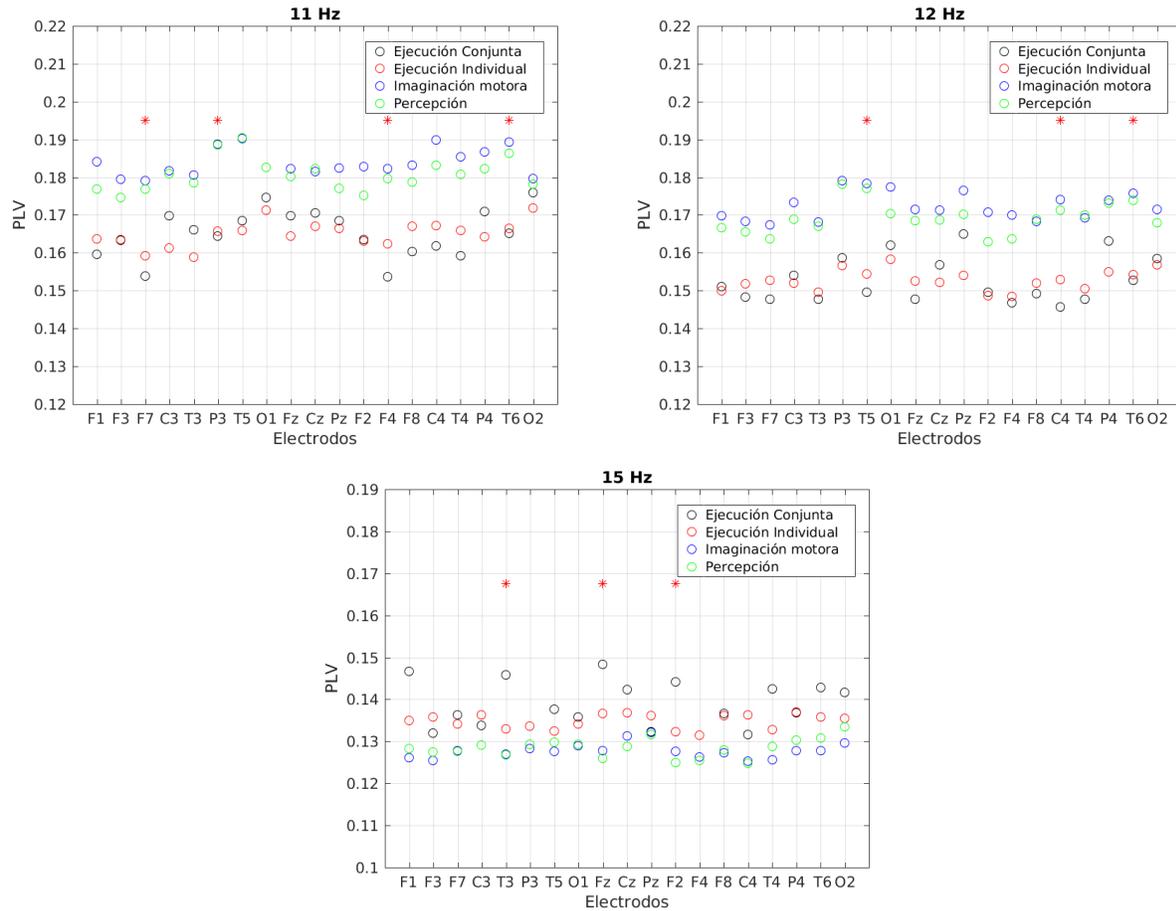


Figura 5.4: Diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva, para electrodos homólogos en diferentes bandas de frecuencia con una ventana de análisis de 8 segundos. Nótese el cambio de escala entre las figuras.

5.1.2. Correlación

La correlación no tiene un problema tan serio como el PLV al tratar del tamaño de la ventana y el número de oscilaciones. En general, la correlación entre series con pocas oscilaciones pero un número suficiente de observaciones se puede estimar de forma confiable. Además, no depende de la estimación confiable de las fases instantáneas de la señal en una banda de frecuencia estrecha, por lo que se puede calcular la correlación de las señales filtradas en banda ancha, en este caso, entre 0.5 Hz y 20.5 Hz; así mismo, se puede estimar la correlación de las señales filtradas en bandas de frecuencia tradicionales. En este caso, las bandas de frecuencia tradicionales corresponden a las siguientes frecuencias: Delta: 1-4 Hz; Theta: 4-7 Hz; Alfa lenta: 7-10 Hz; Alfa rápida, 10-13 Hz; Beta lenta: 13-16 Hz; y Beta rápida: 16-20 Hz.

La correlación se estimó con una ventana corrida sobre todo el registro en la misma forma que en PLV. Las figuras 5.5 y 5.6 muestran las diferencias significativas para diferentes ventanas de análisis entre las condiciones de ejecución conjunta y ejecución comparadas con el resto de condiciones, esto considerando

el valor absoluto de la correlación. La figura 5.5 muestra diferencias entre las señales filtradas en bandas de frecuencia de 1 Hz mientras que la figura 5.6 muestra diferencias en las señales filtradas en bandas de frecuencia tradicionales.

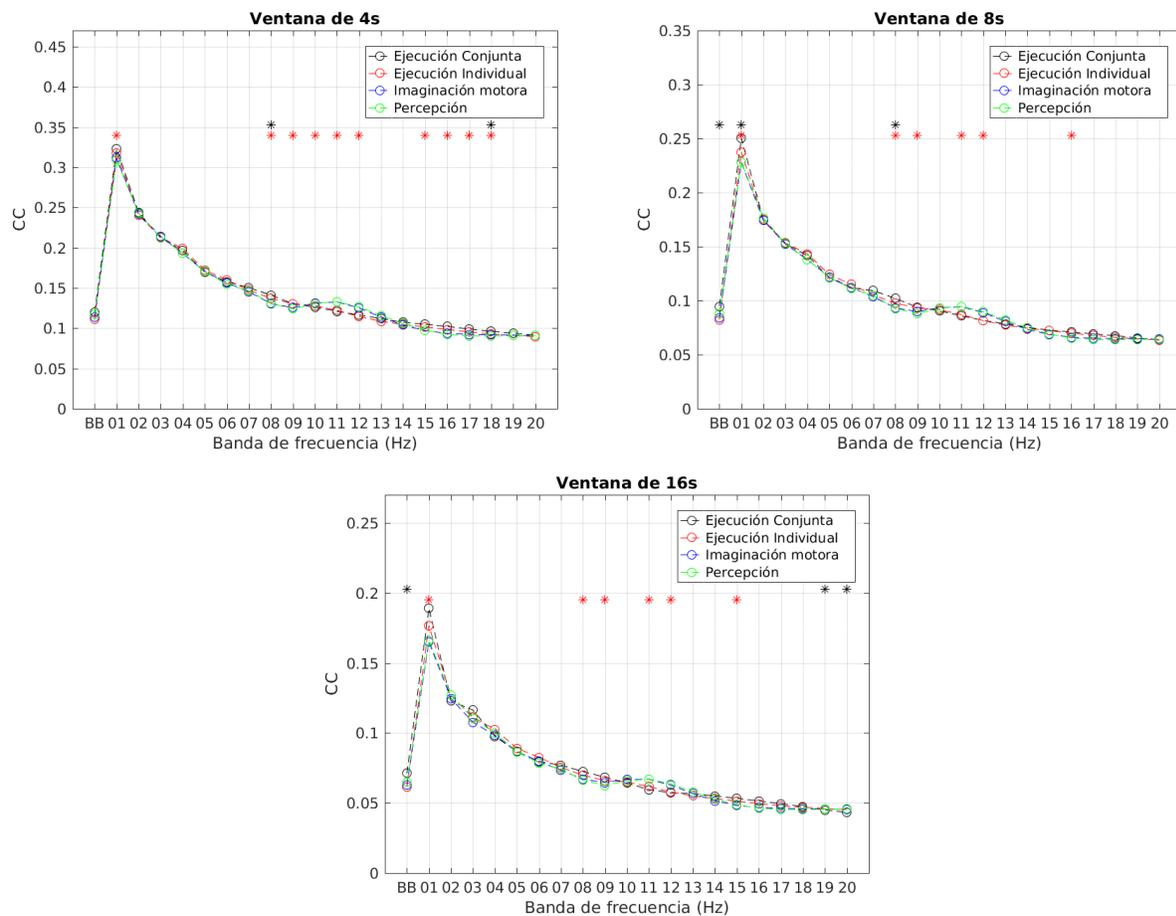


Figura 5.5: Diferencias significativas para la correlación dependiendo del tamaño de la ventana de análisis. Las señales fueron filtradas en bandas de 1 Hz. En negro se señalan diferencias significativas entre ejecución conjunta y el resto de condiciones, mientras que en rojo se muestran diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva. Nótese el cambio de escala entre las diferentes figuras.

Se puede observar que la dinámica de las correlaciones se comporta de forma similar a PLV, con una correlación relativamente alta para bandas de frecuencia lentas que disminuye conforme aumenta la banda de frecuencia. Además, se observa también una disminución entre 10 y 13 Hz y un ligero aumento a partir de los 14 Hz para las condiciones de ejecución musical. A simple vista es apreciable además un aumento en la correlación de las señales entre 7 y 9 Hz, tanto para el filtrado en bandas de 1 Hz como para las bandas tradicionales.

Así mismo, entre bandas de 1 Hz se observan diferencias significativas específicas de la ejecución conjunta alrededor de los 8 Hz y a partir de los 18 Hz para diferentes ventanas de análisis, además de la banda ancha. Mientras que las diferencias debidas a la ejecución musical se encuentran en el rango de los 8 y 18 Hz. Por otra parte, para bandas de frecuencia tradicionales, se observan diferencias específicas de la ejecución conjunta en

la banda ancha y en delta, mientras que las diferencias debidas a la ejecución musical se observan en el rango de alfa lenta y alfa rápida.

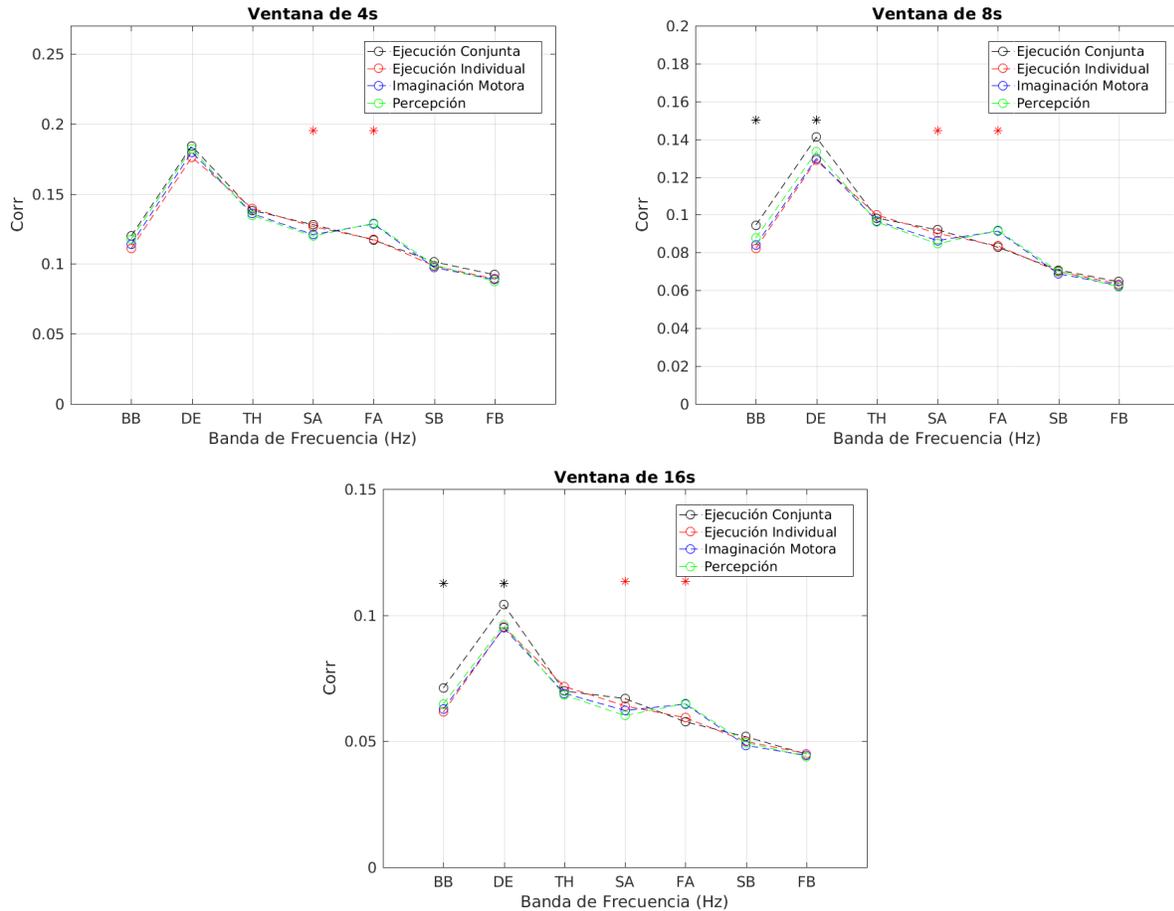


Figura 5.6: Diferencias significativas para la correlación dependiendo del tamaño de la ventana de análisis. Las señales fueron filtradas en bandas de frecuencia tradicionales. En negro se señalan diferencias significativas entre ejecución conjunta y el resto de condiciones, mientras que en rojo se muestran diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva. Nótese el cambio de escala entre las diferentes figuras. Abreviaturas: BB, banda ancha; DE, delta; TH, theta; SA, alfa lenta; FA, alfa rápida; SB, beta lenta; FB, beta rápida.

No se encontraron diferencias significativas específicas de la ejecución conjunta y el resto de condiciones entre parejas de electrodos homólogos para ninguna banda de frecuencia. Sin embargo, si se observan diferencias significativas debidas a la ejecución musical, sin separar entre ejecución conjunta y ejecución individual, con el resto de las condiciones, utilizando una ventana de análisis de 4 segundos. Dichas diferencias se pueden observar en las bandas de 11 y 16 Hz para las bandas de 1 Hz, y en alfa rápida para las bandas de frecuencia tradicionales. Al igual que para el PLV, los valores de correlación durante la ejecución musical tienden a ser menores durante la ejecución musical para las frecuencias del rango de alfa y mayores para las frecuencias del rango de beta. La estructura de la matriz de correlación es bastante similar a la estructura de los valores de PLV. Dicha estructura se puede observar en el Anexo 3 para una ventana de 4 segundos, pero se repite en el resto de las ventanas de análisis. Se puede observar a simple vista una disminución de los valores de correlación entre 10 y 13 Hz para todos los pares de electrodos en las diferentes ventanas de análisis.

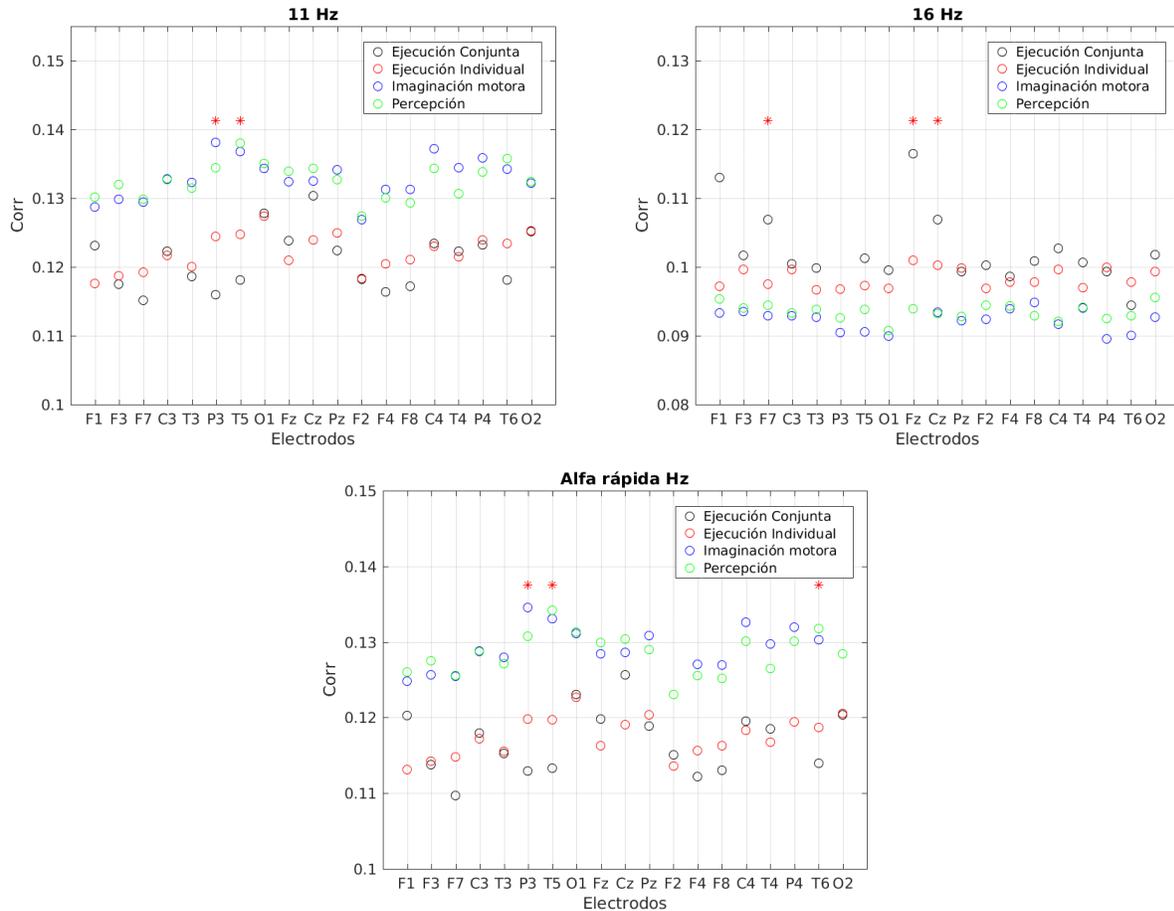


Figura 5.7: Diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva, para electrodos homólogos en diferentes bandas de frecuencia con una ventana de análisis de 4 segundos. Las primeras dos figuras corresponden al filtrado en bandas de 1 Hz, mientras la última corresponde a bandas de frecuencia tradicionales. Nótese el cambio de escala entre las figuras.

5.1.3. Correlación Circular

El comportamiento de la correlación circular para diferentes bandas de frecuencia, así como entre los elementos individuales de la matriz, es bastante similar a las medidas anteriores. En promedio, la correlación circular en el rango de alfa lenta y en el rango de beta es ligeramente superior durante la ejecución musical, disminuyendo en el rango de alfa rápida, entre 10 y 13 Hz. Se pueden observar diferencias significativas debidas a la ejecución musical en 7 y 8 Hz, y entre 10 y 18 Hz para las diferentes ventanas de análisis. Mientras que diferencias significativas específicas de la ejecución conjunta se aprecian en 7 Hz para una ventana de 4 segundos, y en 8 Hz para una ventana de 16 segundos. En este caso no se encontraron diferencias significativas entre cada pareja de electrodos homólogos para ninguna banda de frecuencia en ninguna ventana de análisis. Sin embargo, la estructura de la matriz de correlaciones es equivalente a las estructuras de las medidas anteriores, como se puede apreciar en el Anexo 4 para una ventana de análisis de 4 segundos, pero se sostiene para el resto de las ventanas de análisis.

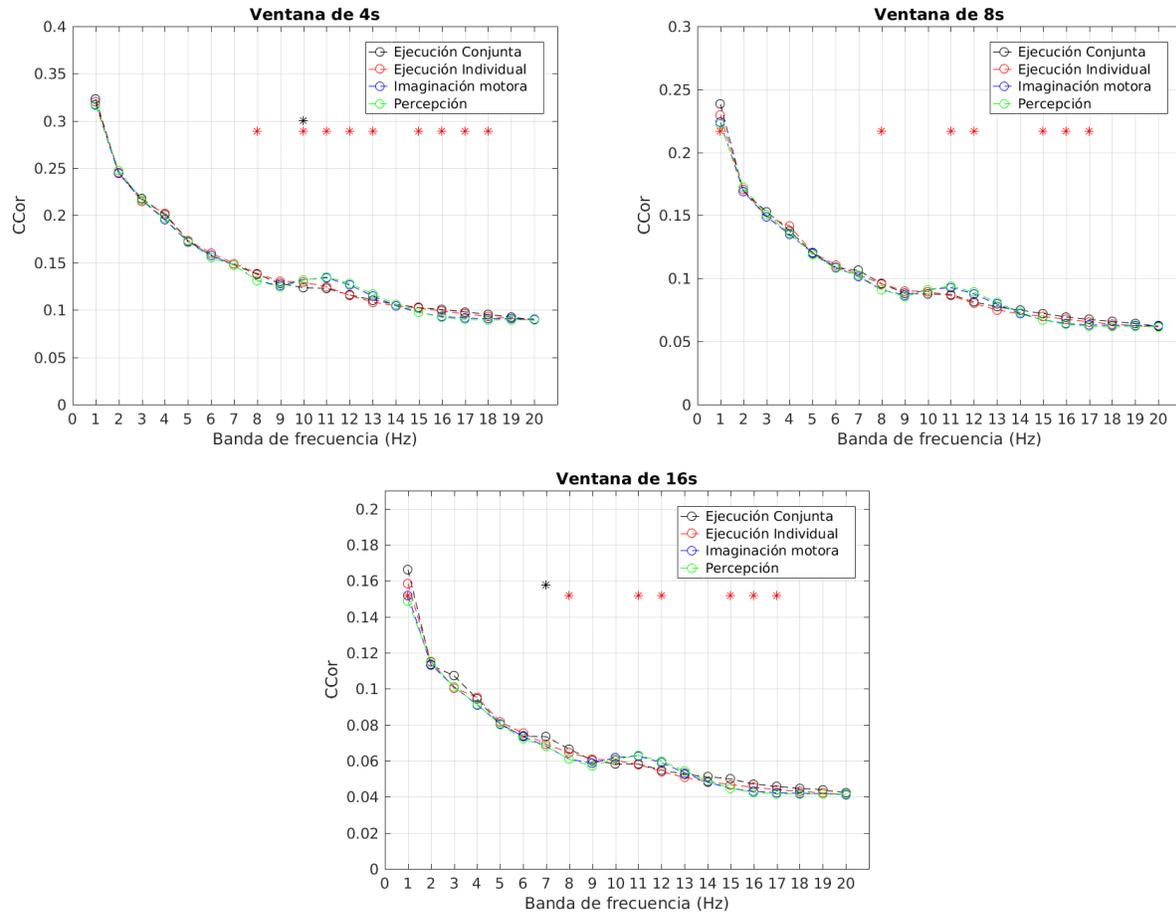


Figura 5.8: Diferencias significativas para Correlación Circular dependiendo del tamaño de la ventana de análisis para diferentes bandas de frecuencia. En negro se señalan diferencias significativas entre ejecución conjunta y el resto de condiciones, mientras que en rojo se muestran diferencias significativas entre la ejecución musical, sin importar el contexto social, con la imaginación motora y la percepción pasiva. Nótese el cambio de escala entre las diferentes figuras.

5.2. Entre electrodos cruzados

Debido al costo computacional que la comparación entre electrodos cruzados implica, la estimación de sincronización intercerebral entre electrodos no homólogos se limitó a las medidas que estiman específicamente la relación entre las fases instantáneas de las señales, es decir, PLV y Correlación Circular. Asimismo, se consideraron únicamente ventanas de análisis de 4 y 8 segundos, que mostraron un rendimiento satisfactorio en las comparaciones anteriores. De igual forma, aunque se calcularon las diferencias significativas entre diferentes condiciones, solo se muestran las diferencias significativas durante la ejecución conjunta comparada con la ejecución individual, la imaginación motora y la percepción musical. Es decir, se muestran únicamente las hiperconexiones significativas que se pueden atribuir a la interacción social.

5.2.1. Phase Locking Value

La figura 5.9 muestra diferencias significativas en la sincronización intercerebral, estimada con PLV para una ventana de análisis de 4 segundos, durante la ejecución musical conjunta entre todas las parejas posibles de electrodos de ambos participantes. Se puede apreciar que en una banda de frecuencia de 10 Hz, el valor de la sincronización durante esta condición es significativamente menor entre los electrodos frontales derechos F4 del sujeto 1 y Fp2 del sujeto 2. En una banda de 17 Hz, se aprecia un aumento significativo de la sincronización entre el electrodo parietal derecho P3 del sujeto 1 y el área frontocentral Fz, así como el área temporal T5 del sujeto 2. Adicionalmente, se observa que el área O2 del sujeto 1 y el Fz del sujeto 2 muestran mayor sincronización en esta banda de frecuencia. Finalmente, para una banda de frecuencia de 18 Hz, se observa un aumento en la sincronización intercerebral entre el electrodo parietal P3 del sujeto 1 y el electrodo frontocentral Fz del sujeto 2.

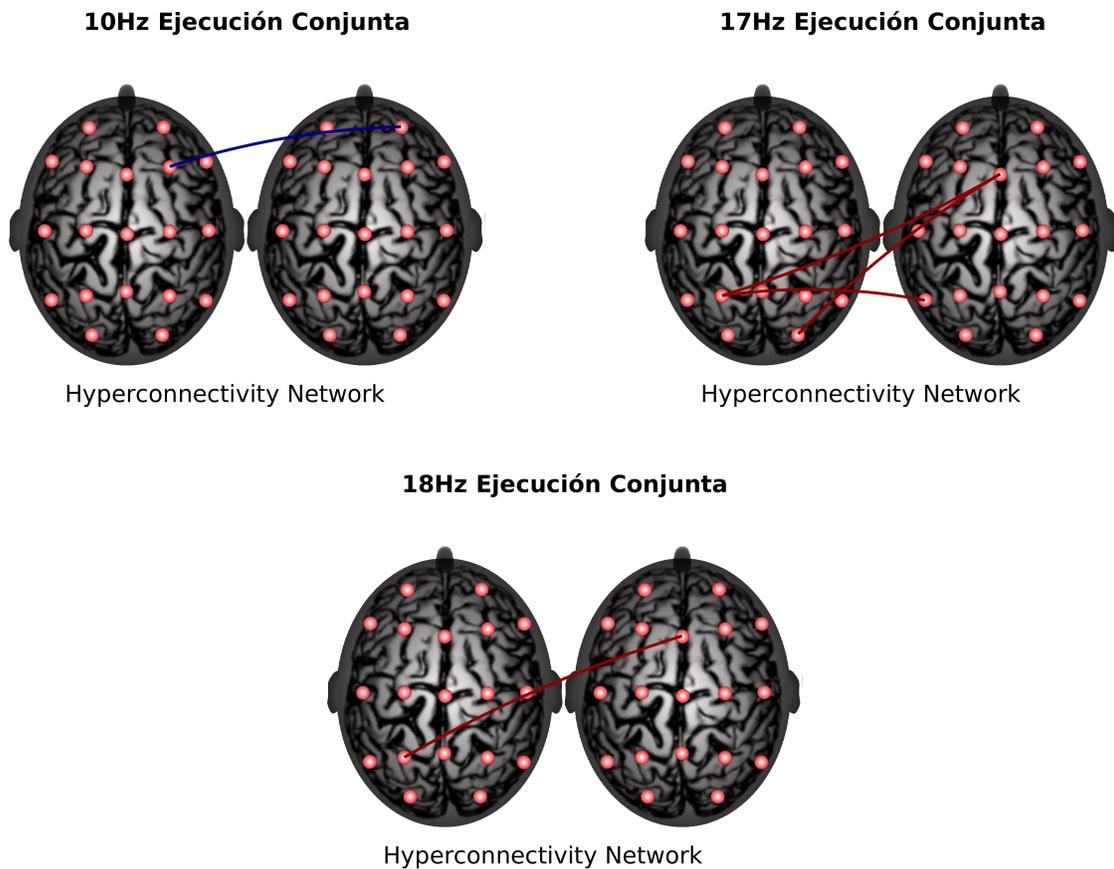


Figura 5.9: Sincronización intercerebral significativa entre la ejecución conjunta y el resto de condiciones, estimada con PLV para todas las parejas posibles de electrodos, con una ventana de análisis de 4 segundos.

Por otra parte, para una ventana de análisis de 8 segundos, el valor de PLV es significativamente superior entre los electrodos homólogos izquierdos Fp1 de ambos participantes, en una banda de 7 Hz, y entre los entre el electrodo frontal izquierdo F7 del sujeto 1 y el electrodo temporal derecho T6 del sujeto 2. Estas hiperconexiones se observan en la figura 5.10.

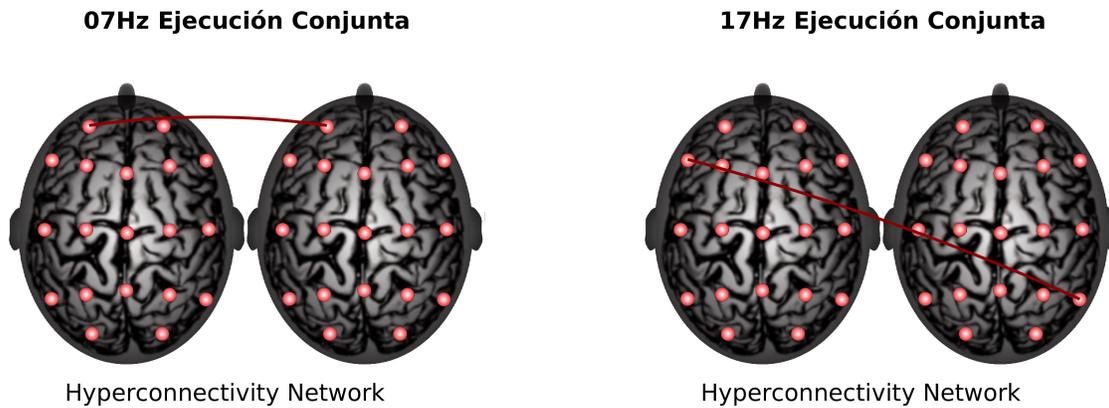


Figura 5.10: Sincronización intercerebral significativa entre la ejecución conjunta y el resto de condiciones, estimada con PLV para todas las parejas posibles de electrodos, con una ventana de análisis de 8 segundos

Puesto que la elección del umbral de significancia es más o menos arbitrario y puede aumentar la probabilidad de cometer errores tipo I, en el Anexo 5 se puede apreciar el patrón de hiperconexiones estimado con PLV para un umbral de significancia tradicional $p < 0.01$.

5.2.2. Correlación Circular

Para una ventana de análisis de 4 segundos, las hiperconexiones significativas durante la ejecución musical conjunta estimadas con correlación circular se presentan únicamente en la banda de frecuencia de 18 Hz entre el electrodo parietal izquierdo P3 del sujeto 1 y el electrodo temporal izquierdo T3 del sujeto 2. Las hiperconexiones se observan en la figura 5.11.

Mientras que para una ventana de análisis de 8 segundos, mostrada en la figura 5.12, se observan conexiones significativas en 7 Hz entre el electrodo frontopolar Fp1 con electrodos frontales, centrales y temporales del sujeto 2, específicamente con F3, Cz y T5. De igual forma, el electrodo frontal F7 del sujeto 1 muestra sincronización significativa con el electrodo Cz del sujeto 2; mientras que el electrodo Fp2 del sujeto 1 se sincroniza con el electrodo O1 del sujeto 2. En 16 Hz, se pueden observar hiperconexiones entre los electrodos C3 y P3 del sujeto 1 y el electrodo T3 del sujeto 2, así como entre el electrodo O1 del sujeto 1 y el electrodo F7 del sujeto 2.

Al igual que con PLV, las hiperconexiones significativas para un umbral de significancia tradicional $p < 0.01$ se muestran en el Anexo 6.

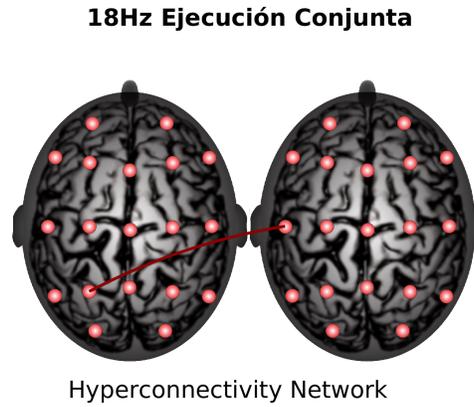


Figura 5.11: Sincronización intercerebral significativa entre la ejecución conjunta y el resto de condiciones, estimada con correlación circular para todas las parejas posibles de electrodos, con una ventana de análisis de 4 segundos

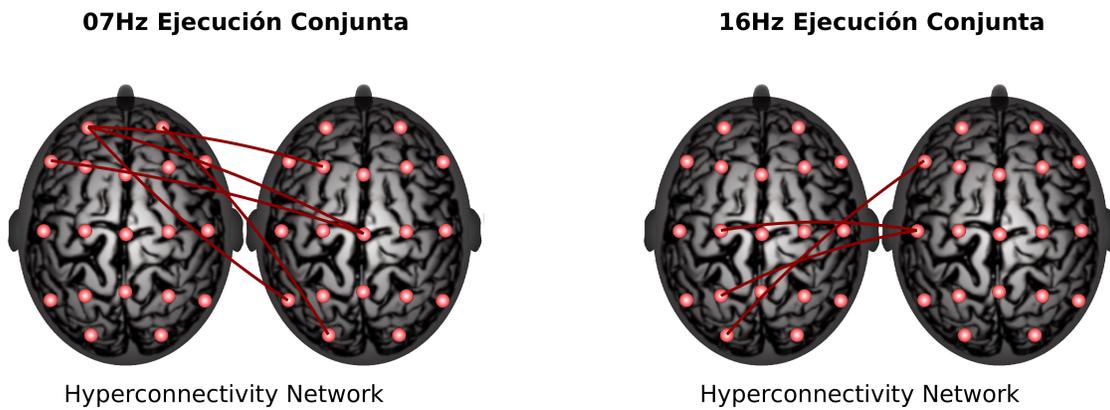


Figura 5.12: Sincronización intercerebral significativa entre la ejecución conjunta y el resto de condiciones, estimada con correlación circular para todas las parejas posibles de electrodos, con una ventana de análisis de 8 segundos

Capítulo 6

Discusión y conclusiones

Uno de los objetivos del presente proyecto era determinar si diferentes medidas y procedimientos de análisis influían en la estimación de hiperconexiones significativas durante la ejecución musical.

El tamaño de la ventana de análisis determina en gran medida el valor de las medidas calculadas. Las medidas que se basan en la fase instantánea de las señales son especialmente susceptibles a este efecto. En ventanas de análisis cortas y bandas de frecuencia lentas suele sobreestimarse el valor de la sincronización entre dos señales, debido a que el número de oscilaciones que se compara en cada ventana suele ser insuficiente. Sin embargo, en bandas de frecuencia rápidas y ventanas de análisis largas el efecto es justo el contrario. Un procedimiento que podría adoptarse para el análisis confiable de este tipo de medidas es adaptar el tamaño de la ventana de análisis a la banda de frecuencia, de tal forma que número de oscilaciones permanezca constante en todas las bandas, es decir, analizar bandas lentas con ventanas largas y bandas rápidas con ventanas cortas. Sin embargo, debido a que las fases instantáneas durante el presente análisis se realizó con un procedimiento conocido como Fast Fourier Transform (FFT), que tiene como limitación la utilización de segmentos con una cantidad de datos de n^2 , dicho procedimiento no pudo aplicarse correctamente. Sin embargo, esta propuesta debería ser tenida en cuenta para futuros trabajos.

Si bien la estructura de las interrelaciones entre las distintas parejas de electrodos y bandas de frecuencia se sostienen sin importar el tamaño de la ventana de análisis o la medida utilizada, como se puede apreciar en los Anexos 3, 4 y 5, las diferencias significativas varían dependiendo de la medida seleccionada y la ventana de análisis utilizada. No obstante, no hay un procedimiento estándar en cuanto a qué medida es mejor que otra o en cuanto a qué ventana de análisis es la ideal. Es probable que diferentes autores adopten y reporten los resultados del procedimiento que más favorece a sus datos, lo que explicaría la gran heterogeneidad de resultados y procedimientos de análisis en el área. Si bien no existe un procedimiento estándar, si existen pautas que deben seguirse y que a menudo son omitidas. Ejemplos de esto son el filtrado en bandas estrechas para las medidas de sincronización de fase, y la utilización de ventanas de análisis lo suficientemente largas para estimar la sincronización entre señales oscilatorias de diferentes frecuencias. En el presente trabajo se tuvo especial cuidado de seguir estas dos pautas.

Otra carencia común en los estudios de hyperscanning es la falta de controles adecuados, que consideren actividades con las mismas demandas perceptuales e ideomotoras que las tareas de interacción, pero sin el componente social. Por ejemplo, se suelen comparar las hiperconexiones de parejas durante una tarea versus las hiperconexiones durante el *resting state*, o versus las hiperconexiones de parejas aleatorias de sujetos que

hacen tareas similares, pero donde la secuencia de presentación estímulos y de las respuestas que estos evocan no son las mismas entre los diferentes sujetos parejas. Esto trató de controlarse introduciendo una fase de ejecución coordinada con un estímulo externo, es decir, con el audio de la pieza musical. Así, tanto ambas condiciones de ejecución musical involucran ejecución coordinada. En la condición conjunta coordinando con otro ser humano y en la condición individual coordinando con una serie de estímulos predefinidos e invariantes, en el sentido de que eran exactamente los mismos de un trial a otro y de un sujeto a otro. Además, esta condición permitió la generación de parejas aleatorias, conformadas por sujetos que hacían la misma tarea pero de forma individual. Si bien se encontraban bastantes diferencias en la sincronización intercerebral durante la tarea de ejecución musical, tomando como controles la percepción del estímulo musical y la imaginación motora de la pieza, la mayoría de estas diferencias no resultaban significativas cuando se comparaba la ejecución conjunta con la ejecución individual. Así, cabe la posibilidad de que gran parte de los hallazgos en el área se puedan explicar debido a la sincronización inducida por una tarea particular o la presentación de estímulos simultáneos.

A pesar de que las significancias cambian con la ventana de análisis y la medida utilizada, la relación entre electrodos de diferentes parejas permanece estable. Un resultado sorpresivo fue que para alfa rápida, entre 10 y 13 Hz, se observó una disminución de la sincronización durante la ejecución musical. Esto contrasta con los resultados de publicaciones que reportan sincronización intercerebral en esta banda durante una tarea conjunta. Sin embargo, esto podría explicarse con el hecho de que esta banda de frecuencia se relaciona con la atención sostenida y diferenciada. La disminución de sincronización durante la ejecución musical en alfa rápida puede reflejar la atención selectiva y paralela a diferentes estímulos. Durante la percepción musical y la imaginación motora, la atención de los participantes se encontraba enfocada en la pieza musical, no debían dividir su atención ni monitorear de forma simultánea estímulos de diferentes fuentes. Sin embargo, durante la ejecución musical, los sujetos no solo debían poner atención a estímulos externos, ya fuesen generados por una computadora o por otro ser humano, sino que debían atender a sus propias acciones en el contexto de los estímulos externos, y al resultado común. Considerando lo anterior, no es inexplicable la disminución en la sincronización durante la ejecución musical en esta banda de frecuencia.

Se prestó especial atención a la relación entre electrodos homólogos debido a que no existe consenso, ni siquiera en estudios del mismo grupo, de cuáles áreas cerebrales no homólogas estarían involucradas en la interacción social. Como se reportó anteriormente, los resultados varían de una publicación a otra. Tampoco existen modelos neurobiológicos que traten de explicar la interrelación entre áreas cerebrales de diferentes cerebros durante cualquier tipo de interacción social. Así, cualquier patrón de hiperconexiones entre electrodos no homólogos dependería de la intuición (por no decir especulación) del investigador sobre lo que está pasando en los cerebros de los individuos mientras interactúan. No obstante, se ha propuesto que estas hiperconexiones reflejan la preparación de un individuo a una acción en particular, y la anticipación o predicción a estas acciones en el cerebro del otro individuo. Aún así, falta mucho para explicar de forma satisfactoria cómo se da el intercambio de información entre dos cerebros durante la interacción social, y falta aún más para una demostración científica de este tipo de relaciones.

Desafortunadamente, no se observaron diferencias entre la actividad de electrodos homólogos durante la ejecución musical conjunta, salvo en el caso reportado en la figura 5.10. No obstante, esto no significa que la sincronización intercerebral no juegue un rol particularmente relevante durante la interacción social. Si bien la construcción de parejas aleatorias brindó una muy robusta comparación, el efecto adverso de este procedimiento es que los trials de ejecución conjunta quedaron infrarepresentados en el análisis estadístico. La comparación pudo resultar injusta para esta condición. Esto puede ilustrarse con las figuras 5.3, 5.4 y 5.7,

donde en las bandas de frecuencia rápidas se observan claramente mayores valores de sincronización durante la ejecución conjunta, pero no alcanzan a ser distinguidos estadísticamente del resto de condiciones. La pobre representación de trials de ejecución conjunta se explica parcialmente por el diseño de la tarea, debido a que cada trial era relativamente largo y requería de un esfuerzo considerable para su registro correcto, el número de repeticiones en esta condición se limitó a tres para cada pareja. En futuros diseños, valdría la pena apostar por un diseño que permita maximizar el número de repeticiones de una tarea durante la ejecución conjunta, de tal forma que se pueda hacer una comparación adecuada entre esta condición y las condiciones control.

Puesto a que la literatura señala que las hiperconexiones se presentan principalmente entre electrodos no homólogos, también se comparó la sincronización entre todas las parejas posibles de electrodos durante las diferentes condiciones. Los resultados también varían dependiendo de la medida y la ventana de análisis. Sin embargo, parece que comúnmente se observan hiperconexiones entre áreas del hemisferio izquierdo del sujeto 1 hacia áreas centrales e izquierdas del sujeto 2. Especialmente las áreas frontales y parietales del primer sujeto y las áreas centrales y temporales del segundo fueron ubicadas como sincronizadas y relevantes durante la ejecución conjunta en diferentes medidas para diferentes ventanas de análisis, lo que concuerda con la literatura reportada previamente.

Finalmente, la corrección para múltiples comparaciones fue un problema persistente a lo largo de todo el análisis. La corrección de Bonferroni a menudo resultaba demasiado estricta, por lo que solo la corrección para las comparaciones entre las múltiples bandas de frecuencia fue aplicada. Sin embargo, puede alegarse con justa razón que este criterio fue arbitrario. No obstante, tampoco existe un procedimiento estándar ni un modelo matemático para detectar significancias espurias en este tipo de análisis, por lo que resalta la necesidad de un procedimiento estadístico que tenga en cuenta este problema al momento de analizar no solo datos de hyperscanning, sino datos de neuroimagen limitados a la dinámica intracerebral. El fijar un umbral de significancia demasiado estricto, si bien disminuye la probabilidad de errores tipo II, aumenta la probabilidad de cometer errores tipo I, rechazando la existencia de relaciones significativas en datos que en realidad si están relacionados.

Bibliografía

- Alerstam, T., Hedenström, A., & Åkesson, S. (2003). Longdistance migration: evolution and determinants. *Oikos*, 103(2), 247-260.
- Allison, T., Puce, A., & McCarthy, G. (2000). Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends in cognitive sciences*, 4(7), 267-278.
- Amodio, D. M., & Frith, C. D. (2006). Meeting of minds: The medial frontal cortex and social cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(4), 268–277.
- Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Marciani, M. G., ... Babiloni, F. (2009). Estimation of the cortical activity from simultaneous multi-subject recordings during the prisoner’s dilemma. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine* (pp. 1937–1939). EMBC.
- Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., Fallani, F. D. V., Salinari, S., Vecchiato, G., ... & He, B. (2010). Imaging the social brain: multi-subjects EEG recordings during the “Chicken’s game”. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 1734-1737). IEEE.
- Astolfi, L., Toppi, J., Borghini, G., Vecchiato, G., He, E. J., Roy, A., ... Babiloni, F. (2012). Cortical activity and functional hyperconnectivity by simultaneous EEG recordings from interacting couples of professional pilots. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 4752–4755). EMBS.
- Astolfi, L., Toppi, J., Borghini, G., Vecchiato, G., Isabella, R., Fallani, F. D. V., ... & Caltagirone, C. (2011). Study of the functional hyperconnectivity between couples of pilots during flight simulation: An EEG hyperscanning study. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 2338-2341). IEEE.
- Astolfi, L., Toppi, J., Casper, C., Freitag, C., Mattia, D., Babiloni, F., ... Siniatchkin, M. (2015). Investigating the neural basis of empathy by EEG hyperscanning during a Third Party Punishment. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 5384–5387). EMBS.
- Astolfi, L., Toppi, J., De Vico Fallani, F., Vecchiato, G., Salinari, S., Mattia, D., ... Babiloni, F. (2010). Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. *Brain Topography*, 23(3), 243–256.
- Astolfi, L., Toppi, J., Vogel, P., Mattia, D., Babiloni, F., Ciaramidaro, A., & Siniatchkin, M. (2014). Investigating the neural basis of cooperative joint action. An EEG hyperscanning study. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 4896–4899). EMBC.

- Atmaca, S., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2011). The joint flanker effect: Sharing tasks with real and imagined co-actors. *Experimental Brain Research*, 211(3–4), 371–385.
- Atmaca, S., Sebanz, N., Prinz, W., & Knoblich, G. (2008). Action co-representation: The joint SNARC effect. *Social Neuroscience*, 3(3–4), 410–420.
- Axelrod, R. (1980). Effective choice in the prisoner’s dilemma. *Journal of conflict resolution*, 24(1), 3-25.
- Babiloni, C., Buffo, P., Vecchio, F., Marzano, N., Del Percio, C., Spada, D., . . . Perani, D. (2012). Brains “in concert”: Frontal oscillatory alpha rhythms and empathy in professional musicians. *NeuroImage*, 60(1), 105–116.
- Babiloni, C., Vecchio, F., Infarinato, F., Buffo, P., Marzano, N., Spada, D., . . . Perani, D. (2011). Simultaneous recording of electroencephalographic data in musicians playing in ensemble. *Cortex*, 47(9), 1082–1090.
- Babiloni, F., & Astolfi, L. (2014). Social neuroscience and hyperscanning techniques: past, present and future. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 76-93.
- Babiloni, F., Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., Tocci, A., Tarantino, A., . . . De Vico Fallani, F. (2007). Cortical activity and connectivity of human brain during the prisoner’s dilemma: An EEG hyperscanning study. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings* (pp. 4953–4956). IEEE.
- Babiloni, F., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Tocci, A., Bianchi, L., . . . Astolfi, L. (2007). High resolution EEG hyperscanning during a card game. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 4957–4960). IEEE.
- Babiloni, F., Cincotti, F., Mattia, D., Mattiocco, M., De Fallani, F. V., Tocci, A., . . . Astolfi, L. (2006). Hypermethods for EEG hyperscanning. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 3666–3669). IEEE.
- Bahrami, B., Olsen, K., Latham, P. E., Roepstorff, A., Rees, G., & Frith, C. D. (2010). Optimally interacting minds. *Science*, 329(5995), 1081-1085.
- Bandura, A. (2001). Social cognitive theory: An agentic perspective. *Annual review of psychology*, 52(1), 1-26.
- Bandura, A., Ross, D., & Ross, S. A. (1961). Transmission of aggression through imitation of aggressive models. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 63(3), 575.
- Bauer, A. K. R., Bleichner, M. G., Jaeger, M., Thorne, J. D., & Debener, S. (2018). Dynamic phase alignment of ongoing auditory cortex oscillations. *NeuroImage*, 167, 396–407.
- Becchio, C., Sartori, L., Bulgheroni, M., & Castiello, U. (2008). Both your intention and mine are reflected in the kinematics of my reach-to-grasp movement. *Cognition*, 106(2), 894–912.
- Bernieri, F. J. (1988). Coordinated movement and rapport in teacher-student interactions. *Journal of Non-verbal Behavior*, 12(2), 120–138.
- Bezerianos, A., Sun, Y., Chen, Y., Woong, K. F., Taya, F., Arico, P., . . . Thakor, N. (2015). Cooperation driven coherence: Brains working hard together. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 4696–4699). EMBS.
- Blain, G., Meste, O., Blain, A., & Bermon, S. (2009). Time-frequency analysis of heart rate variability reveals cardiocomotor coupling during dynamic cycling exercise in humans. *American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology*, 296(5), H1651–H1659.

- Bleidorn, W., Kandler, C., Hülshager, U. R., Riemann, R., Angleitner, A., & Spinath, F. M. (2010). Nature and nurture of the interplay between personality traits and major life goals. *Journal of Personality and Social Psychology*, 99(2), 366.
- Böckler, A., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2011). Giving a helping hand: effects of joint attention on mental rotation of body parts. *Experimental brain research*, 211(3-4), 531.
- Bosman, C.A., Schoffelen, J.M., Brunet, N., Oostenveld, R., Bastos, A.M., Womelsdorf, T., Rubehn, B., Stieglitz, T., De Weerd, P. and Fries, P. (2012). Attentional stimulus selection through selective synchronization between monkey visual areas. *Neuron*, 75(5), 875-888.
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356–366.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539–546.
- Brass, M., Bekkering, H., & Prinz, W. (2001). Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta Psychologica*, 106(1–2), 3–22.
- Brennan, S. E., Chen, X., Dickinson, C. A., Neider, M. B., & Zelinsky, G. J. (2008). Coordinating cognition: The costs and benefits of shared gaze during collaborative search. *Cognition*, 106(3), 1465-1477.
- Burgess, A. P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: a cautionary note. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(December), 1–17.
- Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press. Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, 304(5679), 1926–1929.
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grèzes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: An fMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, 15(8), 1243–1249.
- Capozzi, F., Becchio, C., Garbarini, F., Savazzi, S., & Pia, L. (2016). Temporal perception in joint action: This is MY action. *Consciousness and Cognition*, 40, 26–33.
- Casile, A., Caggiano, V., & Ferrari, P. F. (2011). The mirror neuron system: a fresh view. *The neuroscientist*, 17(5), 524-538.
- Castellanos, I. (1990). Grammatical structure, historical development, and religious usage of Afro-Cuban bozal speech.
- Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: the perception–behavior link and social interaction. *Journal of personality and social psychology*, 76(6), 893.
- Chavez, M., Besserve, M., Adam, C., & Martinerie, J. (2006). Towards a proper estimation of phase synchronization from time series. *Journal of Neuroscience Methods*, 154(1–2), 149–160.
- Chawla, D., Friston, K. J., & Lumer, E. D. (2001). Zero-lag synchronous dynamics in triplets of interconnected cortical areas. *Neural Networks*, 14(6–7), 727–735.
- Chemero, A. (2003). An outline of a theory of affordances. *Ecological psychology*, 15(2), 181-195.
- Chung, D., Yun, K., & Jeong, J. (2014). Decoding covert motivations of free riding and cooperation from multi-feature pattern analysis of EEG signals. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(9), 1210–1218.

- Cooper, R. . (2010). Forward and Inverse Models in Motor Control and Cognitive Control. *International Symposium on AIInspired Biology*.
- De Lange, F. P., Spronk, M., Willems, R. M., Toni, I., & Bekkering, H. (2008). Complementary Systems for Understanding Action Intentions. *Current Biology*, 18(6), 454–457.
- De Vico Fallani, F., Nicosia, V., Sinatra, R., Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., Wilke, C., Doud, A., Latora, V., He, B., & Babiloni, F. (2010). Defecting or not defecting: How to “read” human behavior during cooperative games by EEG measurements. *PLoS ONE*, 5(12), e14187.
- Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176–180.
- Dodel, S., Cohn, J., Mersmann, J., Luu, P., Forsythe, C., & Jirsa, V. (2011, July). Brain signatures of team performance. *International Conference on Foundations of Augmented Cognition* (pp. 288–297). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dolk, T., Hommel, B., Colzato, L. S., Schütz-Bosbach, S., Prinz, W., & Liepelt, R. (2014). The joint Simon effect: a review and theoretical integration. *Frontiers in Psychology*, 5, 974.
- Duane, T. D., & Behrendt, T. (1965). Extrasensory Electroencephalographic Induction between Identical Twins. *Science*, 150(3694), 367.
- Dumas, G., Lachat, F., Martinerie, J., Nadel, J., & George, N. (2011). From social behaviour to brain synchronization: Review and perspectives in hyperscanning. *Irbm*, 32(1), 48–53.
- Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PLoS ONE*, 5(8).
- Durantoni, C., & Gaunet, F. (2016). Behavioural synchronization from an ethological perspective: Overview of its adaptive value. *Adaptive Behavior*, 24(3), 181–191.
- Fias, W. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical cognition*, 2(1), 95–110.
- Flexer, A., & Makeig, S. (2007). Independent component analysis of EEG recorded during two-person game playing. *Applied Artificial Intelligence*, 21(9), 883–894.
- Freyd, J. J. (1987). Dynamic Mental Representations. *Psychological Review*, 94(4), 427–438.
- Fries, P. (2005). A mechanism for cognitive dynamics: Neuronal communication through neuronal coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(10), 474–480.
- Fries, P. (2015). Rhythms for Cognition: Communication through Coherence. *Neuron*, 88(1), 220–235.
- Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Interacting minds—a biological basis. *Science*, 286(5445), 1692–1695.
- Froese, T., & Di Paolo, E. A. (2011). The enactive approach: Theoretical sketches from cell to society. *Pragmatics & Cognition*, 19(1), 1–36.
- Froese, T., Gershenson, C., & Rosenblueth, D. A. (2013, June). The dynamically extended mind. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 1419–1426). IEEE.
- Froese, T., Iizuka, H., & Ikegami, T. (2014). Embodied social interaction constitutes social cognition in Pairs of humans: A minimalist virtual reality experiment. *Scientific Reports*, 4, 1–10.

- Fuchs, T., & de Jaegher, H. (2009). Enactive intersubjectivity: Participatory sense-making and mutual incorporation. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 8(4), 465–486.
- Galantucci, B. (2009). Experimental Semiotics: A New Approach for Studying Communication as a Form of Joint Action. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 393–410.
- Giardina, I. (2008). Collective behavior in animal groups: Theoretical models and empirical studies. *HFSP Journal*, 2(4), 205–219.
- Gibson, J. J. (1977). *The theory of affordances*. Hilldale.
- Goebl, W., & Palmer, C. (2009). Synchronization of timing and motion among performing musicians. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 26(5), 427-438.
- Goldstein, M. H., & Schwade, J. A. (2010). From birds to words: Perception of structure in social interactions guides vocal development and language learning. En *The Oxford handbook of developmental and comparative neuroscience*, 708-729.
- Gomez-Ramirez, M., Kelly, S. P., Molholm, S., Sehatpour, P., Schwartz, T. H., & Foxe, J. J. (2011). Oscillatory sensory selection mechanisms during intersensory attention to rhythmic auditory and visual inputs: a human electrocorticographic investigation. *Journal of Neuroscience*, 31(50), 18556-18567.
- Gottlieb, J. (2007). From Thought to Action: The Parietal Cortex as a Bridge between Perception, Action, and Cognition. *Neuron*, 53(1), 9–16.
- Gräfenhain, M., Behne, T., Carpenter, M., & Tomasello, M. (2009). Young children’s understanding of joint commitments. *Developmental Psychology*, 45(5), 1430.
- Gray, C. M., König, P., Engel, A. K., & Singer, W. (1989). Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, 338(6213), 334.
- Graybiel, A. M. (1998). The basal ganglia and chunking of action repertoires. *Neurobiology of Learning and Memory*, 70(1–2), 119–136.
- Griffiths, D., & Tipper, S. P. (2009). Priming of reach trajectory when observing actions: Hand-centred effects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(12), 2450–2470.
- Grinberg-Zylberbaum, J., & Ramos, J. (1987). Patterns of interhemispheric correlation during human communication. *International Journal of Neuroscience*, 36(1-2), 41-53.
- Grinberg-Zylberbaum, J., Delaflor, M., Sánchez Arellano, M. E., Guevara, M.A. y Perez, M. (1993). Human communication and the electrophysiological activity of the brain. *Subtle Energies & Energy Medicine Journal Archives*, 3(3).
- Gros-Louis, J., West, M. J., Goldstein, M. H., & King, A. P. (2006). Mothers provide differential feedback to infants’ prelinguistic sounds. *International Journal of Behavioral Development*, 30(6), 509-516.
- Gross, J., Schmitz, F., Schnitzler, I., Kessler, K., Shapiro, K., Hommel, B., & Schnitzler, A. (2004). Modulation of long-range neural synchrony reflects temporal limitations of visual attention in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(35), 13050-13055.
- Häberle, A., Schütz-Bosbach, S., Laboissière, R., & Prinz, W. (2008). Ideomotor action in cooperative and competitive settings. *Social Neuroscience*, 3(1), 26–36.

- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51(5), 347–356.
- Handjaras, G., Bernardi, G., Benuzzi, F., Nichelli, P. F., Pietrini, P., & Ricciardi, E. (2015). A topographical organization for action representation in the human brain. *Human Brain Mapping*, 36(10), 3832–3844.
- Hanson, S. J., Gagliardi, A. D., & Hanson, C. (2009). Solving the brain synchrony eigenvalue problem: Conservation of temporal dynamics (fMRI) over subjects doing the same task. *Journal of Computational Neuroscience*, 27(1), 103–114.
- Hari, R., & Kujala, M. V. (2009). Brain Basis of Human Social Interaction: From Concepts to Brain Imaging. *Physiological Reviews*, 89(2), 453–479.
- Harrison, S. J., & Richardson, M. J. (2009). Horsing Around: Spontaneous four-legged coordination. *Journal of Motor Behavior*, 41(6), 519–524.
- Hasson, U., Ghazanfar, A. A., Galantucci, B., Garrod, S., & Keysers, C. (2012). Brain-to-brain coupling: a mechanism for creating and sharing a social world. *Trends in cognitive sciences*, 16(2), 114–121.
- Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G., & Malach, R. (2004). Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *Science*, 303(5664), 1634–1640.
- Healey, P. G. T., Swoboda, N., Umata, I., & King, J. (2007). Graphical Language Games: Interactional Constraints on Representational Form. *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal*, 31(2), 285–309.
- Heed, T., Habets, B., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2010). Others' actions reduce crossmodal integration in peripersonal space. *Current Biology*, 20(15), 1345–1349.
- Heyman, G. D., & Gelman, S. A. (1998). Young children use motive information to make trait inferences. *Developmental Psychology*, 34(2), 310–321.
- Hoff, E. (2006). How social contexts support and shape language development. *Developmental Review*, 26(1), 55–88.
- Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136(2), 189–202.
- Hood, B. M., Willen, J. D., & Driver, J. (1998). Adult's eyes trigger shifts of visual attention in human infants. *Psychological Science*, 9(2), 131–134.
- Hove, M. J., & Risen, J. L. (2009). It's All in the Timing: Interpersonal Synchrony Increases Affiliation. *Social Cognition*, 27(6), 949–960.
- Hummel, F., & Gerloff, C. (2005). Larger interregional synchrony is associated with greater behavioral success in a complex sensory integration task in humans. *Cerebral Cortex*, 15(5), 670–678.
- Iacoboni, M. (2005). Neural mechanisms of imitation. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(6), 632–637.
- Jääskeläinen, I. P., Koskentalo, K., Balk, M. H., Autti, T., Kauramäki, J., Pomren, C., & Sams, M. (2008). Inter-subject synchronization of prefrontal cortex hemodynamic activity during natural viewing. *The open neuroimaging journal*, 2, 14.
- Jeong, J. (2004). EEG dynamics in patients with Alzheimer's disease. *Clinical Neurophysiology*, 115(7), 1490–1505.

- Kawasaki, M., Yamada, Y., Ushiku, Y., Miyauchi, E., & Yamaguchi, Y. (2013). Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. *Scientific Reports*, 3, 1–8.
- Keller, P. E., & Koch, I. (2008). Action planning in sequential skills: Relations to music performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(2), 275–291.
- Keller, P. E., Novembre, G., & Hove, M. J. (2014). Rhythm in joint action: Psychological and neurophysiological mechanisms for real-time interpersonal coordination. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1658).
- Keysers, C., & Gazzola, V. (2009). Expanding the mirror: vicarious activity for actions, emotions, and sensations. *Current opinion in neurobiology*, 19(6), 666-671.
- Keysers, C., & Perrett, D. I. (2004). Demystifying social cognition: A Hebbian perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(11), 501–507.
- Kilner, J. M., Paulignan, Y., & Blakemore, S. J. (2003). An interference effect of observed biological movement on action. *Current biology*, 13(6), 522-525.
- Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011). Psychological research on joint action: theory and data. En *Psychology of learning and motivation*, 59-101. Academic Press.
- Koch, I., Keller, P., & Prinz, W. (2004). The ideomotor approach to action control: Implications for skilled performance. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 2(4), 362-375.
- Konvalinka, I., & Roepstorff, A. (2012). The two-brain approach: how can mutually interacting brains teach us something about social interaction? *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(July), 1–10.
- Konvalinka, I., Bauer, M., Stahlhut, C., Hansen, L. K., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2014). Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: multivariate decoding of mutually interacting brains. *Neuroimage*, 94, 79-88.
- Krueger, F., Barbey, A. K., & Grafman, J. (2009). The medial prefrontal cortex mediates social event knowledge. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(3), 103–109.
- Kuhlen, A. K., Allefeld, C., & Haynes, J.-D. (2012). Content-specific coordination of listeners' to speakers' EEG during communication. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 1–15
- Kuhlmeier, V. A., Troje, N. F., & Lee, V. (2010). Young infants detect the direction of biological motion in point-light displays. *Infancy*, 15(1), 83–93.
- Lalazar, H., & Vaadia, E. (2008). Neural basis of sensorimotor learning: modifying internal models. *Current Opinion in Neurobiology*, 18(6), 573–581.
- Land, W. M., Volchenkov, D., Bläsing, B. E., & Schack, T. (2013). From action representation to action execution: exploring the links between cognitive and biomechanical levels of motor control. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7(September), 1–14.
- Lieberman, M. D. (2007). Social Cognitive Neuroscience: A Review of Core Processes. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 259–289.
- Liepelt, R., Stenzel, A., Bou, M. A. T., Lappe, M., Chinellato, E., & del Pobil, Á. P. (2012). When humanoid robots become human-like interaction partners: Corepresentation of robotic actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(5), 1073–1077.

- Lindenberger, U., Li, S. C., Gruber, W., & Müller, V. (2009). Brains swinging in concert: Cortical phase synchronization while playing guitar. *BMC Neuroscience*, 10, 1–12.
- Liszkowski, U., Carpenter, M., & Tomasello, M. (2008). Twelve-month-olds communicate helpfully and appropriately for knowledgeable and ignorant partners. *Cognition*, 108(3), 732–739.
- Loehr, J. D., Kourtis, D., Vesper, C., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2013). Monitoring individual and joint action outcomes in duet music performance. *Journal of cognitive neuroscience*, 25(7), 1049–1061.
- Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Ma, N., Vandekerckhove, M., van Hoeck, N., & van Overwalle, F. (2012). Distinct recruitment of temporo-parietal junction and medial prefrontal cortex in behavior understanding and trait identification. *Social Neuroscience*, 7(6),
- Marsh, K. L., Richardson, M. J., & Schmidt, R. C. (2009). Social Connection Through Joint Action and Interpersonal Coordination. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 320–339.
- Mead, G. H. (1934). *Mind, self and society* (Vol. 111). University of Chicago Press.: Chicago.
- Melis, A. P., Hare, B., & Tomasello, M. (2006). Chimpanzees recruit the best collaborators. *Science*, 311(5765), 1297–1300.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1989). Imitation in Newborn Infants: Exploring the Range of Gestures Imitated and the Underlying Mechanisms. *Developmental Psychology*, 25(6), 954–962.
- Ménoret, M., Varnet, L., Fargier, R., Cheylus, A., Curie, A., Des Portes, V., ... & Paulignan, Y. (2014). Neural correlates of non-verbal social interactions: a dual-EEG study. *Neuropsychologia*, 55, 85–97.
- Miles, L. K., Nind, L. K., & Macrae, C. N. (2009). The rhythm of rapport: Interpersonal synchrony and social perception. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(3), 585–589.
- Mitchell, J. P. (2004). Encoding-Specific Effects of Social Cognition on the Neural Correlates of Subsequent Memory. *Journal of Neuroscience*, 24(21), 4912–4917.
- Mottet, D., Guiard, Y., Ferrand, T., & Bootsma, R. J. (2001). Two-handed performance of a rhythmical fitts task by individuals and dyads. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(6), 1275–1286.
- Müller, R. (2016). Does the anticipation of compatible partner reactions facilitate action planning in joint tasks? *Psychological Research*, 80(4), 464–486.
- Müller, V., Sängler, J., & Lindenberger, U. (2013). Intra- and Inter-Brain Synchronization during Musical Improvisation on the Guitar. *PLoS ONE*, 8(9).
- Naeem, M., Prasad, G., Watson, D. R., & Kelso, J. A. S. (2012). Electrophysiological signatures of intentional social coordination in the 10-12Hz range. *NeuroImage*, 59(2), 1795–1803.
- Naeem, M., Prasad, G., Watson, D. R., & Kelso, J. A. S. (2012). Functional dissociation of brain rhythms in social coordination. *Clinical Neurophysiology*, 123(9), 1789–1797.
- Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T., & Barabási, A. L. (2000). Self-organizing processes: The sound of many hands clapping. *Nature*, 403(6772), 849.

- Oberman, L. M., Pineda, J. A., & Ramachandran, V. S. (2007). The human mirror neuron system: A link between action observation and social skills. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2(1), 62–66.
- Olguín-Rodríguez, P. V. (2015). *Protocolo experimental y análisis de señales intra e intercerebrales influenciados por estímulos acústicos* (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Ciencias - Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos.
- Oullier, O., De Guzman, G. C., Jantzen, K. J., Lagarde, J., & Scott Kelso, J. A. (2008). Social coordination dynamics: Measuring human bonding. *Social neuroscience*, 3(2), 178-192.
- Park, G., Van Bavel, J. J., Hill, L. B. K., Williams, D. W. P., & Thayer, J. F. (2016). Social groups prioritize selective attention to faces: How social identity shapes distractor interference. *PLoS ONE*, 11(8), 1–17.
- Pelphrey, K. A., Morris, J. P., & McCarthy, G. (2004). Grasping the Intentions of Others: The Perceived Intentionality of an Action Influences Activity in the Superior Temporal Sulcus during Social Perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(10), 1706–1716.
- Phillips-Silver, J., Aktipis, C. A., & Bryant, G. A. (2010). Entrainment, foundations of coordinated rhythm. *Music Perception*, 28(1), 3–14.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2003). *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge University Press.
- Plankar, M., Brežan, S., & Jerman, I. (2013). The principle of coherence in multi-level brain information processing. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 111(1), 8–29.
- Polanía, R., Nitsche, M. A., Korman, C., Batsikadze, G., & Paulus, W. (2012). The importance of timing in segregated theta phase-coupling for cognitive performance. *Current Biology*, 22(14), 1314–1318.
- Quintero-Torres, R., Ocampo, M. A., Millán, B., Aragón, J. L., & Naumis, G. G. (2007). Oscilaciones, armonía y simpatía. *Revista mexicana de física*, 53(1), 67-81.
- Ragert, M., Schroeder, T., & Keller, P. E. (2013). Knowing too little or too much: the effects of familiarity with a co-performer's part on interpersonal coordination in musical ensembles. *Frontiers in psychology*, 4, 368.
- Ramnani, N., & Miall, R. C. (2004). A system in the human brain for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience*, 7(1), 85–90.
- Rapoport, A., & Chammah, A. M. (1966). The Game of Chicken. *American Behavioral Scientist*, 10(3), 10–28.
- Richardson, D. C., & Dale, R. (2005). Looking to understand: The coupling between speakers' and listeners' eye movements and its relationship to discourse comprehension. *Cognitive science*, 29(6), 1045-1060.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Baron, R. M. (2007). Judging and Actualizing Intrapersonal and Interpersonal Affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(4), 845–859.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L., & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, 26(6), 867–891.

- Ríos-Herrera, W. A. (2017). *Desarrollo de métodos multivariantes para el estudio de dinámicas complejas* (Tesis doctoral). Centro de Investigación en Ciencias - Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.*, *27*, 169-192.
- Roelfsema, P. R., Engel, A. K., König, P., & Singer, W. (1997). Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature*, *385*(6612), 157.
- Rosenblum, M. G., Pikovsky, A. S., & Kurths, J. (1996). Phase synchronization of chaotic oscillators. *Physical review letters*, *76*(11), 1804.
- Samson, D., Apperly, I. A., Braithwaite, J. J., Andrews, B. J., & Bodley Scott, S. E. (2010). Seeing it their way: evidence for rapid and involuntary computation of what other people see. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*(5), 1255.
- Samson, D., Apperly, I. A., Kathirgamanathan, U., & Humphreys, G. W. (2005). Seeing it my way: A case of a selective deficit in inhibiting self-perspective. *Brain*, *128*(5), 1102–1111.
- Sänger, J., Lindenberger, U., & Müller, V. (2011). Interactive brains, social minds. *Communicative and Integrative Biology*, *4*(6), 655–663.
- Sänger, J., Müller, V., & Lindenberger, U. (2012). Intra- and interbrain synchronization and network properties when playing guitar in duets. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 1–19.
- Sarnthein, J., Petsche, H., Rappelsberger, P., Shaw, G. L., & Von Stein, A. (1998). Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*(12), 7092-7096.
- Sauseng, P., & Klimesch, W. (2008). What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *32*(5), 1001–1013.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Gruber, W. R., & Birbaumer, N. (2008). Cross-frequency phase synchronization: A brain mechanism of memory matching and attention. *NeuroImage*, *40*(1), 308–317.
- Saxe, R., Carey, S., & Kanwisher, N. (2004). Understanding Other Minds: Linking Developmental Psychology and Functional Neuroimaging. *Annual Review of Psychology*, *55*(1), 87–124.
- Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T., & Vogeley, K. (2013). Toward a second-person neuroscience. *Behavioral and brain sciences*, *36*(4), 393-414.
- Schmidt, R. C., & O'Brien, B. (1997). Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, *9*(3), 189-206.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase Transitions and Critical Fluctuations in the Visual Coordination of Rhythmic Movements Between People. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*(2), 227–247.
- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: What, when, and where. *Topics in Cognitive Science*, *1*(2), 353-367.
- Sebanz, N., & Shiffrar, M. (2007). Bodily bonds: Effects of social context on ideomotor movements. Oxford University Press. En *Sensorimotor foundations of higher cognition* (No. 22). Oxford University Press, USA.

- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: Bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 70–76.
- Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003). Representing others' actions: just like one's own?. *Cognition*, 88(3), B11-B21.
- Shockley, K., Baker, A. A., Richardson, M. J., & Fowler, C. A. (2007). Articulatory constraints on interpersonal postural coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(1), 201–208.
- Shockley, K., Richardson, D. C., & Dale, R. (2009). Conversation and Coordinative Structures. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 305–319.
- Shockley, K., Santana, M. V., & Fowler, C. A. (2003). Mutual interpersonal postural constraints are involved in cooperative conversation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 326.
- Simion, F., & Giorgio, E. Di. (2015). Face perception and processing in early infancy: Inborn predispositions and developmental changes. *Frontiers in Psychology*, 6(July), 1–11.
- Singer, W. (1993). Synchronization of cortical activity and its putative role in information processing and learning. *Annual Review of Physiology*, 55(1), 349–374.
- Singer, W., & Gray, C. M. (1995). Visual Feature Integration and the Temporal Correlation Hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*, 18(1), 555–586.
- Sinha, N., Maszczyk, T., Zhang, W., Tan, J., & Dauwels, J. (2017). EEG hyperscanning study of inter-brain synchrony during cooperative and competitive interaction. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 4813–4818). IEEE.
- Sogorski, M., Geisel, T., & Priesemann, V. (2018). Correlated microtiming deviations in jazz and rock music. *PLoS ONE*, 13(1), e0186361.
- Speckmann, E. J., & Elger, C.E. (2005). Introduction of the neurophysiological basis of the EEG and DC potentials. En Niedermeyer, E., & da Silva, F. L. (eds), *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields* (pp. 15-26). Lippincott Williams & Wilkins.
- Lippincott Williams & Wilkins. Sporns, O., Tononi, G., & Edelman, G. M. (2002). Theoretical neuroanatomy and the connectivity of the cerebral cortex. *Behavioural Brain Research*, 135(1–2), 69–74.
- Stam, C. J., Van Der Made, Y., Pijnenburg, Y. A. L., & Scheltens, P. (2003). EEG synchronization in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Acta Neurologica Scandinavica*, 108(2), 90–96.
- Stanley, J., Gowen, E., & Miall, R. C. (2007). Effects of Agency on Movement Interference During Observation of a Moving Dot Stimulus. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(4), 915–926.
- Tanji, J., & Hoshi, E. (2008). Role of the Lateral Prefrontal Cortex in Executive Behavioral Control. *Physiological Reviews*, 88(1), 37–57.
- Thut, G., Miniussi, C., & Gross, J. (2012). The functional importance of rhythmic activity in the brain. *Current Biology*, 22(16), 658-663.

- Thut, G., Schyns, P. G., & Gross, J. (2011). Entrainment of perceptually relevant brain oscillations by non-invasive rhythmic stimulation of the human brain. *Frontiers in Psychology*, 2(JUL), 1–10.
- Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., & Kelso, J. A. S. (2007). The phi complex as a neuromarker of human social coordination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(19), 8190–8195.
- Tomasello, M., Kruger, A. C., & Ratner, H. H. (1993). Cultural learning. *Behavioral and brain sciences*, 16(3), 495–511.
- Toppi, J., Borghini, G., Petti, M., He, E. J., De Giusti, V., He, B., . . . Babiloni, F. (2016). Investigating cooperative behavior in ecological settings: An EEG hyperscanning study. *PLoS ONE*, 11(4), 1–26.
- Tria, F., Servedio, V. D. P., Mufwene, S. S., & Loretto, V. (2015). Modeling the emergence of contact languages. *PLoS ONE*, 10(4), 1–11.
- Tsai, C. C., Kuo, W. J., Hung, D. L., & Tzeng, O. J. (2008). Action co-representation is tuned to other humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(11), 2015–2024.
- Valdesolo, P., Ouyang, J., & DeSteno, D. (2010). The rhythm of joint action: Synchrony promotes cooperative ability. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46(4), 693–695.
- van Baaren, R. B., Holland, R. W., Steenaert, B., & van Knippenberg, A. (2003). Mimicry for money: Behavioral consequences of imitation. *Journal of Experimental Social Psychology*, 39(4), 393–398.
- van Baaren, R., Janssen, L., Chartrand, T. L., & Dijksterhuis, A. (2009). Where is the love? The social aspects of mimicry. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1528), 2381–2389.
- van Overwalle, F. (2009). Social cognition and the brain: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, 30(3), 829–858.
- van Ulzen, N. R., Lamoth, C. J. C., Daffertshofer, A., Semin, G. R., & Beek, P. J. (2008). Characteristics of instructed and uninstructed interpersonal coordination while walking side-by-side. *Neuroscience Letters*, 432(2), 88–93.
- Vander Wyk, B. C., Sobel, D. M., Pelphrey, K. A., Hudac, C. M., & Carter, E. J. (2009). Action Understanding in the Superior Temporal Sulcus Region. *Psychological Science*, 20(6), 771–777.
- Vesper, C., Butterfill, S., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2010). A minimal architecture for joint action. *Neural Networks*, 23(8–9), 998–1003.
- Vygotsky, L. S., & Luria, A. R. (1993). *Studies on the history of behavior: Ape, primitive, and child* (V. I. Golod & J. E. Knox, Eds.). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Warneken, F., Hare, B., Melis, A. P., Hanus, D., & Tomasello, M. (2007). Spontaneous altruism by chimpanzees and young children. *PLoS Biology*, 5(7), 1414–1420.
- Weiss, S., & Rappelsberger, P. (2000). Long-range EEG synchronization during word encoding correlates with successful memory performance. *Cognitive Brain Research*, 9(3), 299–312.
- Weitekamp, C. A., Libbrecht, R., & Keller, L. (2017). Genetics and Evolution of Social Behavior in Insects. *Annual Review of Genetics*, 51(1), 219–239.
- Will, U., & Berg, E. (2007). Brain wave synchronization and entrainment to periodic acoustic stimuli. *Neuroscience Letters*, 424(1), 55–60.

- Wilson, M. L., Hauser, M. D., & Wrangham, R. W. (2001). Does participation in intergroup conflict depend on numerical assessment, range location, or rank for wild chimpanzees? *Animal Behaviour*, 61(6), 1203–1216.
- Wilson, S. M., Molnar-Szakacs, I., & Iacoboni, M. (2008). Beyond superior temporal cortex: Intersubject correlations in narrative speech comprehension. *Cerebral Cortex*, 18(1), 230–242.
- Wiltermuth, S. S., & Heath, C. (2009). Synchrony and cooperation. *Psychological science*, 20(1), 1-5.
- Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1431), 593–602.
- Woodward, A. L. (1998). Infants selectively encode the goal object of an actor's reach. *Cognition*, 69(1), 1–34.
- Woodworth, R. S. (1939). Individual and group behavior. *American Journal of Sociology*, 44(6), 823-828.
- Yun, K., Chung, D., & Jeong, J. (2008). Emotional interactions in human decision making using EEG hyperscanning. In *International Conference of Cognitive Science*.
- Yun, K., Watanabe, K., & Shimojo, S. (2012). Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. *Scientific Reports*, 2, 1–8.

Anexos

Anexo 1

TRIAL	VERSUS																								
CAS11	CIS111																								
CAS12	CIS111	CIS112																							
CAS13	CIS111	CIS112	CIS113																						
CAS21	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211																					
CAS22	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212																				
CAS23	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213																			
CAS11	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111																		
CAS12	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112																	
CAS13	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113																
CAS21	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211															
CAS22	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212														
CAS23	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213													
CAS11	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111												
CAS12	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112											
CAS13	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113										
CAS21	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211									
CAS22	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212								
CAS23	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213							
CAS11	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111						
CAS12	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112					
CAS13	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113				
CAS21	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211			
CAS22	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212		
CAS23	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS11	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS12	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS13	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS21	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS22	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS23	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS11	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS12	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS13	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS21	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS22	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	
CAS23	CIS111	CIS112	CIS113	CIS211	CIS212	CIS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	CAS111	CAS112	CAS113	CAS211	CAS212	CAS213	

Nomenclatura: C: Pareja (Couples), S: Sujeto, T: Trial. Ejemplo con tareas de ejecución individual: CAS113 vs CAS211. Compara el trial 3 del primer guitarista de la pareja 3 con el trial 1 del guitarrista 2 de la pareja 2.

Figura 6.1: Comparaciones entre sujetos durante las condiciones individuales realizadas en el presente trabajo. Se omitieron las comparaciones de un sujeto contra sí mismo, ilustradas en gris y amarillo.

Anexo 2

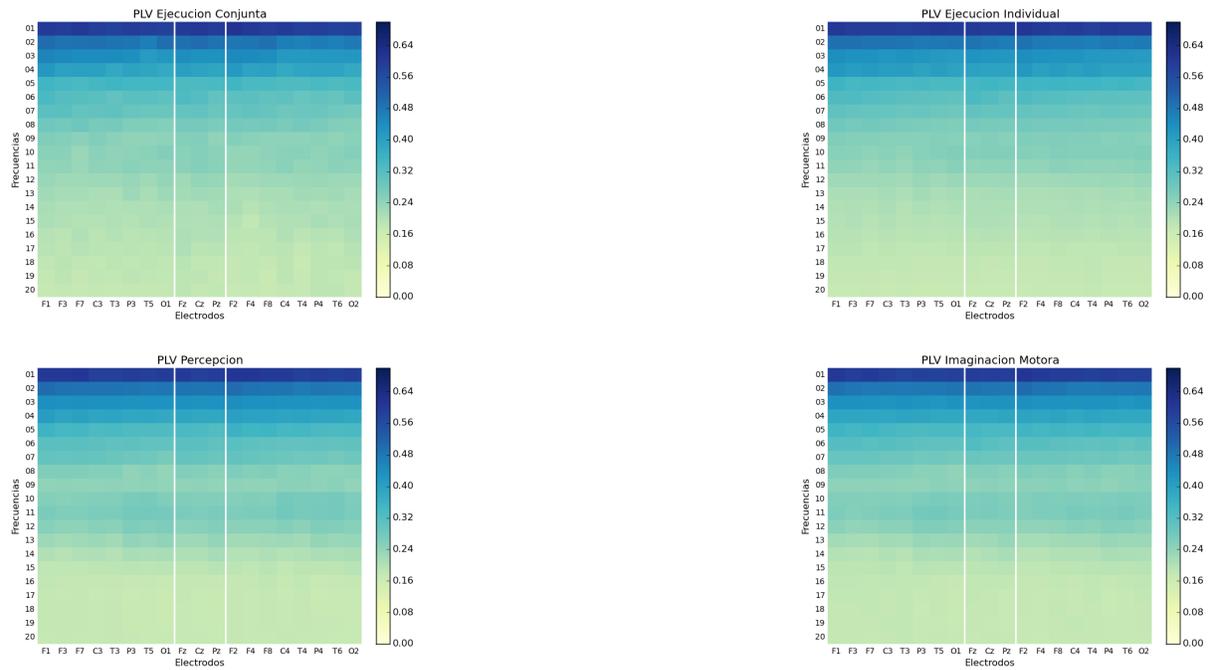


Figura 6.2: PLV para cada par de electrodos homólogos en las diferentes bandas de frecuencia para cada condición con una ventana de análisis de 4 segundos

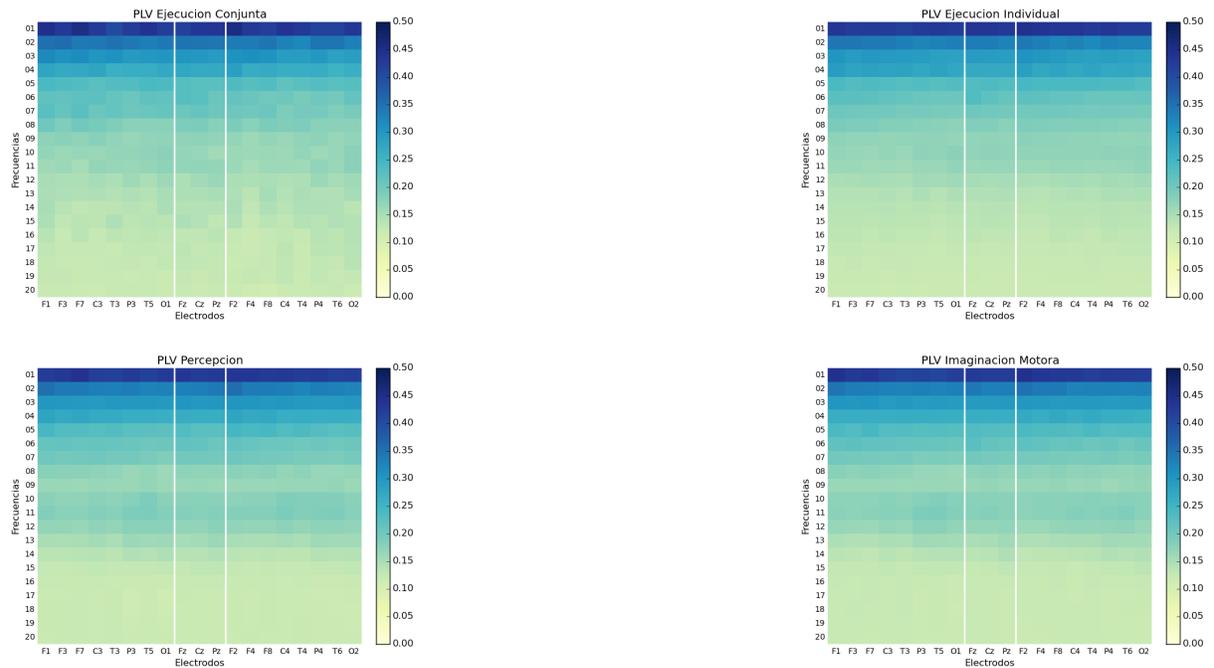


Figura 6.3: PLV para cada par de electrodos homólogos en las diferentes bandas de frecuencia para cada condición con una ventana de análisis de 8 segundos.

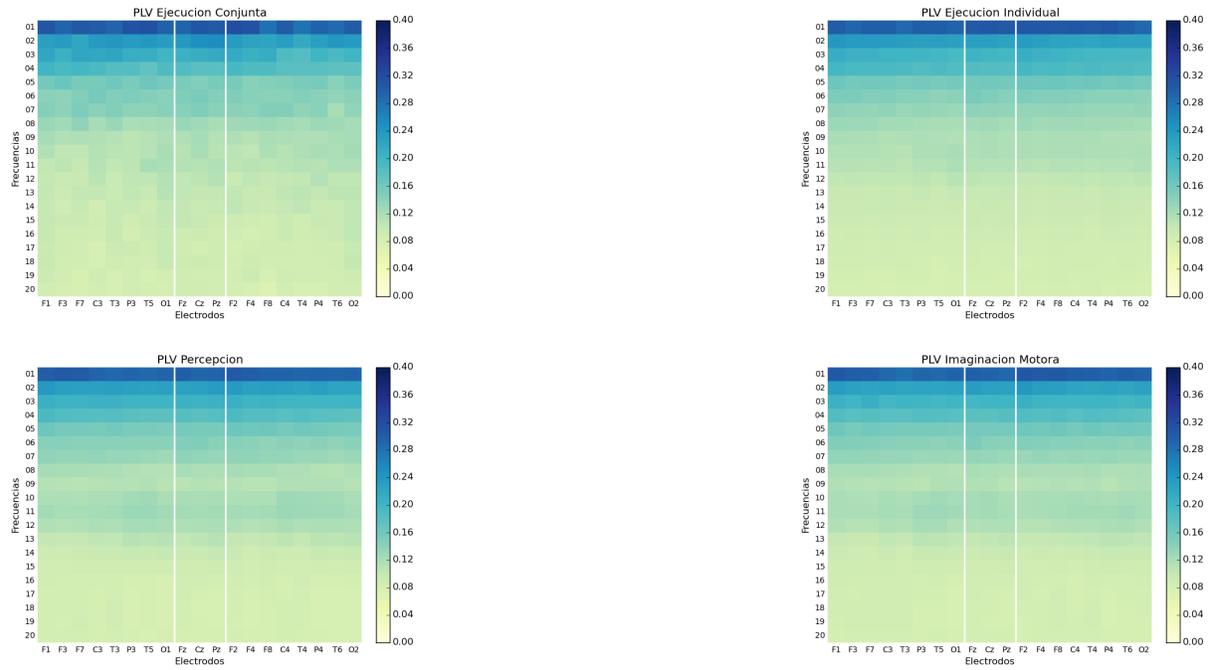


Figura 6.4: PLV para cada par de electrodos homólogos en las diferentes bandas de frecuencia para cada condición con una ventana de análisis de 16 segundos

Anexo 3

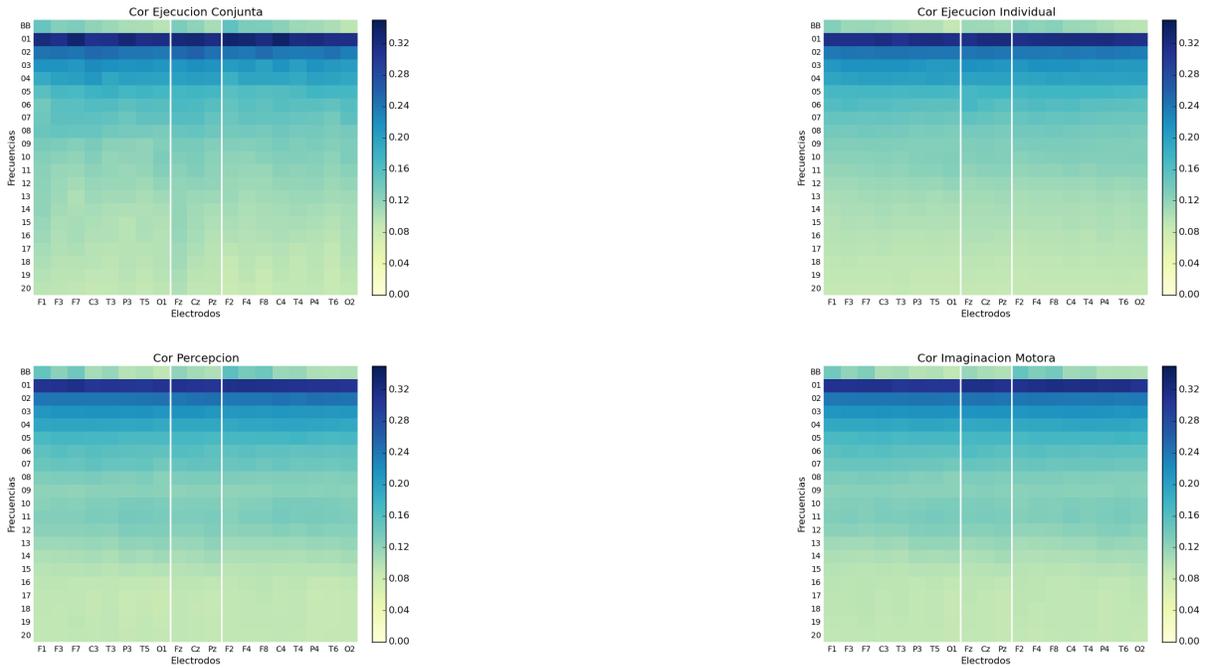


Figura 6.5: Correlación para cada par de electodos homólogos en las diferentes bandas de frecuencia para cada condición con una ventana de análisis de 4 segundos.

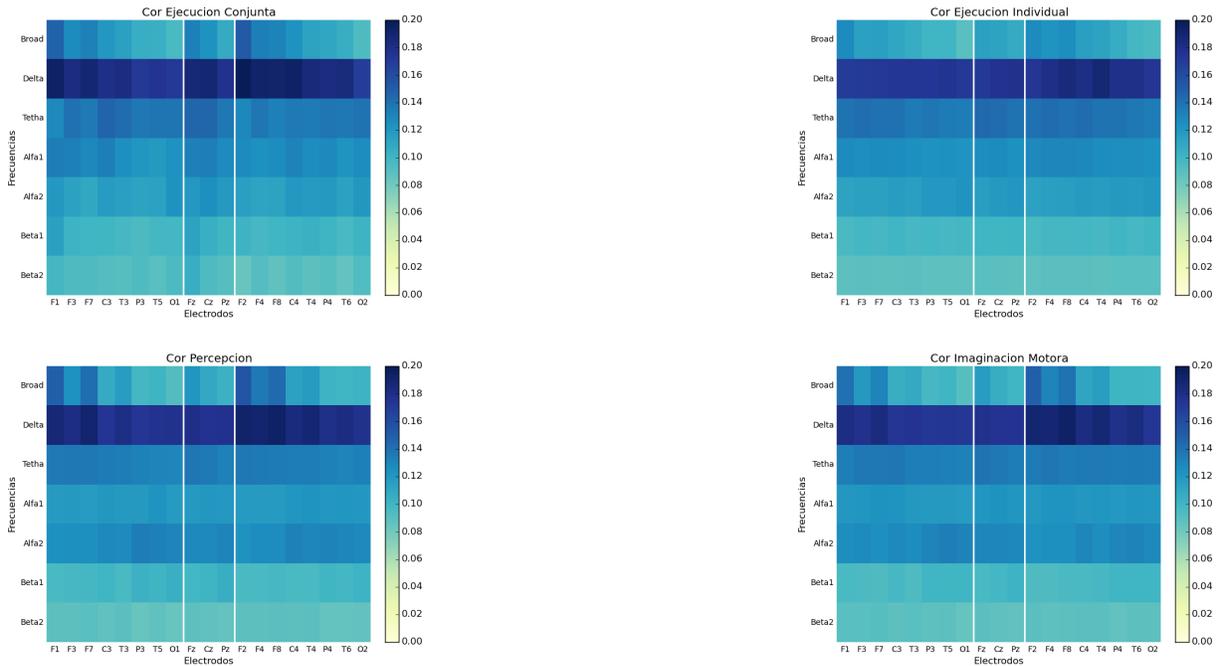


Figura 6.6: Correlación para cada par de electodos homólogos en las bandas de frecuencia tradicionales para cada condición con una ventana de análisis de 4 segundos.

Anexo 4

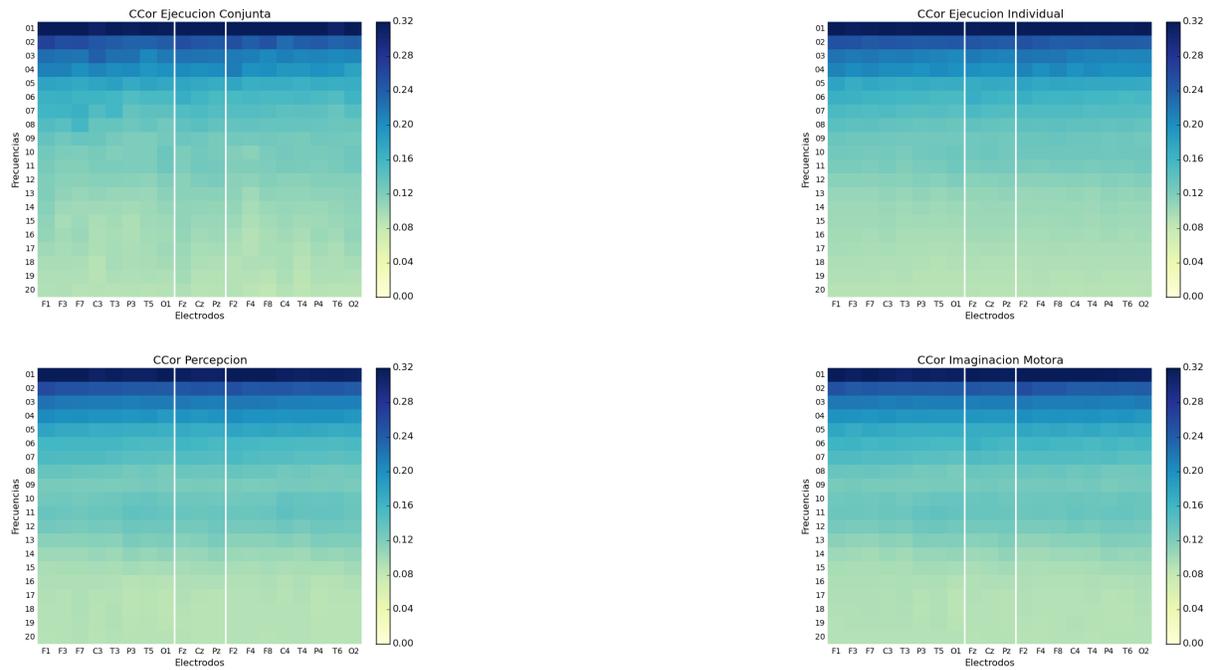


Figura 6.7: Correlación Circular para cada par de electrodos homólogos en las diferentes bandas de frecuencia para cada condición con ventana de análisis de 4 segundos.

Anexo 5

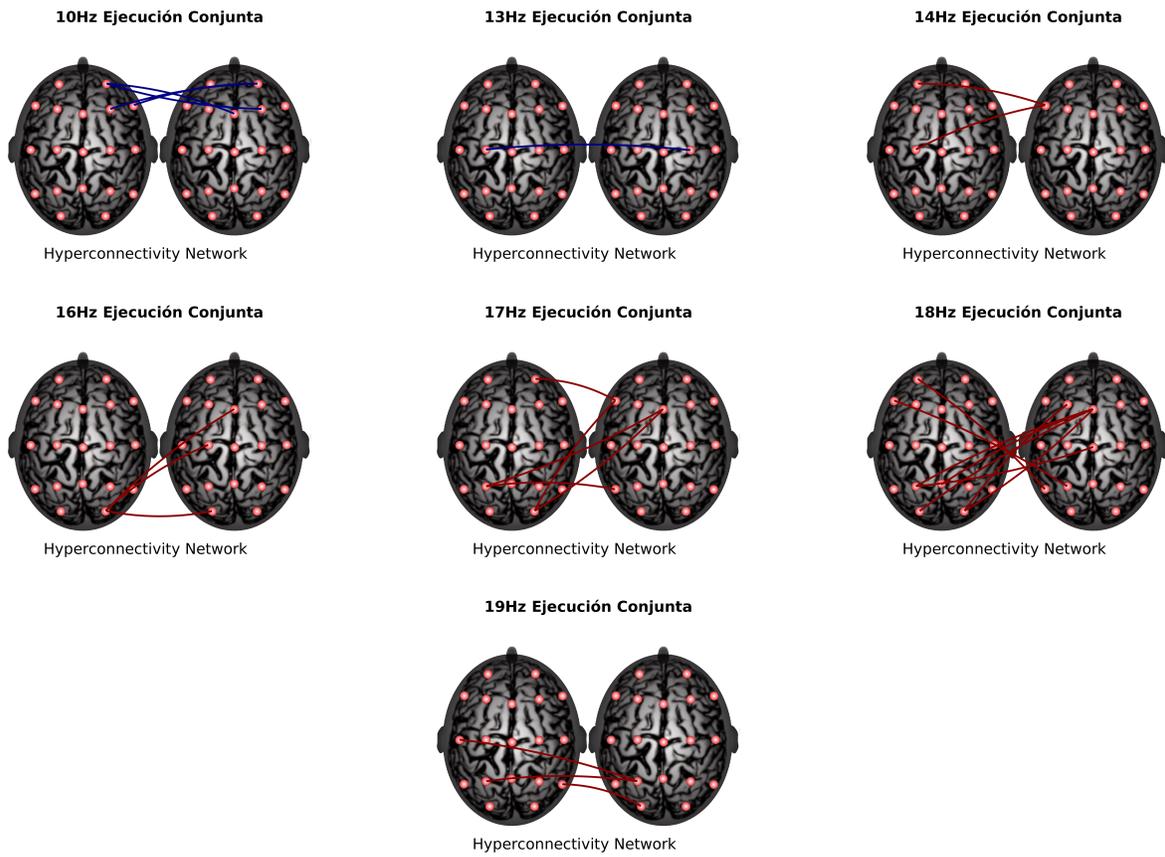


Figura 6.8: Sincronización significativa entre electrodos cruzados estimada con PLV para una ventana de análisis de 4 segundos y un umbral de significancia $p < 0.01$.

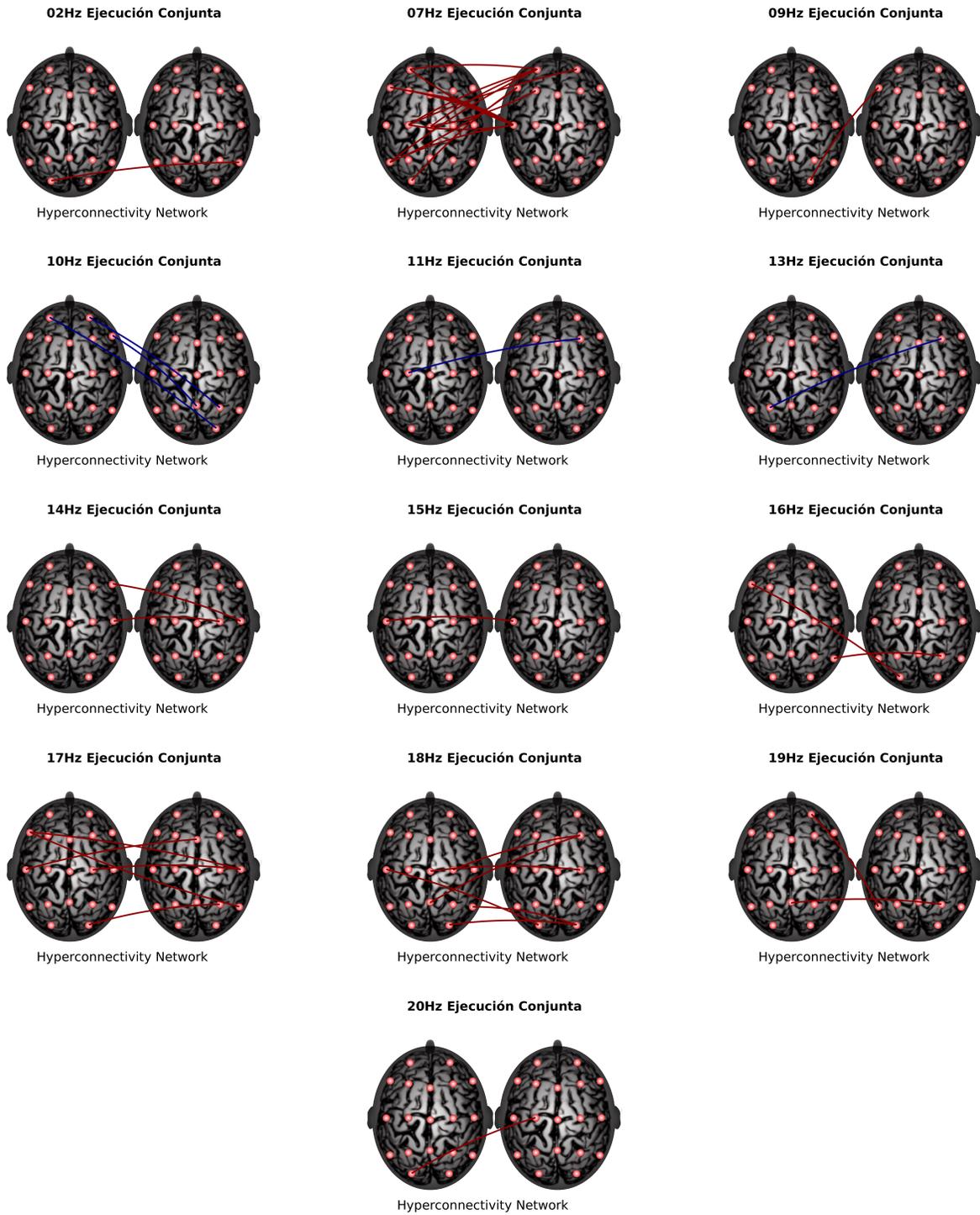


Figura 6.9: Sincronización significativa entre electrodos cruzados estimada con PLV para una ventana de análisis de 8 segundos y un umbral de significancia $p < 0.01$.

Anexo 6

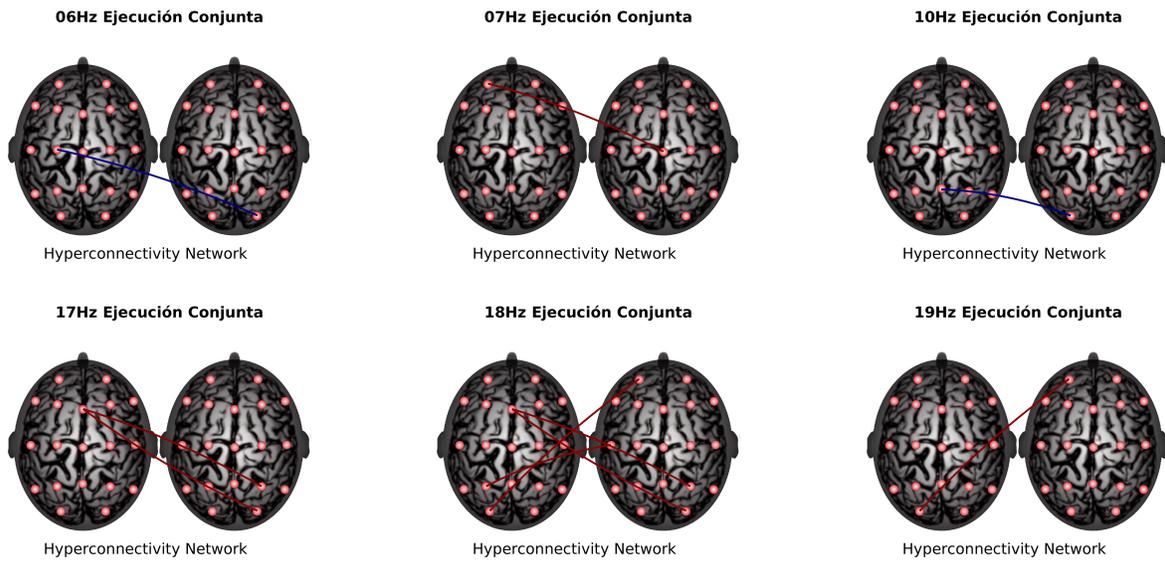


Figura 6.10: Sincronización significativa entre electrodos cruzados estimada con Correlación Circular para una ventana de análisis de 4 segundos y un umbral de significancia $p < 0.01$.

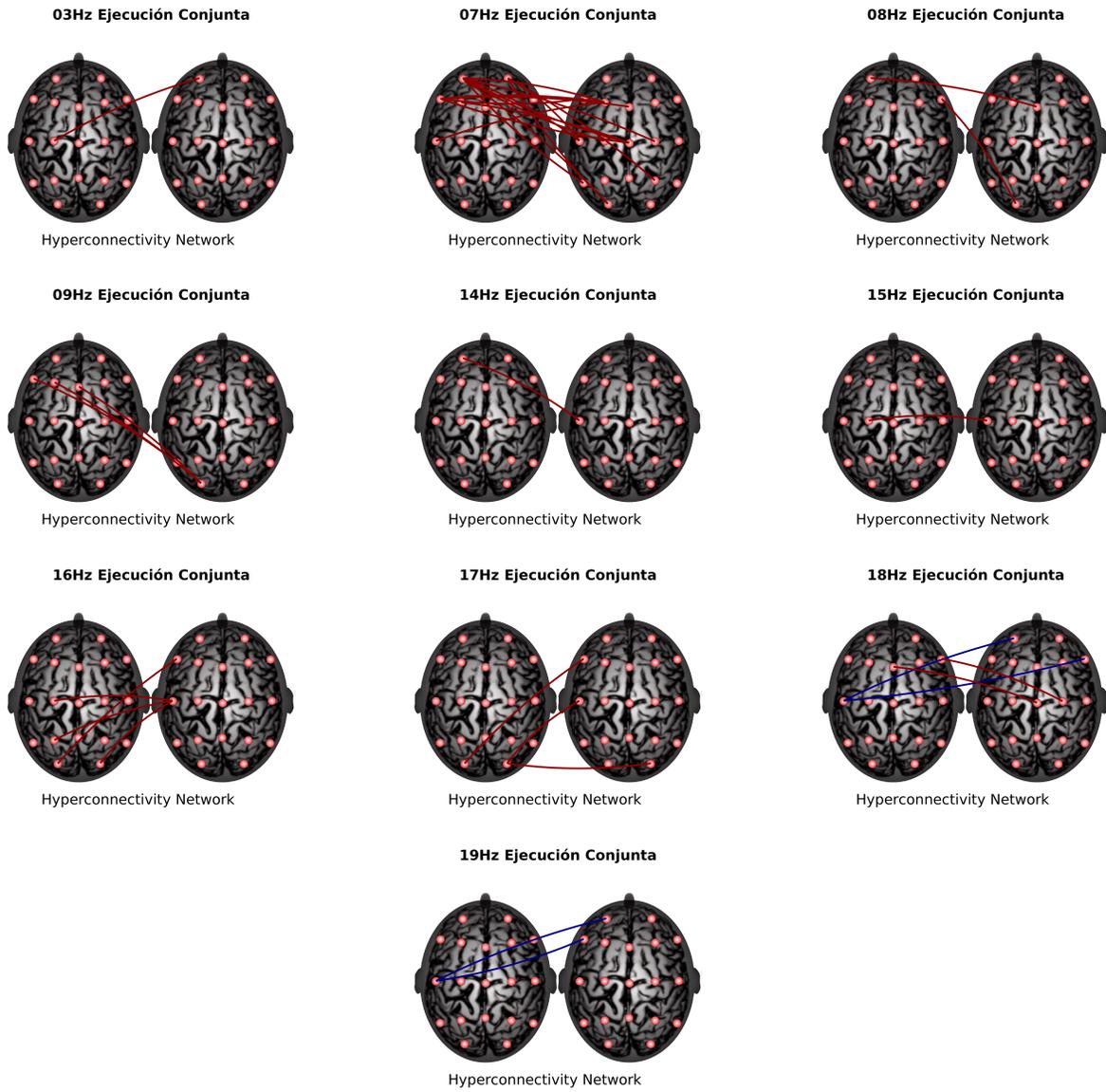


Figura 6.11: Sincronización significativa entre electrodos cruzados estimada con Correlación Circular para una ventana de análisis de 8 segundos y un umbral de significancia $p < 0.01$.

13.05.2019.

Mtra. Angélica Fabiola Sánchez Gutiérrez
Jefa de Programas Educativos
Centro de Investigación en Ciencias Cognitivas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he leído la tesis
“**Acoplamiento de Fase de Señales EEG en Parejas de Guitarristas durante la Interacción Musical**” que presenta el alumno:

Juan Manuel Esquivias Farías

para obtener el grado de Maestro en Ciencias Cognitivas. Considero que dicha tesis está terminada por lo que doy mi **voto aprobatorio** para que se proceda a la defensa de la misma.

Baso mi decisión en lo siguiente:

El trabajo científico realizado por el estudiante Esquivias es enorme. No solamente por la carga de realizar experimentos de hyperscanning que anteriormente no ha conocido, sino también por la exhaustiva revisión de literatura y el cuidadoso análisis de los datos. Cabe mencionar, que dado que él viene del área de psicología, tampoco estaba familiarizado con los algoritmos y técnicas de análisis usados en esta tesis. Sin embargo, el resultado que ha obtenido y la rigidez científica con la cual el estudiante Esquivias elaboro esta tesis es excelente y seguramente funge como un trabajo ejemplo en la Maestría en Ciencias Cognitivas.

Sin más por el momento, quedo de usted

Atentamente



Dr. Markus Franziskus Müller Bender

(26.04.2019).

Mtra. Angélica Fabiola Sánchez Gutiérrez
Jefa de Programas Educativos
Centro de Investigación en Ciencias Cognitivas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he leído la tesis "**Acoplamiento de fase de señales EEG en parejas de guitarristas durante la interacción musical**" que presenta el alumno:

Juan Manuel Esquivias Farías

para obtener el grado de Maestro en Ciencias Cognitivas. Considero que dicha tesis está terminada por lo que doy mi **voto aprobatorio** para que se proceda a la defensa de la misma.

Baso mi decisión en lo siguiente:

Esta tesis es un trabajo académico ejecutado profesionalmente. Es exhaustivo en la revisión de la literatura empírica, teórica y metodológica relevante. El estudiante diseñó y realizó un experimento difícil empleando un método de hiperscaneo con doble-EEG. El análisis se acabó con un alto nivel de atención al detalle. Los resultados aportan una contribución novedosa a la literatura, aunque al final la mayoría de ellos no resultaron ser estadísticamente significativos. Pero incluso este descubrimiento, tal vez inicialmente inesperado, en realidad resulta ser consistente con los desarrollos teóricos recientes en la ciencia cognitiva, que aplican una definición más estricta de la interacción social.

Sin más por el momento, quedo de usted

Atentamente



Dr. Tom Froese

17 de Mayo de 2019.

Mtra. Angélica Fabiola Sánchez Gutiérrez
Jefa de Programas Educativos
Centro de Investigación en Ciencias Cognitivas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he leído la tesis "Acoplamiento de Fase de Señales EEG en Parejas de Guitarristas Durante la Interacción Musical", que presenta el alumno:

Juan Manuel Esquivias Farías

para obtener el grado de Maestro en Ciencias Cognitivas. Considero que dicha tesis está terminada por lo que doy mi **voto aprobatorio** para que se proceda a la defensa de la misma.

Baso mi decisión en lo siguiente:

El trabajo de Juan Manuel Esquivias Farías gira en torno a la necesidad de comparar la interconectividad cerebral durante una tarea musical, separando los efectos de la interacción social de los efectos perceptuales y motores comunes durante una tarea. Luego de hacer un análisis bastante a profundidad sobre el estado del arte en materia de acoplamiento intercerebral, Juan Manuel plantea la necesidad de saber si la interacción social juega un rol causal en este acoplamiento, o si los factores comunes durante una tarea son causantes del acoplamiento cerebral entre individuos, similar pero sin el componente social. La pregunta es relevante ya que en el primer escenario, como él mismo apunta, nos encontraríamos con un caso de sincronización por interacción, mientras que en el segundo caso, la sincronización intercerebral sería un caso de sincronización inducida. Así, existen dos explicaciones alternativas para el mismo fenómeno. Para responder a esta pregunta, Juan Manuel diseña una serie de experimentos control que son una aportación al estado del arte además de contribuir a la discusión de la pertinencia interpretativa, tanto de resultados publicados en otras partes, como de sus propios hallazgos. Por estos motivos considero que el trabajo de Juan Manuel Esquivias Farías es un trabajo de gran calidad que contiene todos los elementos para ser defendido.

Sin más por el momento, quedo de usted

Atentamente


Dr. Jorge Hermosillo Valadez

17 de mayo de 2019

Mtra. Angélica Fabiola Sánchez Gutiérrez
Jefa de Posgrado de la Maestría en Ciencias Cognitivas
Centro de Investigación en Ciencias Cognitivas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he leído la tesis ***ACOPLAMIENTO DE FASE DE SEÑALES EEG EN PAREJAS DE GUITARRISTAS DURANTE LA INTERACCIÓN MUSICAL*** que presenta:

ESQUIVIAS FARÍAS JUAN MANUEL

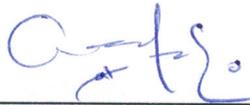
para obtener el grado de Maestro/a en Ciencias Cognitivas. Considero que dicha tesis está terminada por lo que doy mi **voto aprobatorio** para que se proceda a la defensa de la misma.

Bajo mi decisión en lo siguiente:

El trabajo cumple con los requisitos en contenido y forma para su aprobación como trabajo de tesis.

Sin más por el momento, quedo de usted.

Atentamente,



Dr. Alberto Jorge Falcón Albarrán

Cuernavaca Morelos a 15 de Mayo del 2019.

Mtra. Angélica Fabiola Sánchez Gutiérrez
Jefa de Programas Educativos
Centro de Investigación en Ciencias Cognitivas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he leído la tesis "**Acoplamiento de fase de señales EEG en parejas de guitarristas durante la interacción musical**" que presenta el alumno:

Juan Manuel Esquivias Farías

para obtener el grado de Maestro en Ciencias Cognitivas. Considero que dicha tesis está terminada por lo que doy mi **voto aprobatorio** para que se proceda a la defensa de la misma.

Bajo mi decisión en lo siguiente:

El trabajo elaborado por el alumno Esquivias cumple con la calidad científica de una tesis de investigación. El alumno desarrollo un excelente trabajo experimental y numérico, conocimientos que adquirió durante el desarrollo de la tesis, con los que no contaba previamente. Esquivias desarrollo diversas técnicas de análisis para completar un trabajo exhaustivo de investigación, además que tiene una extensa literatura en su tesis. La calidad ofrecida en dicha tesis de investigación es más que excelente para la Maestría en Ciencias Cognitivas.

Sin más por el momento, quedo de usted

Atentamente



M.C Paola Vanessa Olguín Rodríguez