



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

Generalización de Intervalos Temporales:
Psicofísica en Sujetos Humanos

Tesis

que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias
(Neurobiología)

Presenta:

Biol. Ramón Bartolo Orozco

Director de tesis: Dr. Hugo Merchant Nancy

Campus Juriquilla, Querétaro. Julio de 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN.

Se ha sugerido que la cuantificación del paso del tiempo en el rango de los subsegundos depende de un mecanismo neuronal específico. Sin embargo, existe controversia sobre si este mecanismo es distribuido y depende del contexto en el que se temporaliza, o es centralizado y se activa en cualquier circunstancia. El análisis de la transferencia del aprendizaje ha mostrado que el sistema es multimodal, pero sugiere la existencia de subsistemas intervalo-específicos. No obstante, se requiere un estudio más sistemático de la transferencia entre intervalos para comprender la organización fina del mecanismo neural asociado a la cuantificación del tiempo. Para esto, sujetos humanos ($n=35$) fueron entrenados en una tarea de producción de intervalos (delimitados por estímulos auditivos) utilizando un intervalo base (450, 650 o 850 ms) durante 8 días. Además, utilizando un arreglo de 7 intervalos (delimitados por estímulos auditivos o visuales) que rodean a cada intervalo base, se evaluó su desempeño antes y después del entrenamiento. En los tres intervalos base se observó aprendizaje, y ocurrió transferencia hacia intervalos no entrenados y entre modalidades siguiendo una serie de reglas. Los resultados indican que la variable que determina estas reglas es el intervalo base entrenado. Adicionalmente, se encontró que si el sujeto recibe información sobre su desempeño como retroalimentación, se modifican las reglas de transferencia del aprendizaje. Además, la magnitud del efecto de la retroalimentación difiere en los diferentes intervalos base. Todo esto sugiere la existencia de subsistemas intervalo-específicos para intervalos dentro del rango de los cientos de milisegundos.

SUMMARY.

An important amount of evidence suggests the existence of a centralized (multimodal and multipurpose) timing mechanism dedicated to the range of hundreds of milliseconds. Nevertheless, numerous studies have shown that this hypothetical mechanism is not completely centralized, but interval specific and affected by the task sensory-motor context. The analysis of the transfer of learning has shown that this timing mechanism is multimodal, but interval-specific. A more systematic analysis of the transfer of learning between intervals can bring information about the organization of this mechanism into interval-specific sub-systems. The performance of 35 human subjects in an interval production task was evaluated along a training period, using a fixed training interval (450, 650 or 850ms) delimited by auditory markers. Additionally, before (pre-test) and after (post-test) the training period, we evaluated the performance using an array of 7 intervals (delimited by auditory or visual markers) surrounding the corresponding training interval. We assessed whether the learning of an interval transferred to non-trained intervals and/or non-trained modalities by comparing the performance in the post-test with respect to the pre-test. The data showed that transfer of learning across intervals and modalities occurs following a set of rules, in which the principal variable is, apparently, the duration of the training interval. Furthermore, the data suggests that the rules are sensitive to the subject's performance feedback, and that different training intervals have different sensitivity to feedback. Altogether, these results suggest the existence of interval-specific timing mechanisms within the range of the hundreds of milliseconds.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Neurobiología.

Al Dr. Hugo Merchant, por haber dirigido este trabajo, por todas sus enseñanzas.

A los miembros del laboratorio: Ing. Luis Antonio Prado Loeza (Técnico Académico), Sr. Raúl Paulín (Auxiliar de laboratorio), Biol. Wilbert Zarco, Biol. Karyna Yc y Dr. J.C. Méndez. Por el apoyo (técnico y/o humano) que en su oportunidad me brindaron.

A los miembros de mi comité tutorial: Dr. Víctor Ramírez-Amaya y Dr. Miguel Condés-Lara, por todas las críticas hechas a este trabajo a lo largo de su desarrollo.

A los miembros del jurado, por la revisión del manuscrito final de esta tesis y por sus valiosos comentarios y aportaciones.

Al personal de la Unidad de Enseñanza del INB: M.C. Leonor Casanova y C. Yolanda Orduña.

Al personal de la Biblioteca del Campus Juriquilla (Coordinadora: Lic. Pilar Galarza)

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría. No. CVU: 207902.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por creer en mí.

A mis amigos, por estar ahí en los momentos más difíciles, por compartir conmigo este camino.

INDICE

I.	Introducción.	1
	A. Escalas de magnitud de intervalos de tiempo.	2
	B. Aprendizaje de percepción y transferencia del aprendizaje.	4
	C. Evidencia de un mecanismo común	6
	1. Análisis de pendiente	8
	2. Análisis de correlación	9
	3. Análisis de la transferencia del aprendizaje	11
	D. Evidencia de un sistema distribuido	13
	E. Correlatos neurales del procesamiento de información temporal	15
	1. Estudios farmacológicos	16
	2. Neuroimagenología funcional	18
	3. Estudios en lesiones y estados patológicos	21
II.	Planteamiento del problema.	25
III.	Hipótesis.	25
IV.	Objetivos.	26
V.	Sujetos y Métodos.	26
	A. Tarea	27
	B. EXPERIMENTO 1. Pre- y post-entrenamiento sin retroalimentación.	
	1. Procedimiento.	27
	2. Análisis de datos.	
	a. Cálculo de la variabilidad	29
	b. Curvas de aprendizaje	29
	c. Curvas de transferencia del aprendizaje	30
	d. Correlación entre aprendizaje y transferencia	31
	C. EXPERIMENTO 2. Pre- y post-entrenamiento con retroalimentación.	
	1. Procedimiento.	32
	2. Análisis de datos.	33

VI.	Resultados	
	A. EXPERIMENTO 1. Pre- y post-entrenamiento sin retroalimentación.	33
	1. Curvas de aprendizaje de la producción de intervalos	33
	2. Curvas de transferencia del aprendizaje	36
	a. Fase de prueba de la tarea PIU	36
	b. Fase de instrucción de la tarea PIU	40
	c. Comparación de fase de prueba vs. fase de instrucción de la tarea PIU	43
	3. Correlación entre la cinética del aprendizaje y la magnitud de la transferencia.	45
	B. EXPERIMENTO 2. Pre- y post-entrenamiento con retroalimentación.	46
	1. Comparación de las curvas de transferencia del aprendizaje de las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”.	46
VII.	Discusión.	51
	A. Cinética del aprendizaje de la producción de intervalos	52
	B. Generalización del aprendizaje entre intervalos	53
	C. Transferencia del aprendizaje bajo diferentes condiciones de retroalimentación.	56
VIII.	Conclusión.	57
IX.	Referencias.	58
X.	Índice de figuras y tablas	62
XI.	Apéndice I. Forma de consentimiento informado.	64

I. INTRODUCCIÓN.

El tiempo es una variable de gran importancia en la realización de nuestras actividades cotidianas, desde los ciclos sueño-vigilia, hasta la coordinación motora durante la marcha, la articulación de las palabras, la apreciación y/o interpretación musical y la práctica deportiva. La activación minuciosamente orquestada de numerosos músculos es crítica para la expresión de la conducta. Así, es fundamental que la activación sucesiva de grupos musculares ocurra con un alto nivel de precisión temporal y que la duración de la activación sea adecuada. Para esto, se requiere el procesamiento de información temporal.

Es claro que muchas de las actividades de los animales (humanos y no humanos) tienen metas explícitamente temporales o requieren de información temporal precisa para ser realizadas correctamente. Por ejemplo, la interceptación de un blanco en movimiento requiere que el sujeto utilice de manera anticipatoria la estimación del tiempo, de tal forma que pueda estimar el tiempo que le resta al blanco para arribar a la zona de interceptación con respecto al tiempo que le resta al efector para llegar a la misma zona y así alcanzar al blanco (Merchant y Georgopoulos, 2006).

Por otro lado, la percepción del movimiento requiere del procesamiento de información temporal, entendiendo percepción como el proceso a través del cual la información sensorial es integrada, reconocida e interpretada. Esta puede ser información proveniente de una modalidad sensorial específica o una integración de información proveniente de diferentes modalidades. El procesamiento de información temporal permite también el reconocimiento de patrones, en este sentido, el caso del lenguaje es particularmente interesante desde el punto de vista del procesamiento de la información temporal. La información temporal sobre el inicio de la voz (inicio de la vibración de las cuerdas vocales respecto al inicio de la liberación del aire, como entre “ba” y “pa”), sobre la duración de transiciones de timbre (como entre “ba” y “gua”) y sobre la duración de silencios entre vocales y consonantes (como entre “sa” y “sta”) es indispensable para la discriminación de las vocales (Mauk y Buonomano, 2004). Además, los mecanismos de producción de los patrones sonoros que conforman el lenguaje deben coordinar en el tiempo a la maquinaria motora que produce dichos sonidos (garganta, diafragma, cuerdas vocales, lengua, labios, etc.). Esto nos da una idea de la importancia y complejidad del procesamiento de la

información temporal en la realización de tareas que requieren la coordinación precisa de múltiples movimientos.

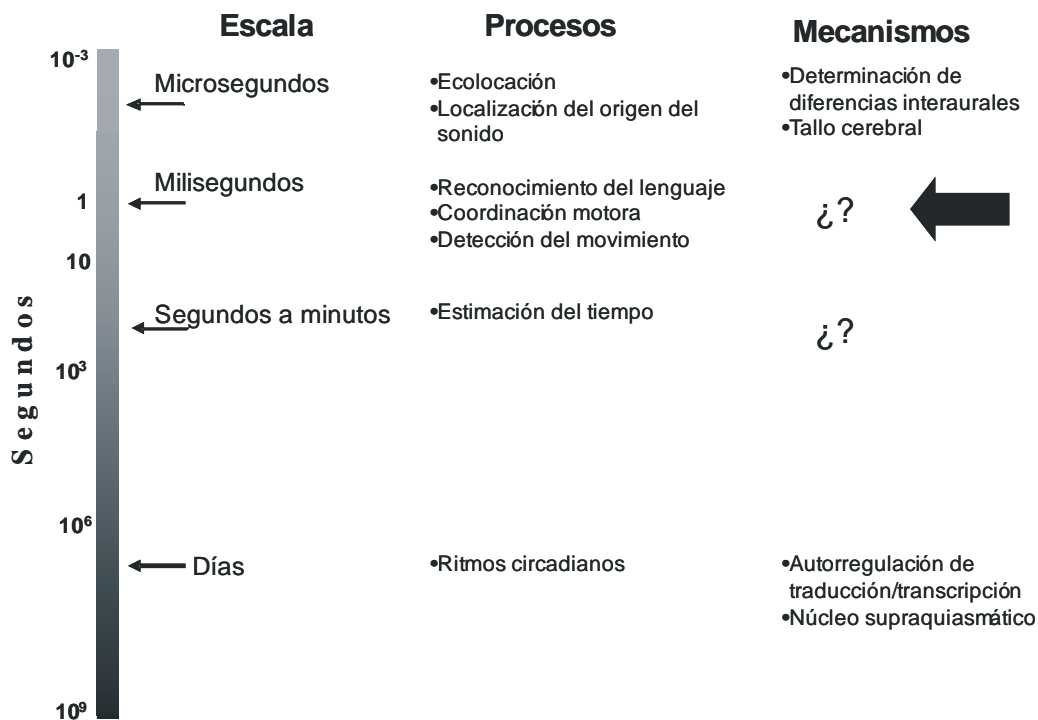
A. ESCALAS DE MAGNITUD DE INTERVALOS DE TIEMPO.

Muchas conductas se sincronizan a eventos con organización temporal periódica, como es el caso de los ritmos circadianos (Moore-Ede, Sulzman y Fuller, 1982). Sin embargo, muchos eventos importantes no están sincronizados a eventos externos periódicos, por lo que se requiere de mecanismos capaces de cuantificar intervalos temporales que comienzan y terminan en momentos arbitrarios. Esta es la característica que diferencia el procesamiento de intervalos temporales (en el rango de los cientos de milisegundos y segundos) del procesamiento de información temporal periódica.

Para manejar la información temporal, los organismos han desarrollado diferentes sistemas que actúan a través de al menos 10 órdenes de magnitud, con diferentes niveles de precisión. Se ha sugerido la existencia de un mecanismo específico para el procesamiento de intervalos temporales en cada rango de magnitudes. Esto ha quedado claramente expuesto en el caso de los ritmos circadianos (Young, 2001), y se dispone de evidencia que apunta hacia la existencia de un mecanismo para el procesamiento de la información temporal en el rango de cientos de milisegundos. La evidencia psicofísica sugiere que es un mecanismo distinto del que participa en el rango de decenas de milisegundos y del que opera en el rango de segundos a minutos (Mauk y Buonomano, 2004). Con base en los mecanismos que subyacen a la estimación del tiempo en cada rango de magnitudes de intervalo podemos hablar de 4 órdenes de magnitud (Figura 1):

- 1) Los sistemas circadianos operan en intervalos de tiempo cercanos a 24 horas, controlan los ciclos sueño-vigilia así como otros parámetros metabólicos y de adecuación conductual a eventos temporales periódicos en este orden de magnitud (Moore-Ede *et al.* 1982).
- 2) Intervalos temporales que van de segundos a minutos, en este orden de magnitud se lleva a cabo la estimación del tiempo que depende del control cognitivo (Rammsayer y Lima, 1991) y que puede ser verbalizada.

- 3) Intervalos temporales de decenas a cientos de milisegundos. En este orden de magnitud el procesamiento de la información temporal se lleva a cabo mayormente de manera automática (al igual que la percepción). Es probablemente el nivel de procesamiento más sofisticado y el menos comprendido. Prácticamente todas las referencias temporales para el reconocimiento y generación del lenguaje, la apreciación y producción musical caen en este rango, además de los procesos de control y coordinación fina del movimiento (Buhusi y Meck, 2005; Buonomano y Karmarkar, 2002; Mauk y Buonomano, 2004).
- 4) Procesamiento en el rango de microsegundos. En este nivel se produce el reconocimiento de diferencias interaurales para la localización del origen del sonido y la ecolocación (Carr, 1993; Mauk y Buonomano, 2004).



Modificado de Mauk y Buonomano (2004)

Figura 1. Escalas de procesamiento de la información temporal. Se conocen mecanismos subyacentes al procesamiento de la información en el rango de microsegundos y en el rango de días. No obstante, en los rangos de milisegundos y de segundos a minutos se tiene poca información. El rango de interés en este trabajo es el de los cientos de milisegundos.

Es importante señalar que esta clasificación no pretende delimitar categorías sin traslape, ni tampoco categorías indivisibles.

Como ya se mencionó, el orden de magnitud del que se tiene menos información referente a los mecanismos neurales que subyacen al procesamiento de la información temporal es el rango de los cientos de milisegundos, por tanto es el rango que nos interesa estudiar en el presente trabajo. En adelante, nos enfocaremos a este orden de magnitud.

B. APRENDIZAJE DE PERCEPCION Y TRANSFERENCIA DEL APRENDIZAJE.

Se considera que el procesamiento de la información temporal sobre un objeto sensorial, en el rango de las decenas a cientos de milisegundos, ocurre en un nivel de percepción (Buonomano y Karmarkar, 2002). Numerosos trabajos reportan procesos de aprendizaje en la percepción de la duración de intervalos de tiempo (Karmarkar y Buonomano, 2003; Nagarajan *et al.*, 1998; Meegan *et al.*, 2000; Wright *et al.*, 1997). El aprendizaje que se reporta se manifiesta como una mejoría en la ejecución de tareas de discriminación de intervalos, que básicamente consisten en preguntar a los sujetos cuál de dos intervalos a comparar es más largo. Además, en esos trabajos se reporta que el aprendizaje de una tarea de percepción se transfiere siguiendo patrones específicos (ver apartado *C.3. Análisis de la transferencia del aprendizaje*). A continuación se resumen las principales características de este tipo de aprendizaje y las implicaciones que tiene su análisis en la búsqueda del sustrato neuronal que subyace a la cuantificación del tiempo.

El aprendizaje de percepción se refiere a un cambio en el desempeño en tareas de percepción, usualmente una mejoría, como resultado del entrenamiento. Dicho cambio en el desempeño persiste durante mucho tiempo (al menos durante varias semanas), esto lo distingue de otras alteraciones de la percepción que resultan de aplicar repetidamente un estímulo (*e.g.* habituación o sensibilización) (Fahle, 2005). El aprendizaje de percepción es altamente específico para determinadas características de un estímulo o tarea (Tsodyks y Gilbert, 2004) y puede ser caracterizado con técnicas psicométricas.

Uno de los modelos más sencillos que tratan de explicar el aprendizaje de percepción se basa en la asunción de que el sistema nervioso tiene una capacidad de cómputo limitada, de modo que solo determinadas variables que caracterizan a un estímulo pueden ser procesadas en paralelo. En este contexto, el aprendizaje de percepción se podría entender como el proceso a través del cual el sistema nervioso busca las variables que brindan la mayor cantidad de información sobre un

determinado estímulo que resulte útil para la resolución de una tarea específica (Liu y Weinshall, 2000). Este modelo requiere de repeticiones múltiples para obtener el resultado esperado (una mejor resolución de una tarea de percepción), por lo que no explica aquellos casos en los que el aprendizaje ocurre con un número pequeño de repeticiones, sin embargo, sí explica la generalización del aprendizaje hacia tareas con requerimientos de percepción similares.

También se ha propuesto que el aprendizaje de percepción puede deberse a una expansión de la representación cortical de las dimensiones del estímulo entrenado, v. gr. mayor número de células en el circuito, (Gaffan, 1996) y conceptos similares se han sugerido para el aprendizaje motor (Classen *et al.*, 1998). Aunque más bien, en vez de pensar en una mayor representación en términos de número de células, podemos pensar en cambios sutiles en la manera en la que las células codifican la información, que se reflejan en cambios en el patrón de variación de la respuesta en función de una característica del estímulo –v. gr. cambios en la curva de sintonización- (Paz, Wise y Vaadia, 2004). Esto concuerda con el modelo que asume la búsqueda de las variables que proporcionan mayor información sobre el estímulo.

Como se ha mencionado, en determinados casos se presenta una transferencia del aprendizaje de percepción, y lo aprendido puede ser utilizado en nuevos contextos, el efecto de la transferencia es llamado “generalización”. La transferencia del aprendizaje de percepción ocurre sobre la base de que características intrínsecas a un estímulo, diagnosticadas de la información sensorial, tienden a ser agrupadas para su procesamiento subsecuente, de modo que cuando un estímulo presenta características similares a las del estímulo aprendido (Figura 2), activará el mismo circuito neuronal sobre el que se basó el aprendizaje (Edelman e Intrator, 2002). Así, el análisis de las características de la transferencia del aprendizaje hacia nuevos contextos nos permite inferir sobre la organización de los sistemas que procesan la información en cuestión y sobre como son utilizadas sus respuestas de salida. Lo mismo aplica cuando hablamos de aprendizaje motor (Poggio y Bizzi, 2004). En secciones posteriores se resumen los principales hallazgos hechos utilizando este enfoque.

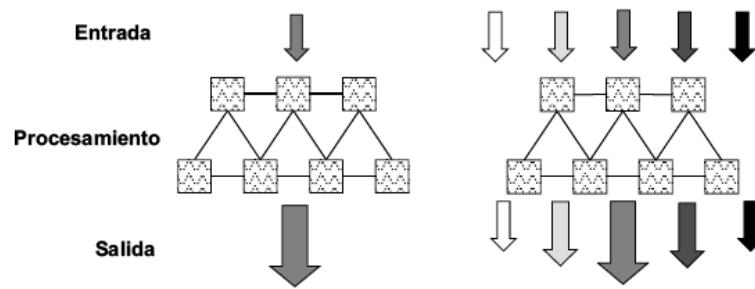


Figura 2. Transferencia del aprendizaje de percepción. El circuito se encarga de procesar una determinada característica de un estímulo. El entrenamiento incrementa la eficiencia del procesamiento de esa información (izquierda). Al probar el circuito utilizando estímulos que difieren sistemáticamente del estímulo utilizado en el entrenamiento, la eficiencia para el procesamiento de estos estímulos habrá aumentado en función a su similitud con el estímulo utilizado en el entrenamiento (derecha).

C. EVIDENCIA DE UN MECANISMO COMUN PARA LA CUANTIFICACION DEL TIEMPO.

Se han usado dos tipos de procedimientos conductuales para investigar la medición de intervalos temporales en el rango de los milisegundos y los segundos, en humanos y otros animales: tareas de percepción y tareas de producción de intervalos temporales. Los datos obtenidos a partir de esos ensayos reflejan una propiedad intrínseca al procesamiento temporal: la propiedad escalar. Típicamente, las respuestas de un participante en una tarea de producción o percepción de intervalos siguen una distribución normal alrededor del intervalo a medir (Figura 3A), se le llama “propiedad escalar” al hecho de que la dispersión de la distribución es proporcional a la duración del intervalo estándar (Buhusi y Meck, 2005; Gibbon, Malapani y Gallistel, 1997).

Lo anterior coincide con la Ley de Weber. Dicha ley, establecida por Ernst Weber en 1831 y generalizada por Fechner tiempo después, establece una relación entre la intensidad física de un estímulo y la experiencia sensorial que provoca, por lo que se conoce también como “Ley psicofísica”. La ley de Weber establece que la proporción entre la intensidad de un estímulo y el incremento de la intensidad necesario para que la diferencia sea perceptible es una constante (Smith, 2000), usualmente llamada “fracción de Weber”. En la literatura sobre el procesamiento de la información temporal, se le ha dado por significado a la ley de Weber que la variabilidad de una distribución de intervalos temporales muestra un coeficiente de variación (proporción entre la

desviación estándar y la media de la distribución) constante, y que la fracción de Weber equivale a la razón del intervalo estimado (tiempo subjetivo) entre el intervalo estándar (tiempo físico).

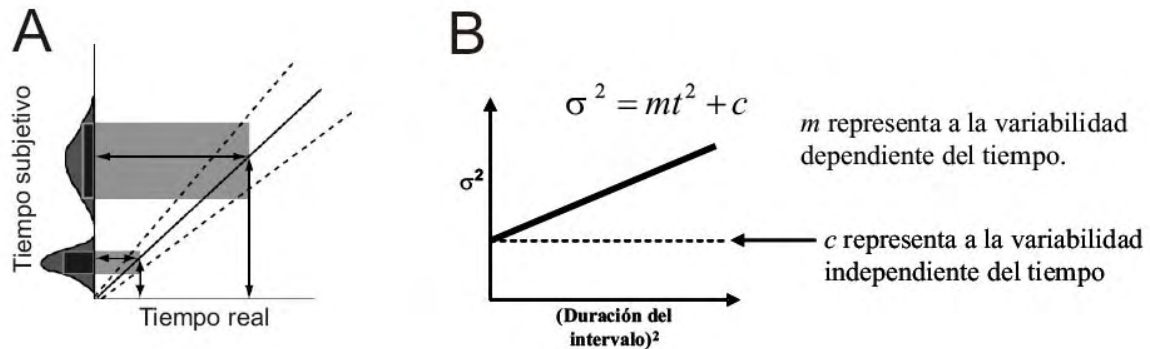


Figura 3. Propiedad escalar y análisis de pendiente. **A.** Esquema que ilustra la propiedad escalar. Las respuestas de un sujeto (tiempo subjetivo) en una tarea de temporalización siguen una distribución normal alrededor del intervalo blanco (tiempo real), y la amplitud de esta distribución se incrementa en función de la duración del intervalo blanco (redibujado de Gibbon *et al.*, 1997). **B.** Análisis de pendiente. La variabilidad (σ^2) de las respuestas de un sujeto en una tarea de temporalización puede ser modelada por una recta. Esto permite disociar 2 componentes de la variabilidad, un componente constante, independiente del tiempo que en el modelo es representado por la constante c , y otro componente que se incrementa en función del tiempo siguiendo la propiedad escalar, que en el modelo es representado por la pendiente m de la recta.

La ubicuidad de la propiedad escalar hizo pensar en la existencia de un mecanismo dedicado al procesamiento de la información temporal. Se han propuesto varios modelos para tal mecanismo, de ellos, el más robusto hasta ahora es el modelo “Marcapaso-Acumulador” (MpA). En el modelo MpA se asume la existencia de 3 instancias, reloj, memoria y toma de decisión (Figura 4). La instancia de reloj consta de un marcapaso que genera pulsos constantemente y de manera regular. Un acumulador almacena temporalmente (*v. gr.* “cuenta”) el número de pulsos emitidos por el marcapaso, un interruptor (en sentido teórico) controla el inicio y el fin del conteo, y es operado por el inicio del ensayo (encendido) y el término del mismo (apagado). Entonces, el número de pulsos es almacenado temporalmente en memoria de trabajo y de ahí puede utilizarse para formar una memoria de referencia, esto representa el tiempo subjetivo. La instancia de toma de decisiones compara el tiempo subjetivo en la memoria de referencia con un segundo tiempo proveniente del acumulador (lectura de reloj) y genera una respuesta apropiada. El modelo MpA implementa la Teoría Escalar (Gibbon *et al.*, 1997) y explica la propiedad escalar como resultado de una acumulación del error, que es proporcional a la magnitud del intervalo estimado. Esto se cumple al menos en intervalos que van de 200ms hasta ~1000ms (Mauk y Buonomano, 2004).

Sobre la base de la posible existencia de un mecanismo común, se han utilizado diferentes herramientas metodológicas para analizar los mecanismos de medición del tiempo. Entre los principales métodos analíticos están: el análisis de pendiente, el análisis de correlación y el análisis de la transferencia del aprendizaje. Estos métodos utilizan la variabilidad de la ejecución en tareas que involucran la temporalización de la conducta, a nivel motor o de percepción. Dado que la variabilidad de la conducta se incrementa en función del intervalo a medir, se deduce que la variabilidad de la ejecución refleja el funcionamiento del mecanismo de cuantificación temporal. En las siguientes secciones se analizan resultados obtenidos utilizando estas metodologías.

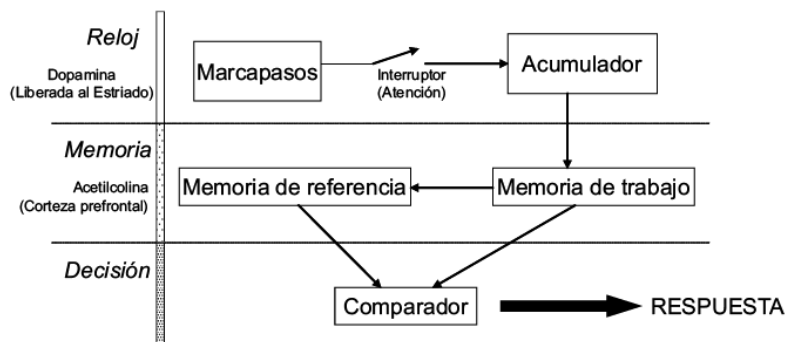


Figura 4. Modelo Marcapasos-Acumulador. Se muestran las 3 instancias teóricas y se indican las estructuras que han sido asociadas a estas instancias a través de estudios farmacológicos. En la instancia de reloj se asume la existencia de un marcapaso que emite pulsos de manera constante, que son almacenados en un acumulador cuando se activa un interruptor (atención). El acumulador envía la información a la instancia de memoria, donde está implicada la memoria de trabajo y una instancia de memoria de referencia que almacena información enviada por la memoria de trabajo. Un comparador lee la información almacenada en la instancia de memoria y compara las lecturas sometiendo a una regla de decisión para emitir una respuesta.

1. Análisis de pendiente.

La comparación de las fracciones de Weber, obtenidas a partir de diferentes tareas de ejecución (producción) de intervalos temporales, ha mostrado ser útil para analizar las propiedades del sistema de medición de intervalos temporales. Se ha propuesto que hay dos fuentes de variabilidad en tareas que implican tiempo (Figura 3B): una fuente dependiente de la duración del intervalo que, se asume, refleja el funcionamiento del reloj; y además un componente independiente de la duración que refleja la implementación de procesos periféricos (Ivry y Hazeltine, 1995) como la detección de los estímulos, la planeación de la respuesta motora, etc. En este contexto, una manera de capturar de manera directa el componente dependiente de la duración consiste en hacer una regresión lineal de la varianza de los intervalos producidos contra

el cuadrado de los intervalos estándar, relación conocida como “relación de Weber”. La constante representa, en este modelo, a los elementos independientes del tiempo relacionados con la ejecución de una tarea psicomotora, como son: la implementación motora, la precisión de la representación del intervalo en la memoria, la atención y un número indeterminado de procesos periféricos. La pendiente de la regresión representa a la variabilidad derivada de los elementos dependientes del tiempo (Gibbon *et al.*, 1997), es decir, al mecanismo de temporalización.

De modo que, si dos tareas comparten un mecanismo común, al graficar la varianza contra el cuadrado de los intervalos estándar se espera que ambas tareas tengan la misma pendiente. Es sumamente importante hacer notar el hallazgo de pendientes comunes para tareas de percepción y de producción de intervalos. Ivry y Hazeltine (1995) encontraron que una tarea de discriminación auditiva de intervalos (percepción) y una tarea de producción de intervalos golpeando con el dedo índice comparten la misma pendiente.

2. Análisis de correlación.

Otra estrategia cuantitativa para poder comparar la ejecución de sujetos en varias tareas que involucran temporalización es la correlación de la variabilidad de la conducta en estas tareas. La suposición que se hace en este caso es que si existe un mecanismo de temporalización o “reloj” común, los sujetos tendrán una variabilidad consistente a lo largo de diferentes paradigmas. Así se ha demostrado que existe una correlación significativa en la variabilidad de la ejecución de tareas de producción y percepción de intervalos (Keele *et al.*, 1985), donde por ejemplo, los sujetos que mostraron alta variabilidad en una tarea de producción de intervalos, también presentaron una alta variabilidad en una tarea de percepción de los mismos intervalos. Por lo tanto, utilizando los análisis de la pendiente y de la correlación de la variabilidad de la conducta en diferentes contextos, se ha sugerido la existencia de un mecanismo común para la cuantificación del tiempo en la escala de los cientos de los milisegundos (Ivry y Hazeltine, 1995).

Un estudio reporta correlaciones importantes entre diferentes tareas de ejecución y entre intervalos diferentes (Robertson, *et al.*, 1999). En ese trabajo, se midió la precisión con la que sujetos humanos ejecutaban tareas de dibujo con diferentes requerimientos motores en un solo intervalo: dibujar círculos (DC), líneas (DL), o figuras “8”, con una periodicidad fija. Una tarea

con requerimientos motores más simples (golpeo rítmico con el dedo índice: GR) se realizó con dos intervalos diferentes. Se encontró una correlación apenas significativa entre el GR entre 2 intervalos distintos, y no se encontró correlación entre el GR y ninguna de las tareas de dibujo cuando se realizaron con periodicidad idéntica. Más interesante aún es el hallazgo de correlaciones fuertes entre tareas de dibujo. En el mismo trabajo se examinó el desempeño de sujetos en tareas con demandas motoras cualitativamente similares pero cuantitativamente distintas, es decir, se probaron tareas de DC y DL en las que variaba el radio del círculo a dibujar, además del GR, utilizando dos intervalos de prueba. No se encontró correlación de la variabilidad de la ejecución al dibujar figuras iguales pero de diferente tamaño, y nuevamente se encontró una correlación apenas significativa para el golpeo rítmico con 2 intervalos. Se concluye que no hay correlación entre la ejecución de GR y la ejecución de tareas con mayores requerimientos motores, lo que sugiere que los mecanismos asociados a la temporalización en ambos tipos de tareas son distintos.

Adicionalmente, en el mismo estudio se investigó la posible correlación en la ejecución del GR o la tarea DC entre diferentes intervalos (Robertson *et al.*, 1999). Primero, nuevamente no se encontró correlación entre la ejecución de la tarea DC y el GR. No obstante, se hicieron hallazgos importantes en la tarea de GR con diferentes intervalos: se encontró correlación entre la ejecución de los diferentes intervalos y esta correlación tendía a ser más fuerte (sin alcanzar niveles significativos) cuanto más cercanos eran los intervalos, no obstante la exploración de la correlación entre diferentes intervalos no se hizo de manera sistemática.

Una crítica importante a las conclusiones del trabajo mencionado, es que la coordinación temporal de las tareas de dibujo (DC y DL) puede ser una propiedad emergente del movimiento *per se*. Entonces, la falta de correlación entre la tarea de GR y las tareas de dibujo puede deberse a que en efecto no están siendo temporalizadas por el mismo sistema. Una posibilidad es que la temporalización de las tareas de dibujo sea una propiedad emergente del funcionamiento del sistema motor. Esta forma de temporalización no estaría relacionada con el sistema central, por esto, los autores hacen en un trabajo posterior (Zelaznik, Spencer e Ivry, 2002) una distinción entre el tiempo explícito (el producido por el sistema de medición del tiempo) y el tiempo implícito (el producido como consecuencia de la velocidad y la amplitud del movimiento).

Para lograr disociar ambas formas de temporalización, se introdujo una pausa en la tarea de DC (Zelaznik *et al.*, 2002). Se realizaron pruebas de ejecución del GR en un intervalo de 1000ms, y de DC dibujando el círculo en 500ms. Entonces el sujeto hizo una pausa de la misma duración, y entonces dibujó otro círculo. Esta tarea fue llamada “Dibujo Discontinuo de Círculos” (DDC), y es una tarea más parecida al GR pero con requerimientos motores distintos. En este trabajo se utilizó además una tarea de percepción: se presentó a los sujetos un par de intervalos estándar, uno corto y uno largo, y posteriormente se presentaron intervalos de duraciones comprendidas en un rango delimitado por los dos intervalos estándar, pidiendo a los sujetos que los clasificaran como cortos o largos. Esta tarea es conocida como “categorización”. Al analizar los datos se encontró correlación entre las tareas DDC, GR y de discriminación, pero no entre alguna de ellas y la tarea de DC. De esto se deduce que en efecto hay un mecanismo central para la medición del tiempo, pero sólo es utilizado en tareas que requieren de la implementación de temporalización explícita para ser realizadas.

3. Análisis de la transferencia del aprendizaje.

Se ha reportado aprendizaje en tareas de discriminación auditiva de intervalos temporales. Wright *et al.* (1997) realizaron un experimento en el que se entrenó a sujetos humanos en una tarea de discriminación de un intervalo temporal delimitando el intervalo siempre con tonos de la misma frecuencia. Se encontró que el umbral de discriminación disminuyó a través de las sesiones de entrenamiento. Se realizó una prueba previa al entrenamiento en el que se midió el umbral de discriminación para el intervalo a ser entrenado más otros intervalos delimitados por tonos de la misma frecuencia y además el intervalo a ser entrenado delimitado por tonos de diferente frecuencia a la del entrenamiento. La prueba fue repetida después del entrenamiento y reveló que el aprendizaje se transfiere hacia el intervalo entrenado presentado utilizando una frecuencia sonora no entrenada, pero no hacia intervalos no entrenados aunque sean presentados usando la frecuencia entrenada (figura 5A). Entonces, se deduce que el aprendizaje de la discriminación auditiva de intervalos temporales es específico para el intervalo (tiempo-específica), pero no es específico para la frecuencia de los estímulos auditivos utilizados en el entrenamiento.

Se ha reportado también la generalización del aprendizaje de intervalos temporales entre modalidades sensoriales. El entrenamiento en una tarea somatosensorial de discriminación de

intervalos temporales produce una mejoría en una tarea auditiva en intervalos similares al entrenado, la generalización también es espacial: el aprendizaje produce una mejoría en la discriminación de intervalos temporales independientemente de la localización del estímulo en el cuerpo (Nagarajan *et al.*, 1998).

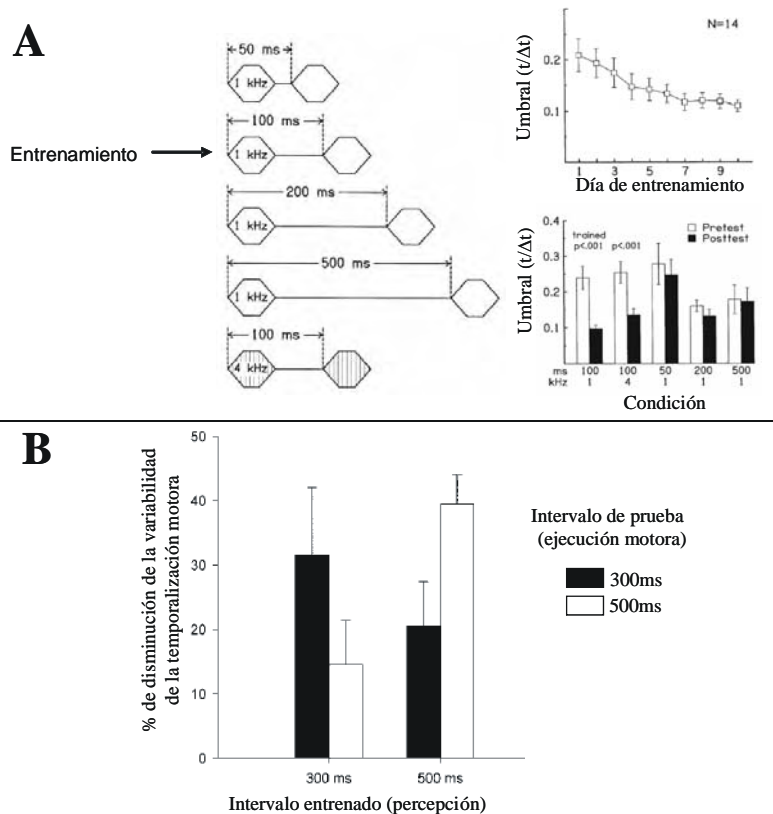


Figura 5. Transferencia del aprendizaje en tareas de cuantificación de tiempo. **A.** A la izquierda se esquematiza el diseño experimental de Wright *et al.* (1997) (detalles en el texto), se señala la condición de entrenamiento. A la derecha, arriba, se muestra la curva de aprendizaje promedio para la condición entrenada. A la derecha abajo se muestran los umbrales de discriminación antes (barras blancas) y después (barras negras) del entrenamiento en cada condición. Modificado de Wright *et al.* (1997). **B.** Resultados del experimento de Meegan *et al.* (2000). Se grafica el porcentaje de disminución de la variabilidad motora, medida en 2 intervalos, en función del intervalo entrenado en una tarea de percepción. Modificado de Meegan *et al.* (2000).

Más interesante aún es el hallazgo descrito en la figura 5B: el entrenamiento en una tarea de discriminación de intervalos delimitados por estímulos auditivos produce una mejoría en una tarea de producción de intervalos temporales, esto es, en una tarea psicomotora (Meegan, Aslin y Jacobs, 2000). El que una tarea de aprendizaje perceptual genere una mejoría en una tarea motora puede considerarse como evidencia de que el procesamiento de la información temporal ocurre en niveles de procesamiento superiores a los sistemas de sensación de los estímulos. Otra implicación de este hallazgo es que para que la transferencia del aprendizaje de una tarea de percepción a una tarea motora ocurra, ambas tareas deberían compartir un mismo mecanismo para la determinación de la duración de intervalos de tiempo.

La interpretación más simple de estos datos es que el sistema es en realidad un conjunto de sistemas intervalo-específicos. Otra posible explicación es que, aunque consideremos un reloj central, el aprendizaje podría ocurrir al nivel de los procesos cognitivos de representación del intervalo estándar, o por una mejoría en el almacenamiento o en la evocación del estándar. Utilizando tareas de discriminación de intervalos que separan dos estímulos auditivos para el entrenamiento, se ha observado que el aprendizaje se transfiere hacia tareas de discriminación de la duración de un tono (Karmarkar y Buonomano, 2003). Esto fue interpretado como evidencia de que el aprendizaje se lleva a cabo al nivel de la percepción del tiempo y no por una mayor precisión de la representación del estímulo. Se observó que el umbral de discriminación para el intervalo que separa dos estímulos es distinto al umbral de discriminación para la duración de un estímulo. Lo anterior evidencia que los requerimientos perceptuales de cada tarea son distintos. Además, los estímulos son distintos entre sí, por lo que la representación de ambos estímulos no puede ser la misma. No obstante, ocurrió transferencia del aprendizaje entre discriminación del intervalo y de la duración. Esto indica que ambas representaciones usan un mecanismo común para determinar el tiempo.

Resumiendo, la evidencia descrita apoya la existencia de un sistema de procesamiento de información temporal, para el rango de los cientos de milisegundos, que es intervalo específico pero multimodal (v. gr. centralizado). Además, sugiere que el mismo sistema es utilizado tanto para la determinar la duración de eventos (percepción de intervalos) como para implementar movimientos temporalizados (producción de intervalos).

D. EVIDENCIA DE UN SISTEMA DISTRIBUIDO.

Además de las evidencias que sugieren la existencia de un sistema centralizado, existen datos que implican que el sistema de medición de intervalos no es un sistema único sino más bien un conjunto de osciladores que son utilizados de manera independiente. Por un lado, en experimentos de producción de intervalos (Golpeo Rítmico) se ha encontrado evidencia de intervalos preferidos, para la ejecución de esa tarea, además se observó la existencia de 2 intervalos preferidos (270 y 450ms), lo que sugiere la existencia de múltiples osciladores (Collyer, Broadbent y Church, 1994).

Más aún, se ha reportado que el entrenamiento intensivo produce cambios en la relación de Weber. En un paradigma de aprendizaje, Kristofferson (1980) reporta cambios en la relación de Weber obtenida a partir de una tarea de discriminación en diferentes intervalos como resultado de la práctica: la variabilidad medida antes del entrenamiento se incrementa de manera lineal a medida los intervalos estándar toman valores de duración mayores, pero después de veinte sesiones de entrenamiento para cuatro diferentes intervalos se observa que la relación de Weber, antes lineal, se convierte en una función escalonada. Esto sugiere igualmente la existencia de múltiples osciladores y que experimentos de aprendizaje en los que se exploren sistemáticamente procesos de generalización pueden brindar aún más información sobre la organización del sistema de temporalización.

Los resultados obtenidos en un estudio reciente (Merchant et al., 2008b) sugieren que el sistema de procesamiento de información temporal para el rango de cientos de milisegundos es un sistema parcialmente distribuido. Se encontró que la variabilidad en la ejecución de tareas que involucran temporalización se define por interacciones complejas entre el contexto sensoriomotor de la tarea (percepción vs. producción), la modalidad sensorial utilizada para delimitar los intervalos (auditiva vs. visual), y el número de intervalos involucrados (un intervalo vs. múltiples intervalos). Se utilizaron 4 tareas: 2 de producción de intervalos y 2 de percepción de intervalos. Cada una de estas categorías incluyó una tarea involucrando un único intervalo y otra con intervalos múltiples. Cada tarea se realizó utilizando, por un lado, estímulos auditivos y, por otro, estímulos visuales, para un total de 8 contextos diferentes. En cada tarea se probaron intervalos con duraciones entre 350ms y 1000ms. El análisis de la variabilidad reveló que el efecto principal sobre la variabilidad está dado por la duración del intervalo (propiedad escalar). Además, la variabilidad también se ve afectada por las interacciones intervalo×tarea, intervalo×modalidad y tarea×modalidad. Se realizó también un análisis de pendiente para cada tarea y modalidad (figura 6). El análisis de varianza de las pendientes obtenidas reveló efectos significativos del contexto sensoriomotor, de la modalidad y del número de intervalos. Además, el análisis de correlación reveló un patrón complejo de asociaciones entre tareas y modalidades en el que el contexto, la modalidad sensorial y el número de intervalos son importantes en la determinación del nivel de correlación entre tareas. En general, las correlaciones fueron más intensas entre tareas iguales con diferentes modalidades. Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple utilizando

2 modelos: uno totalmente distribuido y otro modelo con traslape parcial. Se encontró que el modelo con traslape parcial explica mejor la varianza de los datos que el modelo totalmente distribuido (se obtuvo una R^2 mayor).

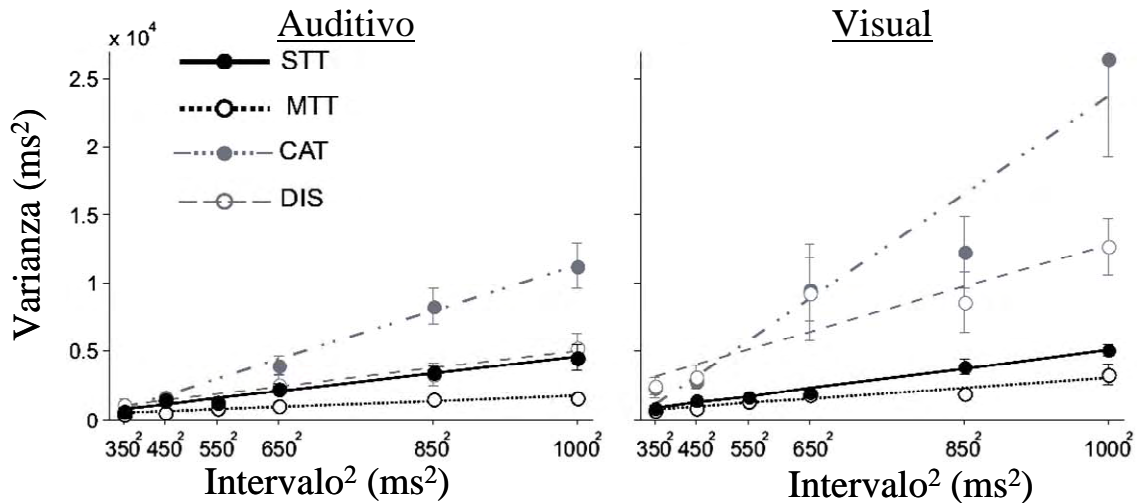


Figura 6. Análisis de pendiente de la variabilidad de tareas de temporalización con distintos contextos sensoriomotrices. Se grafica la varianza en función del cuadrado del intervalo blanco para cada modalidad sensorial utilizada para delimitar intervalos de tiempo. Tareas de producción: STT = tarea de intervalo único, MTT = tarea de múltiples intervalos. Tareas de percepción: CAT = categorización de intervalos, DIS = discriminación de intervalos. Se observa que la pendiente cambia en función del contexto sensoriomotor de la tarea y de la modalidad sensorial (Modificado de Merchant *et al.*, 2008b).

En conclusión, este estudio sugiere la existencia de un sistema distribuido, pero parcialmente traslapado, y que la utilización de tal sistema para cuantificar el tiempo depende de la interacción de los diferentes componentes o requerimientos de la tarea.

E. CORRELATOS NEURALES DEL PROCESAMIENTO DE INFORMACION TEMPORAL.

La evidencia psicofísica necesariamente debe ser interpretada en un contexto funcional, con fundamento en la neurobiología del procesamiento de información temporal. Una pregunta importante que surge al tomar en cuenta la evidencia psicofísica, particularmente la concerniente al análisis de la transferencia del aprendizaje es: ¿qué es lo que se aprende con el entrenamiento en tareas de temporalización? A continuación se revisa información sobre los correlatos neurales del procesamiento de información temporal y su relación con los modelos teóricos construidos a partir de datos psicofísicos. Esto dará mayor solidez, y una mayor precisión, a las inferencias que se hacen sobre la organización del mecanismo de medición del tiempo a partir de la evidencia psicofísica.

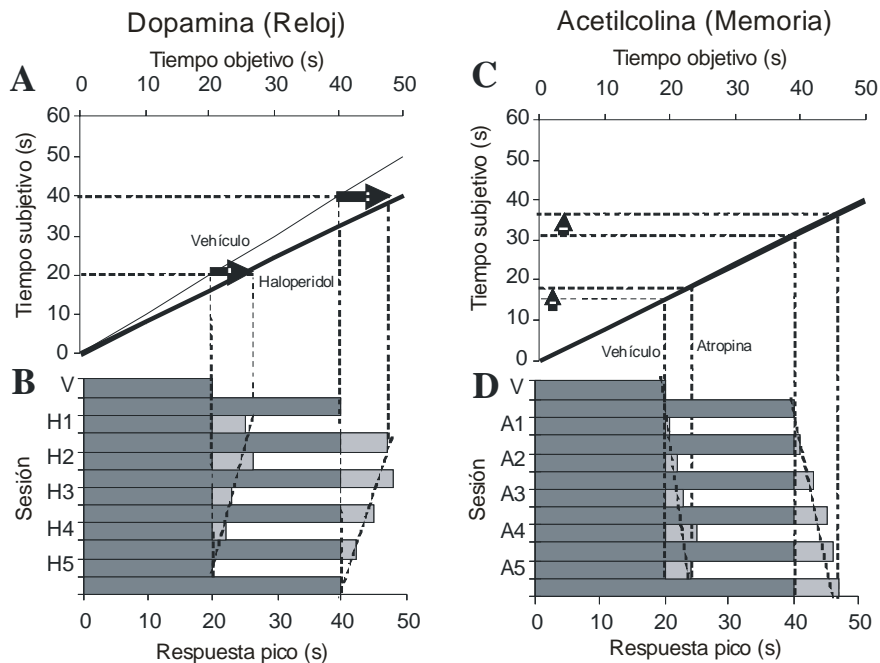
1. Estudios farmacológicos.

Se han utilizado diferentes estrategias experimentales tratando de dilucidar el sustrato neural del procesamiento de información temporal. La administración de fármacos ha permitido observar el efecto que tienen en la resolución de tareas que requieren del procesamiento de información temporal. En este sentido, se ha observado que las drogas dopaminérgicas y colinérgicas alteran el desempeño en tareas tanto de producción como de percepción de intervalos temporales (Buhusi y Meck, 2005; Matell y Meck, 2004; Matell, King y Meck, 2004).

El efecto inmediato de la administración sistémica de agonistas dopaminérgicos (p.e. metanfetaminas) en la ejecución de tareas de percepción de intervalos temporales es un sesgo de las respuestas de un sujeto hacia intervalos más cortos que el estándar (v. gr. el intervalo es percibido como 'más largo'). Se ha observado que dicho sesgo es proporcional a la duración del intervalo (propiedad escalar) y a la afinidad de la droga por los receptores D2 (figura 7A). Lo opuesto ocurre tras la administración aguda de antagonistas dopaminérgicos: se presenta un sesgo escalar de las respuestas hacia intervalos más largos que el estándar. Si se administran agonistas dopaminérgicos en varias sesiones, ocurre un ajuste gradual de las respuestas del sujeto y estas vuelven a ser precisas (figura 7B). En el marco conceptual del modelo Marcapaso-Acumulador (figura 4, p8), estas alteraciones se explican suponiendo que el marcapaso es un circuito que emite pulsos con una determinada frecuencia, este circuito es modulado por el sistema dopaminérgico, de modo que al incrementar los niveles de dopamina, la frecuencia de los pulsos de salida de este marcapaso se incrementaría.

Por otro lado, la administración de antagonistas colinérgicos (p.e. el antagonista muscarínico atropina) no tiene un efecto inmediato, sino que tiene un efecto discreto al inicio, que se hace más notorio tras varias sesiones de administración de la droga (Meck, 1996). El resultado conductual que se obtiene es un sesgo de las respuestas, que presenta la propiedad escalar, hacia intervalos más largos que el estándar (figura 7C). El efecto fue observado en un procedimiento en el que se entrenó a ratas para responder a la presentación de un intervalo estándar, por lo que en la primera sesión de administración de la droga la rata podría usar un intervalo previamente almacenado en memoria (figura 7D). Esto es consistente con una alteración de la instancia de formación de una memoria de referencia. En el modelo Marcapaso-Acumulador, la representación del tiempo en la

memoria de referencia sería el producto del número de pulsos emitidos por el marcapaso multiplicado por una constante. Dicha constante se modificaría con la administración de drogas colinérgicas.



Redibujado de Buhusi y Meck (2005)

Figura 7. Efectos de la administración de drogas sobre el procesamiento de información temporal. **A-B.** La administración aguda del antagonista dopaminérgico haloperidol ocasiona un sesgo de las respuestas del sujeto ('tiempo subjetivo' y 'respuesta pico') hacia intervalos mayores que el estándar. Tras varias sesiones de administración de la droga (V: vehículo, H1-H5: sesiones de administración de haloperidol) el efecto desaparece gradualmente. Este patrón es consistente con una desaceleración del reloj. **C-D.** La administración del antagonista colinérgico atropina ocasiona un sesgo de las respuestas del sujeto hacia intervalos más largos que el estándar. El efecto es moderado tras la administración aguda, pero después de varias sesiones (V: vehículo, A1-A5: sesiones de administración de atropina) el efecto se incrementa. Este patrón es consistente con una alteración de una referencia del intervalo que se almacenó en memoria antes de la administración de la droga.

Lo anterior da soporte para una disociación funcional de los componentes del mecanismo de procesamiento de información temporal, como lo propone el modelo Marcapaso-Acumulador: a) el marcapaso: un sistema cortico-estriatal modulado por aferencias dopaminérgicas, y b) el almacenamiento de una memoria de referencia: un sistema que recibe aferencias colinérgicas (figura 4, p.8). Sin embargo, estas manipulaciones farmacológicas proporcionan información gruesa sobre esta cuestión, resulta necesario utilizar otros enfoques metodológicos para corroborar las inferencias que se pueden hacer a partir de ellas sobre el sustrato neural de un sistema de procesamiento de información temporal.

2. Neuroimagenología funcional.

En los últimos años, se han utilizado técnicas de imagenología funcional para estudiar el problema del procesamiento de información temporal en el sistema nervioso central. En estos trabajos, consistentemente se ha observado la activación de estructuras cerebrales específicas en tareas tanto de percepción como de producción de intervalos temporales. Entre las estructuras que se activan en estas tareas están: el núcleo caudado, el putamen, la corteza prefrontal, la corteza parietal y el cerebelo.

Por ejemplo, en un estudio de resonancia magnética funcional (fMRI) relacionada a evento, se encontró una activación diferencial de estructuras cerebrales en función de la etapa de procesamiento: el caudado y putamen para la codificación del intervalo, y la corteza prefrontal para la etapa de comparación/decisión (Rao, Mayer y Harrington, 2001). Se presentó a sujetos humanos un intervalo estándar (1200ms) delimitado por 2 marcadores auditivos seguido de una pausa de duración fija (1000ms), y después de la pausa un segundo intervalo de comparación de duración distinta al estándar. Este diseño, así como la implementación de controles adecuados (discriminación del tono de los marcadores auditivos por un lado y responder después de escuchar 4 marcadores auditivos sin otro requerimiento) permitió relacionar la señal de resonancia magnética a eventos particulares del procesamiento de información temporal (figura 8). Por un lado la instancia de codificación de la duración del intervalo, y por otro lado la etapa de comparación-decisión-implementación de la respuesta. Los resultados de dicho trabajo indican una disociación de las 2 etapas mencionadas.

Para la etapa de codificación de la duración se encontró una mayor activación en el putamen (derecho), la cabeza del núcleo caudado (bilateral) y los núcleos centro-medial y ventral-anterior del tálamo. A nivel cortical, se encontró una mayor activación del surco intraparietal (derecho), el área premotora dorsal (bilateral), el área premotora ventral (izquierda) y el giro temporal medio. En la etapa de decisión se encontró una mayor activación en la corteza prefrontal dorsolateral derecha (figura 8) y el lóbulo VIIB del cerebelo (vermis posterior).

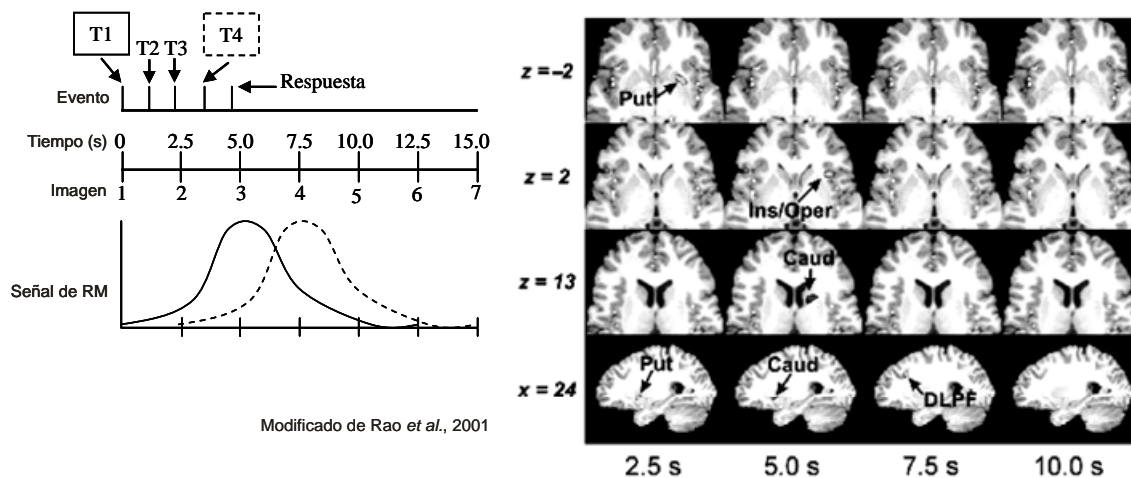


Figura 8. Resonancia magnética (RM) funcional relacionada a eventos del procesamiento de información temporal. A la IZQUIERDA se muestra un esquema de los eventos de una tarea, T1-T4 representan tonos de 700Hz. T1 y T2 delimitan un intervalo estándar (1200ms). Entre T2 y T3 se encuentra un periodo de retraso (1000ms). T3 y T4 delimitan un intervalo de comparación. Las curvas (línea continua y línea punteada) representan la cinética hipotética de la señal de RM relacionada a los eventos T1 y T4 respectivamente. La señal asociada a T1 (línea continua) está relacionada al proceso de codificación del intervalo y su pico se alcanza alrededor de 5s después del inicio del ensayo. La señal asociada a T4 (línea punteada) se relaciona al proceso de comparación de las duraciones y toma de decisión, alcanza su pico alrededor de 7.5s después del inicio del ensayo. A la DERECHA se muestran imágenes representativas (con los controles sustraídos) tomadas a diferentes tiempos de la tarea. En las imágenes de 5.0s se muestra activación asociada a la codificación del intervalo de la corteza insular y opercular (Ins/Oper) y el núcleo caudado (Caud). En las imágenes de 7.5s se observa activación de la corteza prefrontal dorsolateral (DLPF) asociada a la comparación de los intervalos. Las imágenes están en vista radiológica.

Una crítica a dicho trabajo es que el caudado está involucrado en la memoria de trabajo (Postle y D'Esposito, 1999), lo que haría pensar que la activación del caudado estaría relacionada con el mantenimiento de una referencia del intervalo a lo largo de diferentes ensayos. Esto fue abordado en otro estudio de fMRI (Harrington *et al.*, 2004a) obteniendo resultados similares: activación de los ganglios basales (neostriado) en la etapa de codificación y de la corteza prefrontal en la etapa de decisión. Se forzó al sujeto a codificar el intervalo al inicio de cada ensayo presentando aleatoriamente uno de dos posibles intervalos, lo que produciría una mayor activación de las estructuras relacionadas con la memoria del intervalo. La diferencia entre medidas de precisión de la producción de ambos intervalos, que reflejan la eficiencia en la memorización de los estándares, estaría correlacionada con la actividad de las estructuras relacionadas con la memoria (lóbulo temporal medial – MTL), mientras las medidas de variabilidad, que reflejan la eficiencia del procesamiento de la información temporal, correlacionarían con estructuras que se han implicado en este proceso (p. e. los ganglios basales). Se encontró que amplias regiones de la

corteza, los ganglios basales y el cerebelo se activaron durante la fase de codificación del intervalo, sin embargo, no todas correlacionaron con las respuestas conductuales.

Harrington *et al.* (2004a) reportan que entre las áreas cuya actividad se correlacionó con la conducta en esta fase se encuentran el caudado derecho, la corteza parietal inferior derecha, precuneus, el hipocampo derecho y el cerebelo izquierdo. Esto evidencia un sesgo hacia el hemisferio derecho para el procesamiento de la información temporal. En contraste, en la etapa de decisión se encontró actividad incrementada en regiones asociadas con memoria de trabajo (corteza temporal superior, corteza frontal medial y corteza parietal), lo que sugiere que hay una mayor interdependencia entre los procesos de memoria y toma de decisión que entre la codificación del intervalo y la toma de decisión. Se observa también un sesgo, hacia el hemisferio izquierdo (corteza parietal), más implicado en el proceso de toma de decisión. La actividad del parahipocampo derecho se asoció con el proceso de toma de decisión, lo que es congruente con su papel en la evocación de información no verbal. El putamen izquierdo presentó una mayor activación asociada tanto a la codificación del intervalo como a la toma de decisión y su actividad no se correlaciona con las mediciones conductuales, a diferencia de la actividad del caudado derecho. Una posible explicación podría ser que ambos núcleos tengan un papel diferente en tareas de producción y de percepción de intervalos, lo que es consistente con diferencias neuroanatómicas de sus vías hacia áreas motoras y no motoras de la corteza prefrontal.

Por otro lado, la atención es una variable que también interviene en el proceso de medición del tiempo. Se ha propuesto que actúa como un interruptor que inicia y termina el almacenamiento en memoria del número de pulsos emitidos por un marcapaso. Esto ha sido estudiado utilizando fMRI (Coull, Vidal, Nazarian y Macar, 2004). A través de diferentes ensayos se pidió a sujetos humanos que prestaran diferentes niveles de atención a un atributo de un estímulo visual (color o duración), de modo que en un ensayo, por ejemplo, se le podía pedir que prestara atención solo a la duración, y en otro ensayo mayor atención a la duración y menor atención al color. Se encontró que los tiempos de reacción y el número de errores en ensayos de “duración” o de “color” disminuye gradualmente conforme el sujeto presta mayor atención al atributo en cuestión.

Así mismo, Coull *et al.* (2004) observaron un incremento gradual, asociado a la carga de atención que se le daba al atributo “duración” del estímulo, de la actividad de la corteza motora pre-suplementaria (preSMA), corteza motora y premotora (hemisferio derecho), corteza temporal derecha, surco intraparietal (bilateral) y putamen. Estos incrementos graduales fueron consistentes con los resultados de las pruebas conductuales, una menor activación correspondía a un incremento en el porcentaje de errores.

Estos hallazgos, en conjunto, apoyan la idea de que el mecanismo de procesamiento de información temporal se divide en instancias anatómica y funcionalmente segregadas. También son congruentes con los hallazgos de las manipulaciones farmacológicas, ya que consistentemente se ha encontrado activación de los ganglios basales en tareas que involucran la percepción o producción de intervalos temporales. En conjunto, los resultados mencionados sugieren que los ganglios basales (específicamente el neocórtex y las vías dopaminérgicas nigroestriatales) pueden actuar como un sistema marcapaso, mientras la corteza prefrontal (principalmente) haría la función de un sistema de memoria de referencia. Entonces, cabe preguntarnos qué encontraríamos al estudiar animales o sujetos humanos cuando se dañan estructuras involucradas en el procesamiento de información temporal.

3. Estudios en lesiones y estados patológicos.

Se han realizado también estudios en pacientes con enfermedades neurodegenerativas o lesiones que provocan disfunciones de las vías dopaminérgicas, como la enfermedad de Parkinson; o de las vías colinérgicas estriatales, como la enfermedad de Huntington. También se han hecho estudios en pacientes con lesiones focalizadas que provocan disfunciones motoras, como las lesiones cerebelosas.

En pacientes con la enfermedad de Parkinson (PEP), se ha observado un incremento en la variabilidad de las respuestas en tareas de producción de intervalos temporales. Por otro lado, se ha observado la propiedad escalar en tareas de producción y percepción de intervalos temporales (en el rango de segundos a minutos) cuando se les prueba bajo medicación con precursores dopaminérgicos (L-DOPA), no obstante, la propiedad escalar no se observa cuando las pruebas se realizan sin medicación (Buhusi y Meck, 2005).

En un estudio se probó el desempeño de PEP bajo medicación en una tarea de producción de intervalos (golpeo rítmico) y una tarea de percepción de la duración de intervalos (Harrington, Haaland y Hermanowicz, 1998). Se observó que los parkinsonianos tienen un peor desempeño en estas tareas (utilizando intervalos en el rango de los cientos de milisegundos) en comparación con sujetos control y los datos sugieren que este déficit se debe a la disfunción del sistema de procesamiento de información temporal. Mediante el análisis de la variabilidad de los intervalos producidos por los pacientes, en las tareas de producción de intervalos, se logró dissociar dicha variabilidad en 2 componentes: según el modelo de Wing y Kristofferson (1973) uno de estos componentes refleja la operación de un mecanismo de temporalización ('*reloj*'), y el otro componente es un estimado de la variabilidad que resulta de la implementación motora de las respuestas ('*retraso motor*'). El grupo de pacientes parkinsonianos presentó un incremento de la variabilidad cruda de las respuestas, tanto en las tareas de percepción como en las de producción de intervalos, al compararlos con un grupo control. El análisis reveló que la variabilidad cruda se incrementa debido al componente de 'reloj' y no por el componente de la implementación de la respuesta. Esto relaciona a los ganglios basales y sus conexiones con la corteza en las operaciones de temporalización.

Recientemente se estudió el desempeño de pacientes parkinsonianos (PEP) en diferentes tareas de producción y percepción de intervalos temporales (Merchant *et al.*, 2008a). Se evaluó el desempeño de PEP bajo dos condiciones (con medicación y sin medicación) utilizando intervalos de cientos de milisegundos. Uno de los hallazgos de ese trabajo fue que los PEP pueden ser divididos en dos grupos: uno de baja variabilidad respecto a sujetos control, y otro de alta variabilidad. El grupo de baja variabilidad presentó una variabilidad incrementada al ser probados sin medicación, no obstante, se conserva la propiedad escalar y al realizar las pruebas bajo medicación (L-DOPA) se encontraron patrones de variabilidad similares a los de sujetos control.

Un análisis de pendiente (ver sección C.1 para detalles sobre este tipo de análisis) reveló un incremento de la variabilidad dependiente del tiempo en pacientes al realizar las pruebas sin medicación respecto a los resultados obtenidos con medicación (Merchant *et al.*, 2008a), lo que sugiere que el origen del incremento en la variabilidad se encuentra en el sistema de procesamiento temporal y no en los procesos periféricos como la implementación motora.

Adicionalmente, los pacientes no mostraron déficit sustancial en variables que podrían afectar su desempeño, como la atención o la memoria.

Por otro lado, el papel del cerebelo en el procesamiento de información temporal es aún motivo de controversia. Los pacientes con lesiones cerebelosas presentan una mayor variabilidad en la ejecución de tareas de producción de intervalos al compararlos con sujetos control. También, sujetos con lesiones cerebelosas tienen un desempeño deficiente en tareas de percepción de intervalos. Esto ha sido interpretado como evidencia de que el cerebelo participa en el procesamiento de información temporal (Ivry, 1996). No obstante, se ha observado que la propiedad escalar no se ve afectada, lo que es considerado como evidencia de que, aunque el cerebelo es importante en la implementación motora, no es crucial para el procesamiento de información temporal en el rango de cientos de milisegundos a decenas de segundos.

Se ha estudiado el desempeño de pacientes con lesiones cerebelosas en tareas de producción y percepción de intervalos temporales implementando además una batería de pruebas para determinar deficiencias cognitivas (en memoria de trabajo, atención, discriminación sensorial y velocidad de procesamiento sensorial) que pudieran afectar el desempeño (Harrington *et al.*, 2004b). Utilizando el modelo de Wing y Kristofferson (1973) se disoció la variabilidad en los componentes de 'reloj' y 'retraso motor'. Se encontró que el incremento en la variabilidad debido al componente de 'reloj' se correlaciona con deficiencias en atención. En contraste, la velocidad de procesamiento sensorial se correlaciona con el desempeño en tareas de percepción de intervalos. Estos resultados apoyan la idea de que el cerebelo no juega un papel en la medición de intervalos temporales, sino que más bien participa en la adquisición y procesamiento de información (sensorial y cognitiva) relevante para la ejecución de la tarea, además de participar en la implementación de la respuesta motora.

Por otro lado, en un estudio que involucró a pacientes con enfermedad de Huntington, se encontró que la variabilidad en la ejecución de tareas de percepción de intervalos se incrementa conforme disminuye del número de años que restan a los pacientes para alcanzar la edad a la que se pronostica que presentarán el cuadro clínico de la enfermedad (Paulsen *et al.*, 2004). Los resultados de resonancia magnética funcional que se presentan en ese trabajo indican que el

déficit en la ejecución de la tarea se asocia a una menor activación del caudado-putamen, tálamo y área motora pre-suplementaria. Dado que la enfermedad de Huntington involucra una degeneración de neuronas estriatales, estos datos apuntan hacia la participación del estriado en el mecanismo de procesamiento de información temporal.

En un estudio que involucró a pacientes con lesiones corticales focales (Harrington, Haaland y Knight; 1998), se encontró que lesiones de la corteza prefrontal y de la región parietal inferior del hemisferio derecho se correlacionan con un déficit en la percepción de la duración de intervalos. Sin embargo, lesiones similares en el hemisferio izquierdo tuvieron un efecto más discreto que se interpretó como consecuencia directa de trastornos de la atención que presentaron la mayoría de los pacientes.

En general, los estudios en pacientes con lesiones y enfermedades que ocasionan un déficit motor, indican que una parte importante de la disfunción motora se origina en una disfunción del procesamiento de información temporal.

En conclusión, los estudios de farmacología, neuroimagen, patologías y lesiones, permiten establecer una correlación entre diferentes estructuras y etapas de procesamiento de información temporal. En este sentido, se ha encontrado una segregación anatómica y funcional de las diferentes instancias del procesamiento de información temporal, no obstante, se ha observado que algunas estructuras se activan consistentemente en diferentes tareas de cuantificación de intervalos de tiempo aún cuando se utilizan diferentes tipos de estímulos para delimitar las duraciones. Esto es información gruesa sobre la organización del sistema de procesamiento de información temporal y es consistente con la idea de un mecanismo centralizado dedicado al procesamiento de información temporal. Sin embargo, la organización fina del sistema sigue siendo prácticamente desconocida.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Aunque existe evidencia (psicométrica y funcional) sobre cómo está estructurado el sistema de procesamiento de información temporal, su organización fina permanece desconocida. La evidencia indica que este sistema podría estar organizado en sub-sistemas. Como se ha observado en otras tareas, nosotros suponemos que el entrenamiento en una tarea perceptuo-motora en un intervalo fijo resultará en un aprendizaje, que se manifestará como un incremento de la precisión con la que sujetos humanos realizan la tarea de ejecución. Si el sistema se organiza en sub-sistemas, como suponemos, dicho aprendizaje se transferirá hacia intervalos con duración cercana al intervalo entrenado, y también ocurrirá transferencia hacia modalidades sensoriales no entrenadas.

La transferencia del aprendizaje entre intervalos no ha sido explorada de manera sistemática en tareas de ejecución. Nosotros exploramos esto variando sistemáticamente la duración de intervalos temporales alrededor de un intervalo estándar. Si el sistema está organizado en circuitos intervalo específicos, la transferencia del aprendizaje estará estructurada de tal forma que se obtendrá una función de generalización donde los intervalos más cercanos al intervalo entrenado mostrarán una transferencia mayor del aprendizaje.

III. HIPOTESIS.

- El entrenamiento en una tarea de producción de intervalos producirá una mejoría en la ejecución, reflejada por la disminución en la variabilidad de los intervalos producidos.
- Ocurrirá transferencia del aprendizaje. La producción de intervalos no entrenados mejorará proporcionalmente a la cercanía del intervalo de prueba respecto al entrenado.
- Ocurrirá transferencia entre modalidades sensoriales.

IV. OBJETIVOS.

- 1) Determinar la cinética del aprendizaje en una tarea de producción de intervalos temporales para tres intervalos de entrenamiento independientes.
- 2) Determinar la curva de transferencia hacia diferentes intervalos a partir del aprendizaje de un intervalo de entrenamiento.
- 3) Determinar la diferencia de las curvas de transferencia con intervalos definidos por estímulos auditivos o visuales.

V. SUJETOS Y METODOS.

Todos los experimentos se realizaron después de haber dado a los sujetos información sobre la prueba y de que firmaron una Forma de Consentimiento Informado (Ver Anexo I, p.64).

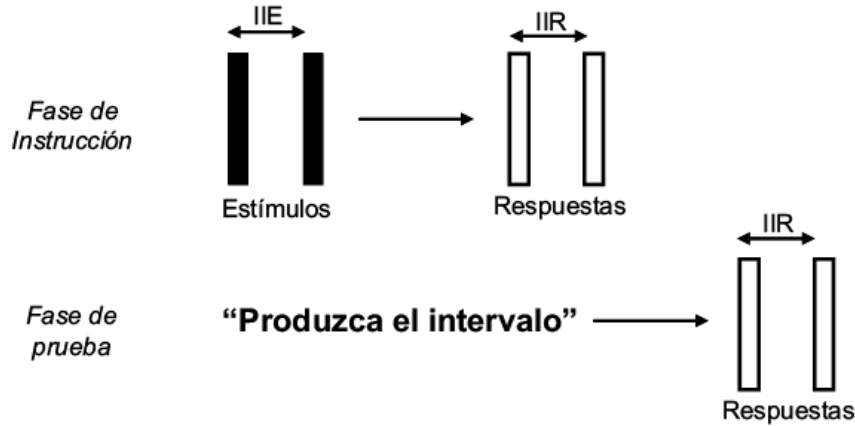


Figura 9. Representación esquemática de la tarea de producción de un intervalo único. Esta tarea se utilizó para medir la habilidad para temporalizar movimientos en sujetos humanos en el presente estudio. IIE = Intervalo Inter-Estímulos, IIR = Intervalo Inter-Respuestas. Cada fase consiste de varios ensayos. La fase de prueba sigue inmediatamente a la fase de instrucción. Un "Bloque" está formado por los ensayos de la fase de instrucción y los ensayos de la fase de prueba. El intervalo a producir puede cambiar de un Bloque a otro. Los estímulos fueron siempre auditivos o siempre visuales.

Participaron 35 sujetos (17 varones, 18 mujeres), con una edad media(SD) de 25.4857(5.5113) años (rango: 18 – 41 años). Los sujetos voluntarios fueron estudiantes universitarios o miembros del personal del campus Juriquilla. No tenían deficiencias auditivas al momento de la prueba y su visión era normal o corregida. Se procuró que cada sujeto iniciara las sesiones a la misma hora en los diferentes días del experimento para evitar variaciones circadianas.

A. TAREA

Se utilizó una tarea de producción de intervalos de tiempo, llamada “Producción de un Intervalo Único” (PIU). Esta tarea se organiza en bloques de ensayos, cada bloque contiene dos fases (ver Figura 9, p26):

- En primer lugar hay una “Fase de Instrucción”, en la que, en varios ensayos (ver procedimiento), se le presenta al sujeto un intervalo de tiempo delimitado por dos estímulos sensoriales (Intervalo Interestímulo – IIE). En este trabajo los estímulos fueron auditivos (tono puro de 33ms, 650Hz, 80dB) o visuales (cuadrado de 10cm de lado, 16ms, color verde). Posteriormente, se le pide al sujeto que reproduzca el intervalo presionando dos veces la barra espaciadora de un teclado de computadora (Intervalo Interrespuesta – IIR). En esta fase es necesario utilizar la memoria de trabajo del intervalo presentado para generar un intervalo flanqueado por dos movimientos temporalizados.
- En segundo lugar hay una “Fase de Prueba”, en la que el IIE no es presentado, pero el sujeto debe recordar el intervalo que se le presentó en la Fase de Instrucción y producir el IIR correspondiente cuando se le pida. En esta fase los sujetos utilizan una representación del intervalo (formada en la fase de instrucción) para temporalizar los dos movimientos.

Para la colección de datos se utilizó un programa diseñado en el laboratorio escrito en lenguaje Visual Basic (Microsoft Visual Basic 6.0). El programa controló la presentación de los estímulos (IIE) y colectó los datos de la ejecución (IIR). Se utilizaron computadoras con procesadores de alta velocidad (>2.0GHz) para la colección de los datos.

B. EXPERIMENTO 1. “PRE- Y POST-ENTRENAMIENTO SIN RETROALIMENTACION”

1. Procedimiento.

Se colectaron datos en 10 sesiones, cada sesión con una duración aproximada de 60 minutos. Se realizó una sesión diaria durante 10 días consecutivos. Los experimentos tuvieron tres etapas (ver Figura 10, p. 32):

- 1) Prueba pre-entrenamiento (Día 1). En esta etapa se evaluó el desempeño basal de los sujetos en la tarea de PIU utilizando varios intervalos que rodean sistemáticamente a un intervalo base (ver Tabla 1). Se realizó la prueba delimitando los IIE con estímulos auditivos, y se repitió delimitando los IIE con estímulos visuales (siempre en el mismo orden). La fase de instrucción tuvo 5 ensayos, seguidos de 20 ensayos de la fase de prueba, lo cual constituye un bloque. Un bloque fue colectado por intervalo. En todos los casos los sujetos realizaron previamente una prueba similar con el objetivo de evitar artefactos por familiarización con la tarea. Después de cada ensayo de la fase de instrucción, el sujeto fue informado de la duración del intervalo inter-respuesta que produjo, como retroalimentación. Los ensayos de la fase de prueba no fueron retroalimentados.
- 2) Entrenamiento (Días 2 a 9). En esta etapa, los sujetos realizaron 60 bloques diarios de la tarea de PIU (~60 minutos al día) utilizando únicamente el intervalo base definido solamente con estímulos auditivos para delimitar el IIE. La fase de instrucción durante el entrenamiento tuvo 5 ensayos, seguidos de 15 ensayos de la fase de prueba. Así, cada día el sujeto realizó 300 ensayos de la fase de instrucción y 900 ensayos de la fase de prueba. Los sujetos recibieron retroalimentación después de todos los ensayos.
- 3) Prueba post-entrenamiento (Día 10). Esta prueba fue idéntica a la prueba pre-entrenamiento. De nuevo se evaluó el desempeño de los sujetos en todos los intervalos de prueba, y de nuevo realizó la prueba delimitando los IIE con estímulos auditivos, y se repitió delimitando los IIE con estímulos visuales. Nuevamente, los sujetos recibieron retroalimentación en cada ensayo de la fase de instrucción pero no en los ensayos de la fase de prueba.

Intervalo Base	450ms		650ms		850ms	
Serie	A	B	A	B	A	B
Intervalos de prueba (ms)	300	300	450	450	600	600
	400	415	600	550	700	750
	430	440	630	620	830	800
	450	450	650	650	850	850
	470	460	670	680	870	900
	500	485	700	750	1000	950
	600	600	850	850	1100	1100

Tabla 1. Intervalos base con los respectivos intervalos de prueba alrededor de cada uno. En negritas se muestran los intervalos base.

El procedimiento descrito se realizó para tres intervalos base: 450 ($n=12$), 650 ($n=12$), y 850ms ($n=11$). Los sujetos fueron entrenados solamente en uno de los 3 intervalos base y se probaron utilizando sólo una de las series de intervalos (A ó B) que se muestran en la Tabla 1. En la figura 10 (p. 32) se esquematiza el diseño experimental. La distribución de los sujetos en los diferentes intervalos base fue aleatoria.

2. Análisis de datos.

a. Cálculo de la variabilidad.

Como se mencionó en la introducción, la variabilidad refleja el funcionamiento del sistema de temporalización, por lo tanto fue la medida principal para este trabajo. Los IIR fueron agrupados de acuerdo a la fase de la tarea en la que fueron colectados (prueba o instrucción) y se realizó el análisis de las dos fases por separado. Se eliminaron los datos atípicos mediante el cálculo de percentiles (Daniel, 2002) utilizando el siguiente procedimiento: Considerando sólo los datos entre los percentiles 15 y 85 se calculó un margen de error igual a 1.5 veces la diferencia entre los valores máximo y mínimo, y sumando ese valor al valor del percentil 85 y restándolo del percentil 15 se fijó un rango; los datos fuera de este rango se eliminaron. La desviación estándar (SD) se utilizó como medida de la variabilidad (v. gr. de la habilidad para temporalizar), y se calculó, para cada bloque de ensayos, como:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (IIR_i - \mu)^2}{n-1}}$$

donde: μ es la media de los IIR y n es el número de IIR.

b. Curvas de aprendizaje.

Se calcularon las SD para cada bloque de ensayos durante la etapa de entrenamiento de los experimentos. Posteriormente, se calculó la media aritmética de las SD de cada día ($n=60$ bloques). Entonces se graficó la media en función del día de entrenamiento. La curva fue ajustada a una función de potencia de la forma $y = bx^m$ para obtener la pendiente m , que refleja la magnitud y velocidad del aprendizaje y b es un estimado de la variabilidad al inicio del entrenamiento. Se construyeron curvas de aprendizaje para cada fase de la tarea (instrucción y prueba) y para cada intervalo base. Se obtuvieron las pendientes y las diferencias entre el la SD inicial y final ($SDdif$) de cada curva. Para buscar diferencias entre fases de la tarea se aplicaron

pruebas *t* de Student para los valores de *m*, *b* y *SDdif* obtenidos en cada fase de la tarea para cada intervalo base. Para buscar diferencias entre los valores de *m*, *b* y *SDdif* de los distintos intervalos base se aplicó un análisis de varianza donde el factor fue el intervalo base. Se obtuvo la curva promedio calculando la media aritmética de los sujetos por cada día de entrenamiento. Finalmente, se aplicó un análisis de varianza para un diseño de medidas repetidas con la finalidad de determinar si el efecto del entrenamiento fue estadísticamente significativo.

c. Curvas de transferencia del aprendizaje.

Las curvas de transferencia se construyeron a partir de las SD obtenidas en las pruebas pre-entrenamiento y post-entrenamiento de la siguiente manera:

A partir de los datos las pruebas pre- y post-entrenamiento, se calculó la SD para cada intervalo probado. Si la variabilidad sigue la propiedad escalar, un intervalo más largo que reduzca su variabilidad a la mitad tendrá una diferencia mayor que un intervalo más corto que también reduzca su variabilidad a la mitad, lo que ocasionaría un sesgo en la curva de transferencia. Por esta razón se optó por una medida normalizada. Se calculó un Porcentaje de Ganancia utilizando la relación:

$$\%Ganancia = \frac{100(SD_{Pre} - SD_{Post})}{SD_{Pre}}$$

El Porcentaje de Ganancia se define como el porcentaje de disminución de la variabilidad en la prueba post-entrenamiento (SD_{Post}) respecto a la variabilidad en la prueba pre-entrenamiento (SD_{Pre}) como resultado del entrenamiento.

Se agruparon los datos de porcentaje de ganancia por fase de la tarea, intervalo base y modalidad sensorial utilizada para delimitar los intervalos. Se aplicó una prueba de *t* de Student para comparar los resultados de la fase de prueba con los de la fase de instrucción (tabla 3, p.36), esto permitió probar si el entrenamiento actuó en el mecanismo del reloj endógeno en contraste con el posible entrenamiento del sistema sensorio-motor y/o de una mejor representación perceptual del estímulo.

Se graficó la mediana, así como el rango intercuartil, de los porcentajes de ganancia en función del intervalo de prueba. Se analizaron por separado las dos modalidades sensoriales. Con la finalidad de probar si el porcentaje de ganancia en cada intervalo de prueba fue significativamente mayor que cero, se utilizó una prueba t de Student para una sola muestra (prueba de hipótesis de una cola). De este modo se evaluó la transferencia del aprendizaje hacia intervalos no entrenados.

d. Correlación entre aprendizaje y transferencia.

Las curvas de aprendizaje de cada sujeto fueron ajustadas a una función de potencia de la forma $y = bx^m$. En esta función, el exponente m es la pendiente de la función, y representa un índice de la velocidad y de la magnitud de la disminución del valor de la variable dependiente y (que corresponde a la variabilidad) que está en función de la variable independiente x (cuyos valores fueron los días de entrenamiento).

Por otro lado, se calculó un índice de generalización (IG) para cada sujeto y para cada modalidad sensorial por separado. El (IG) es igual a la suma de los valores positivos del Porcentaje de Ganancia exceptuando a la ganancia del intervalo base (intervalo entrenado). Se graficaron los valores del exponente m de la función de potencia en función del valor del IG en cada modalidad sensorial por separado y se realizó un análisis de correlación entre estos dos valores. De este modo, se probó la posible existencia de una relación entre el nivel de aprendizaje y el nivel de transferencia.

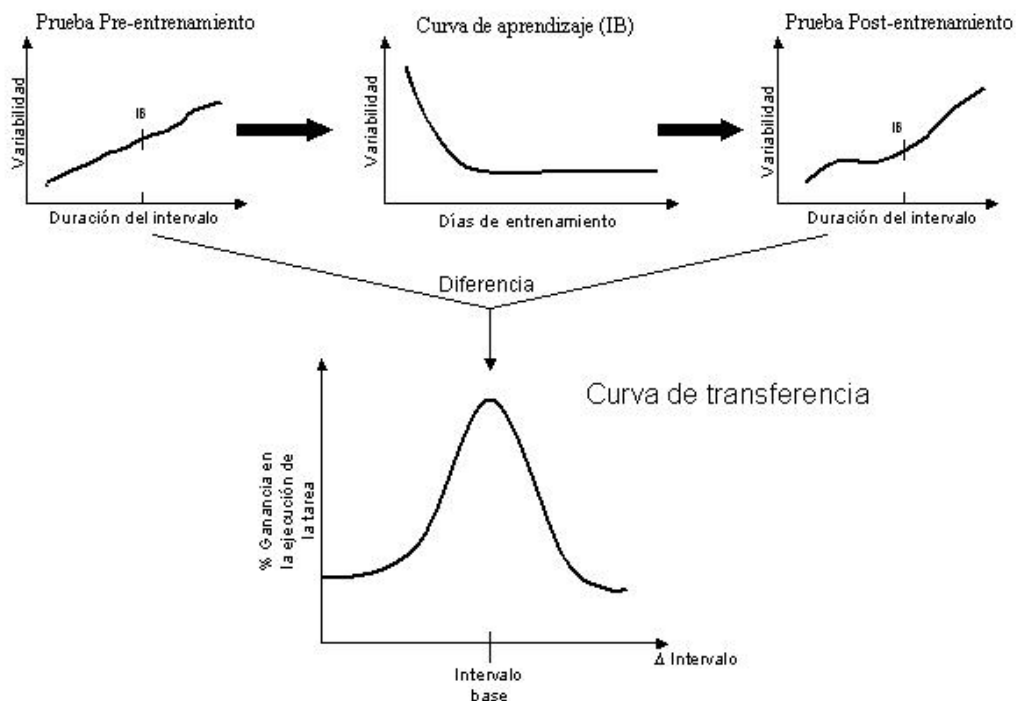


Figura 10. Representación esquemática del diseño experimental. Arriba se muestran las 3 etapas de los experimentos. En la prueba pre-entrenamiento se evalúa el desempeño de los sujetos en varios intervalos de prueba alrededor de un intervalo base (IB), posteriormente, se entrena al sujeto en la producción del IB y en la prueba post-entrenamiento se evalúa de nuevo el desempeño en los mismos intervalos probados antes del entrenamiento. Abajo se muestra la curva de transferencia que se espera, graficando el Porcentaje de Ganancia en función del intervalo de prueba.

C. EXPERIMENTO 2. “PRE- Y POST-ENTRENAMIENTO CON RETROALIMENTACION”.

1. Procedimiento

Como se explicó, en el EXPERIMENTO 1 los sujetos solo recibieron retroalimentación en la fase de prueba de la tarea en las etapas pre- y post-entrenamiento de los experimentos, mientras en la etapa de entrenamiento todos los ensayos fueron retroalimentados. Esto nos hizo pensar que los resultados obtenidos estaban influenciados por esta variable. Para evaluar esto, un subconjunto de los sujetos (los n últimos de cada intervalo base: $n=6$ para 450ms y 850ms, $n=5$ para 650ms) realizó, adicionalmente al EXPERIMENTO 1, pruebas pre- y post-entrenamiento recibiendo retroalimentación después de cada ensayo de la tarea PIU sin distinción de fase de la tarea. De este modo, para cada sujeto se hicieron pruebas pre- y post-entrenamiento en 2 condiciones: “sin retroalimentación” y “con retroalimentación” en la fase de prueba de la tarea. Con esta salvedad, el resto del diseño experimental fue exactamente el mismo que en el EXPERIMENTO 1.

2. Análisis de datos.

Solo se utilizaron los datos de la fase de prueba de la tarea PIU. Se calcularon los porcentajes de ganancia del mismo modo que en EXPERIMENTO 1. Para estos sujetos se calcularon los porcentajes de ganancia en ambas condiciones, y se compararon los resultados utilizando pruebas de t de Student de tres maneras:

- A) Se tomaron todos los valores de porcentaje de ganancia. Se agruparon por intervalo base, modalidad sensorial utilizada para delimitar el intervalo y condición de retroalimentación. Se compararon las condiciones de retroalimentación (con vs. sin) utilizando una prueba de t de Student (tabla 6, p.47) para evaluar el efecto de la retroalimentación sobre el porcentaje de ganancia global.
- B) Se compararon los porcentaje de ganancia de las dos condiciones de retroalimentación intervalo por intervalo utilizando una prueba t de Student (tablas 7 – 9, p.48). Así, se evaluó de manera más fina la posible diferencia de los porcentajes de ganancia entre ambas condiciones de retroalimentación.
- C) Para probar si el porcentaje de ganancia en cada intervalo de prueba fue significativamente mayor que cero se utilizó una prueba de t de Student para una sola muestra (prueba de una cola). Esto permitió evaluar si hubo ganancia en cada intervalo e identificar si ocurrió transferencia entre los diferentes intervalos bajo cada condición de retroalimentación.

VI. RESULTADOS.

A. EXPERIMENTO 1. “PRE- Y POST-ENTRENAMIENTO SIN RETROALIMENTACION”.

1. Curvas de aprendizaje de la producción de intervalos.

Los resultados mostraron que el entrenamiento intensivo dio lugar a un proceso de aprendizaje. Para los tres intervalos base se encontró una disminución de la variabilidad de los intervalos inter-respuesta (IIR), tanto en la fase de instrucción como en la fase de prueba, en función del entrenamiento. Mediante análisis de varianza de medidas repetidas se determinó que el efecto del entrenamiento fue significativo (ver figura 11, p.35) y que la variabilidad cambia en función del entrenamiento. Cabe recordar que el entrenamiento fue sólo en la modalidad auditiva. En la figura 11 se muestran las curvas de aprendizaje promedio para cada uno de los intervalos. La variabilidad decrece rápidamente al inicio del aprendizaje hasta alcanzar un nivel asintótico, por lo que las curvas se ajustaron bien a una función de potencia, lo que permitió evaluar parámetros estadísticos que se relacionan con la cinética del aprendizaje.

Comparando las curvas de aprendizaje de las fases de instrucción y de prueba de la tarea, a simple vista podemos observar una gran similitud. Cuantitativamente, al comparar las diferencias entre la SD inicial y la SD final de las curvas de aprendizaje (*SDdif*) no se encontraron diferencias significativas entre fases de la tarea, (tabla 2, p.35). Tampoco se encontraron diferencias al comparar de las pendientes (*m*) de ambas fases.

Al comparar las curvas de los diferentes intervalos para la fase de prueba, se encontró que hay una clara tendencia al incremento de la SD_{dif} en función del intervalo base (tabla 2), sin embargo, estas diferencias solo tuvieron una significancia estadística marginal ($P=0.57$). Algo similar ocurrió en la fase de instrucción, donde también hubo una tendencia al incremento de la SD_{dif} en función del intervalo base, pero esta tendencia no fue tan marcada como en la fase de prueba y tampoco fue estadísticamente significativa. La principal diferencia entre las curvas de los distintos intervalos es la variabilidad inicial (SD al primer día). Esta diferencia era esperada, y corresponde a la propiedad escalar del procesamiento de información temporal.

Al comparar las pendientes (m) de las curvas de aprendizaje entre los diferentes intervalos base, no se encontraron diferencias significativas en ninguna de las fases de la tarea. En contraste, al comparar los valores de la constante b , que representa una estimación de la variabilidad al inicio del entrenamiento, se encontraron diferencias tanto en la fase de instrucción (tabla 2) como en la fase de prueba (propiedad escalar del procesamiento de la información temporal). De hecho, esta fue la única diferencia significativa encontrada después de analizar todos los parámetros que se calcularon para las curvas de aprendizaje. La prueba *post hoc* HSD de Tukey reveló diferencias significativas de b para el par de intervalos base 450ms-650ms tanto en la fase de instrucción como en la fase de prueba. Igualmente para el par 450ms-850ms en la fase de instrucción y de prueba. Para el par 650ms-850ms la b no fue significativamente diferente en ninguna de las dos fases de la tarea.

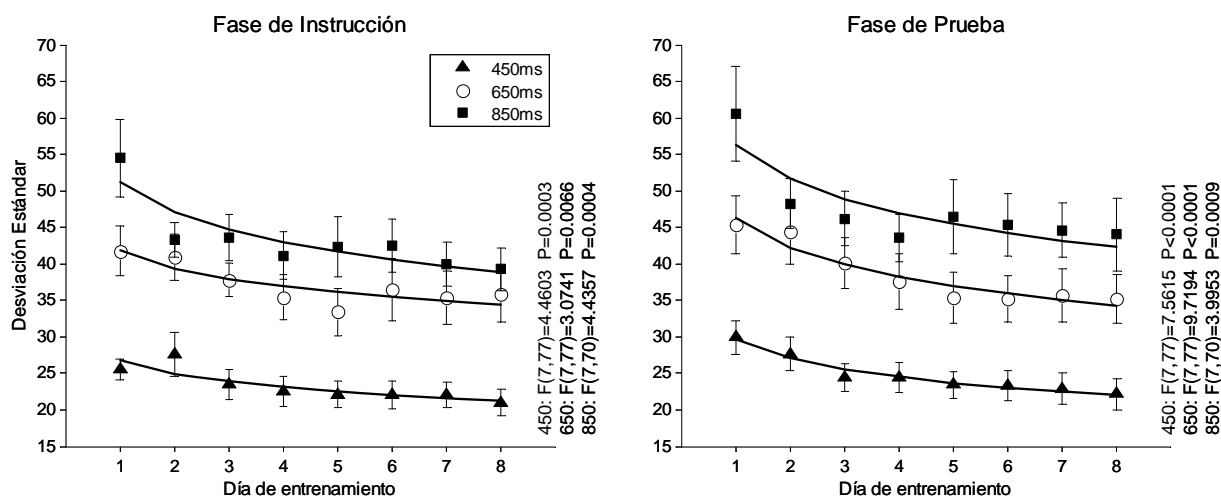


Figura 11. Curvas de aprendizaje de la producción de los 3 intervalos base correspondientes a cada una de las fases de la tarea de Producción de Intervalo Único (PIU). Se grafica la desviación estándar (SD) en función del día de entrenamiento. Cada punto es la media \pm SEM. Para los intervalos de 450m y 650ms $n=12$, para 850ms $n=11$. Las líneas son resultado del ajuste a una función de potencia. Todos los ajustes fueron significativos ($P<0.01$). Se muestran los resultados del análisis de varianza (estadístico F y valor de P) para un diseño de medidas repetidas.

Estos resultados indican que efectivamente ocurre un proceso de aprendizaje, que se manifiesta como una disminución de la variabilidad de la ejecución motora (intervalos inter-respuesta) en función del entrenamiento. Además, aunque el valor inicial de la curva de aprendizaje difiere entre los diferentes intervalos base, la cinética del aprendizaje es similar para todos ellos y para ambas fases de la tarea.

Parámetro	Intervalo Base (ms)	Fase de Instrucción		Fase de Prueba		Entre fases de la tarea	
		Media	SEM	Media	SEM	<i>t</i>	<i>P</i>
<i>m</i>	450	-0.115617	0.0199363	-0.148158	0.0272938	0.962785	0.347075
	650	-0.107483	0.0326013	-0.147458	0.0150526	1.113243	0.282585
	850	-0.130009	0.0287524	-0.133945	0.04178	0.077613	0.939004
<i>b</i>	450	†*26.68951	1.7582876	‡*29.77870	2.2300655	-1.0878	0.288457
	650	†42.050767	3.1588272	‡46.339867	3.9663856	-0.845886	0.407174
	850	*50.711191	3.2285698	*55.686627	4.2304495	-0.934936	0.361739
<i>SDdif</i>	450	4.5594917	1.285625	7.760475	2.0311849	-1.331601	0.199085
	650	5.9438583	3.2248325	10.087467	2.1899511	-1.062973	0.30087
	850	15.193682	4.5588902	16.519164	6.2405231	-0.171509	0.865705
Entre intervalos base	Parámetro	F(2,32)	P	F(2,32)	P		
	<i>m</i>	0.1673363	0.8466505	0.0725683	0.9301548		
	<i>b</i>	19.109755	<0.0001	13.575782	<0.0001		
	<i>SDdif</i>	3.1242399	0.0576199	1.3699192	0.2686303		

Tabla 2. Comparación de los diferentes parámetros de las curvas de aprendizaje entre fases de la tarea y entre intervalos base. *m* es la pendiente del ajuste a una función exponencial y *b* es la intersección con el eje de las abscisas de la función exponencial; *SDdif* es la diferencia de SD al inicio y al final del periodo de entrenamiento. La comparación de pares entre fases de la tarea se realizó utilizando una prueba *t* de Student. La comparación de los parámetros entre los intervalos base se hizo mediante análisis de varianza. Se resaltan en negritas las diferencias significativas. Los símbolos indican que la prueba *post hoc* HSD de Tukey detectó diferencia significativa entre los pares de intervalos base señalados, †: $P=0.006$, ‡: $P=0.001$, *: $P<0.001$.

2. Curvas de transferencia del aprendizaje.

En la Tabla 3 se muestran todos los intervalos de prueba utilizados y el número de sujetos probados para cada uno.

Intervalo Base					
450ms		650ms		850ms	
Intervalo de prueba	<i>n</i>	Intervalo de prueba	<i>n</i>	Intervalo de prueba	<i>n</i>
300	10	450	10	600	10
400	8	550	5	700	6
415	5	600	8	750	5
430	8	620	5	800	5
440	5	630	8	830	7
450	12	650	12	850	11
460	5	670	8	870	7
470	8	680	5	900	5
485	5	700	8	950	5
500	8	750	5	1000	5
600	10	850	10	1100	10

Tabla 3. Intervalos base e intervalos de prueba correspondientes. En negritas se muestran los intervalos estándar. Se muestra el número de datos para cada intervalo probado.

a. Fase de prueba de la tarea PIU.

En primera instancia se analizaron solo los datos de la fase de prueba de la tarea de producción de un intervalo único, y se encontraron los siguientes resultados.

Para el caso de 450ms, en la fase de prueba de la tarea PIU observamos que el aprendizaje se transfiere hacia intervalos no entrenados. Esta transferencia ocurre principalmente hacia los intervalos de prueba más cortos que el entrenado, y solo en la modalidad entrenada (intervalos delimitados por estímulos auditivos) (figura 12). En contraste, en la modalidad no entrenada (estímulos visuales) no encontramos un patrón de transferencia y la dispersión de los datos es mayor; de hecho, solo en 3 intervalos la ganancia fue estadísticamente significativa.

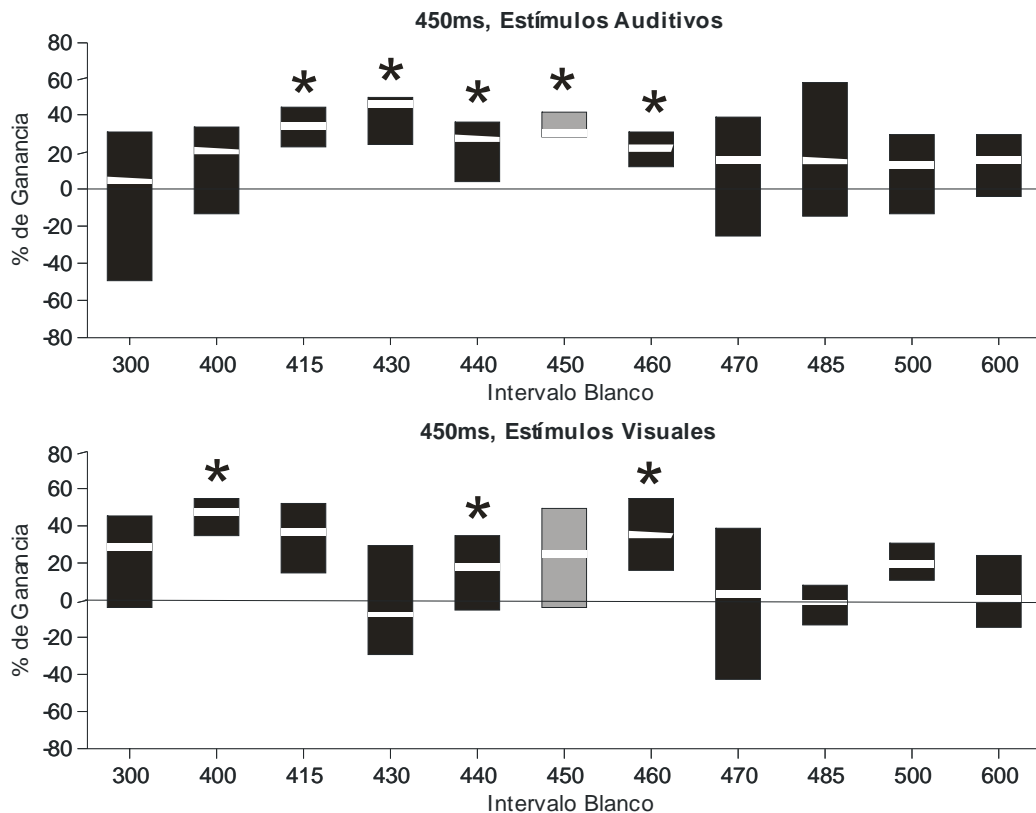


Figura 12. Resultados del análisis de los datos de la FASE DE PRUEBA para el intervalo base de 450ms. Panel superior: el intervalo fue delimitado por estímulos auditivos. Panel inferior: el intervalo fue delimitado por estímulos visuales. Se grafican las medianas (barras blancas) y los intercuartiles (barras negras) de los porcentajes de ganancia para cada intervalo de prueba. Un asterisco indica que el porcentaje de ganancia fue significativamente distinto de cero (t de Student, $P < 0.05$).

Para el caso del intervalo base de 650ms, no se observa transferencia ordenada hacia otros intervalos en la fase de prueba en ninguna de las 2 modalidades (figura 13). Pocos intervalos presentaron un porcentaje de ganancia significativamente mayor que cero en las dos modalidades. Cabe señalar que en este intervalo se encontraron los valores más bajos de porcentaje de ganancia (tabla 4, p.44).

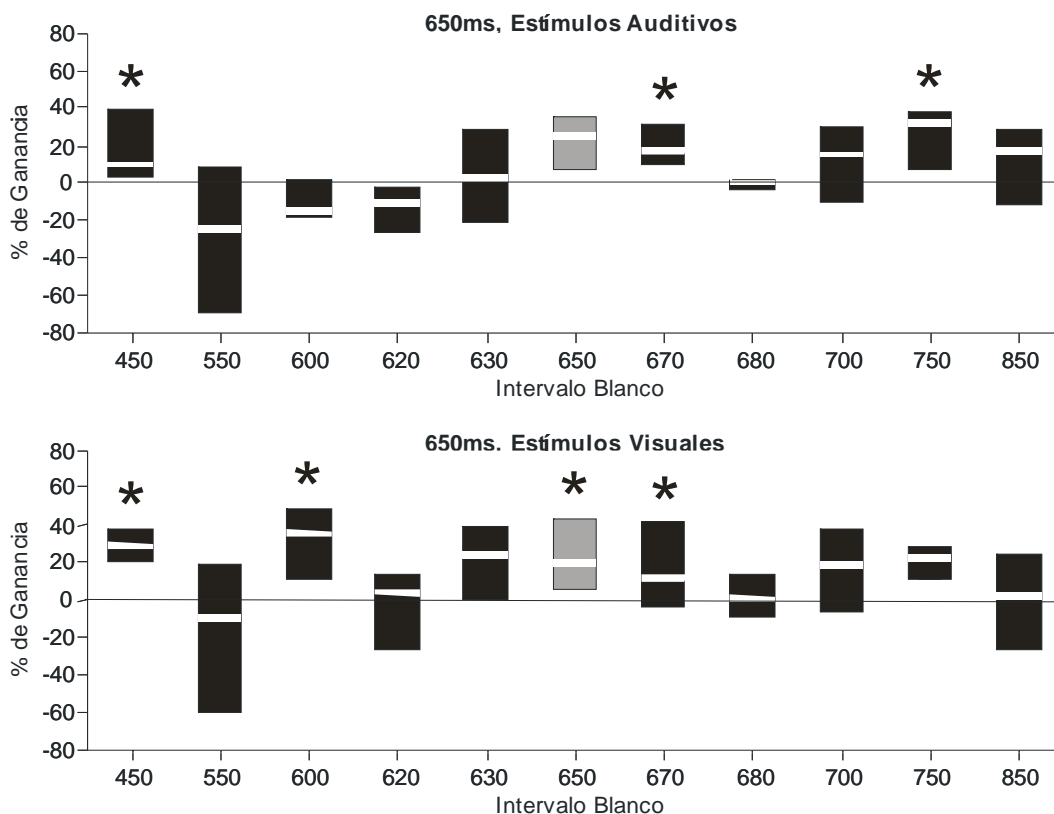


Figura 13. Resultados del análisis de los datos de la FASE DE PRUEBA para el intervalo base de 650ms. Panel superior: el intervalo fue delimitado por estímulos auditivos. Panel inferior: el intervalo fue delimitado por estímulos visuales. Se grafican las medianas (barras blancas) y los intercuartiles (barras negras) de los porcentajes de ganancia para cada intervalo de prueba. Un asterisco indica que el porcentaje de ganancia fue significativamente distinto de cero (t de Student, $P < 0.05$).

En contraste con los intervalos base de 450ms y 650ms, en la fase de prueba del intervalo base de 850ms (figura 14), observamos que la transferencia es alta hacia casi todos los intervalos de prueba, encontramos ganancias significativamente distintas de cero en casi todos los casos. Además, en este caso hubo un alto grado de transferencia entre modalidades sensoriales. A pesar de que los datos de la modalidad no entrenada presentan una mayor dispersión que los datos de la modalidad entrenada, es posible observar un patrón similar en ambas. Al igual que en la modalidad auditiva, los valores de porcentaje de ganancia son altos y fueron significativamente mayores que cero en casi todos los intervalos de prueba. Como se muestra en la tabla 4 (p.44) los valores de porcentaje de ganancia para el intervalo base de 850ms son los mayores.

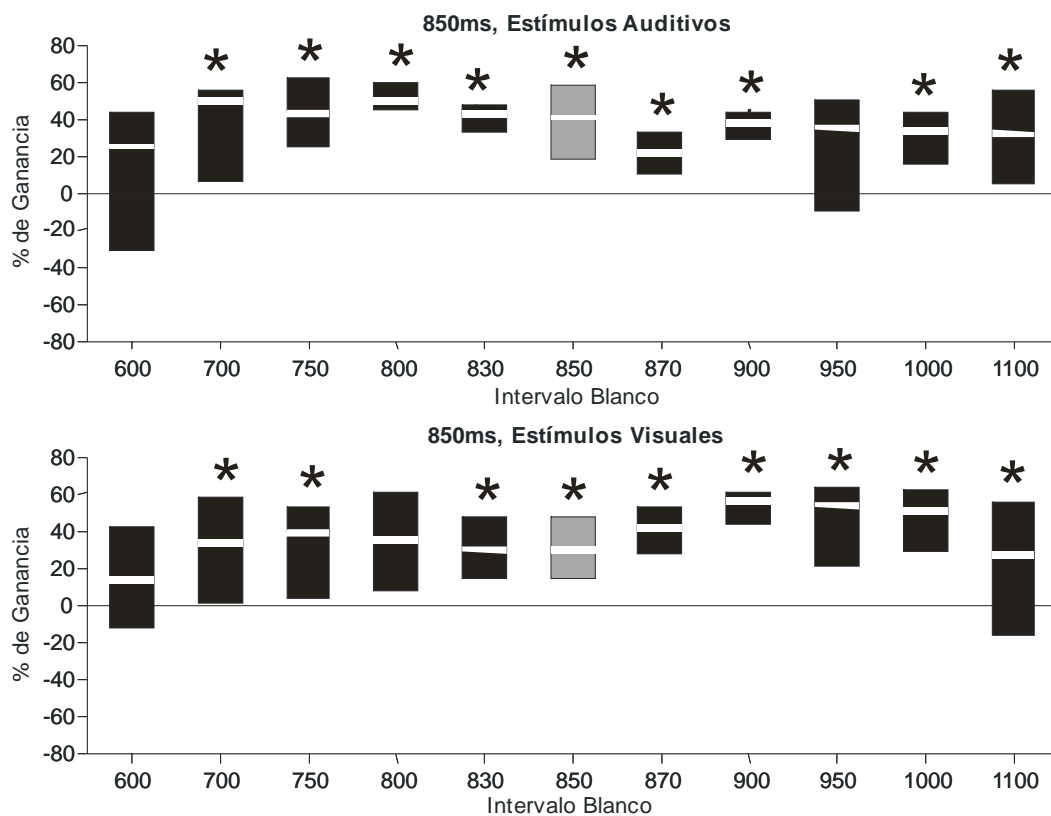


Figura 14. Resultados del análisis de los datos de la FASE DE PRUEBA para el intervalo base de 850ms. Paneles superiores: el intervalo fue delimitado por estímulos auditivos. Paneles inferiores: el intervalo fue delimitado por estímulos visuales. Se grafican las medianas (barras blancas) y los intercuartiles (barras negras) de los porcentajes de ganancia para cada intervalo de prueba. Un asterisco indica que la prueba *t* de Student reveló que el porcentaje de ganancia fue significativamente distinto de cero ($P < 0.05$).

Dado que el porcentaje de ganancia es un valor normalizado por la variabilidad inicial, no nos permite analizar las diferencias en la reducción de la variabilidad en los diferentes intervalos base y sus intervalos de prueba correspondientes. Por esta razón, en la figura 15 se muestran las diferencias de la desviación estándar (calculada para la fase de prueba de la tarea PIU) entre las etapas pre- y post-entrenamiento. Podemos ver claramente que las diferencias de la variabilidad después del entrenamiento respecto a la variabilidad pre-entrenamiento son mayores en intervalos más largos. Esto refleja que la disminución de la variabilidad sigue la propiedad escalar de la medición del tiempo.

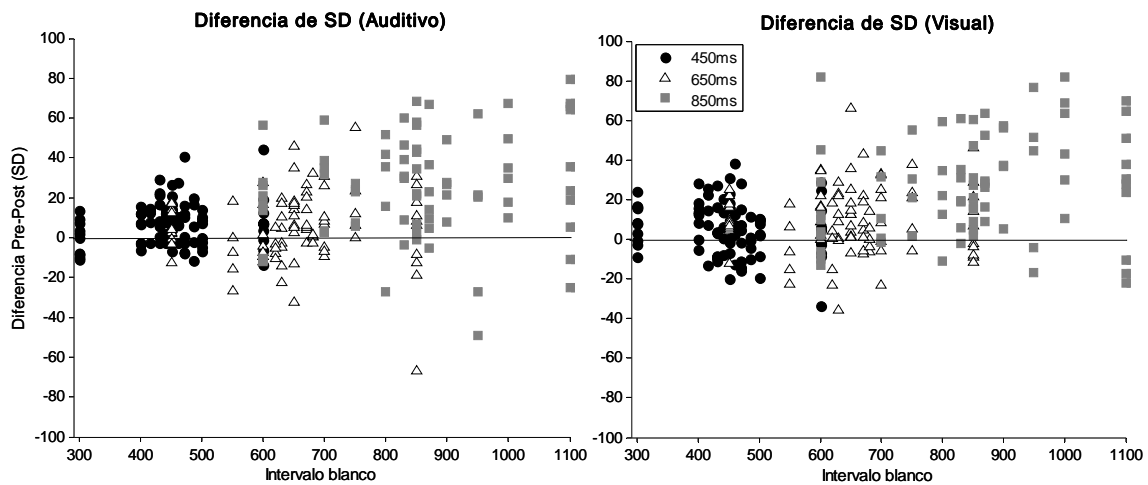


Figura 15. Distribución de las diferencias Pre-Post entrenamiento de las desviaciones estándar. Se grafica la diferencia de las SD en función del intervalo de prueba, para la modalidad auditiva (izquierda) y para la modalidad visual (derecha). Se muestran los datos de la fase de prueba para todos los intervalos base y todos los sujetos ($n=35$). Valores mayores que cero indican una disminución de la SD en la prueba Post-entrenamiento respecto a la prueba Pre-entrenamiento. Cada punto es la diferencia del valor de la SD calculada a partir de los datos de sólo un sujeto.

b. Fase de Instrucción de la Tarea PIU.

Para probar la posibilidad de que la transferencia encontrada fuera un efecto de aprendizaje sensorio-motor, realizamos el mismo análisis para la fase de instrucción de la tarea PIU. A diferencia de la fase de prueba, aquí el sujeto produce el intervalo blanco utilizando una referencia en memoria de trabajo que se actualiza de un ensayo a otro. En las figuras 16-18 se muestran las curvas de transferencia construidas a partir de los datos de la fase de instrucción.

Para 450ms (figura 16), observamos que el patrón de transferencia que se observó en la fase de prueba no se encuentra en la fase de instrucción. Adicionalmente, podemos ver que la dispersión de los datos es mayor en esta fase respecto a la fase de prueba en ambas modalidades sensoriales. Llama la atención que solo 2 intervalos blanco en cada modalidad presentan porcentajes de ganancia significativamente mayores que cero, contrastando con la serie de intervalos con porcentaje de ganancia significativo que se encontró en la fase de prueba. Las mayores diferencias entre ambas fases se encuentran en la modalidad auditiva (ver tabla 4, p.44), mientras en la modalidad visual la diferencia es menos notoria. Cabe señalar que estas diferencias en la transferencia del aprendizaje ocurren a pesar de que las curvas de aprendizaje para ambas fases de la tarea muestran un aprendizaje similar (figura 11, p.35).

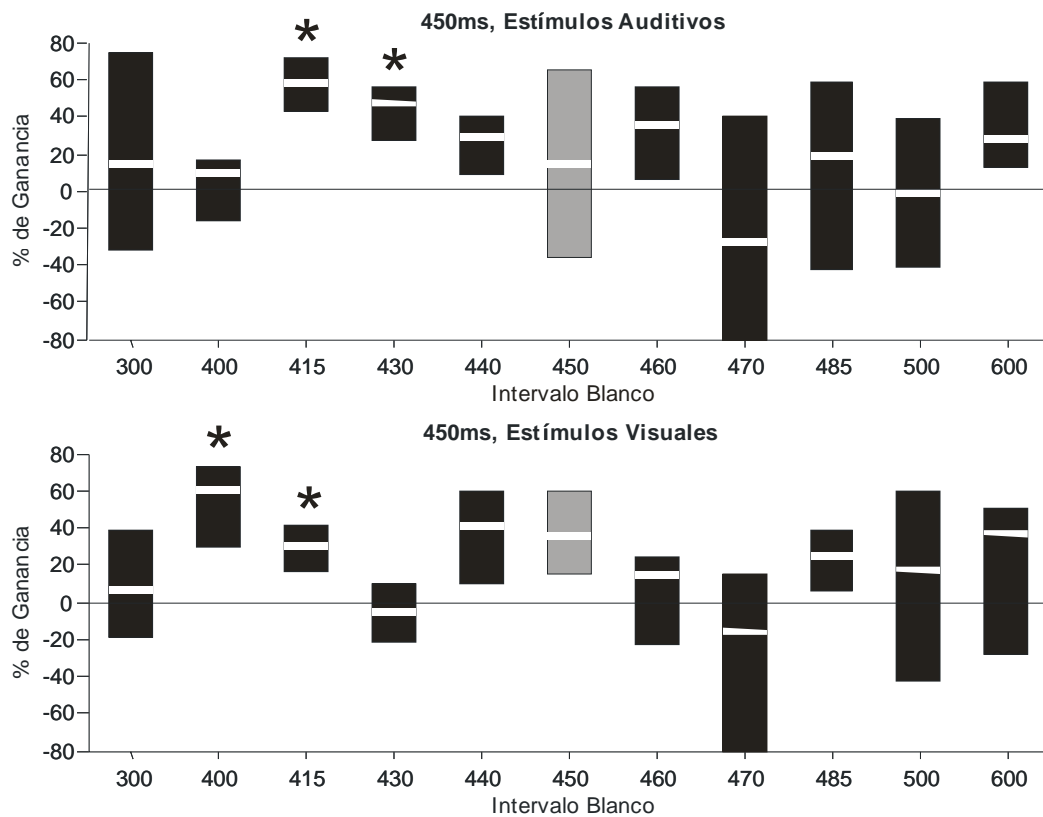


Figura 16. Resultados del análisis de los datos de la FASE DE INSTRUCCIÓN para el intervalo base de 450ms. Panel superior: el intervalo fue delimitado por estímulos auditivos. Panel inferior: el intervalo fue delimitado por estímulos visuales. Se grafican las medianas (barras blancas) y los intercuartiles (barras negras) de los porcentajes de ganancia para cada intervalo de prueba. Un asterisco indica que el porcentaje de ganancia fue significativamente distinto de cero (t de Student, $P < 0.05$).

En la figura 17 se muestran las curvas de transferencia de la fase de instrucción para el intervalo base de 650ms. Llama la atención la gran dispersión de los datos en las dos modalidades sensoriales probadas. No es posible decir que ocurrió transferencia en este intervalo. De hecho, en la modalidad visual ni siquiera el intervalo entrenado obtuvo un porcentaje de ganancia significativamente mayor que cero. Este análisis visual de las curvas de transferencia para las fases de prueba y de instrucción apunta a la falta de transferencia del aprendizaje del intervalo base (650ms) hacia los intervalos que lo rodean. Esto es apoyado con los resultados de la comparación utilizando la t de Student (tabla 4, p.44) que no reveló diferencias significativas entre los datos de ambas fases de la tarea.

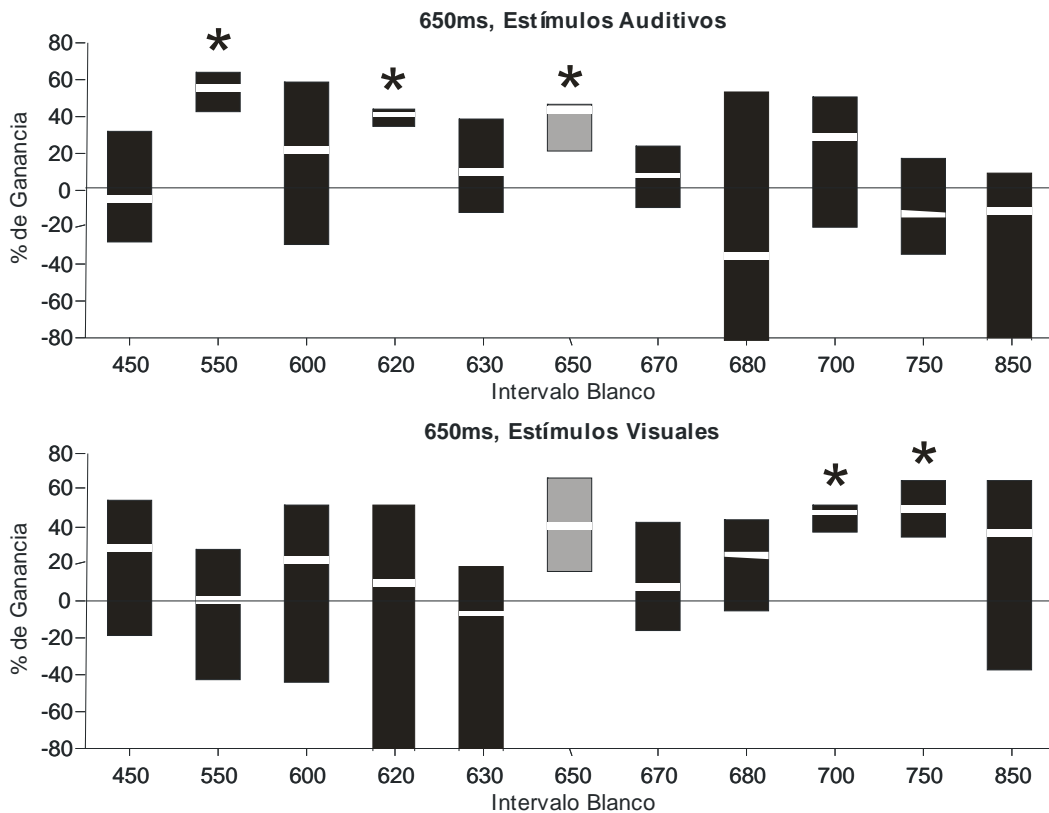


Figura 17. Resultados del análisis de los datos de la FASE DE INSTRUCCIÓN para el intervalo base de 650ms. Panel superior: el intervalo fue delimitado por estímulos auditivos. Panel inferior: el intervalo fue delimitado por estímulos visuales. Se grafican las medianas (barras blancas) y los intercuartiles (barras negras) de los porcentajes de ganancia para cada intervalo de prueba. Un asterisco indica que el porcentaje de ganancia fue significativamente distinto de cero (t de Student, $P < 0.05$).

Finalmente, las curvas de transferencia para la fase de instrucción en 850ms se muestran en la figura 18. La diferencia entre estas curvas y las curvas de la fase de prueba son dramáticas. Además de las diferencias en la dispersión de los datos, observamos que los patrones de transferencia son completamente diferentes en ambas fases de la tarea. Ambas modalidades presentaron porcentajes de ganancia significativamente mayores que cero para casi todos los intervalos alrededor del intervalo base en la fase de prueba. No obstante, en la fase de instrucción encontramos pocos intervalos con porcentaje de ganancia fueron significativamente mayores que cero en ambas modalidades. Al parecer, la modalidad visual es la que presenta menor transferencia en esta fase.

c. Comparación de fase de prueba vs. fase de instrucción de la tarea PIU.

En la tabla 4 se muestran las comparaciones de los porcentajes de ganancia entre ambas fases de la tarea. Encontramos que, en general, en la fase de prueba hay valores de ganancia mayores en todos los intervalos. No obstante, esta diferencia solo fue significativa en el intervalo de 850ms. Podemos notar, además, que hay una diferencia marginalmente significativa ($P=0.0604$) en la modalidad auditiva para 450ms. De hecho, al comparar los datos de ambas modalidades en conjunto encontramos una diferencia significativa entre ambas fases de la tarea para 450ms ($t = -1.8608, P = 0.03202$) y 850ms ($t = -3.7156, P = 0.0001$). No obstante, aún al comparar en conjunto los resultados de ambas modalidades para el intervalo de 650ms, la diferencia entre ambas fases de la tarea no fue significativa ($t = -0.51542, P = 0.3033$).

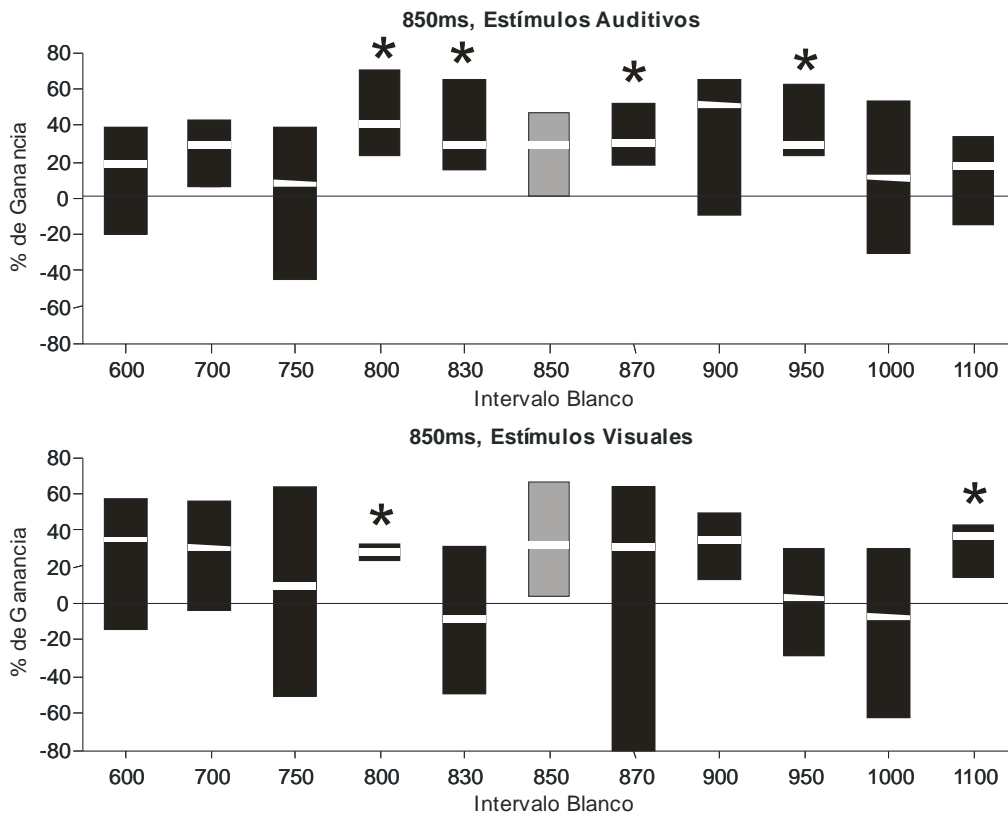


Figura 18. Resultados del análisis de los datos de la FASE DE INSTRUCCIÓN para el intervalo base de 850ms. Panel superior: el intervalo fue delimitado por estímulos auditivos. Panel inferior: el intervalo fue delimitado por estímulos visuales. Se grafican las medianas (barras blancas) y los intercuartiles (barras negras) de los porcentajes de ganancia para cada intervalo de prueba. Un asterisco indica que el porcentaje de ganancia fue significativamente distinto de cero (t de Student, $P < 0.05$).

Es importante resaltar que las diferencias que fueron significativas en este análisis (tabla 4) corresponden a las curvas de transferencia para la fase de prueba (figuras 12-14) en las que claramente se observa transferencia del aprendizaje entre intervalos (450ms-auditivo y 850ms-auditivo, visual). Cuando las curvas de transferencia de la fase de prueba no mostraron transferencia del aprendizaje, la comparación estadística de la fase de instrucción con la fase de prueba no arrojó diferencias significativas.

Intervalo Base	Modalidad	Fase de Instrucción		Fase de Prueba		Diferencia de Medias	<i>t</i>	<i>P</i>
		Media	SEM	Media	SEM			
450ms	Auditivo	1.5555346	9.0756563	16.885691	3.7067418	-15.33016	-1.563753	0.0604281
	Visual	5.769942	7.0142209	13.901212	3.8384567	-8.13127	-1.016941	0.1555811
650ms	Auditivo	2.2556038	6.9574937	5.99136	3.4397694	-3.735756	-0.481327	0.315603
	Visual	9.0431756	7.1695108	11.21567	4.2860218	-2.172494	-0.260087	0.3976002
850ms	Auditivo	18.08785	5.0565527	31.454485	3.3128807	-13.36663	-2.211132	0.0143974
	Visual	8.1307507	7.3558712	32.033601	3.170357	-23.90285	-2.984128	0.0017849

Tabla 4. Comparación de los porcentajes de ganancia de las fases de la tarea para cada intervalo base y para cada modalidad. SEM = Error estándar de la media. En negritas se resaltan las medias que fueron significativamente diferentes entre las dos fases. En negritas se resaltan las diferencias significativas.

A pesar de las diferencias encontradas entre las curvas de transferencia de las fases de instrucción y de prueba, las curvas de aprendizaje de ambas fases son similares. Esto sugiere que ocurren dos procesos de aprendizaje en paralelo:

- i) En la fase de instrucción el sujeto utiliza una referencia en memoria de trabajo que se actualiza de un ensayo a otro. De modo que el proceso de aprendizaje que se presenta muy probablemente afecta a los procesos periféricos (sensorio-motores) de la tarea que son independientes del tiempo. Este aprendizaje no presenta un patrón ordenado de transferencia de un intervalo entrenado hacia intervalos no entrenados.
- ii) En la fase de prueba el sujeto utiliza una representación interna del intervalo (formada durante la fase de instrucción) para producir dos movimientos temporalizados. En esta fase ocurre un proceso de aprendizaje que muy probablemente afecta al mecanismo interno de producción de intervalos. Este aprendizaje, específicamente, sí se transfiere de un intervalo entrenado a intervalos no entrenados.

3. Correlación entre la cinética del aprendizaje y la magnitud de la transferencia.

Los resultados anteriormente descritos nos hacen pensar en una posible relación entre la cinética del aprendizaje y el grado de transferencia hacia intervalos no entrenados y entre modalidades sensoriales. Para explorar esto, se realizó un análisis de correlación entre el exponente m de la curva de aprendizaje y los índices de generalización (IG) calculados para cada modalidad sensorial probada.

Los resultados de este análisis para los valores de ganancia de la fase de prueba se muestran en la figura 19. Observamos diferencias entre los diferentes intervalos base que fueron entrenados, así como entre las modalidades sensoriales. Para el caso del intervalo base de 450ms encontramos que existe una correlación entre la pendiente de la curva de aprendizaje y el nivel de generalización del aprendizaje (IG). Esta correlación es baja con parámetros (coeficiente de correlación y significancia estadística de la regresión) similares en ambas modalidades y ambas con pendiente negativa: auditiva ($m = -0.0004$) y visual ($m = -0.0003$).

Notablemente, al analizar los datos del intervalo base de 650ms, se encontraron coeficientes de correlación sumamente bajos entre estas dos variables en las 2 modalidades probadas. Los niveles de significancia de las regresiones también son muy bajos para este intervalo. Se encontró una pendiente nula ($m = 0$) en la modalidad auditiva, y una pendiente positiva en la modalidad visual ($m = 0.002$).

Y para el intervalo base de 850ms, encontramos una correlación alta y significativa en la modalidad auditiva. No obstante, en la modalidad visual la correlación encontrada no fue tan alta y en nivel de significancia no fue significativo. En ambas modalidades se encontraron pendientes negativas: auditiva $m = -0.0007$; visual $m = -0.0004$.

Estos resultados muestran relaciones distintas entre la magnitud del aprendizaje y el nivel de transferencia del aprendizaje dependiendo del intervalo base. Lo anterior, sugiere la existencia de diferentes mecanismos dedicados a la medición de intervalos de tiempo en los diferentes rangos que fueron probados.

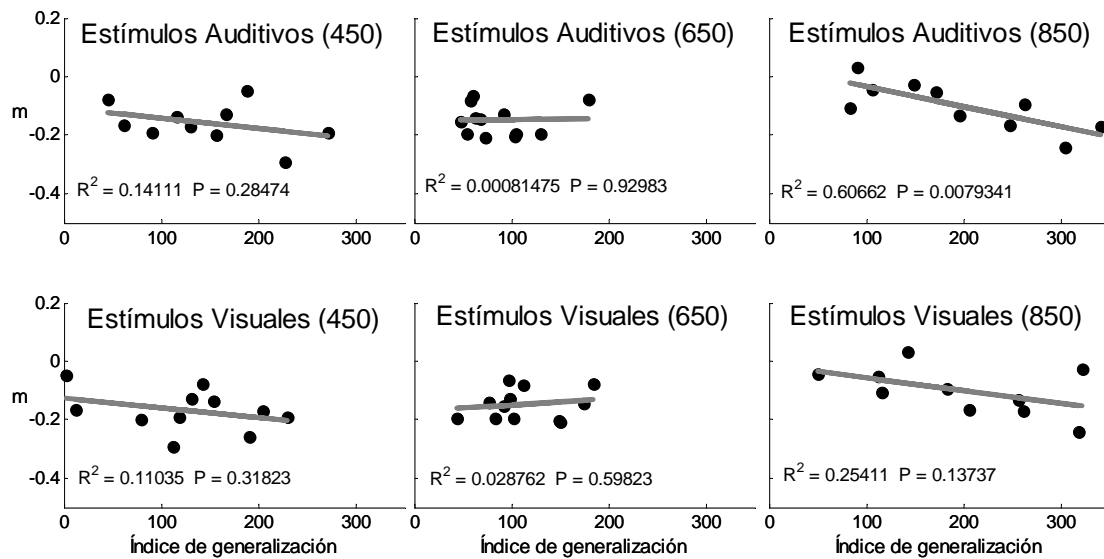


Figura 19. Análisis de correlación entre los exponentes m de las curvas de aprendizaje y los valores del índice de generalización. En la fila superior se muestran las correlaciones para la modalidad entrenada (auditiva), en la fila inferior se muestran las correlaciones para la modalidad no entrenada (visual). Cada punto corresponde a un individuo, la línea sólida es el ajuste estadístico de los datos. Se muestran los valores del coeficiente de correlación (R^2) y el nivel de significancia del ajuste (P). También se muestran la pendiente y el punto de intersección (b) de la función ajustada.

B. EXPERIMENTO 2. “PRE- Y POST-ENTRENAMIENTO CON RETROALIMENTACION”.

En las etapas de prueba pre- y post- entrenamiento del EXPERIMENTO 1, los sujetos recibieron retroalimentación sólo después de cada ensayo de la fase de instrucción de la tarea PIU, mientras que en la etapa de entrenamiento recibieron retroalimentación después de todos los ensayos. Esto nos hizo pensar que los patrones de transferencia encontrados probablemente se debían a esta variable. Por lo tanto, se contrastaron pruebas pre- y post- entrenamiento en las que todos los ensayos fueron retroalimentación, con pruebas pre- y post- entrenamiento en las que los ensayos de la fase de prueba de la tarea PIU no fueron retroalimentadas. Se analizaron sólo los datos de la fase de prueba de la tarea para este experimento.

1. Comparación de las curvas de transferencia del aprendizaje de las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”.

En la Tabla 5 se muestran los intervalos probados en esta condición y el número de sujetos probados en cada uno.

Intervalo Base					
450ms		650ms		850ms	
Intervalo de prueba	<i>n</i>	Intervalo de prueba	<i>n</i>	Intervalo de prueba	<i>n</i>
300	4	450	3	600	5
400	3	550	4	700	2
415	4	600	2	750	4
430	3	620	4	800	4
440	4	630	2	830	3
450	6	650	5	850	6
460	4	670	2	870	3
470	3	680	4	900	4
485	4	700	2	950	4
500	3	750	4	1000	2
600	4	850	3	1100	5

Tabla 5. Intervalos base de la condición “con retroalimentación” y sus respectivos intervalos de prueba. En negritas se muestran los intervalos estándar. Se muestra el número de datos para cada intervalo probado.

En general, se encontró que la retroalimentación influye sobre el nivel de generalización del aprendizaje de manera distinta dependiendo del intervalo base entrenado. Se compararon las medias de la totalidad de los datos de ganancia obtenidos en ambas condiciones a una prueba de *t* de Student, los resultados se muestran en la tabla 6. No se detectó diferencia significativa entre las pruebas realizadas con y sin retroalimentación en la fase de prueba para el intervalo base de 850ms en ninguna de las modalidades sensoriales. Para 450ms, se encontró diferencia significativa solo en la modalidad auditiva. El intervalo base más afectado por la retroalimentación fue 650ms. En este caso, se encontró que la diferencia entre las pruebas con retroalimentación y sin retroalimentación es estadísticamente significativa en las dos modalidades sensoriales probadas.

Fase de la tarea	Intervalo base	Modalidad	Sin Retroalimentación		Con Retroalimentación		Diferencia de Medias	<i>t</i>	P
			Media	SEM	Media	SEM			
Prueba	450	Auditivo	11.47798	6.2287836	26.200462	4.5071998	-14.72248	-1.91487	0.0296686
		Visual	11.7636	4.9128693	14.604883	5.4619556	-2.841283	-0.38676	0.3499735
	650	Auditivo	-3.08998	7.3742498	22.368537	5.5309786	-25.45853	-2.76183	0.0037604
		Visual	16.43327	4.130507	28.812446	4.6220211	-12.37917	-1.99705	0.0249371
	850	Auditivo	19.34416	6.5738208	19.660981	5.807953	-0.316821	-0.03611	0.4856389
		Visual	25.25656	4.8585474	22.559057	4.8769731	2.6975024	0.39184	0.3480938

Tabla 6. Resultados de la prueba de *t* de Student de la totalidad de los porcentajes de ganancia obtenidos en las dos fases de la tarea PIU para cada intervalo base. SEM es el error estándar de la media, *t* es el estadístico de Student. Se resaltan en negritas los casos en los que se encontraron diferencias significativas.

Intervalo Base	Modalidad	Intervalo Blanco	Sin Retroalimentación		Con Retroalimentación		Diferencia de medias	t	P
			Media	SEM	Media	SEM			
450ms	Auditiva	300	-50.03955	30.017838	20.003375	15.343788	-70.04293	-2.482905	0.0445204
		400	22.353067	23.517257	45.255667	6.3405064	-22.9026	-1.053808	0.2012446
		415	27.1687	11.724738	32.9941	11.347966	-5.8254	-0.523186	0.3185147
		430	41.360567	11.464494	14.201133	41.084938	27.159433	0.6221767	0.2986516
		440	20.679075	12.379377	40.373675	7.1233716	-19.6946	-1.745804	0.0895913
		450	27.007433	14.925996	28.998217	12.388034	-1.990783	-0.361799	0.3661447
		460	29.71325	7.7130609	42.302225	8.07703	-12.58898	-1.456349	0.1206634
		470	-5.703733	34.39128	23.775267	17.249051	-29.479	-0.8155	0.2502289
		485	5.273875	20.469006	10.384	20.935876	-5.110125	-0.148412	0.4457161
	500	6.9054667	20.356189	12.259333	6.4707837	-5.353867	-0.272521	0.40539	
	600	-1.4742	13.988195	13.9316	9.1302348	-15.4058	-1.09142	0.1774502	
	Visual	300	18.55665	13.401705	21.40045	5.2857104	-2.8438	-0.318759	0.3854065
		400	13.2577	18.06597	-40.85097	42.742035	54.108667	2.0271802	0.0899272
		415	25.400025	21.826292	24.907025	10.214786	0.493	0.0183229	0.4932659
		430	-27.87273	2.9360029	-3.9321	15.883827	-23.94063	-1.274501	0.1652697
		440	15.589375	18.791363	46.0102	8.2971782	-30.42083	-1.580149	0.106101
		450	19.1531	13.35707	25.322867	8.3171866	-6.169767	-0.58862	0.29085
		460	23.0012	21.604287	12.16265	8.9569986	10.83855	0.4031042	0.35694
470		10.062967	23.859112	46.514033	6.8563733	-36.45107	-1.558373	0.1297358	
485		-1.871425	9.3207005	12.335475	14.396449	-14.2069	-1.486038	0.1169811	
500	4.3872	18.269738	3.9778667	24.103553	0.4093333	0.0122719	0.4956614		
600	14.235975	14.576888	-5.73045	23.448924	19.966425	1.0982355	0.1761712		

Tabla 7. Resultados de la comparación de los porcentajes de ganancia para el intervalo base de 450ms en las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”. SEM = error estándar de la media, *t* es el estadístico de Student. En negritas se resaltan las medias que fueron significativamente mayores que cero ($P < 0.05$), y los valores de P que alcanzaron niveles significativos para la comparación de las 2 condiciones.

Intervalo Base	Modalidad	Intervalo Blanco	Sin Retroalimentación		Con Retroalimentación		Diferencia de medias	t	P
			Media	SEM	Media	SEM			
650ms	Auditiva	450	-19.49093	13.97621	8.3182333	17.328035	-27.80917	-2.211165	0.0787837
		550	-40.4426	33.386931	21.926825	8.0956396	-62.36943	-1.913797	0.0757795
		600	4.4651	22.9021	40.518	10.1503	-36.0529	-1.09078	0.2361879
		620	-6.760575	7.3010768	30.414725	17.495656	-37.1753	-1.839051	0.081596
		630	14.52375	23.65345	22.8841	33.0509	-8.36035	-0.88964	0.268569
		650	1.21372	20.171412	24.40712	15.213417	-23.1934	-1.464455	0.1084621
		670	31.0056	8.4602	3.8458	9.1143	27.1598	1.5454095	0.1828111
		680	8.513475	10.064469	42.157675	10.546406	-33.6442	-2.575869	0.0410368
		700	4.5418	15.4206	33.3256	19.0868	-28.7838	-7.851127	0.0403261
	750	23.083575	11.311958	36.854925	11.60506	-13.77135	-2.15632	0.0599954	
	850	-34.13113	57.689294	-30.21837	31.930111	-3.912767	-0.136804	0.4518573	
	Visual	450	31.0241	8.3405118	35.690833	8.3323819	-4.666733	-0.295177	0.3978406
		550	-0.3721	14.754286	8.2203	18.148927	-8.5924	-0.288981	0.3957075
		600	28.1107	28.0411	24.109	29.3181	4.0017	3.1336727	0.0983257
		620	-8.889875	19.331234	31.5902	16.487537	-40.48008	-1.522279	0.1126519
		630	39.3785	7.0415	21.3738	14.2723	18.0047	0.8447438	0.2767264
		650	28.37128	7.1491615	44.31036	4.4504222	-15.93908	-1.804979	0.0726969
		670	-3.90355	6.92535	10.79385	10.72245	-14.6974	-3.870691	0.0804763
680		6.464425	6.6708698	11.9016	22.432301	-5.437175	-0.322353	0.3841716	
700		23.3778	10.1845	50.3332	14.3734	-26.9554	-6.434959	0.0490732	
750	26.424275	3.8029538	46.8785	3.4899843	-20.45423	-9.157913	0.0013763		
850	23.934033	11.711083	24.0764	13.682559	-0.142367	-0.030448	0.4892375		

Tabla 8. Resultados de la comparación de los porcentajes de ganancia para el intervalo base de 650ms en las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”. SEM = error estándar de la media, *t* es el estadístico de Student. En negritas se resaltan las medias que fueron significativamente mayores que cero ($P < 0.05$), y los valores de P que alcanzaron niveles significativos para la comparación de las 2 condiciones.

Intervalo Base	Modalidad	Intervalo Blanco	Sin Retroalimentación		Con Retroalimentación		Diferencia de medias	<i>t</i>	P
			Media	SEM	Media	SEM			
850ms	Auditiva	600	3.24282	17.041731	25.63672	13.396815	-22.3939	-1.288952	0.1334533
		700	31.2586	24.5209	24.10725	12.33345	7.15135	0.5867798	0.3310914
		750	39.57125	13.32707	38.889625	7.8982551	0.681625	0.0865872	0.4682275
		800	19.55705	34.257224	32.91755	5.6327055	-13.3605	-0.445978	0.342918
		830	15.5242	14.330265	-41.6034	28.920512	57.1276	3.7952388	0.0314711
		850	31.042283	9.6286917	31.256533	19.968556	-0.21425	-0.00771	0.4970732
		870	36.0484	17.358898	1.6538667	29.411345	34.394533	1.6289489	0.1224376
		900	32.54335	6.7928946	15.3964	14.985024	17.14695	1.7413376	0.0899963
		950	-29.332	42.209656	31.013375	7.5398168	-60.34538	-1.738782	0.090229
		1000	14.79285	0.53565	19.9276	8.9091	-5.13475	-0.543662	0.3414931
		1100	22.76152	20.301245	13.7899	23.619285	8.97162	0.4771617	0.3290739
	Visual	600	-2.18416	11.404979	16.05082	16.43914	-18.23498	-1.133049	0.1602518
		700	27.08145	30.46665	37.86515	8.99285	-10.7837	-0.273285	0.415084
		750	27.845	14.961949	3.365875	25.235115	24.479125	0.8562735	0.2273968
		800	29.3914	23.149241	42.11405	10.544805	-12.72265	-0.425901	0.3494442
		830	28.556367	18.228937	53.994333	4.0411091	-25.43797	-1.171947	0.1809636
		850	28.0524	8.1775171	4.3583333	17.50829	23.694067	1.7714162	0.068349
		870	47.2838	10.514651	33.879533	17.288284	13.404267	1.1947027	0.1773342
		900	46.711125	12.094379	-4.8212	5.3031204	51.532325	5.8831835	0.0048998
		950	19.66445	21.895121	23.401225	9.8299225	-3.736775	-0.212912	0.4225214
		1000	31.7262	11.548	32.69555	5.52655	-0.96935	-0.056772	0.4819484
		1100	12.75964	17.892613	36.0187	5.6407724	-23.25906	-1.869999	0.0674157

Tabla 9. Resultados de la comparación de los porcentajes de ganancia para el intervalo base de 850ms en las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”. SEM = error estándar de la media, *t* es el estadístico de Student. En negritas se resaltan las medias que fueron significativamente mayores que cero ($P < 0.05$), y los valores de P que alcanzaron niveles significativos para la comparación de las 2 condiciones.

Se realizó un análisis más detallado de los datos, comparando el porcentaje de ganancia de cada intervalo de prueba en las condiciones “sin retroalimentación” y “con retroalimentación” utilizando nuevamente una prueba de *t* de Student. Los resultados de esta comparación para los porcentajes de ganancia se muestran en las tablas 7, 8 y 9; que corresponden a los intervalos base de 450ms, 650ms, y 850ms, respectivamente.

En la comparación intervalo por intervalo de las condiciones “sin retroalimentación” y “con retroalimentación”, se encontraron pocas diferencias.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de *t* de Student, intervalo por intervalo para cada condición de retroalimentación por separado, para probar la hipótesis de que la media era distinta de cero. Los resultados se muestran como medias resaltadas en negritas en las tablas 7 – 9 cuando la media fue significativamente mayor que cero ($P < 0.05$). Observamos que los patrones de distribución de medias significativamente distintas de cero cambian en los diferentes intervalos base.

En el intervalo base de 450ms (tabla 7, p.48) notamos que, en general, la media de los porcentajes de ganancia se incrementa cuando el sujeto recibe retroalimentación, y este incremento se acompaña de una disminución de la dispersión, lo que coincide con los resultados mostrados en la tabla 6 (p.47). Esto se tradujo en un incremento del número de intervalos con medias significativamente mayores que cero, en ambas modalidades.

Para el intervalo base de 650ms (tabla 8, p.48) se encontró un efecto más dramático. El incremento de la media del porcentaje de ganancia en la condición “con retroalimentación” respecto a “sin retroalimentación” prácticamente eliminó todos los valores negativos que se encontraron en la condición “sin retroalimentación” (excepto INTERVALO BLANCO: 850ms, MODALIDAD: auditiva). En la modalidad auditiva, esto resultó en la aparición de medias de porcentaje de ganancia significativamente mayores que cero en la condición “con retroalimentación”. En la modalidad visual podemos observar un notorio incremento en las medias del porcentaje de ganancia, aunque este incremento solo fue significativo para el intervalo de prueba de 750ms.

El efecto de la retroalimentación para el intervalo base de 850ms (tabla 9, p.49) fue sumamente discreto en comparación con los otros 2 intervalos, tanto al comparar las dos condiciones de retroalimentación intervalo por intervalo, como al comparar la totalidad de los datos (tabla 6, p.47). Es posible observar un ligero incremento en los valores de la media del porcentaje de ganancia, que no fue estadísticamente significativo. De hecho, la única diferencia significativa entre “con retroalimentación” y “sin retroalimentación” se encontró en el intervalo de prueba de 900ms en la modalidad auditiva, donde la media fue menor cuando los sujetos recibieron retroalimentación en la fase de prueba.

Lo anterior se resume en un efecto diferencial de la retroalimentación de los ensayos de la fase de prueba de la tarea PIU en las etapas pre- y post-entrenamiento para cada intervalo base. La tendencia general es que los valores del porcentaje de ganancia se incrementan cuando el sujeto recibe retroalimentación en la fase de prueba, y la variabilidad del porcentaje de ganancia entre sujetos disminuye.

Esto sugiere que:

- i) En el EXPERIMENTO 1, la tarea que el sujeto realiza en las pruebas pre- y post-entrenamiento es distinta a la tarea entrenada debido a la diferencia en la retroalimentación que se da en cada etapa. Esto puede implicar que se esté entrenando un aspecto específico del proceso de medición del intervalo cuando hay retroalimentación.
- ii) Los patrones de transferencia encontrados en el EXPERIMENTO 1 para los intervalos de 450ms y 650ms son resultado de que el sujeto tiene poca información de retroalimentación sobre su desempeño.
- iii) La sensibilidad diferencial de los diferentes intervalos base a la retroalimentación sugiere la existencia de un sistema segregado en unidades dedicadas a sub-rangos dentro del rango de cientos de milisegundos, lo que coincide con los resultados del EXPERIMENTO 1. Estas unidades acceden de manera distinta a una referencia del intervalo almacenada en memoria.

VII. DISCUSION.

En este estudio, encontramos que la generalización se presenta principalmente en la fase de prueba de la tarea de Producción de Intervalo Único a pesar de que el aprendizaje ocurre con una cinética similar en ambas fases de la tarea. Esto sugiere que el aprendizaje afecta principalmente al mecanismo de producción de intervalos de tiempo y no al mecanismo sensoriomotor de implementación de las respuestas. Los resultados obtenidos en el EXPERIMENTO 1 muestran una capacidad de generalización que varía en función del rango de duraciones de los intervalos. En el rango de intervalos probados para el intervalo base de 450ms encontramos que hay transferencia más o menos amplia en la modalidad entrenada (auditiva), pero no se observa un patrón claro de transferencia del aprendizaje en la modalidad no entrenada (visual). Para 650ms no encontramos patrones de transferencia en ninguna de las 2 modalidades. En contraste, para 850ms encontramos altos niveles de transferencia en ambas modalidades.

Los resultados del EXPERIMENTO 2 nos hacen suponer que estos patrones de transferencia son moldeados por la retroalimentación que recibe el sujeto. Encontramos, además, que los diferentes rangos de intervalos probados tienen una sensibilidad distinta a la presencia/ausencia de retroalimentación. Para el rango alrededor del intervalo base de 850ms se observó un efecto prácticamente nulo de la retroalimentación; en contraste, para 650ms el efecto fue notorio. El intervalo base de 450ms mostró una sensibilidad intermedia.

A. CINÉTICA DEL APRENDIZAJE DE LA PRODUCCIÓN DE INTERVALOS.

Previamente se ha reportado el aprendizaje de la percepción de intervalos (Karmarkar y Buonomano, 2006; Nagarajan *et al.*, 1998; Wright *et al.*, 1997) y que dicho aprendizaje de percepción puede transferirse a tareas de producción (Meegan *et al.*, 2000). No obstante, hasta donde sabemos, no existen reportes de aprendizaje en tareas de producción de intervalos. Resulta interesante que el aprendizaje siga un curso temporal similar en las dos fases de la tarea de producción de intervalo único, al igual que en los diferentes intervalos entrenados. En todos los casos se observan dos etapas: una etapa inicial en la que la variabilidad disminuye rápidamente, y una etapa en la que se alcanza una asíntota. Esta asíntota refleja la variabilidad mínima que puede alcanzarse con un entrenamiento de las características utilizadas. El aprendizaje reportado en tareas de percepción de intervalos (discriminación), en contraste, ocurre con un curso temporal en el que no se encuentra un aprendizaje rápido al inicio, sino que el desempeño mejora gradualmente hasta alcanzar un valor mínimo (Karmarkar y Buonomano, 2006; Nagarajan *et al.*, 1998; Wright *et al.*, 1997).

La diferencia de la cinética del aprendizaje en tareas de percepción y esta tarea de producción puede deberse a que se involucran diferentes componentes. En este estudio, el aprendizaje tiene al menos: 1) un componente sensorio-motor y 2) un componente de temporalización. Especulando un poco, podríamos suponer que la combinación de estos 2 componentes resulta en el curso temporal del aprendizaje de la tarea de producción de un intervalo único. Otra posibilidad es que durante el entrenamiento, el sujeto se formara una representación del intervalo en los primeros ensayos y utilizara esa representación de ahí en adelante, prestando poca atención a los intervalos inter-estímulo de la fase de instrucción durante el entrenamiento. Esto resultaría

en patrones de variabilidad similares en ambas fases de la tarea, y además, causaría que el aprendizaje fuera específico para la fase de prueba de la tarea.

En aprendizaje motor, se ha reportado que el aprendizaje de movimientos lineales estereotipados de duración (tiempo) y amplitud (espacio) fijas se transfiere a movimientos con diferentes duraciones y amplitudes (Goodbody y Wolpert, 1998). Esto sugiere una contribución del componente sensoriomotor a nuestras curvas de transferencia. En este sentido, se ha observado que el entrenamiento en una tarea motora produce cambios localizados y transitorios en la materia gris cortical. Sin embargo, estos cambios no ocurren en áreas motoras, sino en áreas de procesamiento de aspectos específicos de la información sensorial que son relevantes para la tarea (Draganski *et al.*, 2004). El entrenamiento en una tarea de malabarismo ocasionó cambios en el volumen de V5 (corteza medial temporal), pero no en áreas motoras o premotoras. Esto implica que la práctica de malabares representa un estímulo más intenso para las áreas de procesamiento de información visuo-espacial que para las áreas involucradas en la implementación de la respuesta motora. Esto apoya la idea de que el entrenamiento en una tarea de producción de intervalos representaría un estímulo más intenso para el sistema de procesamiento de información temporal que para el sistema motor.

B. GENERALIZACION DEL APRENDIZAJE ENTRE INTERVALOS.

Es de esperarse que el componente motor del aprendizaje se transfiera entre intervalos y modalidades, no obstante su influencia mostró ser modesta cuando se compararon las curvas de transferencia de las fases de instrucción y de prueba en el EXPERIMENTO 1. Entonces, la transferencia observada es atribuible al componente del sistema de procesamiento de información temporal.

Los resultados del EXPERIMENTO 1 apuntan hacia una menor capacidad de generalización en ciertos rangos de duraciones. Esto último es consistente con reportes de un punto de sensibilidad máxima en tareas de discriminación (Grondin, 2001). Si el sistema de percepción del tiempo se encuentra más finamente sintonizado en un rango de duraciones, es difícil que el aprendizaje se generalice ampliamente. Es posible que este sea el caso de los resultados obtenidos para el

experimento realizado utilizando un intervalo base de 650ms. No obstante, si así fuera, se esperaría una menor variabilidad en la producción de intervalos de 650ms, lo cual no concuerda con nuestros resultados. Otra posibilidad es que 650ms no sea un intervalo que se encuentre frecuentemente en el ambiente, o que sea un intervalo poco utilizado. Por ejemplo, en un estudio basado en el idioma sueco (Fant y Kruckenberg, 1996) se encontró que la frecuencia de las duraciones de las pausas (entre oraciones, párrafos, frases, etc.) se distribuye alrededor de picos en 400ms y 1200ms, y dentro de este rango los intervalos menos frecuentes se encuentran entre 600ms y 750ms. Esto es congruente también con el hallazgo de intervalos preferidos para el golpeo rítmico (con modas en 272ms y 450ms) cuando al sujeto se le pide golpear rítmicamente con el dedo a la velocidad que le parezca más cómoda (Collyer, Broadbent y Church, 1994). Por otro lado, 850ms puede ser un intervalo más frecuente en la naturaleza, por ejemplo: una señal interna, la frecuencia cardiaca, considerada como 70 pulsaciones/minuto, tiene un intervalo inter-pulsación promedio de 857ms.

Para el intervalo base de 450ms hubo transferencia en la modalidad entrenada (auditiva), pero no hacia la modalidad no entrenada (visual). Se ha sugerido que aunque el sistema de procesamiento temporal tuviese elementos centralizados (*v. gr.* un marcapaso compartido por diferentes modalidades sensoriales), la manera en que la información de diferentes modalidades sensoriales ingresa a este sistema podría ser distinta (Wearden, *et al.*, 1998), en el contexto del modelo marcapaso-acumulador (figura 4), esto significa que el interruptor que determina el número de pulsos que son contados en la instancia de reloj es operado de manera modalidad-dependiente. Esto es congruente con la ausencia de transferencia inter-modal encontrada para 450ms, pero no es congruente con el alto nivel de transferencia inter-modal encontrado en 850ms.

El patrón de transferencia encontrado para el intervalo base de 850ms es más consistente con una disminución de la distorsión de la referencia del intervalo almacenada en la instancia de memoria. No obstante, se ha observado un alto nivel de independencia entre la instancia de memoria y de toma de decisión (Harrington *et al.*, 2004a). Ante esta evidencia, es imposible deducir a partir de nuestros resultados cuál de estas dos instancias del procesamiento de información temporal aumenta su eficiencia con el entrenamiento.

El patrón de transferencia encontrado para el intervalo base de 450ms es una curva de transferencia típica, con un gradiente en el que la transferencia es menor conforme el intervalo se aleja de un intervalo con mayor transferencia. No obstante, el centro de la curva de transferencia no se encuentra sobre el intervalo entrenado, sino que la curva tiene un sesgo hacia intervalos más cortos que el entrenado. Esto indica que, posiblemente, durante el entrenamiento el circuito se especializó en la producción de intervalos más cortos que el entrenado, de tal forma que el intervalo con mayor ganancia fue un intervalo más corto. Por otro lado, la curva de transferencia encontrada para 850ms no es una curva de transferencia típica, sino más bien una función plana. Es posible que la amplitud de la curva de transferencia siga la propiedad escalar, de modo que el rango de intervalos probado alrededor de 850ms no fuera suficiente para alcanzar los límites de la curva de transferencia.

Al analizar la relación entre el aprendizaje y la transferencia (figura 19, p.46), se encontraron relaciones distintas entre intervalos base y modalidades. Esto apunta hacia un proceso de aprendizaje que modifica múltiples aspectos del procesamiento de información temporal. Dado que la cinética del aprendizaje es similar entre diferentes intervalos, se deduce que los aspectos que se modifican son similares, por tanto, que cada uno de ellos tiene un peso que varía en función del intervalo base. Esto es algo similar a la dependencia del contexto de la tarea que se ha reportado para la variabilidad total en la ejecución de tareas producción de intervalos (Merchant *et al.*, 2008b), que en conjunto con el hallazgo de patrones de transferencia distintos, sugiere que el sistema de procesamiento de información temporal es un sistema dividido en sub-sistemas dedicados a rangos de intervalos particulares. La idea de un sistema organizado en sub-sistemas fue sugerida a partir de que, en tareas de producción de intervalos, se encontró que las respuestas de un sujeto presentaban, de manera alternada, un sesgo hacia duraciones mayores y menores que el intervalo estándar (Collyer, Broadbent y Church, 1992). Esto se interpretó como evidencia de un sistema categórico para la temporalización de los movimientos.

C. TRANSFERENCIA DEL APRENDIZAJE BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE RETROALIMENTACION.

Por otro lado, es importante recordar que durante el entrenamiento el sujeto siempre recibió retroalimentación sobre su desempeño, por tanto, el sujeto tenía una determinada cantidad de información para producir el siguiente intervalo. No obstante, en el EXPERIMENTO 1 los sujetos no recibieron retroalimentación en la fase de prueba de la tarea en las etapas pre- y post-entrenamiento, reduciendo la cantidad de información.

El efecto de la retroalimentación en el desempeño de sujetos no ha sido estudiado en tareas de producción de intervalos, pero sí en una tarea de percepción de intervalos (Droit-Volet e Izaute, 2005). En dicha tarea, se presenta al sujeto un intervalo estándar varias veces, después se presentan intervalos de diferentes duraciones y el sujeto debe decir si el intervalo que se le presentó es igual al estándar o no. El efecto de la retroalimentación en este procedimiento es una disminución del umbral de discriminación: intervalos con duraciones más cercanas al estándar fueron categorizados como diferentes cuando el sujeto tuvo retroalimentación respecto a cuando no tuvo retroalimentación. Este efecto fue atribuido a una disminución de la variabilidad del estándar almacenado en memoria. Esto es consistente con el incremento generalizado del porcentaje de ganancia que se encontró en la condición ‘pre- y post-entrenamiento con retroalimentación’ en el EXPERIMENTO 2. El efecto de incremento del porcentaje de ganancia se encontró en todos los casos.

Es importante señalar que se encontró que los diferentes rangos de intervalos probados mostraron una sensibilidad diferencial a la presencia o ausencia de retroalimentación. La transferencia del aprendizaje del intervalo base de 650ms mostró una alta sensibilidad a la retroalimentación, mientras que la transferencia para 850ms presentó un efecto sutil. El incremento generalizado del porcentaje de ganancia para la modalidad visual en 450ms no alcanzó niveles significativos. No obstante, el incremento fue suficiente para que el porcentaje de ganancia en la condición ‘con retroalimentación’ alcanzara valores significativos en casi la mitad de los intervalos de prueba. El entrenamiento con retroalimentación pudo provocar una mayor eficiencia, específicamente, en el mantenimiento y la precisión de la referencia del intervalo en memoria y en el proceso de comparación del intervalo de referencia con el intervalo ‘en curso’ (toma de decisión). Decimos

que en ambos procesos por la interdependencia que se reporta para entre ellos (Harrington *et al.*, 2004a), y porque la retroalimentación podría: 1) limitar la variabilidad debida a la distorsión de la referencia del intervalo almacenada en memoria y 2) proporcionar información para el proceso de toma de decisión que limite la variabilidad de las respuestas. Esto moldearía las curvas de transferencia encontradas en las diferentes condiciones estudiadas.

VIII. CONCLUSION.

De lo anterior se concluye que el sistema de procesamiento de la información temporal, para el rango de los cientos de milisegundos, podría ser un sistema organizado en subsistemas dedicados a sub-rangos de duraciones particulares. Estos sistemas podrían presentar un nivel de traslape más o menos alto que no puede ser definido a partir de nuestros datos. Los subsistemas tendrían propiedades comunes (p. e. la cinética del aprendizaje) pero la manera en que se accede a la información proveniente de uno o múltiples marcapasos difiere entre los diferentes sistemas, como se evidenció al comparar la forma de las curvas de transferencia en los diferentes intervalos y los patrones de transferencia que se presentan en presencia/ausencia de retroalimentación.

IX. REFERENCIAS.

- Buhusi CV, Meck H. 2005. What make us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*. 6:755-765.
- Buonomano DV, Karmarkar UR. 2002. How do we tell time? *Neuroscientist* 8(1):42-51.
- Carr CE. 1993. Processing of temporal information in the brain. *Annu. Rev. Neurosci.* 16:223-43.
- Collyer CE, Broadbent HA, Church RM. 1992. Categorical time production: Evidence for discrete timing in motor control. *Percept. & Psychophysics*. 51(2):134-144.
- Collyer CE, Broadbent HA, Church RM. 1994. Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production. *Percept. & Psychophysics*. 55(4):443-453.
- Coull JT, Vidal F, Nazarian B, Macar F. 2004. Functional Anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science*. 303:1506-1508.
- Classen J, Liepert J, Wise SP, Hallett M, Cohen LG. 1998. Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *J. Neurophysiol.* 79:1117-1123.
- Daniel WW. 2002. *Bioestadística*. 4a edición en español (Trad. Francisco León Hernández). Ed. Limusa. México, D.F.
- Dragansky B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U, May A. 2004. Changes in grey matter induced by training. *Nature*. 427:311-312.
- Droit-Volet S, Izaute M. 2005. Effect of feedback on timing in children and adults: The temporal generalization task. *Quart. J. Exp. Psych.* 58A(3): 507-520.
- Fahle M. 2005. Perceptual learning: specificity versus generalization. *Curr. Op. Neurobiol.* 15:154-160.
- Edelman S, Intrator N. 2002. Models of perceptual learning. En: Fahle y Poggio (Eds). *Perceptual Learning*. MIT Press. USA. 2002.
- Fant G, Kruckenberg A. 1996. On the quantal nature of speech timing. *Proc. ICSLP 1996*: 2044-2047.
- Gaffan D. 1996. Associative and perceptual learning and the concept of memory systems. *Cognit. Brain Res.* 5:69-80.
- Gibbon J, Malapani C, Corby LD, Gallistel CR. 1997. Toward a neurobiology of temporal cognition: advances and challenges. *Curr. Op. Neurobiol.* 7:170-184.
- Goodbody SJ, Wolpert DM. 1998. Temporal and amplitude generalization in motor learning. *J. Neurophysiol.* 79:1825-1838.

- Grondin S. 2001. From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*. 127(1):22-44.
- Harrington DL, Haaland KY. 1999. Neural underpinnings of temporal processing: a review of focal lesion, pharmacological, and functional imaging research. *Reviews of Neuroscience* 10:91–116.
- Harrington DL, Haaland KY, Hermanowicz N. 1998. Temporal processing in the basal ganglia. *Neuropsychology*, 12(1):3-12.
- Harrington DL, Haaland KY, Knight RT. 1998. Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *J. Neuroscience*. 18(3)1085-1095.
- Harrington DL, Boyd LA, Mayer AR, Sheltraw DM, Lee RR, Huang M, Rao SM. 2004a. Neural representation on interval encoding and decision making. *Cognitive Brain Research*, 21:193-205.
- Harrington DL, Lee RR, Boyd LA, Rapcsak SZ, Knight RT. 2004b. Does the representation of time depend on the cerebellum? Effect of cerebellar stroke. *Brain* 127(3):561-574.
- Ivry RB, Hazeltine RE. 1995. Perception and production of temporal intervals across a range of durations: Evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*. 21:3-18.
- Ivry R. 1996. The representation of temporal information in perception and motor control. *Curr. Op. Neurobiol*. 6:851-857.
- Karmarkar UR, Buonomano DV. 2003. Temporal specificity of perceptual learning in an auditory discrimination task. *Learning and memory*. 10:141-147.
- Keele SW, Pokorny RA, Corcos DM, Ivry R. 1985. Do perception and motor production share common timing mechanisms: A correlational analysis. *Acta Psychologica*. 60:173-191.
- Kristofferson AB. 1980. A quantal step function in duration discrimination. *Perception & Psychophysics*. 27(4):300-306.
- Liu Z, Weinshall D. 2000. Mechanisms of generalization in perceptual learning. *Vision Research*. 40:97-109.
- Matell MS, King GR, Meck WH. 2004. Differential modulation of clock speed by the administration of intermittent versus continuous cocaine. *Behavioral Neuroscience* 118:150–156
- Matell MS, Meck WH. 2004. Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes. *Cognitive Brain Research*, 21:139-170.
- Mauk MD, Buonomano DV. 2004. The neural basis of temporal processing. *Annu. Rev. Neurosci*. 27:307-40.

- Meck WH. 1996. Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive Brain Research*, 3:227-242.
- Meegan DV, Aslin RN, Jacobs RA. 2000. Motor timing learned without motor training. *Nature Neuroscience*. 3(9):860-862.
- Merchant H, Georgopoulos AP. 2006. Neurophysiology of Perceptual and Motor Aspects of Interception. *J. Neurophysiol.* 95:1-13.
- Merchant H, Luciana M, Hooper C, Majestic S, Tuite P. 2008a. Interval timing and Parkinson's disease: heterogeneity in temporal performance. *Exp. Brain Res.* 184:233-248.
- Merchant H, Zarco W, Prado L. 2008b. Do we have a common mechanism for measuring time in the hundreds of milliseconds range? Evidence from multiple-interval timing tasks. *J. Neurophysiol.* 99:939-949.
- Nagarajan SS, Blake DT, Wright BA, Byl N, Merzenich M. 1998. Practice related improvements in somatosensory interval discrimination are temporally specific but generalize across skin location, hemisphere, and modality. *J. Neuroscience.* 18(4):1559-1570.
- Moore-Ede MC, Sulzman FM, Fuller CA. 1982. *The clocks that time us: Physiology of the circadian timing system.* Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts.
- Paz R, Wise SP, Vaadia E. 2004. Viewing and doing: similar cortical mechanisms for perceptual and motor learning. *TRENDS in the neurosciences.* 27(8): 496-503.
- Paulsen JS, Zimelman JL, Hinton SC, Langbehn DR, Leveroni CL, Benjamin ML, Reynolds NC, Rao SM. 2004. fMRI Biomarker of Early Neuronal Dysfunction in Presymptomatic Huntington's Disease. *Am. J. Neuroradiol.* 25(10):1715-1721.
- Poggio T, Bizzi E. 2004. Generalization in vision and motor control. *Nature.* 431:768-774.
- Postle BR, D'Esposito M. 1999. Dissociation of human caudate nucleus activity in spatial and nonspatial working memory: an event-related fMRI study. *Cogn. Brain Res.* 8:107– 115.
- Rammsayer TH, Lima SD. 1991. Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: cognitive and perceptual factors. *Percept Psychophys* 50:565–74.
- Rao SM, Mayer AR, Harrington DL. 2001. The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature Neuroscience*, 4(3):317-323.
- Robertson SD, Zelaznik HN, Lantero DA, Bojczyk KG, Spencer RM, Doffin JG, Schneidt T. 1999. Correlations for timing consistency among tapping and drawing tasks: Evidence against a single timing process for motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance.* 25:1316-1330.
- Smith CUM. 2000. *Biology of sensory systems.* Wiley. New York.

Tsodyks M, Gilbert C. 2004. Neural networks and perceptual learning. *Nature*. 431:775-781.

Wearden JH, Edwards H, Fakhiri M, Percival A. 1998. Why 'sounds are judged longer than lights': Application of a model of the internal clock in humans. *Quart. J. Exp. Psych.* 51B(2): 97-120.

Wing AM, Kristofferson AB. 1973. Response delays and the timing of discrete motor responses. *Percept. Psychophys.* 14:5-12.

Wright BA, Buonomano DV, Mahncke HW, Merzenich MM. 1997. Learning and Generalization of auditory Temporal-Interval Discrimination in Humans. *J. Neuroscience*. 17(10):3956-3963.

Young MW (2001). Circadian Rhythms. En: *Encyclopedia of Life Sciences*. John Wiley and Sons, Ltd.

Zelaznik HN, Spencer RMC, Ivry RB. 2002. Dissociation of implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*. 28:575-588.

X. INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.

A. FIGURAS.

Figura	Página
F1. Escalas de procesamiento de información temporal	3
F2. Transferencia del aprendizaje de percepción	6
F3. Propiedad escalar y análisis de pendiente	7
F4. Modelo Marcapaso-Acumulador	8
F5. Transferencia del aprendizaje en tareas de cuantificación de tiempo	12
F6. Análisis de pendiente de la variabilidad de tareas de temporalización con distintos contextos sensoriomotores	15
F7. Efectos de la administración de drogas sobre el procesamiento de información temporal.	17
F8. Resonancia Magnética (RM) Funcional relacionada a eventos del procesamiento de información temporal	19
F9. Representación esquemática de la tarea de producción de un intervalo único	26
F10. Representación esquemática del diseño experimental	32
F11. Curvas de aprendizaje de la producción de los tres intervalos base correspondientes a cada una de las fases de la tarea de PIU	35
F12. Resultados del análisis de datos de la FASE DE PRUEBA para el intervalo base de 450ms	37
F13. Resultados del análisis de datos de la FASE DE PRUEBA para el intervalo base de 650ms	38
F14. Resultados del análisis de datos de la FASE DE PRUEBA para el intervalo base de 850ms	39
F15. Distribución de las diferencias Pre-Post entrenamiento de las desviaciones estándar	40
F16. Resultados del análisis de datos de la FASE DE INSTRUCCIÓN para el intervalo base de 450ms	41
F17. Resultados del análisis de datos de la FASE DE INSTRUCCIÓN para el intervalo base de 650ms	42

F18. Resultados del análisis de datos de la FASE DE INSTRUCCIÓN para el intervalo base de 850ms	43
F19. Análisis de correlación entre los exponentes m de las curvas de aprendizaje y los valores del Índice de Generalización.	46

B. TABLAS.

Tabla	Página
T1. Intervalos base con los respectivos intervalos de prueba alrededor de cada uno.	28
T2. Comparación de los diferentes parámetros de las curvas de aprendizaje entre fases de la tarea y entre intervalos base	35
T3. Intervalos Base e intervalos de prueba correspondientes	36
T4. Comparación de los porcentajes de ganancia de las fases de la tarea para cada intervalo base y para cada modalidad	44
T5. Intervalos Base de la condición “con retroalimentación y sus respectivos intervalos de prueba	47
T6. Resultados de la prueba t de Student de la totalidad de los porcentajes de ganancia obtenidos en las dos fases de la tarea PIU para cada intervalo base	47
T7. Resultados de la comparación de los porcentajes de ganancia para el intervalo base de 450ms en las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”	48
T8. Resultados de la comparación de los porcentajes de ganancia para el intervalo base de 650ms en las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”	48
T9. Resultados de la comparación de los porcentajes de ganancia para el intervalo base de 850ms en las condiciones “con retroalimentación” y “sin retroalimentación”	49

XI. APENDICE I. FORMA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

Forma de consentimiento para experimentos de psicofísica.
(Página 1 de 2)

Nombre del Sujeto:

Fecha:

Título del Estudio:

Generalización de Intervalos Temporales: Psicofísica en Sujetos Humanos.

Investigador Principal: **Dr. Hugo Merchant**

Introducción

(Página 2 de 2)

Antes de aceptar su participación en este estudio de investigación, es importante que lea y entienda el presente texto. Este escrito describe el objetivo, el procedimiento, los beneficios y riesgos asociados al presente experimento.

Objetivo

El estudio en el que podrá participar está diseñado para entender los principios de la generalización de un aspecto específico del manejo del tiempo, que será aprendido intensivamente, sobre otros aspectos o contextos conductuales donde también se utiliza la variable tiempo. Con esta información se generarán predicciones extremadamente útiles para entender las bases neurofisiológicas de estas conductas.

Descripción del estudio

Usted estará sentado enfrente de un monitor de computadora y se le pedirá que presione un botón o unas teclas de computadora para ejecutar diferentes tareas asociadas a la cuantificación del tiempo. Estas tareas se dividen en dos: tareas de producción en intervalos en las que se producirán movimientos rítmicos asociados y tareas de percepción en las que se categorizarán intervalos. El estudio tendrá una duración de 10 días, cada día con una sesión de 1 hora aproximadamente. Si durante el estudio usted siente cualquier incomodidad, el estudio será interrumpido inmediatamente.

Posibles riesgos

El estudio no tiene riesgos físicos o psicológicos de ningún tipo.

Posible beneficios

El estudio no tiene beneficios directos para los participantes. Sin embargo, su colaboración será importante para entender las bases psicofísicas de la cuantificación del tiempo.

Confidencialidad

La confidencialidad es uno de los derechos de los sujetos humanos involucrados en trabajos de investigación, por tanto, los datos de este estudio serán mantenidos en privado. Cualquier manuscrito publicado en relación con este estudio no incluirá la identidad de los sujetos participantes.

Yo, (nombre) _____, he leído y entendido todo lo anterior. El experimentador, Ramón Bartolo Orozco, me ha explicado el estudio y ha contestado todas mis preguntas. Me han descrito los posibles riesgos y beneficios del estudio y entiendo que puedo abstenerme de participar en este estudio sin ninguna penalización.

Firma del participante