



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

PSICOFÍSICA DE LA REPRODUCCIÓN DE RITMOS COMPLEJOS EN SUJETOS HUMANOS SANOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:
AMEYALTZIN CASTILLO ALMAZÁN

TUTOR PRINCIPAL

DR. HUGO MERCHANT NANCY
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

COMITÉ TUTOR

DR. VÍCTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

DR. MARIO TREVIÑO VILLEGAS
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicado a mi madre quien me enseñó a luchar en la vida

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Al Programa de Maestría en Ciencias (Neurobiología)

Al CONACYT por la beca de Maestría (Becaria No. 963683)

A mi tutor, Dr. Hugo Merchant

A mi comité tutor, Dr. Víctor de Lafuente (INB) y Dr. Mario Treviño (UDG)

Al jurado de examen, Dr. Luis Concha Loyola (INB), Dr. Luis Lemus Sandoval (IFC) y Dr. Enrique Soto Eguibar (BUAP).

Al Ing. Luis Prado Loeza por su asistencia técnica

CONTENIDO

Introducción	1
Antecedentes	3
Justificación	11
Hipótesis	11
Objetivos	12
Material y métodos	12
Resultados	25
Discusión y Conclusiones	41
Bibliografía	46

ÍNDICE

I. Introducción	1
II. Antecedentes	3
A. La información temporal y el ser humano.....	3
1. Percepción y Acción: Procesamiento de la información temporal.....	3
B. Preparar y producir una respuesta motora.....	4
1. Sincronización Sensorial-Motora.....	5
2. Inducción rítmica.....	6
3. Neurofisiología del golpeteo rítmico.....	7
C. ¿Cómo estudiar la extracción de la información temporal?.....	8
1. Psicofísica.....	8
2. Aproximación bayesiana.....	8
III. Justificación	11
IV. Hipótesis	11
V. Objetivos	12
A. Objetivo general.....	12
B. Objetivos particulares.....	12
VI. Material y métodos	12
A. Sujetos.....	12
B. Protocolo experimental.....	13
1. Fase de pre-entrenamiento.....	13
2. Fase de entrenamiento y prueba.....	15
C. Dispositivo experimental.....	19
D. Adquisición y análisis de datos.....	21
1. Variabilidad de golpeteo y exactitud de copiado.....	22
2. Estimación de Densidad de Kernel.....	22
3. Divergencia Jensen Shannon.....	23
E. Análisis estadístico.....	24
VII. Resultados	25
A. Pre-entrenamiento.....	25
1. <i>Tempo</i> Espontáneo y desempeño motor.....	26
2. Familiarización con tarea de sincronización.....	27
B. Entrenamiento.....	33
C. Prueba.....	35
1. Tarea con 2 intervalos.....	35

VIII. Discusión y Conclusiones	41
A. Diferencias entre especies.....	43
B. Conclusión	45
IX. Bibliografía	46

RESUMEN

La información temporal es necesaria en tareas que requieren la sincronización de los movimientos del cuerpo a un ritmo (bailar, hablar, hacer un deporte, etc.). El estudio de la relación entre un estímulo sensorial y la respuesta a éste se ha podido investigar gracias a la psicofísica. Así en tareas de psicofísica de sincronización a estímulos sonoros usando repeticiones múltiples de un ritmo generado a partir de la respuesta del participante, se ha demostrado que los seres humanos muestran un sesgo en la ejecución rítmica hacia ritmos que privilegian razones de enteros pequeños como 1, 2 o 3. Este tipo de enteros pequeños son usuales en la métrica de la música occidental que utiliza ritmos como $1/2$, métrica característica de la marcha, o $1/3$ característica del vals. La ejecución rítmica marcada por estímulos auditivos se encuentra por consecuente sesgada por ritmos endógenos al sujeto. De este modo, el objetivo del estudio desarrollado fue evaluar la existencia de un sesgo hacia ritmos de razones de enteros pequeños al reproducir un ritmo marcado por un metrónomo de dos modalidades diferentes, auditivo y visual, y así reproducir los datos ya encontrados en la literatura de sincronización rítmica y caracterizar la existencia de un sesgo en dos modalidades diferentes utilizando repeticiones múltiples de ritmos originados con la respuesta del sujeto. Los resultados obtenidos muestran que los participantes cuentan con un sesgo similar en ambas modalidades analizadas a pesar de un desempeño más variable ante estímulos visuales.

ABSTRACT

Temporal information is essential for the performance of many motor activities involving complex rhythmic behaviors, such as musical execution, speech, dance and sports. The branch of psychology called psychophysics allows for the study of the relationship between the perception and the response to a stimulus. To decode sensory signals our brain needs to estimate probability distributions that can be used in psychophysics to characterize the mechanism by which motor responses are performed. In this way, a recent psychophysical study has shown that humans have a bias towards probability distributions over external states (priors) of simple rhythms identified by small integer ratios like $1/2$ or $1/3$ which are metrics for march and waltz music, respectively. In the work presented here, we have reproduced data relating to spontaneous and directed synchronization, also iterated reproduction with auditory or visual stimuli were studied. Therefore, we added to the research by testing a visual modality, which we found to be similar, but with higher variability than auditory modality.

I. Introducción

El procesamiento de información temporal es fundamental en los seres vivos para realizar conductas complejas que involucran la ejecución de movimientos rítmicos. El uso de la información temporal permite en efecto planear la secuencia en la que se llevarán a cabo los movimientos [1,2]. En el caso de los seres humanos, claros ejemplos de estas conductas rítmicas son actividades como bailar, tocar un instrumento musical, realizar algún deporte, hablar y, en general, toda actividad que requiera la coordinación rítmica de los movimientos del cuerpo [3, 4, 5]. Para otros animales, la ejecución de movimientos rítmicos resulta útil en la supervivencia por ejemplo, para poder comunicarse con sus congéneres, evaluar la localización de los objetos por la discriminación temporal de señales que reciben y llevar a cabo acciones secuenciales con el objetivo de huir o de atrapar una presa [6, 7, 1]. De esta manera, numerosos comportamientos requieren de la información temporal. Se requiere así de un sistema o mecanismo que permita percibir y procesar la información temporal para poder realizar una acción secuencial. Los animales pueden extraer información temporal de diversas modalidades sensoriales como son la audición, la vista o el tacto y con esta planear y ejecutar diferentes comportamientos [1, 8, 9]. La coordinación de los movimientos de un animal depende entonces de la evaluación perceptual del medio que lo rodea [10] y es de gran relevancia determinar las características del mecanismo que interviene en la ejecución de acciones motoras rítmicas.

La sincronización sensorial-motora es un ejemplo de conducta rítmica compleja que muestra el vínculo entre percepción y acción [11, 12]. El vínculo entre un sistema sensorial y el sistema motor es fundamental para la percepción de eventos regulares en el tiempo y la ejecución de conductas sincronizadas con dichos eventos [13]. Una acción motora rítmica usual en los seres humanos es el baile. Para poder realizar esta acción es necesario que los seres humanos perciban la estructura métrica de la secuencia rítmica y sean capaces de extraer el pulso que permitirá guiar los movimientos [12, 14, 15]. La percepción del pulso presente en la secuencia rítmica permite a los seres humanos ser inducidos rítmicamente y coordinar entonces sus movimientos aún en ausencia del estímulo [14].

El estudio de la capacidad de los seres humanos y otros animales para sincronizar su conducta con eventos rítmicos se ha realizado con tareas de psicofísica [10, 16, 11]. La psicofísica es una rama de la psicología que se encarga de estudiar la relación existente entre un estímulo sensorial y la respuesta a éste. De esta manera, el procesamiento de información temporal puede ser examinado a partir de tareas psicofísicas en las que se requiere sincronizarse a un ritmo, como es el caso en una tarea de golpeteo rítmico (*tapping* en inglés). En las tareas de golpeteo rítmico se solicita al participante sincronizar un movimiento simple, una palmada por ejemplo, a una secuencia de estímulos (ritmo). Este tipo de tareas permiten mostrar cómo los sujetos valoran un estímulo y analizar la capacidad de los sujetos para percibir la información temporal contenida en un ritmo [10, 17]. El análisis de la reproducción de ritmos en distintas modalidades resulta por consecuencia de importancia para el estudio de la utilización de la información temporal durante la ejecución de tareas rítmicas complejas. Además, este tipo de tareas han mostrado cómo las conductas asociadas a la percepción de estímulos son guiadas por los conocimientos inherentes al sujeto [19, 17, 18]. En efecto, la interacción entre la información sensorial adquirida previamente y la información sensorial nueva puede encontrarse al origen del comportamiento motor adoptado ante una circunstancia [20, 21]. Los individuos realizan de este modo estimaciones sobre el mundo. Dichas estimaciones se encuentran sesgadas hacia conocimientos previos o bien hacia conocimientos intrínsecos del sujeto [22, 17, 18].

En este contexto, se busca caracterizar dentro de este proyecto de maestría la existencia o no de un sesgo en la reproducción rítmica de los seres humanos hacia ritmos de métrica simple, siendo estos ritmos marcados en dos modalidades sensoriales diferentes, auditiva y visual.

II. Antecedentes

A. La información temporal y el ser humano

1. Percepción y Acción: Procesamiento de la información temporal

Los seres humanos son capaces de reconocer y reproducir señales rítmicas con el objetivo de realizar comportamientos que requieren de la sincronización de las diferentes partes del cuerpo, ejemplo de estas acciones son bailar, hablar o tocar un instrumento musical [4, 11, 23]. Este tipo de comportamientos requiere la extracción de la información temporal a partir de los estímulos que se perciben. Así la percepción del 'beat' o pulso es una capacidad cognitiva que favorece identificar el intervalo temporal que existe dentro de una serie de pulsos o ritmo y con esto facilitar la acción a realizar, es decir que el procesamiento de los intervalos temporales entre dos eventos confiere habilidades cognitivas para realizar acciones motoras adecuadas a fin de sincronizarse a los estímulos percibidos [23, 24].

Se ha propuesto que existen dos mecanismos en la percepción temporal. Por una parte, encontramos un sistema denominado *Tiempo automático de los intervalos* relacionado con la temporalidad de los movimientos y por otra, un sistema de *Tiempo controlado cognitivamente de intervalos más largos* el que se encuentra más implicado con procesos atencionales y procesos de discriminación de intervalos temporales [23]. De esta manera la percepción del tiempo se realiza gracias a mecanismos de identificación de los **pulsos** que marcan los intervalos (tiempo relativo basado en el pulso - *beat-based timing* -) o bien a mecanismos que estiman la **duración** del intervalo (tiempo absoluto basado en el intervalo - *duration-based timing* -) [25, 15, 8] (Figura 1).

La percepción temporal posibilita a través de estos medios preparar y producir la respuesta motora adecuada, ya sea un patrón rítmico que seguir o planificar una acción específica (cambio de objetivo o de la atención prestada a un evento) [26, 27], lo que muestra que la percepción de la información temporal y la acción resultante están altamente ligadas. Claro ejemplo de este lazo entre percepción y acción lo podemos encontrar cuando se escucha y reproducen ritmos musicales,

este tipo de actividad estimula regiones cerebrales asociadas con funciones motoras [25, 28, 27]. Adicionalmente a este hecho es importante señalar que los movimientos generados al seguir un estímulo permiten acceder por inferencia al estudio de cómo el cerebro estaría procesando la información temporal [5].

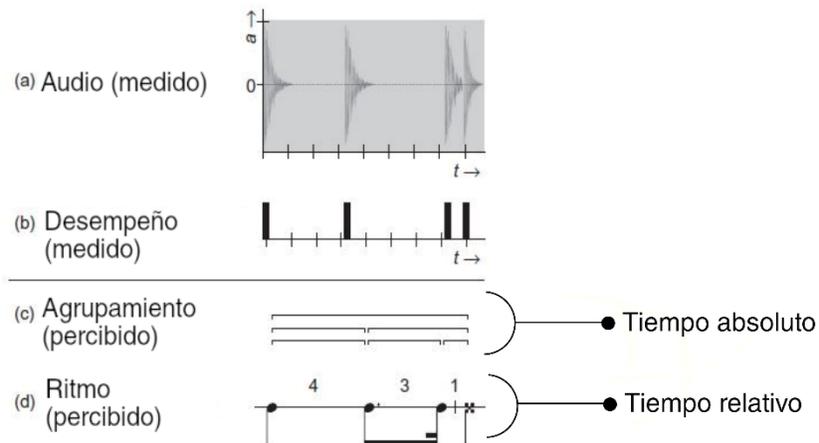


Figura 1. **Ejemplo ilustrativo de los dos mecanismos de percepción temporal en una señal sonora.** Se muestran los componentes que se pueden medir y los que son percibidos. (a) Señal de audio que se puede medir, a : amplitud, t : tiempo. (b) Desempeño del sujeto ante un sonido, t : tiempo. (c) Intervalos que pueden ser percibidos por el sujeto, ejemplo del mecanismo de Tiempo absoluto. (d) Cada una de las notas en un ritmo equivalen a un pulso, ejemplo de Tiempo relativo. Modificado de Honing 2013, *Structure and Interpretation of Rhythm in Music*.

B. Preparar y producir una respuesta motora

La música, el lenguaje y la danza son comportamientos que dependen de circuitos intrincados de percepción y acción dentro de los cuales la información temporal se puede encontrar implicada durante la sincronización del movimiento al ser extraída a partir del estímulo o bien en la generación de un patrón secuencial de movimiento [1]. Los seres humanos son de esta forma capaces de seguir un ritmo aun si el estímulo que lo marca se encuentra ausente y en ese caso involucrar a diferentes áreas motoras del cerebro [23, 26, 15, 8].

1. Sincronización Sensorial-Motora

Como se ha mencionado los seres humanos son capaces de reconocer y reproducir señales rítmicas y por tanto se puede hablar de un acoplamiento entre un sistema sensorial y el sistema motor, es decir entre la percepción y la acción, a este tipo de fenómeno se le conoce como Sincronización Sensorial-Motora (SMS por sus siglas en inglés) [11]. Cuando una acción se coordina temporalmente con un evento externo podemos hablar de un comportamiento referencial [29], por consiguiente el comportamiento rítmico humano es una forma de comportamiento referencial en el que se pone en evidencia la coordinación rítmica de los movimientos con respecto a un referente externo (el estímulo percibido) [11, 23].

El referente externo al que los humanos suelen coordinarse con mayor facilidad son los estímulos auditivos [16, 31, 30], así en el estudio, por métodos de imagen, de la capacidad de los seres humanos para sincronizarse rítmicamente a un estímulo musical se ha visto en efecto el acoplamiento entre el sistema auditivo y el sistema motor [4, 32, 28]. Sin embargo, actividades no auditivas que implican seguir el movimiento como al atrapar una pelota, requieren también de la coordinación temporal entre la acción y el sistema visual [33, 30]. El procesamiento de la información temporal en una tarea de sincronización puede por consiguiente implicar el acoplamiento con otros sistemas sensoriales como el sistema del tacto o el sistema visual [1, 34], así diferentes estudios han demostrado también la capacidad de los seres humanos para sincronizarse con estímulos visuales [16, 31, 35].

La SMS muestra características esenciales para poder ser llevada a cabo, estas características posibilitan su uso como herramienta en el estudio del procesamiento de la información temporal; este mecanismo requiere de los siguientes componentes: la extracción del 'beat' o pulso regular contenido dentro del ritmo percibido por los sentidos, la generación de un patrón motor y el acoplamiento entre la propia respuesta motora y el beat inferido [15, 36].

El acoplamiento entre la acción y la percepción permite adoptar comportamientos rítmicos adecuados que pueden ser estudiados en el laboratorio, la SMS resulta en

consecuencia de gran utilidad en el análisis de comportamientos que implican la coordinación temporal entre sistemas.

2. Inducción rítmica

La sincronización sensorial-motora como hemos visto requiere de la extracción del beat, esta acción requiere de inferir el pulso dentro del ritmo gracias a las repeticiones múltiples del mismo, esta inferencia permite sincronizar, es decir, alinear las acciones motoras correspondientes con el pulso extraído [14, 36]. A este hecho se le conoce en el contexto del estudio del comportamiento humano y de la fisiología como **inducción** (*entrainment* en inglés). La inducción en el contexto de las neurociencias refiere más precisamente al hecho de una función adaptativa que permite sincronizar, voluntaria o involuntariamente, nuestro cerebro y nuestro cuerpo a eventos periódicos presentes en el medio que nos rodea [13]. La inducción rítmica es una habilidad cognitiva común entre los seres humanos que ocurre espontáneamente [14, 12, 28]. Este tipo de habilidad se puede identificar fácilmente en circunstancias de convivencia social como por ejemplo en un grupo de música o de baile [23, 36].

Una de las ventajas de la inducción rítmica en el comportamiento es la posibilidad de automatizar los movimientos o las respuestas necesarias [13]. Para poder automatizar la respuesta, el sujeto debe ser capaz de extraer el beat presente en la secuencia. La percepción del beat es un proceso predictivo que juega un rol importante en los procesos de sincronización, ya que favorece las predicciones temporales acerca de la llegada del próximo evento sensorial y propician por consiguiente una coordinación correcta y precisa de los movimientos del cuerpo con los eventos rítmicos a lo largo del tiempo [26, 37, 38, 39] (Figura 2).

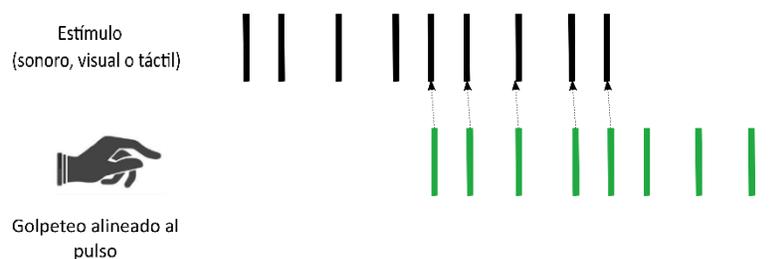


Figura 2. **Figura ilustrativa de la inducción rítmica.** Normalmente los sujetos logran alinear sus golpeteos después de haber percibido algunos estímulos y pueden continuar con el ritmo sin necesidad de estar presente.

3. Neurofisiología del golpeteo rítmico

Producir activamente un patrón temporal durante la inducción rítmica activa áreas cerebrales comúnmente relacionadas con las funciones motoras, de esta manera estudios electrofisiológicos y de imagen han mostrado consistentemente que áreas como la corteza premotora, el área motora suplementaria, los ganglios basales o el cerebelo se encuentran ligadas con tareas que requieren del procesamiento de información temporal [61, 28, 27].

Estudios de imagen han mostrado por ejemplo que los ganglios basales se encuentran más activos durante la percepción de ritmos inducidos por un beat [28] o bien en estimaciones aberrantes del tiempo en personas con enfermedades motoras como la enfermedad de Parkinson, de Huntington o Tourette [62, 27]. Por su parte estudios electrofisiológicos han demostrado que la corteza premotora medial (MPC por sus siglas en inglés, esta área cerebral comprende el área premotora, así como el área motora suplementaria), presenta neuronas que se encuentran implicadas en varios aspectos del procesamiento de información temporal como la organización secuencial de los movimientos o en la producción de intervalos [63].

Más precisamente, en nuestro laboratorio se ha demostrado una modulación de la tasa de disparo de las neuronas de la MPC en función de la duración de los intervalos producidos en una tarea de sincronización a metrónomos de modalidades distintas [63, 64]. Además en estos estudios también se ha encontrado que la tasa de disparo de un gran número de neuronas de esta región, la MPC, se encuentra modulada por la estructura secuencial y temporal de la tarea de sincronización utilizada. De esta forma se propone la modulación de las neuronas de la MPC como un mecanismo de codificación de los intervalos temporales en esta región.

Es importante señalar igualmente que el procesamiento de información temporal depende de la interacción entre estructuras que participan en diferentes circuitos cerebrales relacionados con los procesos sensorimotrices [61]. El grado de conectividad entre las diferentes áreas se encuentra modulado por los elementos

rítmicos de los estímulos percibidos (duración del intervalo, intensidad, presencia de pausas...) [28]. De esta manera las diferentes áreas del cerebro no actúan aisladamente durante el procesamiento de la información temporal, sino más bien en conjunto para formar redes especializadas que necesitan ser exploradas con más detalle.

C. ¿Cómo estudiar la extracción de la información temporal?

1. Psicofísica

El estudio de la sincronización y de la reproducción de ritmos se realiza usualmente gracias a tareas psicofísicas. La tarea comúnmente utilizada para evaluar el procesamiento de información temporal en la SMS son las tareas de golpeteo rítmico (*tapping* en inglés) [11, 23, 40]. Diversos experimentos psicofísicos muestran que los seres humanos muestran una mayor capacidad para extraer información temporal a partir de ritmos auditivos que de ritmos visuales, y se ha demostrado entonces que los seres humanos logran sincronizarse a un metrónomo auditivo con mayor precisión que a un metrónomo visual [16, 3, 11, 31].

2. Aproximación bayesiana

En 1984 Fraisse [41] se preguntó en qué medida la percepción del tiempo depende de las condiciones en las que esta se realiza o de las expectativas que tiene el sujeto. La percepción se realiza efectivamente dentro de un medio lleno de ruido [20, 22], es decir en un medio en donde múltiples estímulos pueden también intervenir además del estímulo de interés. Para minimizar la incertidumbre, el cerebro necesita entonces utilizar toda la información que dispone a su alrededor, partiendo de esta afirmación podemos decir que el cerebro combina la información sensorial que recibe con las convicciones internas o primarias del sujeto [4, 10, 22, 19] para poder realizar la acción que se adapta mejor a la situación. Una manera de

ver este proceso es pensar en las estimaciones que efectúa el cerebro para determinar la acción más ventajosa [20, 22].

Se necesita estimar efectivamente las variables más relevantes para el comportamiento a adoptar, así las convicciones internas (conocimiento previo de un sujeto sobre su medio) tienen una distribución de probabilidad ponderada por una probabilidad previa o *a priori* [22] lo que permite al sujeto tener de antemano una estimación sobre el mundo. Estas estimaciones determinan las posibilidades de acción del sujeto. Al considerar entonces las distribuciones de probabilidad *a priori*¹ y de la probabilidad de la información nueva, se pueden explicar los resultados de las pruebas psicofísicas con ayuda de modelos matemáticos, a este tipo de modelos se les conoce por el nombre de modelos Bayesianos de percepción [42, 22].

Los modelos Bayesianos de percepción permiten realizar cálculos sobre la probabilidad de respuesta de un sujeto tomando en cuenta y combinando el conocimiento previo y la evidencia nueva. El conocimiento previo tiene una cierta probabilidad dentro de una distribución de probabilidad *a priori* y es esta distribución la que constituye una estrategia del cerebro para integrar e interpretar múltiples señales sensoriales sobre los objetos del mundo y poder hacer entonces inferencias sobre lo que se percibe [42, 20, 22] (Figura 3).

En la música occidental existe una tendencia a usar pulsos casi isócronos organizados de acuerdo con una jerarquía métrica que se basa en múltiplos de dos o tres pulsos para construir los patrones musicales, ejemplo de esto son ritmos como la marcha o el vals los que tienen una métrica de 1/2 y 1/3 respectivamente [3, 15, 43]. El estudio reciente en seres humanos del procesamiento de información temporal cuando realizan un comportamiento rítmico ha mostrado la presencia de un sesgo en la ejecución rítmica hacia ritmos que privilegian razones de enteros pequeños (1:1, 1:2 o 1:3) [17], ritmos que serán denominados a continuación ritmos de proporciones simples. Estos ritmos tienen una alta probabilidad en una distribución *a priori* cuando la ejecución de los movimientos es guiada por una secuencia de estímulos auditivos [17]. De este modo la ejecución rítmica se

¹ En inglés la distribución de probabilidad *a priori* recibe el nombre de *prior*.

encuentra sesgada por ritmos de proporciones simples que se comportan según una distribución de probabilidad a priori. Este hecho permite a los sujetos hacer inferencias perceptuales sobre el contexto auditivo [42, 12, 17].

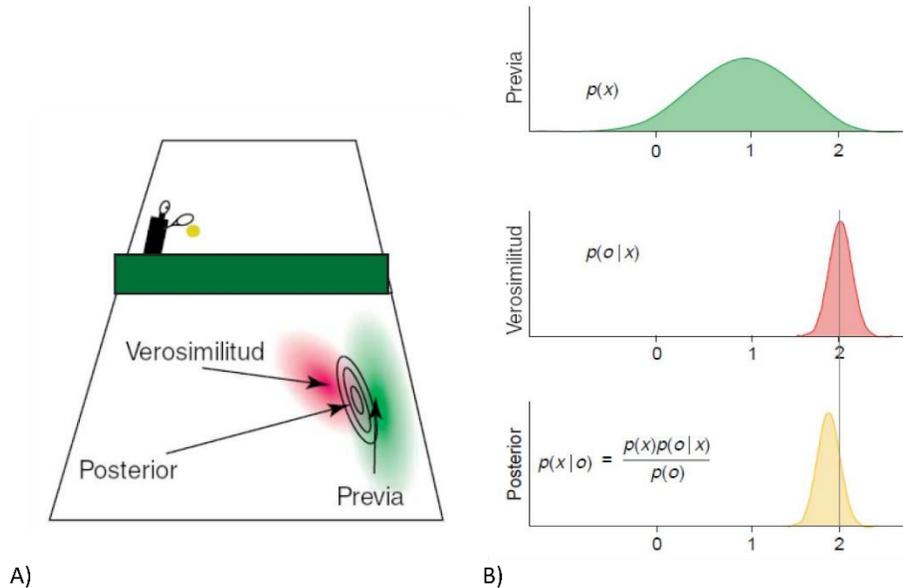


Figura 3. **Ejemplo de integración bayesiana.** En un juego de tenis A) el contrincante golpea la pelota. Al ver la pelota podemos estimar en donde podría caer (región roja). Además tenemos conocimiento previo de donde puede caer la pelota (región verde). Las elipses negras marcan las predicciones que podemos hacer sobre donde puede caer la pelota como observador bayesiano. B) Integración bayesiana. La curva verde representa la distribución a priori del observador y la curva roja la distribución de verosimilitud, es decir el conjunto de observaciones realizadas. La curva amarilla representa la distribución posterior resultante de la combinación de la previa con la verosimilitud. Modificado de Kording 2006, *Bayesian decision theory in sensorimotor control*.

Adicionalmente, estudios neurofisiológicos han propuesto un substrato neuronal que podría estar implicado en la preferencia de intervalos. Las neuronas de la corteza premotora medial presentan una tasa de disparo modulada por la duración del intervalo a reproducir en una tarea de sincronización; existen también neuronas que muestran perfiles de actividad modulados por un intervalo preferente a estas neuronas [64]. En consecuencia, se puede pensar en la existencia de un mecanismo para representar el tiempo basado en una modulación de actividad neuronal.

Una aproximación bayesiana resulta entonces de gran interés en el estudio del procesamiento de información temporal para conocer de este modo cómo las distribuciones probabilísticas e inferencias se encuentran ligadas al procesamiento de información temporal [44, 45].

III. Justificación

Los humanos tienen la capacidad de sincronizarse más fácilmente a pulsos dados con un metrónomo auditivo que con uno visual [3, 31] y existe un sesgo hacia ritmos de proporciones simples en la modalidad auditiva [17]. Actualmente, hay pocos estudios sobre las características de los ritmos intrínsecos a un sujeto implicados en la ejecución de movimientos rítmicos. Estas características resultan de gran utilidad para comprender mejor el funcionamiento de la ejecución rítmica y la percepción del tiempo. Con el fin de obtener más datos acerca de las características de esos ritmos endógenos, el estudio del sesgo en la reproducción rítmica en modalidades diferentes a la auditiva permitirá esclarecer si el sesgo a ritmos de proporciones simples es único de la modalidad auditiva o bien si puede ser encontrado en otro tipo de modalidades como la modalidad visual. Por otro lado, este tipo de estudio permitirá caracterizar los mecanismos que se encuentran detrás de la capacidad de sincronización de los seres humanos los cuales no se comprenden del todo todavía. El estudio de la influencia de ritmos de proporciones simples en la ejecución rítmica resulta en consecuencia de interés para tener conocimientos sobre la evolución de la capacidad de sincronización en los primates y validar modelos animales en los que se pueda estudiar la neurofisiología de los ritmos complejos más tarde.

IV. Hipótesis

Hasta aquí, la evidencia presentada sugiere que:

- Los humanos no mostrarán un sesgo hacia ritmos de proporciones simples en la modalidad visual con respecto a la modalidad auditiva.

V. Objetivos

A. Objetivo general

Determinar si los seres humanos presentan un sesgo hacia ritmos de proporciones simples cuando ejecutan movimientos guiados por ritmos relativamente sencillos formados por intervalos no isócronos y presentados con un metrónomo visual.

B. Objetivos particulares

1. Medir el desempeño de los sujetos humanos en una tarea psicofísica de sincronización rítmica a estímulos auditivos y visuales.
2. Caracterizar, mediante probabilidad bayesiana, las distribuciones *a priori* de dos modalidades sensoriales.

VI. Material y métodos

Sujetos humanos fueron entrenados y probados en una tarea de sincronización a secuencias rítmicas no isócronas auditivas y en una tarea de sincronización a secuencias rítmicas no isócronas visuales. En la tarea auditiva, los estímulos fueron presentados mediante audífonos, en la tarea visual, los estímulos fueron presentados mediante un diodo emisor de luz (LED por sus siglas en inglés).

A. Sujetos

En este proyecto de maestría, 31 individuos del Instituto de Neurobiología de entre 18 a 45 años participaron, hombres (n=12) y mujeres (n=19). Los participantes fueron una mezcla de personas con o sin experiencia musical, 80% de los participantes tuvieron menos de 4 años de práctica musical y además tienen las siguientes características:

-Diestros

-Habla hispana

-Sin patología auditiva o visual

-Sin entrenamiento prolongado con anterioridad en tareas rítmicas.

B. Protocolo experimental

La tarea se compone de 2 modalidades, una **auditiva** y una **visual**. Se realizaron dos sesiones de trabajo, una para ritmos de 2 intervalos y otra para ritmos de 3 intervalos. Se utilizaron ritmos de 2 y 3 intervalos, pues se considera la posibilidad de adaptar este tipo de experimento en monos Rhesus más tarde y se debe entonces saber qué configuración aporta más información sobre el sesgo intrínseco del sujeto. El ritmo de la primera sesión se escogió aleatoriamente.

Cada modalidad consta de 3 diferentes partes que se realizan de manera seriada. Primero hay una **fase de pre-entrenamiento** (Figura 4A), posteriormente se realiza una **fase de entrenamiento** (Figura 4B) para finalmente realizar la **fase de prueba** (Figura 4C). En la segunda sesión, sólo la fase de entrenamiento y prueba se realizaron (Figura 4D y E). En una misma sesión, se realizó la prueba para ambas modalidades, visual y auditiva, con una pausa de 10 min entre modalidades.

Los participantes se sentaron frente al dispositivo experimental, a una distancia de 56cm apoyando su cabeza sobre un soporte de barbilla.

1. Fase de pre-entrenamiento.

El pre-entrenamiento tiene por objetivo determinar el *tempo* espontáneo del participante y probar su desempeño motor además de familiarizar al sujeto con el experimento y el tipo de estímulos a los que se verá confrontado. De esta forma, esta etapa del protocolo se encuentra compuesto por:

- 1) **Golpeteo rítmico libre.** Golpeteo a un ritmo libre seguido de golpeteo libre a mayor velocidad. Esta parte busca identificar el *tempo* espontáneo de los sujetos para más tarde comparar los resultados obtenidos a la literatura existente en este tema.
- 2) Presentación del tipo de estímulo que el participante encontrará a lo largo de todo el experimento (pulsos auditivos o visuales) con el fin de familiarizar al sujeto con los pulsos a los que deberá sincronizarse.

- 3) **Sincronización isócrona.** Esta etapa del pre-entrenamiento busca familiarizar a los sujetos con dos tipos de intervalos rítmicos diferentes, uno lento y uno rápido, con el objetivo de que los participantes tengan una práctica inicial de sincronización con intervalos de diferente duración.
- a. ~60 segundos de sincronización isócrona con intervalos fijos de **800ms** (entrenamiento lento, *slow training*).
 - b. ~60 segundos de sincronización isócrona con intervalos fijos de **600ms** (entrenamiento rápido, *fast training*).
 - c. Repetición del punto a. y b.
- 4) **Tempo Cambiante.** La meta principal de esta parte del pre-entrenamiento es hacer consciente al individuo de que los intervalos pueden ser de diferente duración en un mismo ritmo, y familiarizarlos de este modo a ritmos no isócronos. De esta forma durante alrededor de 60 segundos los participantes deben sincronizarse a dos tipos de intervalos, **546ms** y **654ms**. Estos intervalos se alternan en series de diferente número de intervalos a lo largo de toda esta tarea de *tempo* cambiante. A esta parte también le denominamos fase de sincronización con perturbaciones.

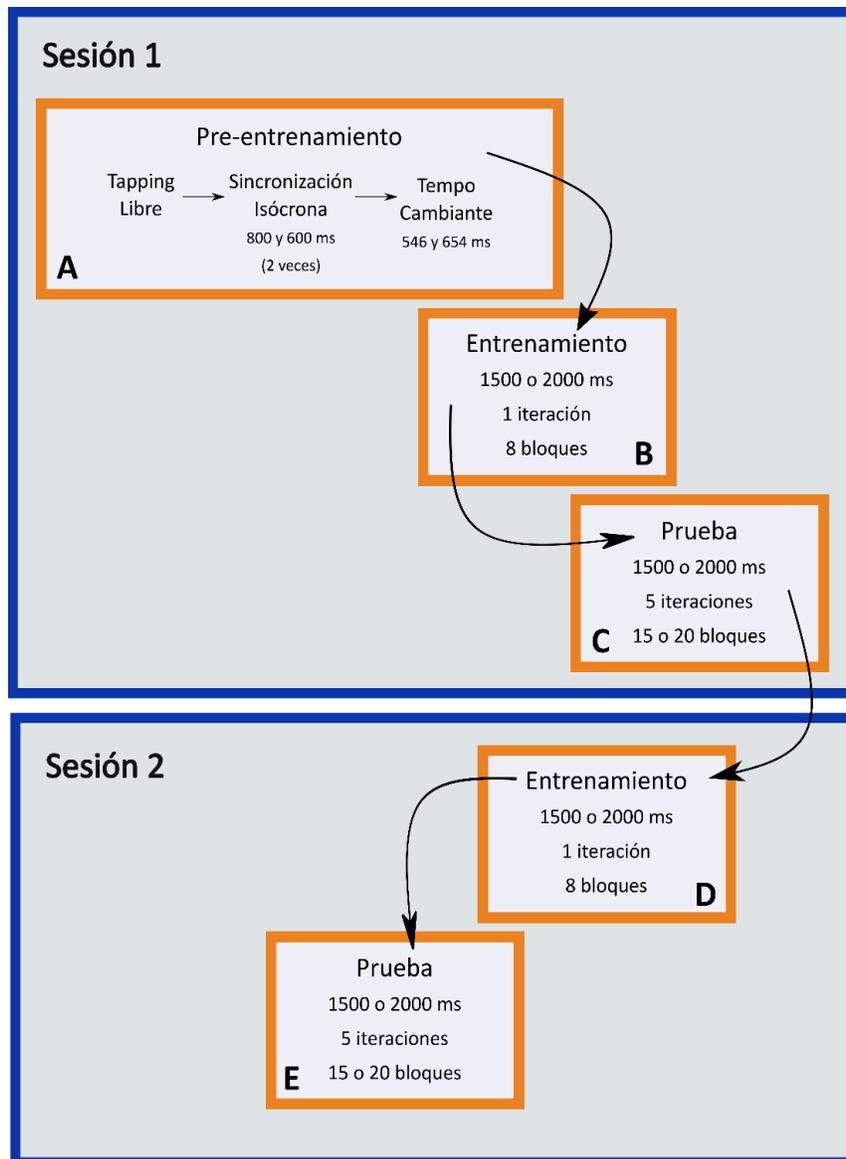


Figura 4. **Diagrama del protocolo utilizado.** El protocolo consta de dos sesiones. En la sesión 1 hay 3 fases distintas: **A** Pre-entrenamiento, **B** Entrenamiento y **C** Prueba. En la sesión 2 sólo se realiza el entrenamiento **D** y la prueba **E**. Dos sesiones son necesarias para evaluar en cada sesión diferentes ritmos (ritmo de 2 intervalos - 1500 ms - o ritmo de 3 intervalos - 2000 ms -).

2. Fase de entrenamiento y prueba

En una primera etapa se realizó el entrenamiento gracias al cual los participantes se familiarizaron con la estructura de la tarea y de los ritmos que se podrían presentar posteriormente en el desarrollo de la fase de prueba.

En la fase de prueba se presentó inicialmente un ritmo semilla al azar al que se sincronizó el sujeto. La respuesta del sujeto permitió generar un ritmo nuevo para

las fases siguientes de sincronización repetida y con esto mostrar la o las distribuciones preferentes del individuo.

Cada una de las dos fases realizadas se encuentra compuesta por las siguientes secciones:

1 Bloque

1.1.1 Iteración² (Repetición ritmo semilla)

1.1.1.1 Ritmo semilla

El entrenamiento se encuentra compuesto por 8 bloques. Cada bloque se compone de 1 iteración. La iteración del entrenamiento consta de 5 repeticiones del ritmo semilla. El ritmo semilla puede ser de 2 o 3 intervalos inter-estímulo (ISI por sus siglas en inglés).

En el caso de la prueba hay 15 o 20 bloques. Cada bloque se compone de 5 iteraciones. La iteración de la prueba presenta 5 repeticiones del ritmo semilla. El ritmo semilla puede ser también de 2 o 3 ISI (Figura 5).

En cada bloque, la tarea de los sujetos es golpear con la palma de la mano una superficie de esponja en sincronía con los estímulos, i.e. pulsos del ritmo.

La fase de entrenamiento y prueba presentan ritmos no isócronos, también llamados complejos, ya que se utilizan en este protocolo ritmos de intervalos diferentes. La primera repetición del ritmo no isócrono recibe el nombre de ritmo semilla. La

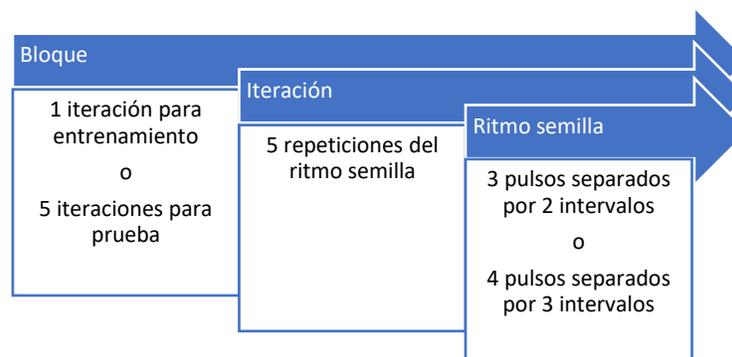


Figura 5. **Esquema de la organización particular del entrenamiento y la prueba.** Cada ritmo semilla se compone de 3 o 4 pulsos consecutivos separados por 2 o 3 intervalos (ISI), el ritmo semilla dura un total de 1500 o 2000 ms. El ritmo semilla se repite 5 veces para formar una iteración. El conjunto de iteraciones forma un bloque.

² Iteración: Conjunto de repeticiones de un ritmo.

duración total de cada ritmo semilla es siempre de 1500ms para la tarea con dos ISI y de 2000ms para la tarea con tres ISI. El primer ISI del ritmo semilla es elegido aleatoriamente y su duración es mayor al 15% de la duración total del ritmo para evitar presentar ritmos con intervalos demasiado cortos para ser reproducidos, así el primer intervalo del ritmo tiene una duración mayor a 225ms o 300ms según el número de ISI elegidos para el ritmo semilla.

a) Fase de entrenamiento

La fase de entrenamiento consiste en llevar a cabo 8 bloques de 1 iteración (Figura 6). Al inicio de cada bloque se presenta un ritmo semilla diferente, generado de manera aleatoria y el que se repite 5 veces.

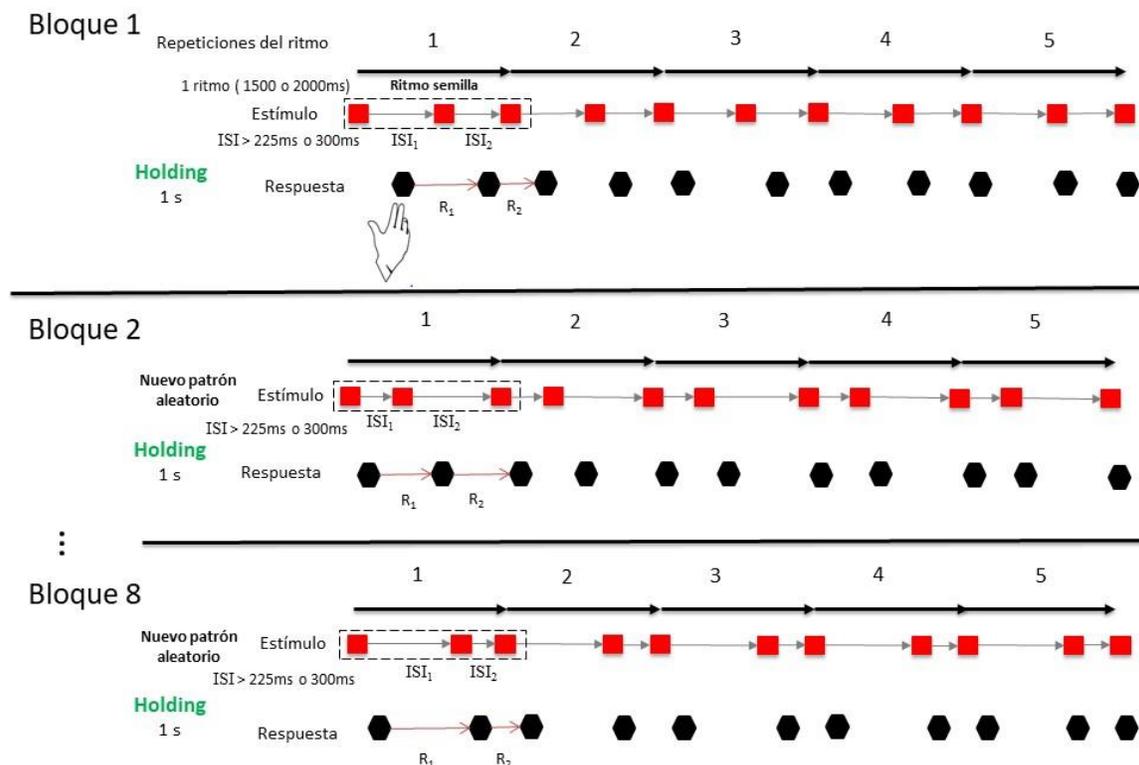


Figura 6. Esquema de la estructura de la fase de entrenamiento. El entrenamiento inicia con la presentación de un ritmo semilla, cuadros rojos enmarcados en el esquema con línea discontinua. El sujeto debe ante la aparición de una señal del LED verde colocar su mano sobre el sensor de holding para enseguida sincronizar sus golpeteos con la mano, hexágonos negros, a cada uno de los pulsos que aparecen, cuadros rojos. El ritmo semilla se repite 5 veces a lo largo de cada bloque. Los ISI del ritmo semilla son mayores a 225 o 300ms, según el número de ISI del ritmo (2 o 3 intervalos). ISI: intervalo entre estímulos, flechas grises. R: intervalo entre respuestas, flechas rojas.

b) Fase de prueba

La fase prueba consiste en realizar i bloques, en una primera parte del proyecto se realizaron 15 bloques ($n=21$) y posteriormente 20 bloques ($n=10$). Dentro de cada bloque hay 5 iteraciones. En la primera iteración del primer bloque se presenta un ritmo semilla aleatorio, al cabo de la primera iteración se realiza el promedio del primer intervalo respuesta (R_1) de cada repetición, lo que llamamos la respuesta promedio. La respuesta promedio genera el primer intervalo de un nuevo patrón rítmico para la siguiente iteración del bloque. Este proceso se repite en cada iteración hasta terminar las 5 iteraciones del bloque 1 (Fig.7). El segundo bloque comienza con un nuevo ritmo semilla aleatorio, los ritmos semilla de las iteraciones

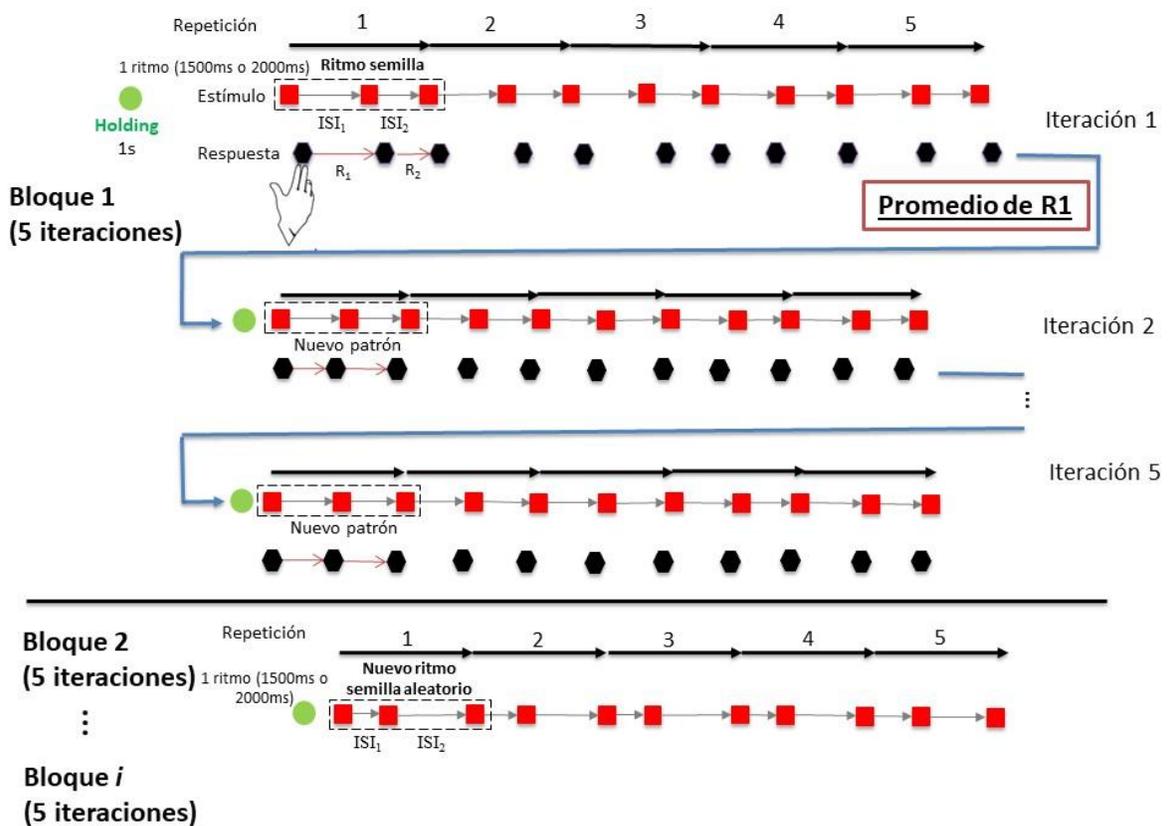


Figura 7. Esquema de la estructura de la fase de prueba. Al inicio de cada bloque se presenta un ritmo semilla cuyo primer ISI se elige de manera aleatoria. Cuando el LED verde se enciende el sujeto debe colocar su mano sobre el sensor de holding para después sincronizar cada uno de sus golpeteos, hexágonos negros, a los pulsos del ritmo, cuadros rojos. Al final de cada iteración se realiza el promedio de todos los primeros intervalos de respuesta (R_1) para generar un promedio de respuesta. Con el promedio de respuesta se genera un nuevo patrón rítmico para la siguiente iteración. ISI: Intervalo entre estímulos, flechas grises. R: Intervalos entre respuestas, flechas rojas.

subsecuentes son generados a partir de la respuesta promedio; después de 5 iteraciones se empieza con un nuevo bloque. Este proceso se repite hasta completar i bloques.

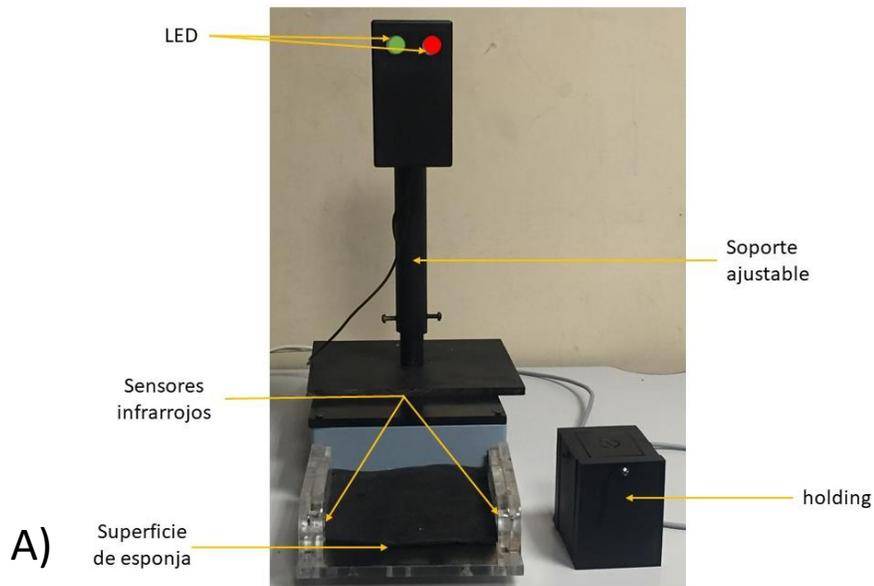
Este tipo de configuración, en la que los ritmos posteriores al ritmo semilla dependen de la respuesta del individuo y además la tarea de golpeteo rítmico se repite múltiples veces, permite revelar una muestra del sesgo endógeno al participante por medio de una estimación obtenida gracias a las numerosas repeticiones realizadas [17, 51].

C. Dispositivo experimental

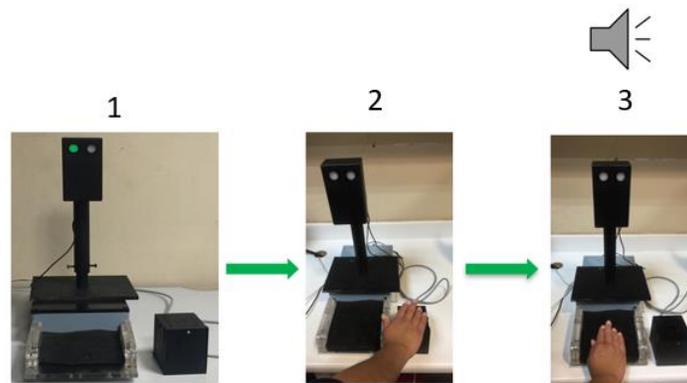
El dispositivo experimental utilizado es una adaptación del dispositivo empleado por Jacoby y McDermott en su estudio de las distribuciones de probabilidad a priori para los ritmos entre culturas [17]. El dispositivo presenta estímulos auditivos y estímulos visuales, además de recopilar los datos correspondientes a las respuestas de los participantes.

El dispositivo consiste en un módulo que consta de dos LEDs de colores, uno verde y uno rojo. El LED verde previene al usuario sobre el inicio próximo de una serie de ritmos (ritmo semilla y sus repeticiones) y el LED rojo presenta los pulsos del ritmo en la tarea visual (Figura 8). Para la presentación de los estímulos auditivos se utilizan audífonos. La presentación de estímulos visuales es controlada por un microcontrolador y los estímulos auditivos por una computadora. La tarea de los sujetos es sincronizar el golpe de la palma de la mano con los estímulos sensoriales (*tapping*). El *tapping* se realiza sobre una superficie de esponja de alta densidad para evitar retroalimentación sonora adicional al estímulo auditivo o visual. Un sensor infrarrojo permite detectar el desplazamiento de la palma de la mano.

Los sujetos realizan la tarea sentados frente al dispositivo en una habitación silenciosa, además su cabeza es colocada sobre un soporte para barbilla (*chin rest*) a una distancia de 56cm de los LED's con el fin de asegurar la correcta disposición de los ojos al estímulo visual y tener un campo visual restringido, pues se limita la orientación de la cabeza con respecto al módulo presentador de estímulos visuales.



A)



B)

Figura 8. Dispositivo experimental para tarea de sincronización a ritmos complejos (no isócronos). A) El módulo presentador de pulsos visuales por medio de LEDs se encuentra sobre un tubo ajustable a la altura de los ojos de cada sujeto. B) Al iniciar la tarea el LED verde se enciende (1) indicando al sujeto que se debe colocar su mano sobre el holding (2). Al apagarse el LED verde, se comienza a presentar la secuencia rítmica. En el caso de la modalidad auditiva se presentan una secuencia de clicks y para la modalidad visual el LED rojo emite una secuencia de flashes, los sujetos deben entonces sincronizarse a los estímulos haciendo un golpeteo rítmico sobre la superficie de esponja (3). Los movimientos de la mano son detectados por sensores infrarrojos.

D. Adquisición y análisis de datos

El momento en el cual los participantes atraviesan los sensores infrarrojos hasta llegar a la superficie de esponja, golpeteo del sujeto, es recuperado gracias a un microcontrolador (PIC 18F4550 *Microchip*) y enviado a la computadora para ser procesado por una rutina escrita en Matlab por Nori Jacoby. El script de Matlab permite obtener el momento de las respuestas, promediar los primeros intervalos de respuesta de cada repetición realizada (R1) para generar un nuevo ritmo en el caso de la fase de prueba, obtener la asincronía promedio y presentar el desempeño del sujeto a lo largo de la o las iteraciones.

El análisis de datos se realizó con la ayuda de rutinas escritas en Matlab, se calculó por una parte el intervalo promedio realizado por sujeto en la tarea de golpeteo rítmico libre del pre-entrenamiento así como su desviación estándar. Por otra parte, en las tareas de sincronización y de *tempo* cambiante, se calculó la asincronía promedio (diferencia entre el tiempo en que se presentó el estímulo y el momento en el que se dio el golpeteo), el intervalo producido, la desviación estándar correspondiente y el error constante. El error constante es la diferencia entre el intervalo producido y el intervalo presentado. Se utilizó una caja con valores extremos (*boxplot*) para representar la dispersión de los datos obtenidos, así como un diagrama de dispersión (*scatterplot*) para representar la respuesta promedio de cada uno de los sujetos. En el caso de la representación de las asincronías se utilizó además estadística circular que permite resumir la distribución de las asincronías relativas por medio de un vector. El vector resultante se encuentra definido en efecto por dos parámetros: la longitud (de dimensiones 0 a 1) y el ángulo (de 0 a -180° o 0 a 2π). De esta forma, la longitud representa el porcentaje de respuesta promedio obtenido y un ángulo igual a 0° equivale a una sincronización perfecta entre el estímulo y la respuesta, un ángulo negativo a una respuesta anticipada del sujeto y un ángulo positivo a una respuesta tardía, después de la aparición del estímulo.

Para el análisis de los ritmos no isócronos en la fase de prueba, se calculó la variabilidad de golpeteo y la exactitud de copiado a lo largo de las iteraciones, se estimó también la densidad de kernel para todas las posibles razones de enteros

pequeños a lo largo de cada iteración y se hizo una medida de la Divergencia de Jensen-Shannon con el fin de calcular la distancia entre las distribuciones y ver si eran significativas las diferencias entre ellas.

1. Variabilidad de golpeteo y exactitud de copiado

La variabilidad de golpeteo fue calculada como el error constante de las asincronías producidas. Así el error constante para este caso fue calculado como la diferencia entre el tiempo del estímulo y el tiempo de respuesta.

La exactitud de copiado por otro lado fue definida como la distancia entre la presentación del estímulo y la reproducción. En efecto, se calculó la distancia media entre la respuesta y el estímulo según la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (r_{i,m}^k - s_{i,m}^k)^2}$$

donde r es la respuesta, s es el estímulo presentado, k el número de intervalo, i el número de semilla y m el número de iteración.

2. Estimación de Densidad de Kernel

En el caso del análisis de las reproducciones de ritmos de 2 intervalos, se realizó un análisis de los datos de ejecución rítmica con la ayuda de una Estimación de Densidad de Kernel (*KDE* por sus siglas en inglés), con la que se infirió la función de densidad de probabilidad (*pdf* por sus siglas en inglés) de las proporciones simples (razones de enteros pequeños) 1:4, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1 y 4:1. Para los ritmos de 3 intervalos se utilizó una representación del espacio rítmico que se puede realizar con los 3 intervalos. Así se realizó un “mapa cronotopológico” que posee 3 dimensiones [46], el que se denominará en lo que sigue: simplex. Cada una de las dimensiones del simplex es dada por cada intervalo del ritmo. El simplex fue entonces definido tomando cada intervalo del ritmo como un eje, para hacer una representación bidimensional de las 3 dimensiones (triángulo, Figura 9). De este

modo, cada intervalo del ritmo puede ser definido como un punto dentro del triángulo y sus coordenadas pueden ser calculadas como la razón de la duración del intervalo entre la duración total del ritmo, ejemplo: para un ritmo de proporciones 1:1:2 y de duración 2000ms, si el primer intervalo es 500 ms, la razón será igual a $500/2000 = 0.25 = 1/4$. Este resultado da una coordenada del ritmo en el simplex (Figura 9B).

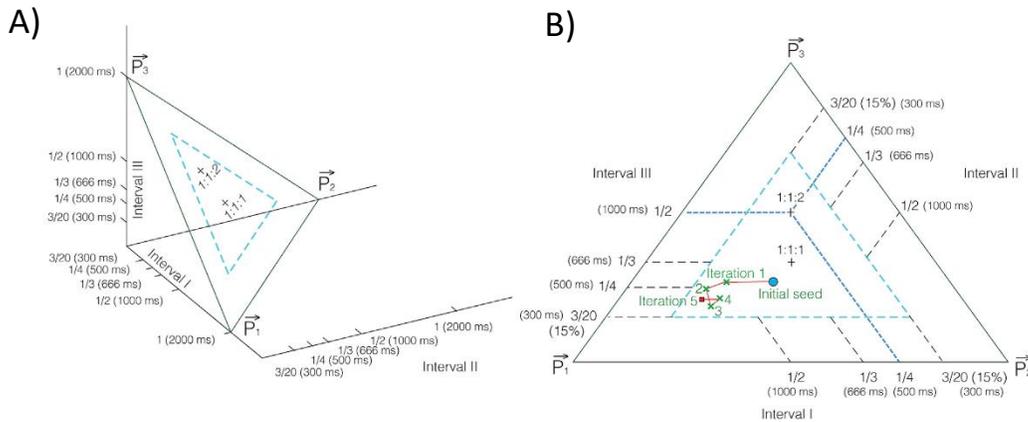


Figura 9. **Representación de ritmo de 3 intervalos en simplex.** A) Un ritmo de 3 intervalos se puede representar en un plano de 2 dimensiones tomando cada intervalo del ritmo como un lado de un triángulo. El triángulo azul en A) y B) representa el espacio de ritmos semilla utilizados cuyo primer intervalo es mayor al 15% de la duración total del ritmo. Los ritmos semilla se encuentran representados por las cruces. B) Simplex que muestra un ejemplo de la evolución del ritmo producido a lo largo de las iteraciones. El punto azul representa al ritmo semilla y las cruces verdes el ritmo generado en cada iteración (Modificado de Jacoby&McDermott, 2016).

3. Divergencia Jensen Shannon

Para medir la distancia que separa dos distribuciones de probabilidad se recurre a menudo a una medida de la información que se puede obtener al observar una variable [47]. Además, la calidad de una codificación puede ser cuantificada gracias a la teoría de la información [47, 48]. La diferencia entre distribuciones puede ser necesaria en la aproximación de distribuciones de probabilidad, en el procesamiento de señal y en el reconocimiento de patrones [47]. En el caso de las distribuciones obtenidas en este trabajo de maestría se comparó la distancia entre ellas gracias al método de la Divergencia de Jensen Shannon.

La divergencia Jensen Shannon es una medida de cómo una distribución es diferente respecto a otra. Esta medida preserva las propiedades de las distribuciones, proporciona la cantidad de información que se puede obtener a partir

de un grupo de datos y tiene la particularidad de ser simétrica lo que permite calcular por tanto la distancia entre dos distribuciones de probabilidad y cuantificar por otro lado la convergencia entre las iteraciones sucesivas.

E. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las diferentes etapas del proyecto, se utilizaron diferentes pruebas estadísticas con la ayuda de rutinas escritas en MATLAB.

La diferencia entre los golpeteos del *tempo* espontáneo fue analizada gracias a un ANOVA de una vía. En el caso de las dos series de sincronización del pre-entrenamiento, *tempo* lento y rápido en ambas modalidades, los datos fueron sometidos a un ANOVA de tres vías. Para la etapa correspondiente al *Tempo* Cambiante, se utilizó un ANOVA de dos vías para evaluar las diferencias entre las asincronías de cada modalidad y entre las modalidades. En todos los casos se realizó una prueba *post hoc* de Tukey para hacer una comparación múltiple entre los diferentes factores.

La significancia de la distancia entre distribuciones fue estimada gracias al método de permutaciones múltiples o *bootstrapping* y evaluada además con una corrección de Bonferroni para las comparaciones múltiples.

VII. Resultados

Para la fase de pre-entrenamiento, entrenamiento y prueba se obtuvieron los datos de 31 sujetos.

En el pre-entrenamiento, se adquirieron los intervalos realizados espontáneamente y las asincronías realizadas durante 2 tareas de sincronización isócrona, una a un *tempo* lento (intervalos de 800ms) y otra a un *tempo* rápido (intervalos de 600ms). Por otro lado, se realizó una sincronización con perturbaciones, en donde se utilizaron dos intervalos de diferente duración (546ms y 654ms) alternadamente. Para el cálculo de las asincronías se tomó en cuenta el momento en el que apareció el estímulo y el tiempo en el que se realizó el golpeteo (*tap*), estableciendo un intervalo de tiempo para considerar la respuesta (*tap*) como correcta (tiempo del estímulo +/- 10ms).

En el entrenamiento y en la prueba, los sujetos se sincronizaron a ritmos no isócronos de 2 y 3 intervalos en sesiones diferentes. De esta forma los participantes realizaron dos sesiones en días diferentes, una sesión para un intervalo en un día y en otro día para el otro intervalo. El número de intervalos del ritmo para la primera sesión se escogió aleatoriamente. Para los ritmos de 2 intervalos la duración total fue de 1500 ms, para los ritmos de 3 intervalos fue de 2000 ms. Durante el entrenamiento, se realizaron 8 bloques de 1 iteración. En la prueba se llevaron a cabo 15 o 20 bloques de 5 iteraciones.

Ritmos de 2 y 3 intervalos fueron utilizados para ver la configuración que proporciona más información sobre el desempeño de los sujetos para en un futuro poder implementar la misma tarea en monos Rhesus.

A. Pre-entrenamiento

Al evaluar el sesgo en la reproducción de ritmos no isócronos, los sujetos realizaron en un primer lugar un pre-entrenamiento para familiarizarse con la tarea de sincronización y conocer su desempeño motor.

1. *Tempo* Espontáneo y desempeño motor

La figura 10 muestra la distribución de los intervalos realizados por los sujetos ($n=31$) sin ser guiados por algún estímulo, golpeteo libre. Estos intervalos corresponden por tanto al *tempo* motor espontáneo para los sujetos. El intervalo promedio producido espontáneamente (libre) por los sujetos fue de 524 ms (SD = 139.1), el intervalo producido aumentando la velocidad de ejecución (libre rápido) fue de 351 ms (SD = 133.3) y aumentando la velocidad aún más (libre más rápido) fue de 166 ms (SD = 35.96). Se puede entonces observar claramente una disminución de la duración del intervalo con el aumento de la velocidad de producción, así hay una diferencia muy significativa entre todos los golpeteos realizados ($F = 77.4$, $p < 0.0001$). Los resultados obtenidos se encuentran en acuerdo con la literatura de tareas de sincronización en donde el *tempo* espontáneo se encuentra oscilando alrededor de 600 ms [49, 50] y el *tempo* más rápido entre 150-200 ms [11].

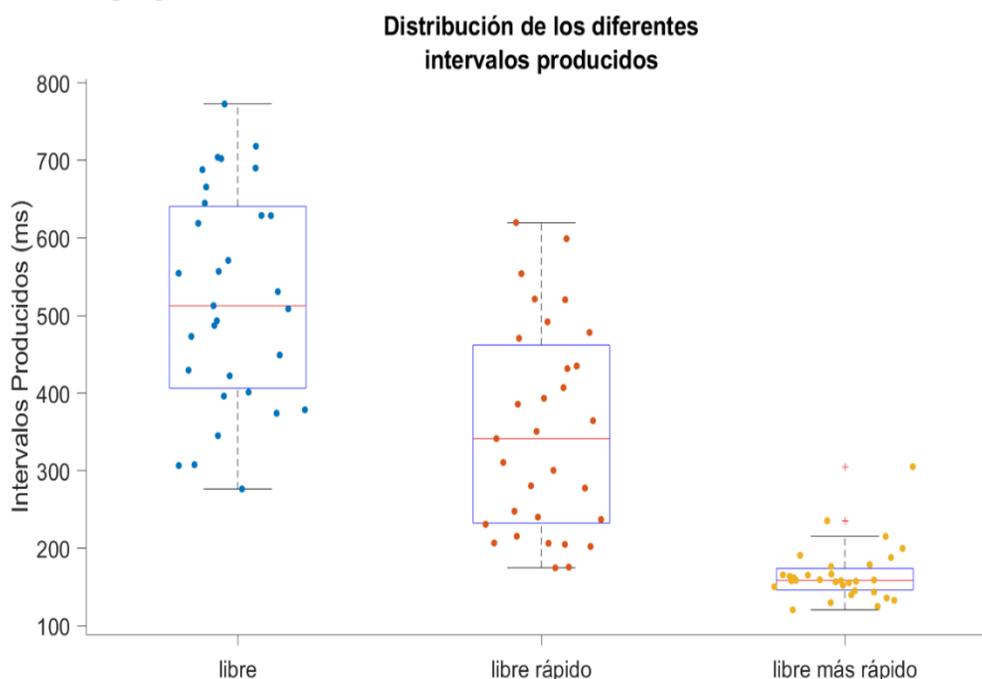


Figura 10. **Distribución de los intervalos producidos.** La distribución de los intervalos producidos se presenta por medio de una gráfica de caja con valores extremos (boxplot) y a un diagrama de dispersión (scatter plot). Cada boxplot muestra la media (línea roja), y el primer, límite inferior, y tercer cuartil, límite superior de la figura. Agrupamiento de los 3 boxplot mostrando la variabilidad en el intervalo producido para cada condición. Boxplot del **tempo espontáneo (libre)**, el tempo espontáneo se encuentra entre 280 ms y 770 ms. Boxplot de los golpeteos rítmicos **libres rápidos**, los intervalos generados se encuentran distribuidos entre 170 ms y 620 ms. Boxplot de los golpeteos rítmicos **libres más rápidos**, los intervalos producidos están distribuidos entre 120 ms y 210 ms. Existe una diferencia muy significativa entre las medias de todas las condiciones de producción ($F = 77.4$, $p < 0.0001$).

2. Familiarización con tarea de sincronización

Después de haber realizado los diferentes golpeteos libres, se mostró a los sujetos el estímulo auditivo o visual que sería utilizado para el resto de la tarea. Posteriormente, se realizaron dos series de sincronización isócrona, cada serie se encontró compuesta de un tempo lento 800 ms y de un tempo rápido 600 ms (Figura 11).

Al final de la fase de pre-entrenamiento, se presentó en la misma sesión una serie de *tempos* rápidos y lentos (546 y 654ms) que fueron alternados en la misma serie.



Figura 11. Serie de presentación de los diferentes tempos.

A esta última etapa se le denominó de *Tempo* cambiante y permitió familiarizar a los sujetos con ritmos no isócronos, es decir con ritmos de intervalos de duración variable.

Para analizar los datos de la sincronización isócrona y no isócrona se recurrió al cálculo de la asincronía media, el intervalo producido, la variabilidad de respuesta (dada por la desviación estándar de los intervalos producidos) y el error constante.

El estudio de la asincronía media por medio de estadística circular (Figura 12) muestra que el desempeño de los sujetos en ambas modalidades es correcto, pues los participantes tienen una sincronización cuyo ángulo promedio de sincronización se encuentra cercano a 0 o bien es igual a 0 (Figura 12, Tabla 1). Además, la mayoría de las respuestas producidas se encuentran en el cuadrante ($0^\circ - 90^\circ$) y la prueba de Rayleigh en todas las condiciones arroja un valor $p < 0.0001$. Este hecho indica que la mayoría de las respuestas tuvieron asincronías negativas, en especial en el caso de la modalidad auditiva, y que la sincronización de los sujetos es significativa. Al realizar un análisis de ANOVA de 3 vías se encuentra que existe una interacción significativa entre el *Tempo* y la Modalidad ($F=9.84$, $p < 0.05$).

Tabla 1. Medias y desviaciones estándar de las asincronías (ángulo) en el pre-entrenamiento (sincronización isócrona).

	Modalidad							
	Auditiva				Visual			
	600 ms		800 ms		600 ms		800 ms	
	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD
1ra vez	-0.326	0.371	0.010	0.492	-0.041	0.767	-0.212	0.588
2da vez	-0.257	0.334	-0.161	0.218	-0.172	0.654	-0.329	0.434

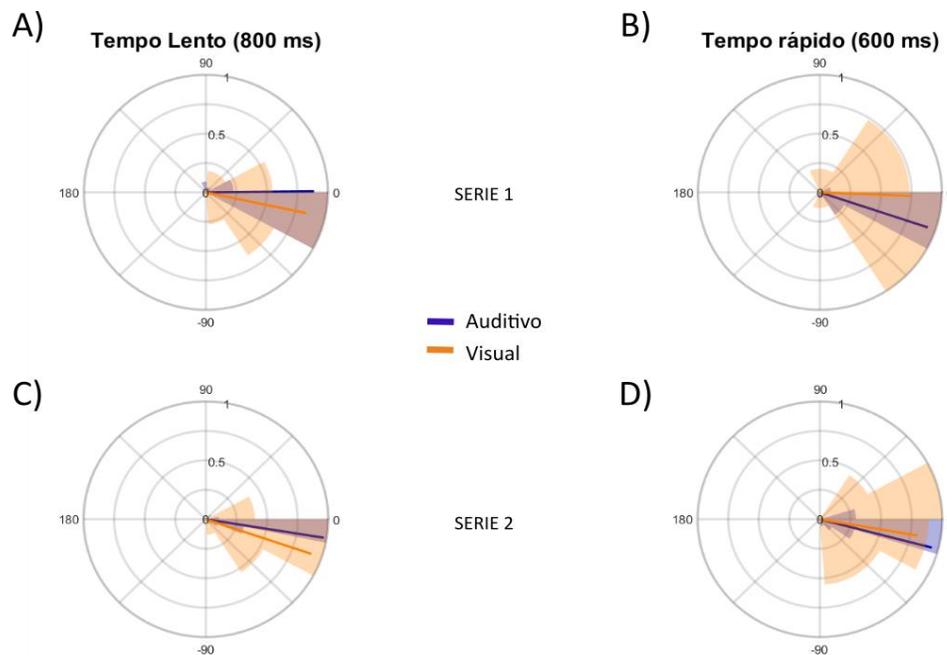


Figura 12. **Histogramas circulares de las asincronías producidas en las tareas de sincronización.** Los histogramas circulares presentan la distribución de las respuestas de los participantes. Se habla de respuesta sincronizada si la respuesta es igual a 0°. Las asincronías negativas son representadas por ángulos negativos mientras que las asincronías positivas por ángulos positivos. La línea gruesa de color indica el ángulo promedio producido y las zonas de color naranja y azul corresponden a los porcentajes de respuesta obtenidos.

Por otra parte, el intervalo promedio producido en la última serie de la modalidad auditiva fue de 834.39 ms, SD = 275.64 ms, para el caso de los intervalos lentos y para el caso de los intervalos rápidos fue de 542.75 ms, SD = 69.45 ms. En el caso de la modalidad visual, para el *tempo* lento se obtuvieron intervalos de 721.13 ms, SD = 315.01 ms y para el *tempo* rápido, intervalos de 627.77 ms, SD = 222.24 ms

(Figura 13). Existe en efecto una diferencia significativa entre los intervalos producidos ($F = 47.18, p=0$).

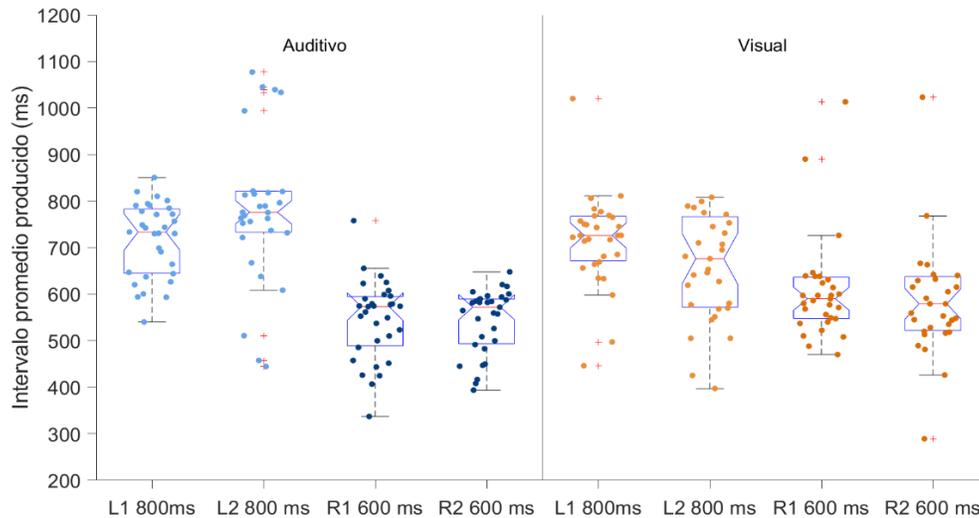


Figura 13. **Dispersión del intervalo promedio producido.** La dispersión de los intervalos promedio producidos en las diferentes modalidades (auditiva, azul y visual, naranja) y en diferentes tiempos se presentan por medio de una gráfica de caja con valores extremos (boxplot) y de un diagrama de dispersión (scatter plot). Cada boxplot muestra la media (línea roja), y el primer, límite inferior, y tercer cuartil, límite superior de la figura. El scatter plot permite mostrar la dispersión de los datos recolectados, cada punto corresponde a un participante. L1: Lento serie 1, L2: Lento serie 2, R1: Rápido serie 1, R2: Rápido serie 2.

Durante esta etapa también se analizó la variabilidad de los intervalos producidos por los participantes (Figura 14). La variabilidad de los intervalos producidos se define como la desviación estándar de todos los intervalos producidos por una persona durante una misma sesión. Las medidas realizadas con un análisis ANOVA de 3 vías muestra que existe una diferencia significativa entre intervalos producidos ($F = 10, p < 0.0018$) y entre modalidades ($F = 24.44, p < 0.0001$). La prueba *post hoc* de Tukey muestra una diferencia de variabilidad temporal significativa entre la modalidad auditiva y la modalidad visual para el *tempo* lento de la segunda sesión. Sin embargo, no hay una interacción significativa entre los intervalos y las modalidades utilizadas ($F = 0.24, p = 0.6265$).

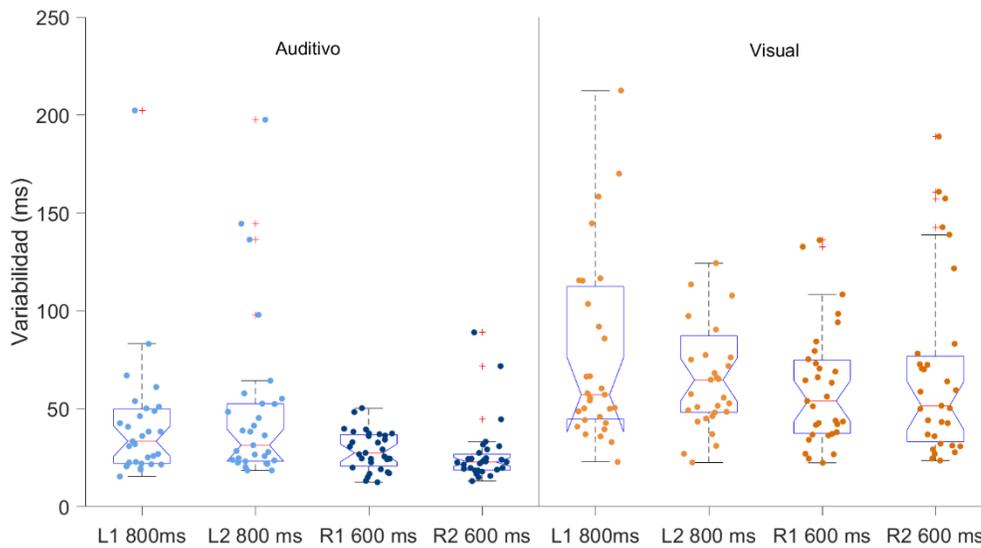


Figura 14. **Variabilidad temporal de los intervalos producidos.** La variabilidad temporal de la respuesta para cada intervalo y modalidad utilizada. Mismo formato que en la Figura 13.

Otra medida, para caracterizar el desempeño rítmico y de sincronización de los participantes es el error constante. Este parámetro pone en evidencia hacia qué valor tienden a desviarse sistemáticamente las medidas realizadas. En nuestro análisis, el error constante fue calculado como la diferencia entre el intervalo producido y el intervalo requerido. Al realizar la prueba ANOVA de 3 vías para esta variable, no se muestra diferencia significativa entre los diferentes factores analizados, ni existe interacción alguna entre ellos (Figura 15). Posteriormente a los ensayos de sincronización, se realizó una sincronización con perturbaciones a lo largo de la cual se presentó una serie de 2 intervalos (546 ms y 654 ms). Los intervalos fueron alternados durante la serie, de esta forma se alternó entre un *tempo* rápido (546 ms) y un *tempo* lento (654 ms), a esta fase del pre-entrenamiento se le llama de *Tempo* cambiante.

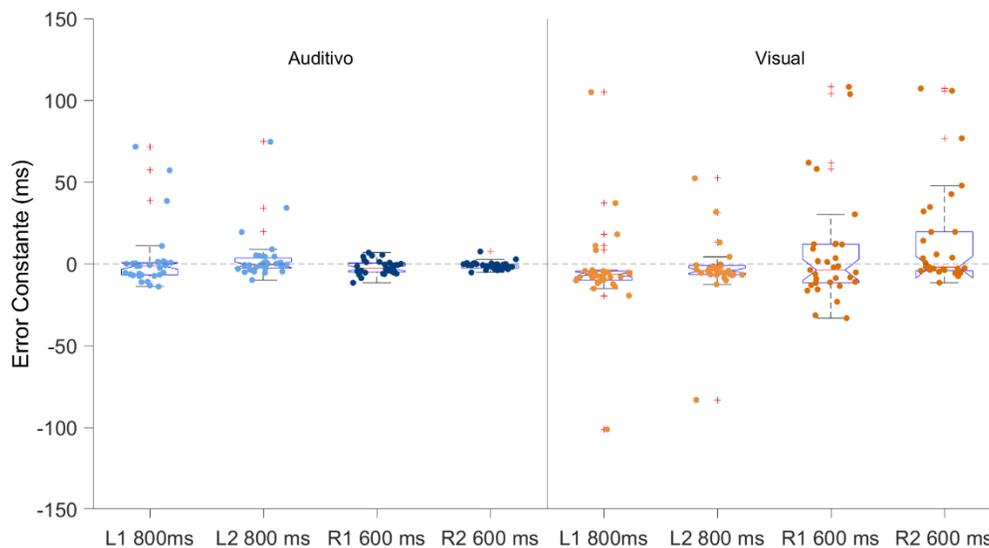


Figura 15. **Error constante.** El error constante es definido como la diferencia entre el intervalo producido por el participante y el intervalo exigido en la tarea. Mismo formato que Figura 13.

Se observa que durante la reproducción de *tempo* cambiante la respuesta de los participantes se encuentra perturbada en el momento de cambio del ISI. Las perturbaciones corresponden a picos preponderantes en la curva de desempeño a lo largo de la tarea (Figura 16). Estos picos coinciden con el momento en el cual se cambia de duración de intervalo. De esta forma las perturbaciones muestran el cambio de serie de intervalos durante la sesión. Los cambios son más acentuados en la modalidad auditiva que en la modalidad visual y los sujetos logran sincronizarse a pesar de los cambios intermitentes. La prueba estadística ANOVA de 2 vías muestra una diferencia significativa entre las modalidades y entre la asincronía media de los intervalos producidos y ($F = 4.05$, $p < 0.05$ y $F = 17$, $p = 0$). Además, los dos factores interactúan significativamente ($F = 3.94$, $p < 0.05$). Al realizar una prueba *post hoc* de Tukey, se hace notar que existe una diferencia significativa entre las modalidades para las asincronías de un mismo intervalo, sobre todo en el *tempo* rápido (ISI de 546 ms).

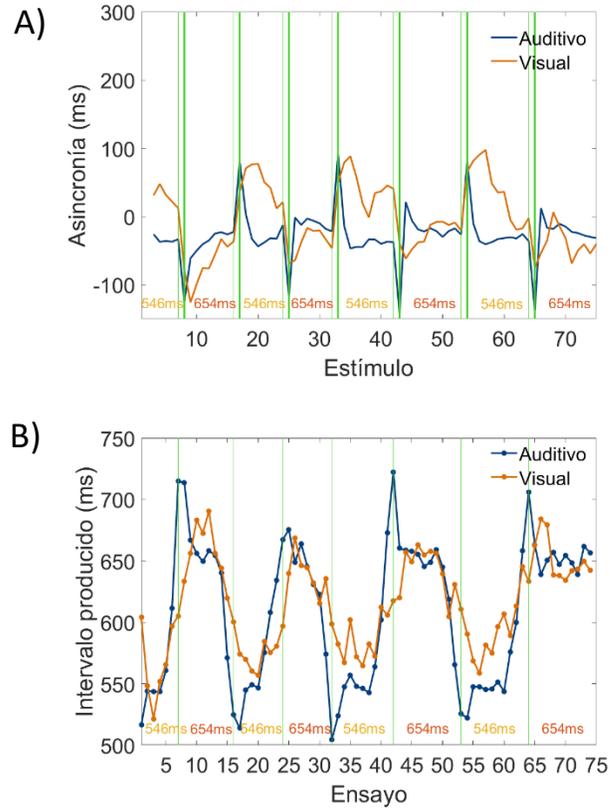


Figura 16. **Sincronización con perturbaciones (Tempo cambiante).** A) Asincronías de todos los sujetos a lo largo de la tarea. La asincronía se calculó con respecto al tiempo del estímulo presentado. B) Evolución de los intervalos producidos por ensayo. Cada punto de la curva representa el intervalo promedio producido para el ensayo. Modalidad auditiva, azul, modalidad visual, naranja. El cambio del valor del ISI (546 o 654 ms) en la serie de intervalos se encuentra señalado por las marcadas asincronías negativas o positivas en ambas modalidades. Las líneas verdes marcan los estímulos de un nuevo ISI también se marca el intervalo presentado en cada serie de estímulos. El desempeño de los sujetos es más uniforme en la modalidad auditiva (línea azul) que en la modalidad visual (línea naranja).

B. Entrenamiento

En esta fase los participantes ($n=31$) debían sincronizarse a ritmos no isócronos de 2 y 3 intervalos. De esta forma, los ritmos fueron repetidos 5 veces y se realizaron 8 bloques de 1 sola iteración.

La figura 17 presenta un ejemplo de los datos obtenidos para un sujeto en una tarea de ritmos de 2 intervalos (ritmo de 1500 ms) y de 3 intervalos (ritmo de 2000 ms), se presentan los intervalos producidos durante la iteración (Fig. 17, A y D) cada cuadro azul representa el pulso del intervalo semilla que se presenta y cada cruz negra representa la respuesta del participante (*tap* o golpeteo), se puede entonces dar seguimiento a la evolución de la respuesta del participante a lo largo de las 5 repeticiones; los estímulos presentados y la respuesta a ellos son mostrados también (Fig. 17, B y E). Un ritmo de 2 intervalos está formado por 3 pulsos y un ritmo de 3 intervalos por 4 pulsos, los pulsos del ritmo corresponden a las líneas azules y el último pulso del ritmo corresponde al primer pulso de la siguiente repetición de esta forma para 5 repeticiones de un ritmo de 2 intervalos se tiene un total de 11 pulsos y en el caso de un ritmo de 3 intervalos se tienen 16 pulsos. La respuesta del participante por otro lado está representada por las líneas rojas, en este ejemplo se observa que el sujeto debió dejar pasar los primeros 2 pulsos para poder sincronizarse posteriormente. El participante realizó algunas asincronías, líneas rojas desfasadas con respecto a la línea azul, pero a lo largo de la iteración su sincronización fue correcta. En el caso de la tarea de ritmos de 2 intervalos, se representó la estimación de densidad de kernel de la respuesta a lo largo de la iteración. Se representa el ritmo semilla utilizado gracias al primer intervalo de este y se muestra el ritmo hacia el que converge al final de las repeticiones (Fig. 17C). Para los ritmos de 3 intervalos, el ritmo semilla y el ritmo hacia al que converge la respuesta del individuo se representaron gracias a un simplex. Los ritmos pueden ser descritos por medio de las razones de enteros pequeños, cada razón da una coordenada dentro del simplex. Las razones de enteros pequeños se definen como el primer intervalo producido dividido por la duración total del ritmo. Dentro del simplex, se puede ver que el ritmo semilla, punto negro, fue un ritmo de

proporciones alrededor de 2-3-2 (razón alrededor de 0.15 – 0.2) y convergió hacia un ritmo de proporciones 1-2-1 (razón de 0.25), cuadro rojo.

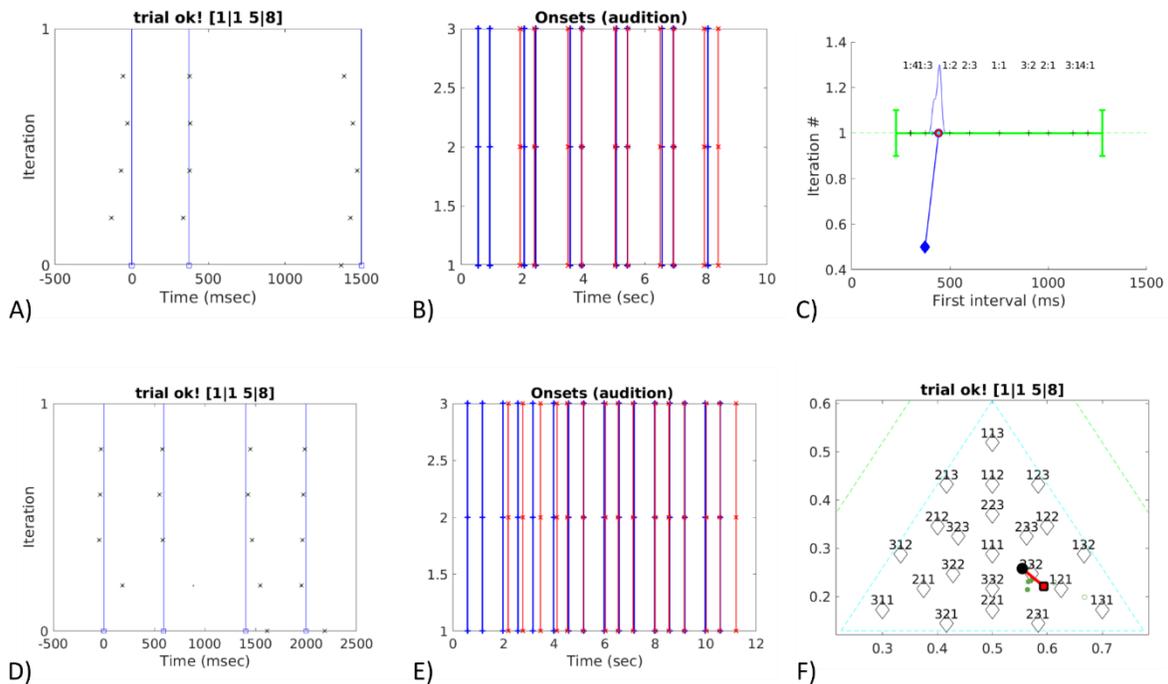


Figura 17. Ejemplos del entrenamiento para ritmos de 2 y 3 intervalos. De A) a C) ejemplo del desempeño de un sujeto con ritmos de 2 intervalos. De D) a F) ejemplo con ritmo de 3 intervalos. A) y D) cada pulso del ritmo semilla es representado por los cuadrados y líneas azules, la respuesta hecha por el sujeto se encuentra representada por las cruces negras. B) y E) representación gráfica de los pulsos presentados, líneas azules, y de las respuestas realizadas durante la iteración, líneas rojas. C) representación de la densidad de kernel de la respuesta del sujeto. El rombo azul representa el primer intervalo del ritmo semilla presentado. Las proporciones simples para cada ritmo se encuentran representados en la parte superior del gráfico. F) representación gráfica en 2 dimensiones del ritmo de 3 intervalos. La línea punteada verde corresponde a toda la gama de intervalos posibles para un ritmo de 2000ms. El triángulo con líneas punteadas azules marca la región a partir de la cual los ritmos semilla fueron seleccionados (los ritmos semilla fueron definidos por intervalos mayores a 15% de la duración total, ejemplo: 300ms para un intervalo que dura 2000ms). La línea roja indica la trayectoria que pudo seguir la respuesta del sujeto. Se indica también el número de iteraciones a realizar 1/1 y el número de bloque que se realiza 5/8 para ambos casos.

C. Prueba

En la fase de prueba, se hicieron 15 bloques de 5 iteraciones en una primera ocasión, en esta etapa se recopilaban los datos para 21 personas. Al analizar los resultados de este protocolo se encontró que la evolución de las densidades a lo largo de las iteraciones era poco clara. Por este motivo, en una segunda ocasión, se aumentó el número de bloques a 20 para los sujetos que realizarían la tarea ($n=10$) y se terminaron de recuperar los datos, para obtener un total de 526 ritmos semilla.

1. Tarea con 2 intervalos

La figura 18 muestra los resultados obtenidos para los 31 sujetos que realizaron ritmos de 2 intervalos. En la modalidad auditiva, se puede notar cómo hay una evolución de la densidad de probabilidad a lo largo de las iteraciones, pues los golpeteos rítmicos se concentran en razones específicas, mientras que en la modalidad visual no se puede observar claramente la definición de las razones preferentes. En efecto, en la modalidad auditiva, en la iteración 1 se tiene una

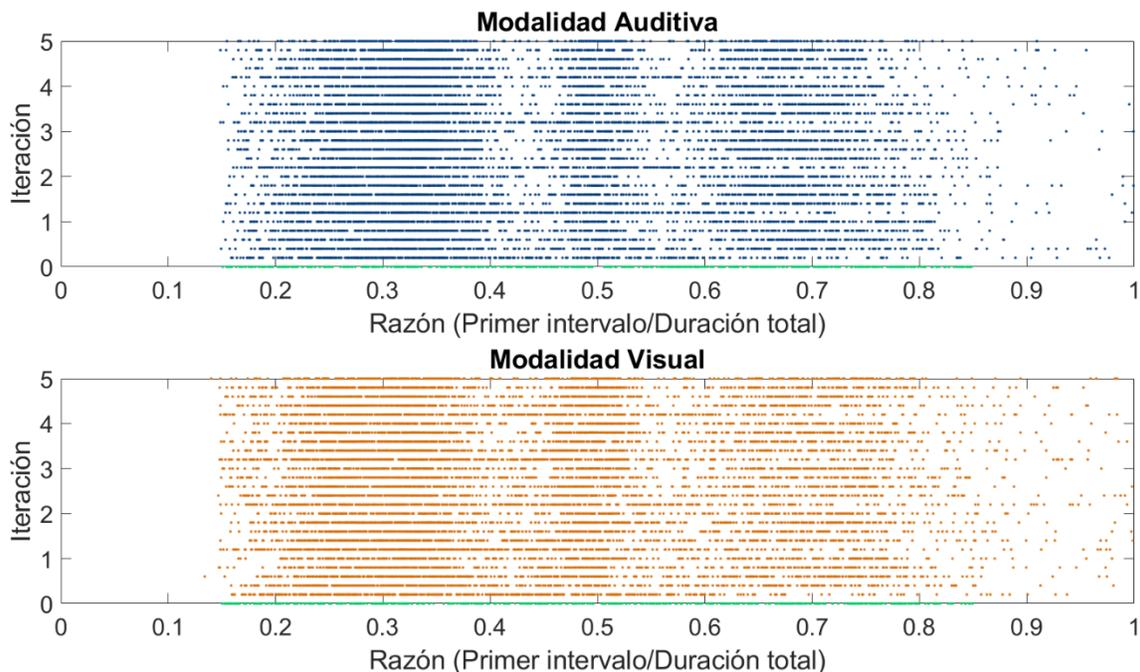


Figura 18. **Resultados aglomerados para ritmos de 2 intervalos.** Resultados en conjunto de 31 sujetos que realizaron la tarea. Cada punto representa el golpeteo dado por cada uno de los sujetos. Los puntos verdes representan cada uno de los ritmos semilla utilizados. En el eje de las x se representa la razón para cada ritmo y en el eje de las y se representa el número de iteración.

densidad de probabilidad igual a 3.17 y en la última iteración una densidad de 3.98 (Figura 19).

Se puede ver por otra parte que existe un sesgo marcado por las puntas pronunciadas de la curva para las proporciones simples de 1:2, 1:1 y 2:1, que corresponden a razones de enteros pequeños iguales a 0.333, 0.5 y 0.666 respectivamente (Fig. 19A). En el caso de la modalidad visual, el cambio en la densidad de probabilidad es poco claro, pues de la iteración 1 a la última iteración la variación de densidad es muy débil, de 2.91 a 2.99. Sin embargo, en ambas modalidades existe una mayor densidad de probabilidad con respecto a la densidad de probabilidad de los ritmos semilla.

El sesgo hacia las 3 razones antes mencionadas es claramente preponderante en la modalidad auditiva, mientras que en la modalidad visual este sesgo es más notorio para las proporciones simples 1:2 y 1:1, aunque se alcanza a apreciar ligeramente un sesgo hacia 2:1 (Fig. 19, A y B). Al acoplar ambas estimaciones de

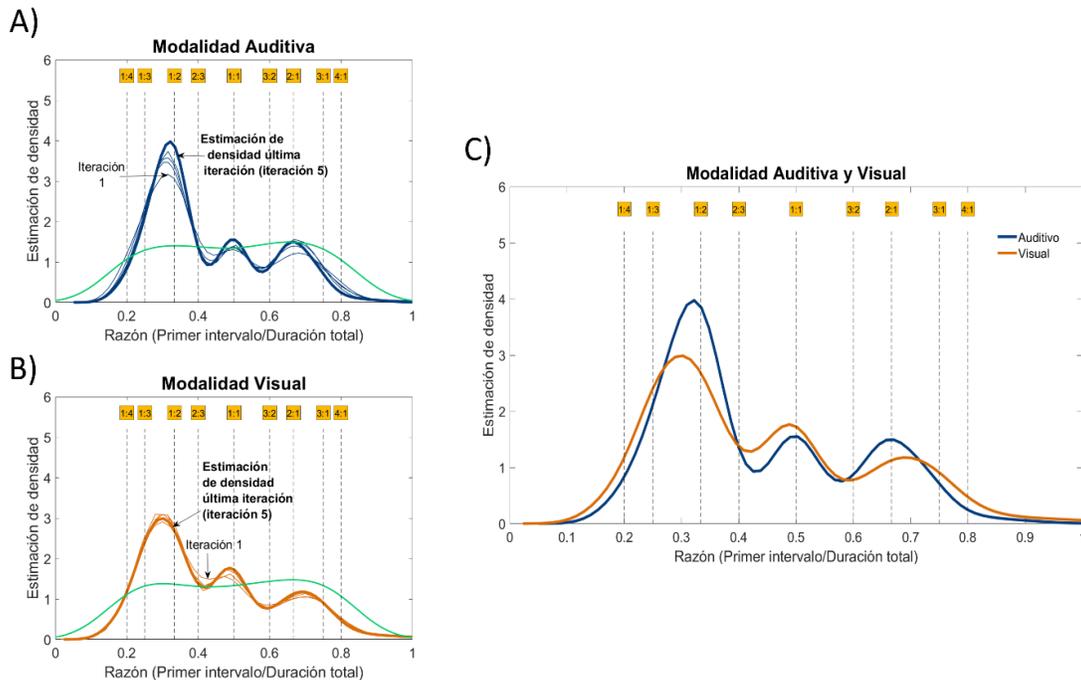


Figura 19. **Densidades de kernel para ritmos de 2 intervalos.** A) y B) Densidad de kernel de las respuestas en la modalidad auditiva para cada una de las iteraciones, líneas azules y en la modalidad visual, líneas naranjas. La línea más gruesa representa la última iteración realizada. La línea verde representa la densidad de kernel para los ritmos semilla utilizados. El eje de las x presenta la razón para cada ritmo y el eje de las y presenta el número de iteración. C) Acoplamiento de las densidades de kernel para la última iteración en ambas modalidades. En el eje de las x se representa la razón para cada ritmo y en el eje de las y se representa la estimación de densidad. Los cuadros amarillos presentan las proporciones de los ritmos para enteros simples analizados.

densidad para la última iteración se puede notar que la distribución de las densidades es similar en las dos modalidades (Figura 19C).

2. Tarea con 3 intervalos

La tarea de 3 intervalos, al contar con más dimensiones que la de 2 intervalos, presenta más claramente la evolución de la respuesta de los sujetos a lo largo de las iteraciones (Figura 20). Se puede observar en esta tarea claramente una reducción de la variabilidad del golpeteo a lo largo de la serie de iteraciones. La variabilidad de golpeteo permite evaluar la cantidad presente de ruido durante la reproducción de los ritmos. La modalidad visual presenta una mayor cantidad de ruido, pues la variabilidad del golpeteo es mucho mayor. Este hecho se ve claramente, ya que el error estándar es más importante en la modalidad visual en ambos análisis. Además, la exactitud de copiado se estabiliza en ambas

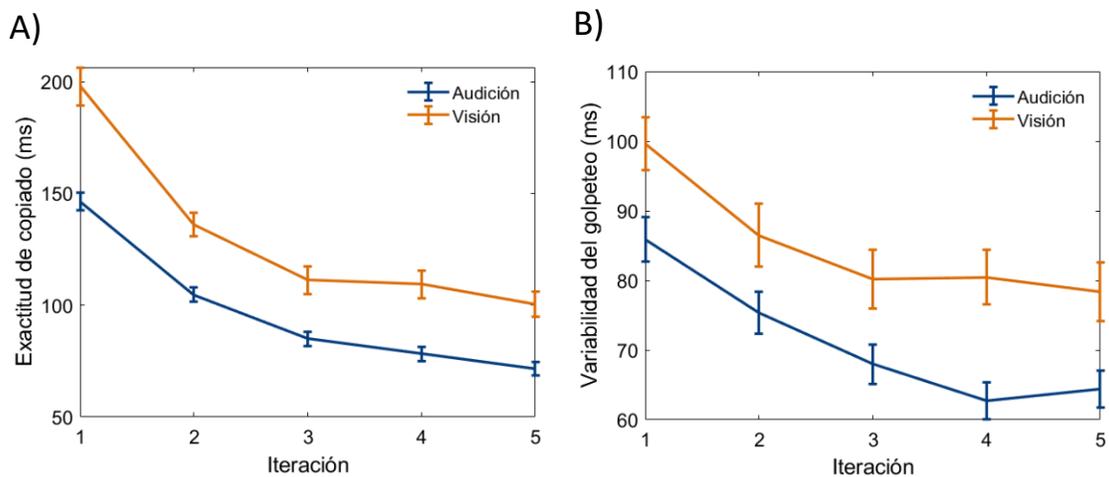


Figura 20. **Variabilidad del golpeteo y exactitud de copiado para la tarea con ritmos de 3 intervalos.** Se graficó en A) La exactitud de copiado que corresponde a la distancia entre el estímulo presentado y la respuesta. B) Variabilidad del golpeteo producido para cada iteración. La variabilidad de golpeteo corresponde a la desviación estándar de los golpeteos. En ambos casos se nota una convergencia en la última iteración hacia un menor tiempo. En las dos gráficas en x se representa el número de iteración y en y la variable estudiada. Las barras de error representan el error estándar de la media.

modalidades en las últimas iteraciones pues no hay diferencias significativas entre las medias de las dos últimas iteraciones, modalidad auditiva: iteración 4 vs 5 $t = 2.32$ $p = 0.109$; modalidad visual: iteración 4 vs 5 $t = 2.09$ $p = 0.179$.

Para la representación de la estimación de densidad de probabilidad para ritmos de 3 intervalos se utilizó una representación bidimensional, simplex. En la figura 21, se

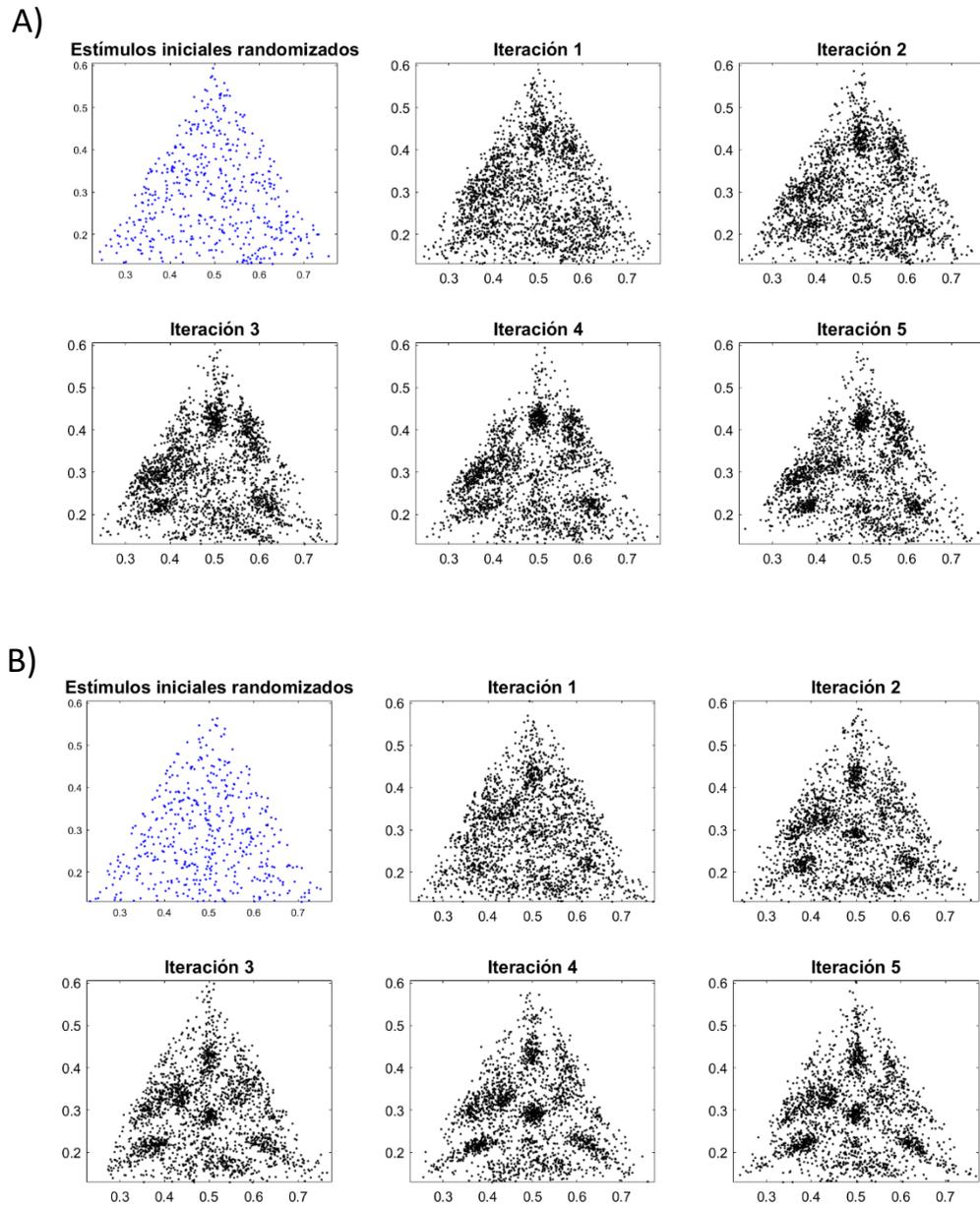


Figura 21. Resultados de la reproducción de ritmos por iteración en ambas modalidades con ritmos de 3 intervalos. Se muestran todas las respuestas aglomeradas para cada iteración de 31 sujetos (puntos negros), así como los estímulos iniciales que sirvieron de ritmo semilla de partida (puntos azules). A) Modalidad Auditiva. B) Modalidad Visual.

muestran los datos aglomerados de los 31 participantes por iteración. A lo largo de las iteraciones se van definiendo claramente las razones de enteros simples preferentes de los sujetos. Se puede notar que la respuesta de los participantes evoluciona entre cada iteración para ambas modalidades. Los ritmos preferentes se hacen evidentes a lo largo de las iteraciones y hay de esta forma una convergencia hacia una distribución multimodal. Por otro lado, se presentan las estimaciones de

densidad de probabilidad para las dos modalidades (Figura 22). En cada representación se superpusieron las 22 razones de los ritmos cuyos intervalos se encuentran relacionados con las razones de enteros pequeños más comunes de la música occidental. Estas razones fueron representadas con rombos sobre el simplex. La modalidad auditiva presenta una densidad de probabilidad importante para ritmos de razones 1:1:2, 1:2:1 y 2:1:1 (Figura 22A). Para la modalidad visual observamos también una evolución entre iteraciones y una densidad de probabilidad importante para los ritmos 1:1:2 y 1:1:1 (Figura 22B).

A)

B)



Figura 22. Resultados de la reproducción con iteraciones para ritmos de 3 intervalos. Estimación de densidad de probabilidad para el conjunto de datos obtenidos a lo largo de las iteraciones. A) Estimación de densidad para la modalidad auditiva. B) Estimación de densidad para la modalidad visual. En ambas modalidades se muestra el simplex con 22 semillas de ritmos de enteros pequeños, rombos.

Con el fin de conocer la distancia que separa a las diferentes distribuciones se utilizó la Divergencia de Jensen Shannon (JSD). La JSD es una medida de distancia entre distribuciones de probabilidad que facilita ver la convergencia entre las iteraciones hacia ritmos preferentes. Las medidas que se obtuvieron por este método confirman en efecto que la convergencia hacia distribuciones cuyas categorías rítmicas son de razones de enteros pequeños se alcanza claramente en la quinta iteración dado que

no existe una diferencia significativa entre las distribuciones 4 y 5, auditiva $p = 0.95$ y visual $p = 0.94$ (Figura 23).

Es importante señalar que en ambas configuraciones rítmicas (2 y 3 intervalos), se puede observar una convergencia hacia las razones de enteros pequeños a lo largo de las iteraciones en la modalidad auditiva. Sin embargo, esta convergencia es menos visible en el caso de la modalidad visual para la configuración con ritmos de 2 intervalos (Figura 19B), pero más notoria en la configuración con ritmos de 3 intervalos (Figura 23B).

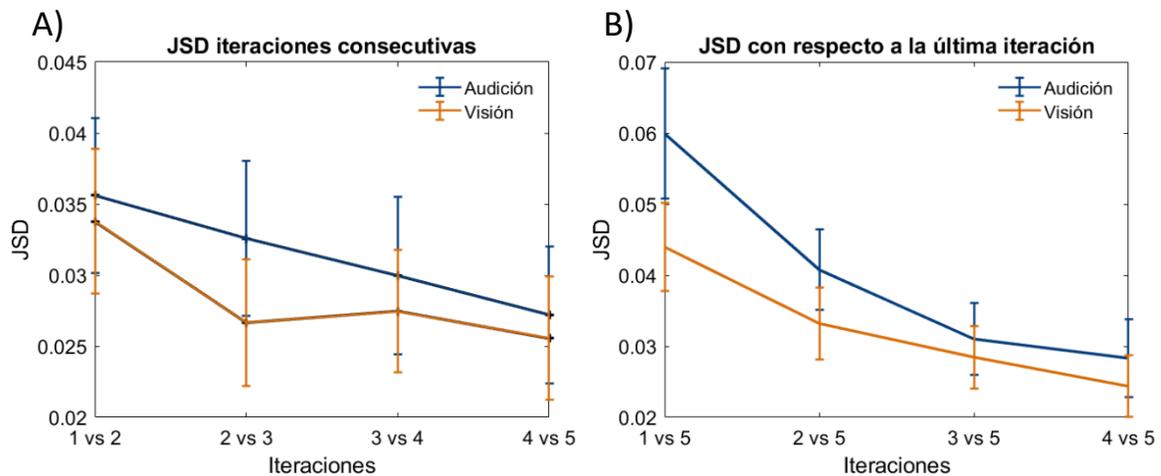


Figura 23. *Distancia por JSD entre iteraciones de ritmos de 3 intervalos.* A) Se muestra la distancia entre las distribuciones de iteraciones consecutivas. B) Distancia entre cada una de las iteraciones y la distribución de la última iteración. En el eje de las y se representa la distancia entre distribuciones, en el eje x se representan las diferentes combinaciones entre iteraciones.

VIII. Discusión y Conclusiones

Con el objetivo de conocer más las características de los ritmos intrínsecos a un sujeto implicado en la ejecución de movimientos rítmicos se realizó una tarea de psicofísica de la reproducción de ritmos complejos por iteraciones. Una de las ventajas de utilizar una tarea de este tipo es que el ritmo presentado en las iteraciones subsecuentes a la primera depende de la ejecución del individuo y adicionalmente este ritmo se repite múltiples veces lo que posibilita la aparición del sesgo intrínseco del individuo [51]. En nuestro protocolo además de utilizar este tipo de tarea se confirmó que el desempeño de los sujetos fuera adecuado. De esta manera, los resultados obtenidos a lo largo de todo el proyecto muestran por una parte la habilidad de sincronización de los participantes y con mayor relevancia la existencia de un sesgo similar para ambas modalidades estudiadas. La reproducción de ritmos complejos marcados con un estímulo visual presenta en efecto distribuciones similares a las encontradas en la modalidad auditiva.

Se analizó por una parte el desempeño motor de los participantes con el fin de confirmar su habilidad para sincronizarse adecuadamente a los estímulos utilizados. El desempeño motor de los seres humanos durante la ejecución libre de un ritmo constante muestra que los humanos tienen una preferencia por ritmos que oscilan alrededor de los 500 ms. Al solicitar hacer intervalos de menor duración los seres humanos son capaces de producir intervalos de hasta 166 ms. De esta manera, el conjunto de los resultados obtenidos en la prueba de golpeteo libre se encuentra en acuerdo con la literatura de producción de ritmos espontáneamente y con las limitaciones biomecánicas de los seres humanos. Los participantes tienen entonces el desempeño de base esperado. Los participantes son también capaces de sincronizarse correctamente en ambas modalidades, logran producir asincronías negativas, reproducir los intervalos solicitados (800 o 600 ms) y no hay diferencias significativas en el error constante. En ambas modalidades las asincronías y el error constante son cercanos a 0, por tanto la sincronización de los participantes es muy buena, casi perfecta, y logran producir intervalos lentos y rápidos sin mayor dificultad. Sin embargo, existe una diferencia en la variabilidad de respuesta de los

sujetos. Los golpeteos rítmicos e intervalos producidos muestran una mayor dispersión en la modalidad visual que en la modalidad auditiva y difieren en la asincronía producida según sea el tempo solicitado, lo que sugiere un mejor desempeño en la sincronización auditiva que en la sincronización visual. El conjunto de los resultados del pre-entrenamiento nos permiten afirmar entonces que existe una ligera diferencia entre modalidades aun si los participantes son capaces de sincronizarse correctamente en ambas modalidades.

En nuestro estudio sobre la reproducción de ritmos complejos buscamos también reproducir los resultados encontrados por Jacoby & McDermott. Nuestro hallazgo en la modalidad auditiva con la tarea de reproducción de ritmos complejos por iteraciones concuerda con los resultados precedentes. Las respuestas de los sujetos presentan una convergencia a lo largo de las iteraciones hacia las distribuciones de ritmos complejos ya descritas (0.25, 0.50, 0.33). En efecto al cabo de la quinta iteración la convergencia hacia distribuciones de razones de enteros pequeños es evidente en ambas modalidades. La convergencia de la distribución se puede apreciar en ambas modalidades con claridad en la configuración de ritmos con 3 ISI. Esta configuración cuenta con menos ruido en la producción de los golpeteos mostrando más claramente la reducción de la variabilidad del golpeteo y una menor distancia entre iteraciones para la exactitud de copiado al cabo de la quinta iteración. En la configuración de ritmos de 2 ISI, esta convergencia es menos visible para el caso de la modalidad visual. Además la aglomeración de los resultados no muestra claramente la convergencia hacia una distribución particular al contrario de la configuración con 3 ISI. Podemos afirmar por tanto que los ritmos complejos de tres intervalos generan una mejor definición de las categorías rítmicas hacia las que hay un sesgo. Así la configuración a privilegiar en futuros experimentos con una tarea de este tipo debe ser de ritmos complejos de tres intervalos.

Uno de los hallazgos más importantes en este estudio fue la presencia de un sesgo en la modalidad visual. En la modalidad visual hay un sesgo hacia las razones de 0.25, 0.50 y 0.33 como en la modalidad auditiva. Este sesgo está presente a pesar

de que se puede notar la dificultad en reproducir ritmos marcados visualmente por la variabilidad entre modalidades. Una diferencia de desempeño entre las dos modalidades existe como se vio durante el pre-entrenamiento y la prueba aunque los sujetos sean capaces de sincronizarse correctamente a los estímulos auditivos o visuales. Ambas modalidades poseen en efecto distribuciones equivalentes. Una explicación posible a este resultado puede ser el establecimiento de un *priming* a lo largo de la tarea debido a la falta de aleatoriedad entre modalidades y entonces este resultado sería ocasionado por un efecto de orden entre tareas. Por otra parte, podemos también pensar que las distribuciones encontradas en la modalidad visual son la consecuencia de compensar la dificultad de la tarea visual. Se ha visto en estudios precedentes que los seres humanos son malos para sincronizarse a metrónomos visuales [23, 49, 52, 34] y entonces se puede hipotetizar que los o el mecanismo para controlar el seguimiento de los pulsos de un ritmo visual sería diferente al utilizado en la modalidad auditiva. En nuestro caso, podemos pensar que los participantes establecen al cabo de pocas iteraciones el sesgo auditivo para facilitar su sincronización a los estímulos visuales. Por consecuente, para verificar si en efecto las distribuciones preferentes encontradas en la modalidad visual son parecidas a las de la modalidad auditiva espontáneamente habría que aleatorizar el orden en que se llevan a cabo las dos modalidades y aumentar el número de iteraciones para la modalidad visual.

A. Diferencias entre especies

La existencia de un sesgo hacia métricas de enteros pequeños en ambas modalidades extiende las cuestiones en el estudio de la ejecución de ritmos no isócronos a una perspectiva biológica. Se sabe que diferentes animales son capaces de sincronizarse a ritmos marcados con estímulos de diferentes modalidades [53, 54, 55]. De este modo, se abre la pregunta sobre la evolución de la capacidad de sincronización en los primates.

Los primates no humanos presentan también una capacidad de sincronización, ya que les es posible planear y controlar los movimientos con el fin de sincronizarse a

un estímulo [54, 56, 57, 58], pueden así cuantificar intervalos temporales y hacer secuencias de movimientos complejos. Los primates no humanos tienen por tanto capacidades para detectar la regularidad en un ritmo, producir movimientos rítmicos y adaptarse a los cambios en el ritmo lo que hace pensar en la posibilidad de la existencia de un mecanismo previo (*prior*) que permite adecuar la respuesta de los primates no humanos a los estímulos pues la respuesta de estos animales no es simplemente reactiva.

Según la teoría de la evolución audiomotora gradual (*gradual audiomotor evolution hypothesis*) la capacidad de inducción rítmica se desarrolló gradualmente en los primates por medio de cambios anatomofuncionales para integrar información sensorimotora por diferentes áreas en el cerebro [14]. De esta forma los circuitos que participan en la percepción y ejecución de intervalos únicos son similares en ambos primates, pero la capacidad de inducción rítmica utilizaría diferentes redes. Este último aspecto se encuentra reforzado por el hecho de que los primates no humanos, al contrario de los seres humanos, presentan una mejor sincronización a metrónomos visuales en comparación con metrónomos auditivos en tareas de sincronización secuencial a tempos isócronos [54, 15, 59].

El estudio de la capacidad de sincronización a secuencias de intervalos no isócronos en los primates no humanos resulta de gran interés para conocer más sobre la habilidad de inducción rítmica en los primates no humanos y sobre la evolución de la integración sensorimotora en la utilización de la información temporal. Adicionalmente análisis recientes del comportamiento y de la actividad neuronal en primates no humanos han mostrado la existencia de la utilización de mecanismos basados en creencias previas y en la evidencia sensorial (aproximación bayesiana) durante la reproducción y estimación de intervalos temporales [60]. Podemos por consiguiente plantear la posibilidad de encontrar un sesgo hacia razones isócronas en la modalidad visual si el protocolo empleado en este proyecto se utiliza con primates no humanos. De ahí la importancia de la investigación sobre las características de los ritmos intrínsecos en primates no humanos, pues este tipo de estudio favorecerá el desarrollo de teorías más

completas sobre los mecanismos que intervienen en la percepción y ejecución de ritmos.

B. Conclusión

Nuestro dispositivo experimental reproduce los resultados ya obtenidos por Jacoby&McDermott en la modalidad auditiva y además obtiene resultados parecidos para la modalidad visual los que deben ser explorados y profundizados con más detalle. Adicionalmente, el tipo de tarea utilizada en este proyecto puede servir más tarde en el estudio de la evolución de la capacidad de sincronización en los primates y validar con esto modelos animales en los que se pueda estudiar la neurofisiología de los ritmos complejos.

IX. Bibliografía

1. Merchant, H.&De Lafuente, V. (eds.) (2014). *Neurobiology of Interval Timing*. New York: Springer.
2. Churchland, P. (1992). Time and time again. En Churchland, P.&Sejnowski, T. S. *The computational brain* (pp379-381). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
3. Patel, A.D. et al (2005). The influence of metricality and modality on synchronization with a beat. *Exp Brain Res*, 163, 226–238.
4. Janata, P.&Grafton, S. T. (2003). Swinging in the brain: shared neural substrates for behaviors related to sequencing and music. *Nat Neurosci* **6**, 682–687.
5. Maes, P.J. et al. (2014). Action-based effects on music perception. *Front. Psychol.*, 4, 1008.
6. Carr, C.E. (1993). Processing of temporal information in the brain. *Annu. Rev. Neurosci.*, 16:223-243.
7. Malapani, C.&Fairhurst, S. (2002). Scalar Timing in Animals and Humans. *Learning and Motivation*, 33, 156–176.
8. Penhune, V.B.&Zatorre, R. (2019). Rhythm and time in the premotor cortex. *PLoS Biol* 17(6): e3000293.
9. Ravignani, A. et al. (2019). Rhythm in speech and animal vocalizations: a cross-species perspective. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1453: 79-98.
10. Aschersleben, G. et al. (2004). 6 A Psychophysical Approach to Action Timing. En Christian Kaernbach et al. (Ed), *Psychophysics beyond sensation: laws and invariants of human cognition* (pp.117-136). Estados Unidos: Lawrence Erlbaum Associates.
11. Repp, B.H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12 (6), 969-992.
12. Patel, A.D. (2014). The Evolutionary Biology of Musical Rhythm: Was Darwin Wrong? *PLoS Biol* 12(3): e1001821.
13. Ross, J.M.&Balasubramaniam, R (2014). Physical and neural entrainment to rhythm: human sensorimotor coordination across tasks and effector systems. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 576, 1-6.
14. Merchant, H.&Honing, H. (2014). Are non-human primates capable of rhythmic entrainment? Evidence for the gradual audiomotor evolution hypothesis. *Frontiers in Neurosciences*, 7, 274, 1-8.
15. Merchant, H. et al (2015). Finding the beat: a neural perspective across humans and non-human primates. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 370, 20140093.
16. Repp, B.H.&Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological Research*, 68, 252–270
17. Jacoby & McDermott (2017). Integer Ratio Priors on Musical Rhythm Revealed Cross-culturally by Iterated Reproduction. *Current Biology*, 27, 1–12.
18. Darlington, T.R. et al (2018). Neural implementation of Bayesian inference in a sensorimotor behavior. *Nature Neurosciences*, 21, 1442-1451.

19. Lauwereyns, J. (2010). *The Anatomy of Bias: How neural circuits weigh the options*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
20. Kording, K.P. & Wolpert, D.M. (2006). Bayesian decision theory in sensorimotor control. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 10, 7, 319-326.
21. Jazayeri, M. & Shadlen, M.N. (2010). Temporal context calibrates interval timing. *Nature Neuroscience*, 13, 8, 1020-1026.
22. Knill, D.C. (2007). Bayesian Models of Sensory Cue Integration. En Kenji Doya et al. (Ed), *Bayesian brain* (pp.189-206). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
23. Repp, B. & Su, Y. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychon Bull Rev*, 20:403–452.
24. Honing, H. (2013). Structure and Interpretation of Rhythm in Music. En D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music* (p. 369–404).
25. Teki, S. et al. (2012). A unified model of time perception accounts for duration-based and beat-based timing mechanisms. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 90, 1-7.
26. Patel, A.D. & Iversen, J.R. (2014). The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action Simulation for Auditory Prediction (ASAP) hypothesis. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 57, 1-14.
27. Paton, J.J. & Buonomano, D.V. (2018). The Neural Basis of Timing: Distributed Mechanisms for Diverse Functions. *Neuron*, 98, 687-705.
28. Cameron, D.J. & Grahn, J.A. (2016). The Neuroscience of Rhythm. En S. Hallam et al (Ed), *The Oxford Handbook of Music Psychology* (p. 357-368). Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
29. Pressing, J. (1999). The Referential Dynamics of Cognition and Action. *Psychological Review*, 106, 4, 714-747.
30. Hove, M.J. et al. (2013). Synchronizing with auditory and visual rhythms: An fMRI assessment of modality differences and modality appropriateness. *NeuroImage*, 67, 313-321.
31. Merchant, H. et al. (2008). Do We Have a Common Mechanism for Measuring Time in the Hundreds of Millisecond Range? Evidence From Multiple-Interval Timing Tasks. *J Neurophysiol*, 99, 939-949.
32. Zatorre, J.R. et al. (2007). When the brain plays music: auditory–motor interactions in music perception and production. *Nat Rev Neuroscience*, 8, 547-558.
33. Merchant, H. & Georgopoulos, A.P. (2006). Neurophysiology of Perceptual and Motor Aspects of Interception. *J Neurophysiol*, 95, 1–13.
34. Comstock, D.C. et al. (2018). Sensorimotor Synchronization with Auditory and Visual Modalities: Behavioral and Neural Differences. *Front. Comput. Neurosci.* 12:53.
35. Iversen, J.R. et al. (2015). Synchronization to auditory and visual rhythms in hearing and deaf individuals. *Cognition*, 134, 232–244.

36. Kotz, S.A. et al. (2018). The Evolution of Rhythm Processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22,10, 896-910.
37. Merchant, H.&Yarrow, K. (2016). How the motor system both encodes and influences our sense of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 22–27.
38. Nozaradan, S. et al. (2016). Individual Differences in Rhythmic Cortical Entrainment Correlate with Predictive Behavior in Sensorimotor Synchronization. *Sci Rep*, 6, 20612, 1-12.
39. Shalev, N. et al. (2019). Time for What? Breaking Down Temporal Anticipation. *Trends in Neurosciences*, 42, 6, 373-374.
40. Merchant, H. et al. (2008). The Context of Temporal Processing Is Represented in the Multidimensional Relationships between Timing Tasks. *Plos One*, 3, 9, 1-9.
41. Fraisse, P. (1984). Perception and Estimation of Time. *Ann. Rev. Psychol.*, 35, 1-36.
42. Sadaka, M. et al. (2006). The Bayesian Way to Relate Rhythm Perception and Production. *Music Perception*, 23, 3, 269-288.
43. Savage, P.E. et al. (2015). Statistical universals reveal the structures and functions of human music. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 112, 8987-8992.
44. Shi, Z. et al. (2013). Bayesian optimization of time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 17, 11, 556-564.
45. Shi, Z.&Burr D. (2016). Predictive coding of multisensory timing. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 200–206.
46. Desain, P.&Honing, H. (2003). The formation of rhythmic categories and metric priming. *Perception*, 32, 341–365.
47. Aftab et al. (2001). Information theory and the digital age. *Project history MIT*, 6, 933, 1-27.
48. Doya, K.&Ishii, S. (2007). A Probability Primer. En Kenji Doya et al. (Ed), *Bayesian brain* (pp.3-13). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
49. Repp, B.H. (2006). Rate Limits of Sensorimotor Synchronization. *Advances in Cognitive Psychology*, 2, 2-3, 163-181.
50. Schwartz, M.&Kotz, S.A. (2015). The Timing of Regular Sequences: Production, Perception, and Covariation. *J Cogn Neurosci*, 27, 9, 1697-707.
51. Xu, J.&Griffiths T.L. (2010). A rational analysis of the effects of memory biases on serial reproduction. *Cognitive Psychology*, 60, 107–126.
52. Iversen, J.R. et al. (2015). Synchronization to auditory and visual rhythms in hearing and deaf individuals. *Cognition*, 134, 232–244.
53. Patel, A.D. et al. (2009). Experimental Evidence for Synchronization to a Musical Beat in a Nonhuman Animal. *Current Biology*, 19, 827–830.
54. Zarco, W. et al. (2009). Subsecond Timing in Primates: Comparison of Interval Production Between Human Subjects and Rhesus Monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 102, 3191-3202.

55. Cook, P. et al. (2013). A California Sea Lion (*Zalophus californianus*) Can Keep the Beat: Motor Entrainment to Rhythmic Auditory Stimuli in a Non Vocal Mimic. *Journal of Comparative Psychology*, 127, 4, 412–427.
56. Schneider, B.A. et al. (2012). Temporal Production Signals in Parietal Cortex. *Plos Biology*, 10, 10, e1001413.
57. Hattori, Y. et al. (2013). Spontaneous synchronized tapping to an auditory rhythm in a chimpanzee. *Sci. Rep.*, 3, 1566.
58. Takeya, R. et al. (2017). Predictive and tempo-flexible synchronization to a visual metronome in monkeys. *Sci Rep*, 7, 6127, 1-12.
59. Gamez, J. et al. (2018). Predictive rhythmic tapping to isochronous and tempo changing metronomes in the nonhuman primate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1423,1, 396-414.
60. Sohn, H. et al. (2019). Bayesian Computation through Cortical Latent Dynamics. *Neuron*, 103, 1–14.
61. Merchant, H. et al (2013). Neural Basis of the Perception and Estimation of Time. *Annu. Rev. Neurosci.*, 36, 313-336.
62. Coull, J.T. et al (2011). Neuroanatomical and Neurochemical Substrates of Timing. *Neuropsychopharmacology Reviews*, 36, 3–25.
63. Merchant, H. et al (2011). Measuring time with different neural chronometers during a synchronization-continuation task. *PNAS*, 108, 49, 19784-89.
64. Merchant, H. et al (2013). Interval Tuning in the Primate Medial Premotor Cortex as a General Timing Mechanism. *The Journal of Neuroscience*, 33, 21, 9082–9096.