

Interacciones entre los sistemas auditivo y motor en la sincronización sensorimotora

Interaction between auditory and motor systems in sensorimotor synchronization

ARTÍCULO

Leonardo Versaci

Universidad Nacional de Quilmes, Argentina. Contacto: leonardo.versaci@unq.edu.ar,
focodefoco@gmail.com

Rodrigo Laje

Universidad Nacional de Quilmes, Argentina. Contacto: rlaje@unq.edu.ar

Recibido: abril de 2022

Aceptado: abril de 2022

Resumen

La sincronización sensorimotora se define como la sincronización de acciones rítmicas con un estímulo externo y se da naturalmente cuando bailamos o cuando golpeteamos el dedo al ritmo de la música. Se ha propuesto que este fenómeno es posible en virtud de la presencia de conexiones especiales a nivel neural entre los sistemas motor y auditivo (acople audio-motor), y que no se dan, por ejemplo, entre los sistemas motor y visual (Zatorre et al., 2007). En este trabajo presentamos evidencia de que el acople audio-motor opera en una tarea de sincronización sensorimotora, específicamente en una tarea de *finger tapping con metrónomo* auditivo, que consiste en sincronizar los movimientos del dedo con los estímulos externos. Realizamos un experimento de *finger tapping* en el cual participaron 44 músicos a los que les medimos la fuerza del golpeteo en dos condiciones de *feedback* sensorial (sin y con *feedback* auditivo adicional) y en dos niveles de atención. Los resultados muestran que la duración del contacto entre el dedo y el sensor es significativamente menor en las condiciones con *feedback* auditivo adicional, lo cual sugiere un arrastre de la modalidad auditiva sobre el control motor, que en otros trabajos se ha considerado como evidencia del acople audio-motor (Chen et al., 2006). Por otro lado, los resultados mencionados se mostraron independientes del nivel de atención, lo cual sugiere que el acople audio-motor opera en un nivel pre atencional.

Palabras clave: *finger tapping*, sincronización sensomotora, acople audio-motor, fuerza, duración del *tap*

Abstract

Sensorimotor synchronization is defined as the synchronization of rhythmic actions with external stimuli and occurs naturally in dancing or when we tap our fingers to the beat of music. It has been suggested that this phenomenon is possible because of the presence of particular neural links between both motor and auditory systems (audio-motor coupling), and that they do not occur, for example, between the motor and the visual systems (Zatorre et al., 2007). In this work, we provide evidence of the audio-motor coupling presence in a sensorimotor synchronization task, specifically in a finger tapping paradigm (synchronization of finger movements with external stimuli). We conducted a finger tapping experiment with an auditory metronome in which 44 musicians participated. We measured tapping force under two sensory feedback conditions (with and without additional auditory feedback) and under two attentional levels. The results show that the duration of the contact between the finger and the sensor is significantly shorter in conditions with additional auditory feedback, suggesting a capture effect of the auditory modality over the motor control; such results have been considered as a signature of the audio-motor coupling (Chen et al., 2006). On the other hand, the aforementioned results were shown to be independent of the attention level, which indicate that the audio-motor coupling could operate at a pre-attentional level.

Keywords: finger tapping, sensorimotor synchronization, audio-motor coupling, force, tap duration

1. Introducción

Sincronización sensomotora y acople audio-motor

La sincronización sensomotora es una habilidad casi específicamente humana que consiste en sincronizar acciones rítmicas con un estímulo externo, como cuando bailamos o golpeteamos con el dedo al ritmo de la música. Para intervalos de estímulo del orden de las centenas de los milisegundos, se acepta que la sincronización a un metrónomo auditivo es menos variable que a un metrónomo visual. Este hecho es interpretado en el contexto de la sincronización sensomotora como evidencia de un acople privilegiado entre los sistemas auditivo y motor (Hove, et al., 2013; Chen, et al., 2002; Kolers y Brewster, 1985; Repp, 2002). Es común mover el pie al ritmo de la música, pero no parece natural o espontáneo hacerlo ante un estímulo visual regular, como una luz titilante. La idea de acople audio-motor ha encontrado una aplicación práctica en la rehabilitación de pacientes con Parkinson y con ACV: se ha visto que una terapia de rehabilitación que utiliza movimientos sincronizados con ritmos musicales sencillos tiene mejores resultados que una terapia tradicional, sin ritmos musicales (Thaut y Abiru, 2010; Thaut, et. al., 1997; McIntosh,

et al., 1997). También se han observado interacciones en el sentido inverso, por ejemplo, una acción previamente aprendida puede generar actividad en la corteza auditiva, aún en la ausencia de sonido (Rodríguez et al., 2012). En forma general, se ha planteado que las interacciones audio-motoras son de gran relevancia en el aprendizaje del lenguaje y en la ejecución musical, pues permiten conectar un sonido con una acción motora y viceversa (Warren, et al., 2005; Zatorre, et al., 2007).

En cuanto al mecanismo que subyace al acople audio-motor, Warren y sus colegas (2005) proponen un modelo de transformación de señales auditivas en representaciones motoras a través de patrones (*templates*, en la literatura). Los patrones son asociaciones entre sonidos y acciones motoras que se construyen con la experiencia. Cada patrón codifica una de las características del sonido (por ejemplo, su duración), de tal manera que un sonido complejo puede construirse combinando patrones elementales (Kuhl, 2004); lo cual, en relación al habla, evita tener que almacenar individualmente las acciones motoras para articular cada palabra. Otro de los beneficios del mecanismo basado en patrones es el aumento de la eficiencia en la comunicación audio-motora. Existe evidencia electrofisiológica de que el mecanismo de patrones es uno de los principios de funcionamiento genéricos en la corteza auditiva (Näätänen, et. al., 2001; Näätänen, et. al., 2005). Este mecanismo podría proveer la base para el aprendizaje del lenguaje y la imitación de sonidos complejos y es probable que esté involucrado en la interpretación de un instrumento musical (Warren et al., 2005).

Una de las consecuencias del modelo descrito en el párrafo anterior es que abre la posibilidad a que las acciones motoras sean moduladas por sonidos. En un experimento de *finger tapping con metrónomo* (sincronización de los movimientos del dedo, *taps*, a un estímulo externo periódico) se puso a prueba esta hipótesis con una secuencia de estímulos auditivos (*bips*) en la cual uno de cada tres *bips* fue acentuado. Los resultados mostraron que la duración del *tap* en el *bip* acentuado fue mayor que en el resto de los *bips*. Esto sugiere una modulación de las acciones motoras a través de la manipulación del sonido, lo cual, según los autores, constituye una corroboración del acople audio-motor (Chen, et. al., 2006; Chen, et. al., 2009). Resultados similares fueron reportados en trabajos anteriores en *finger tapping* en régimen de sincronización. En dichos trabajos, se ve que un aumento de la duración del estímulo conduce a un aumento en la duración del *tap* (Mates, et al., 1992; Vos, Mates y van Kruysbergen, 1995). Si bien estos últimos trabajos no hablan del acople audio-motor, los resultados pueden interpretarse dentro de ese marco, ya que se trata de una manifestación de cómo la alteración de las características del sonido tiene consecuencias sobre las acciones motoras. En este caso, un sonido corto genera una acción corta y un sonido largo genera una acción de larga duración.

Las ideas centrales de este trabajo son: mostrar evidencia del acople audio-motor en una tarea de *finger tapping*, estudiar su dependencia con la atención y analizar la posibilidad de que la duración del sonido pueda modular la duración de las acciones motoras. Para esto mostramos los resultados de un experimento de *finger tapping* con metrónomo auditivo y perturbaciones de

período, en el cual utilizamos dos condiciones de *feedback* sensorial (SIN y CON *feedback* auditivo adicional) y dos niveles de atención (NORMAL y ALTA). Utilizamos el argumento que plantea que una interacción entre los aspectos motores, como la duración del *tap*, y la condición de *feedback* auditivo podría sugerir la presencia del acople audio-motor (Chen et al., 2006). Adicionalmente, proponemos un experimento para estudiar el fenómeno más ampliamente en el contexto de *finger tapping* con metrónomo y detallamos las predicciones que se desprenden de este marco conceptual. Los resultados de este trabajo podrían ayudar a comprender cuáles son las regiones cerebrales activas en la ejecución de una tarea de *finger tapping*, cuestión sobre la cual aún no hay consenso debido a la gran cantidad de procesos neurales que se supone están involucrados (López y Laje, 2019).

2. Métodos

Sujetos y consideraciones éticas

44 músicos diestros (mano derecha hábil) participaron en el experimento (11 mujeres). Se consideró músico a aquel que tuviera 3 años o más de práctica en algún instrumento musical; decidimos considerar solo músicos debido a que muestran menor variabilidad (Repp, 2010). La edad promedio de los participantes fue de 27,5 años (rango 19-44) y la cantidad de años de práctica promedio en su instrumento fue de 5,3 años (rango 3-10). Los participantes fueron remunerados con 150 pesos argentinos y firmaron un consentimiento informado. Se registraron datos comportamentales de la fuerza de tapeo de los 44 participantes. Nuestro protocolo experimental fue diseñado de acuerdo a los lineamientos nacionales e internacionales y fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad de Quilmes.

Diseño experimental

Se manipularon tres factores: Atención, niveles NORMAL y ALTA, factor entre sujetos (*between-subjects factor*, en inglés); *Feedback* Auditivo Adicional, niveles SINf y CONf, factor intra sujetos (*within-subjects factor*, en inglés); y Signo de la Perturbación, niveles POS y NEG, factor intra sujetos. Con respecto al factor Atención, los sujetos fueron asignados a uno u otro nivel al azar. La razón de esta elección es evitar efectos de una condición sobre otra y se basa en resultados preliminares donde encontramos que mezclar niveles de atención para un mismo sujeto hace que todos los datos del sujeto queden contaminados por el nivel de atención ALTA.

Procedimiento

Como consigna general, se les pidió a los participantes que siguieran con su dedo índice derecho el ritmo propuesto por el metrónomo golpeando sobre un sensor de fuerza resistivo, dejando las muñecas y antebrazos apoyados sobre la mesa. Se les pidió que miraran un punto fijo en la pantalla (cruz de fijación de vista) y que evitaran movimientos rítmicos de otras partes del cuerpo como cabeza o pies. Antes de comenzar el experimento los participantes tuvieron una etapa de práctica de 10 minutos de duración, aproximadamente. Para generar una diferencia entre las condiciones de atención NORMAL y ALTA utilizamos dos sensores de fuerza separados 0,5 cm. En la condición de atención NORMAL se les pidió a los sujetos que tapearan en uno solo de los sensores (el sensor de la izquierda). No se les dio ninguna indicación específica acerca de dónde deberían orientar su atención. En la condición de atención ALTA, se les pidió que comenzaran tapeando en el sensor de la izquierda y que cuando detectaran la perturbación (cambio en el período de la serie de estímulos) cambiaran inmediatamente al sensor de la derecha y continuaran tapeando allí hasta el final de la secuencia de estímulos.

Cada sujeto fue asignado al azar a la condición de atención ALTA o NORMAL. Para cada sujeto, el experimento consistió en 2 bloques (un bloque por cada condición de *feedback* auditivo adicional, ordenados al azar y contralanceado entre sujetos) con un descanso de 3 minutos entre bloques. El *feedback* auditivo adicional es un tono, de una frecuencia diferente a la del estímulo, que el sujeto escucha cada vez que toca el sensor. En cada bloque los sujetos debieron completar 12 secuencias válidas (6 secuencias para cada valor de perturbación ± 60 ms, ordenadas al azar), con un descanso de 1 min luego de las primeras 6 secuencias válidas. Cada secuencia de estímulos consistió en una serie de 32 tonos auditivos; el ISI (intervalo inter estímulo) pre perturbación fue de 600 ms y la perturbación consistió en un cambio de período (o cambio de tempo, en términos musicales) de ± 60 ms que ocurrió al azar entre los bips 11 y 15. Los bips de la secuencia de estímulos fueron tonos formados por una onda sinusoidal de 500 Hz de frecuencia, 50 ms de duración y 70 a 80 dB de intensidad sonora; los *bips* del *feedback* auditivo adicional fueron tonos formados por una onda sinusoidal de 1800 Hz de frecuencia, 50 ms de duración y 70 a 80 dB de intensidad sonora. La duración total del experimento incluyendo la etapa de práctica fue de 45 min a 1 hora.

Asimismo se registró la asincronía de cada respuesta (diferencia de tiempo entre estímulo y respuesta) y se definió una secuencia válida como aquella que cumple las siguientes condiciones: 1) ninguna de las asincronías es mayor en valor absoluto a 250 ms; 2) no falta ni sobra ninguna respuesta (es decir, no hay dos respuestas asociadas a un mismo estímulo o un estímulo sin respuesta asociada); 3) la primera respuesta ocurre como máximo en el tercer *bip*; 4) solo para atención ALTA: el cambio de sensor debe producirse exactamente un *bip* después de la perturbación. Si se produce una secuencia inválida el participante recibe aviso sobre el tipo de error cometido y se agrega una secuencia de la misma condición al final del bloque.

Registro de las respuestas y medición de la fuerza

El registro de las respuestas y el envío del estímulo y del *feedback* auditivo adicional fue hecho con un Arduino Mega 2560 conectado a dos sensores de fuerza (*force sensitive resistors*, FSR) separados entre sí una distancia de 0.5 cm, conectados a una PC. Según el trabajo de Schultz y van Vugt (2016), en el que se comparan diferentes dispositivos aptos para experimentos de *finger tapping*, la combinación Arduino-FSR es la que presenta menor latencia entre el momento en que se presiona el sensor y el momento en que suena el tono de *feedback* correspondiente (0.6 ms) y también es la que presenta menor variabilidad en la latencia (0.3 ms), entre otras ventajas. Se usaron unos auriculares cerrados Sennheiser HD 280 Pro y para evitar que los sujetos tuvieran *feedback* visual del movimiento del dedo se les pidió que miraran un punto fijo de la pantalla del monitor y además se colocó verticalmente un tabique de cartón para evitar la visión periférica.

Se registraron 22 perfiles de fuerza por secuencia, que incluyen los 7 *taps* previos a la perturbación. Para tener mejor definición de los cambios abruptos de la fuerza y debido a la poca memoria del Arduino, se utilizó una frecuencia de muestreo de 1 kHz durante los primeros 50 ms y de 0,5 kHz durante los 130 ms restantes (esta disminución en la frecuencia de muestreo permitió aumentar la cantidad de respuestas registradas por secuencia). Luego, interpolamos para obtener una frecuencia uniforme de 1 kHz y finalmente extrapolamos cuadráticamente hasta los 250 ms. El registro de la fuerza se almacena en la memoria del Arduino y al final de cada secuencia se transmite a la PC a través del puerto serie.

En la figura 1 se observa la conexión del sensor FSR con el Arduino. El sensor FSR es una resistencia variable (R_{FSR}) que disminuye de manera proporcional a la fuerza que se ejerce sobre él (considerando que la superficie de contacto es constante). Cuando el sensor está sin presionar, su resistencia es muy grande y el voltaje en el punto P es cero. Cuando se presiona, su resistencia disminuye y el potencial en el punto P aumenta. El Arduino registra el voltaje en el punto P, por esta razón es necesario hacer la conversión a fuerza. De acuerdo a la figura, se puede plantear $i = \frac{V_0}{R_{FSR}-R}$ y $V_P = iR$. Juntando estas dos ecuaciones encontramos una relación entre la resistencia del sensor y el voltaje medido:

$$R_{FSR} = R \left(\frac{V_0}{V_P} - 1 \right) \quad (\text{ec. 1})$$

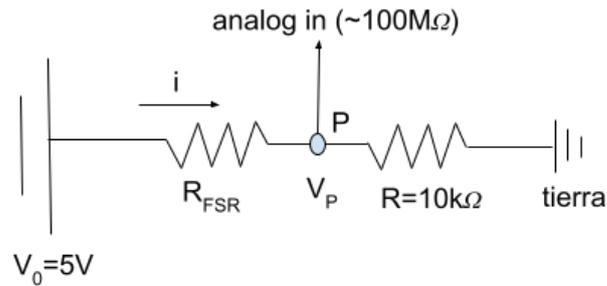


Figura 1. Conexión entre el Arduino y el sensor FSR utilizada para el registro de la fuerza. R: resistencia fija; R_{FSR} : resistencia del sensor FSR, variable; V_P : voltaje medido por el Arduino; analog in: conexión al Arduino.

De acuerdo a las especificaciones del sensor FSR (<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>), la relación aproximada entre fuerza y R_{FSR} para cualquier superficie de contacto es $F \sim 1/R_{FSR}$. Por lo tanto podemos usar $F = \frac{k}{R_{FSR}}$ con $k = 1N\Omega$ para todos los sujetos (superficies de contacto similares) y expresar la fuerza en unidades arbitrarias. Juntando la relación $F = 1/R_{FSR}$ con la ecuación (1), se obtiene la relación entre la fuerza y el voltaje medido:

$$F = \frac{kV_P}{R(V_0 - V_P)} \quad (\text{ec.2}).$$

Los valores de fuerza fueron multiplicados por 10^4 para obtener valores entre 0 y 5 en unidades arbitrarias.

Control del experimento: interacción Matlab®-Arduino

Un programa escrito en Matlab® ordena las 24 secuencias válidas que cada sujeto debe ejecutar para completar el experimento, separadas en dos bloques de 12 secuencias de acuerdo a la condición de *feedback* auditivo adicional (ver Procedimiento). Antes de la ejecución de cada secuencia, el programa envía al Arduino los siguientes parámetros: cantidad de estímulos por secuencia, signo y tamaño de la perturbación, *bip* de la perturbación, período inicial de la secuencia, *feedback* auditivo adicional no/sí. El Arduino recibe los parámetros, ejecuta la secuencia, almacena los valores de asincronía y de fuerza, y al finalizar la secuencia envía los datos al Matlab® por el puerto serie para su posterior procesamiento.

Definición de regiones

Cada sujeto realizó 6 secuencias (correctas) en cada condición de *feedback* y perturbación. Se alinearon estas secuencias de acuerdo al *bip* de la perturbación y se descartaron las

respuestas del comienzo y del final que no fueran comunes a todas las secuencias. Esto dio una serie temporal promedio de las asincronías por sujeto y condición de *feedback* auditivo y signo de perturbación de 22 respuestas/*bips* cada una en las que la perturbación sucede en el *bip* $n=8$. En este trabajo solo presentaremos resultados concernientes a la región pre perturbación, definida por los 7 *bips* previos a la perturbación. Para el análisis del proceso de resincronización luego de la perturbación ver Versaci y Laje (2021a).

Definición de variables

En todas las variables definidas en la zona pre perturbación se juntaron los datos correspondientes a ambos niveles del factor signo de perturbación, POS y NEG, ya que no se esperan diferencias debidas a este factor en la zona previa a la perturbación.

Fuerza media, F . Como medida de la fuerza del *tap* se tomó el valor correspondiente al primer pico del perfil de fuerza del *tap*, que llamaremos F . Para cada sujeto, condición de *feedback* y de atención, el cálculo de la fuerza se realizó promediando los F de los 7 *taps* en la zona pre perturbación y luego, promediando las secuencias correspondientes a esa condición y sujeto.

Duración del *tap*. Se definió la duración de un *tap* individual como el intervalo de tiempo comprendido entre que la fuerza del sensor supera un valor de 0.01 ua (la definición de ua, unidades arbitrarias, puede encontrarse en la sección *Registro de las respuestas y medición de la fuerza, Métodos*) hasta el instante correspondiente al primer valor de tiempo de 4 valores consecutivos con fuerza cero. Se promediaron las duraciones de los *taps* correspondientes a los 7 *taps* que preceden a la perturbación. Luego, para cada sujeto se promediaron las secuencias correspondientes a cada condición.

Datos y códigos

Para el registro de las respuestas del Arduino y el envío de los tonos del *feedback* auditivo adicional y del estímulo se usaron programas de diseño propio en C y también se adaptó un programa de Schultz y van Vugt (2016) originalmente para Arduino Uno que permite presentar tonos auditivos sinusoidales. El control del experimento y el posterior procesamiento de datos se realizó con programas de factura propia en Matlab®. El procesamiento de los datos del EEG se realizó con códigos en Matlab® de factura propia. Todos los datos y los códigos empleados para la confección de las figuras publicadas están disponibles en Portal del Laboratorio de Dinámica Sensomotora (2021).

3. Resultados

La duración del tap disminuye con el agregado de feedback auditivo adicional y no depende de la atención

En la figura 2, se muestra el promedio de la duración del *tap* entre todos los sujetos. Se observa que la duración del *tap* disminuye significativamente en las condiciones CONf; no hay efecto del factor atención ni interacciones significativas (ANOVA de dos factores, con atención como factor entre sujetos y *feedback* como factor intra sujetos; atención $F(1,42)=0.25$, $p=0.61$; *feedback* $F(1,42)=26.9$, $p=5 \times 10^{-6}$; interacción $F(1,42)=0.23$, $p=0.63$). El promedio de la duración del *tap* para las condiciones sin *feedback* da 95 ms; mientras que para las condiciones con *feedback* vale 71 ms; la reducción representa un 25%. Este efecto mostró ser sistemático en gran medida: 40 de los 44 sujetos disminuyeron la duración del *tap* con el agregado de *feedback* auditivo adicional; eso explica un valor de p-valor tan pequeño para el factor *feedback* ($p=5 \times 10^{-6}$). Los resultados sugieren que el *feedback* auditivo adicional (con *bips* de 50 ms de duración) modula la respuesta motora acortando la duración del *tap*. Cabe mencionar que los sujetos no recibieron ninguna indicación explícita sobre la duración con la que debían ejecutar sus *taps*.

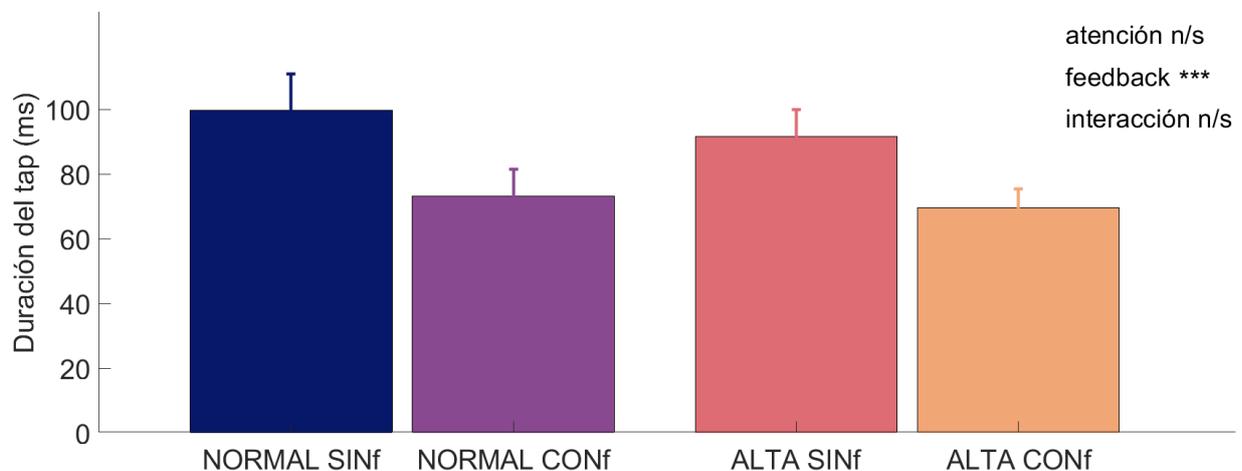


Figura 2. La duración del *tap* disminuye con el agregado de *feedback* auditivo. Esto sugiere que las respuestas motoras pueden ser moduladas por el sonido y puede considerarse una manifestación de la interacción audio-motora. El efecto de la atención en la duración del *tap* no es significativo, lo cual sugiere que las interacciones audio-motoras se dan en un nivel pre atencional. n/s: no significativo; *feedback* $p = 5 \times 10^{-6}$.

La disminución de la duración del tap en las condiciones CONf no obedece a causas mecánicas.

En la figura 3A, se observa el promedio de F entre todos los sujetos, según condición. Las barras de error representan el error estándar entre sujetos. La fuerza es aproximadamente un 20% menor en las condiciones con *feedback*; el efecto es significativo con $p=0.001$ (ANOVA de dos factores, con atención como factor entre sujetos y *feedback* como factor intra sujetos; atención $F(1,42)=0.49$, $p=0.48$; *feedback* $F(1,42)=11.6$, $p=0.001$; interacción $F(1,42)=0.07$, $p=0.79$). La fuerza no depende de la atención ni de una interacción entre *feedback* y atención. La disminución

de la fuerza con el agregado de *feedback* es lo esperado de acuerdo a lo que se desprende de los modelos de predicción sensorial (Versaci, 2021b).

En el panel B, se muestra la fuerza con la que fue ejecutado el *tap* en función de la duración del *tap* para cada una de las condiciones. Para cada *tap* se calculó su duración y la fuerza del primer pico, F. Los valores de la duración del *tap* de todos los sujetos (7392 *taps* por condición) se juntaron en un mismo grupo para cada condición de *feedback* y atención por separado. En cada condición, se tomó el rango completo de valores de duración del *tap* y se lo dividió en 40 intervalos de acuerdo a los percentiles; es decir cada uno de los 40 intervalos incluye una cantidad igual de datos (7392/40~184 valores de duración del *tap* por intervalo). Cada uno de los valores de duración del *tap* está relacionado con el correspondiente valor de fuerza. Finalmente, cada intervalo define un punto en la figura 3B: la coordenada en el eje horizontal se calcula promediando los valores de duración del *tap* incluidos en cada intervalo y la coordenada vertical se calcula promediando los correspondientes valores de fuerza. Como se dijo, la cantidad de valores dentro de cada intervalo es la misma, pero el rango de cada uno no tiene igual longitud. Normalmente, los intervalos extremos son los que poseen un rango mayor puesto que hay menos puntos con valores extremos. Se practicaron regresiones lineales para cada una de las condiciones, los intervalos extremos fueron excluidos (puntos vacíos en la figura) (p-valor de la pendiente, R², coeficiente de Pearson: NORMAL SINf: 0.00025, 0.31, -0.56; NORMAL CONf: 1.7x10⁻⁷, 0.53, -0.73; ALTA SINf: 0.23, 0.039, 0.19; ALTA CONf: 0.0011, 0.26, -0.51). Cuando se agrega *feedback* auditivo disminuye la duración del *tap* promedio, pero también disminuye la fuerza promedio (panel A); por lo tanto, se podría pensar que la disminución de la duración del *tap* es una consecuencia mecánica de la disminución de la fuerza. Sin embargo, cuando se observa la relación entre fuerza y duración del *tap* dentro de una condición, hay una correlación inversa en 3 de las condiciones y ausencia de correlación en la restante (panel B); lo cual sugiere que la disminución de la duración del *tap* se debe a otra causa (no mecánica) y distinta a la disminución de la fuerza. Finalmente, la variación de la duración del *tap* no depende del factor atención lo cual sugiere que el acople audio-motor opera en una fase pre atencional.

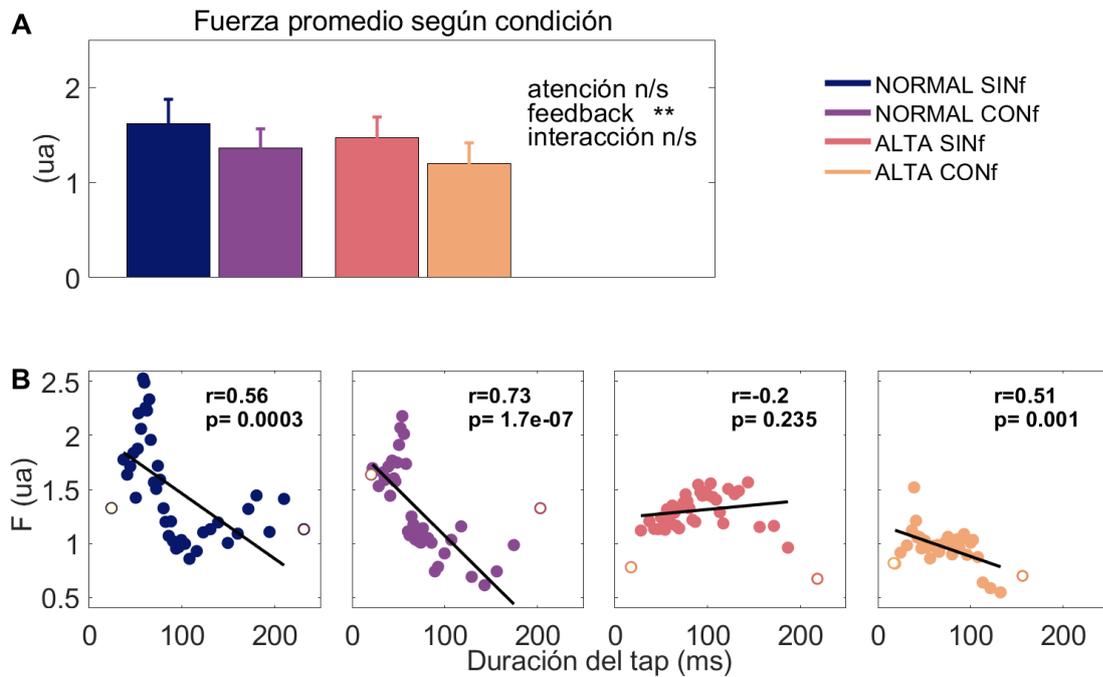


Figura 3. (A) Fuerza promedio entre todos los sujetos, F . Se observa una variación significativa de la fuerza de acuerdo al factor *feedback*, los sujetos tapean más suavemente en la condición CONF. Esta variación de fuerza no depende del factor atención. n/s: no significativo; *feedback* $p=0.0014$. (B) Fuerza en función de la duración del *tap*. Podría pensarse que la disminución de la duración del *tap* es una consecuencia mecánica de la disminución de la fuerza, ya que ambas variables disminuyen en valor promedio con el agregado de *feedback* auditivo (ver figura 2 y panel A de esta figura). Sin embargo, si se observa dentro de cada condición de *feedback* y atención, se hace patente la ausencia de correlación positiva entre duración del *tap* y fuerza, ya que dentro de cada condición mantienen una relación inversa o presentan ausencia de correlación, por lo tanto puede descartarse la disminución de fuerza como causa mecánica de la disminución de la duración del *tap*. Para cada condición, se muestran los coeficientes de Pearson (r) y el p -valor de la pendiente.

4. Discusión

Un sonido de corta duración induce una acción de corta duración.

El acortamiento de la duración del *tap* con el agregado de *feedback* auditivo sugiere que las acciones motoras pueden ser moduladas por las características del sonido. Esta interacción entre sonido y acción puede considerarse como una corroboración del acople audio-motor, de manera similar a como lo han hecho otros trabajos en el contexto de *finger tapping* con sincronización (Chen et al., 2006; Chen et al., 2009). Concretamente, la duración promedio del *tap* en las condiciones SINf es de aproximadamente 100 ms. En las condiciones con *feedback* auditivo adicional se incorpora un *bip* cuya duración es la mitad de ese valor (50 ms), con lo cual, la duración del *tap* pasa a valer 73 ms, en promedio. De acuerdo a las características del acople audio-motor, y particularmente a su condición que posibilita la imitación de sonidos (Warren et al., 2005), puede pensarse que un sonido corto induce una acción motora corta y que un sonido largo induce una acción larga, como más minuciosamente lo muestran otros trabajos de *finger tapping*

(Mates et al., 1992; Vos et al., 1995). Por ejemplo, en Mates y otros, 1992, se observa que la duración del *tap* aumenta cuando la duración del estímulo también lo hace, y aunque los sujetos recibieron la indicación explícita de no alterar nunca la duración del *tap* no pudieron evitar este arrastre. Los autores especulan que el alargamiento de la duración del *tap* podría deberse a que esos *taps* son ejecutados con mayor fuerza (aunque no reportan medición de fuerza). Sin embargo, a la luz de los resultados de nuestro trabajo, podemos decir que el aumento de fuerza no está correlacionado con un aumento en la duración del *tap* (figura 3B); más bien lo contrario: la relación es inversa en tres de las cuatro condiciones de *feedback* y atención: *taps* largos corresponden a *taps* más débiles. Esto nos permite descartar una explicación mecánica para el aumento de la duración del *tap* en el trabajo de Mates et al. y proponer, en cambio, una explicación basada en el acople audio-motor, según el cual, podemos suponer que un sonido largo induce o está vinculado con una acción motora larga. El hecho que en nuestros datos la disminución de la duración del *tap* no dependa de la atención, sugiere que el mecanismo de acople audio-motor funciona de manera automática o se da en fase pre atencional, lo cual es consistente con la evidencia electrofisiológica y de resonancia magnética funcional (Näätänen, et al., 2001; Näätänen et al., 2005).

Predicciones para un futuro experimento

Para corroborar la idea de que un sonido corto induce un *tap* corto y que un sonido largo induce un *tap* largo, proponemos un experimento en el que la duración del *feedback* auditivo adicional sea un factor bajo control experimental. El experimento propuesto es esencialmente el mismo que condujeron Vos y sus colegas (1995), con la diferencia que en dicho trabajo se alteró la duración de los *bips* del estímulo (no usaron *feedback* auditivo adicional). Probablemente, la duración de los *bips* de ambos, *feedback* y estímulo, contribuyan a determinar la duración final del *tap*. En la figura 4 se muestran gráficamente las predicciones de dicho experimento. La forma que sigue la curva de duración del *tap* es similar a la que se observa en Vos et al., 1995, Fig. 2. La relación podría depender también de la saliencia del estímulo; aunque ciertamente no conocemos trabajos en los cuales la dependencia del acople audio-motor con la saliencia del estímulo haya sido estudiada. Vos y sus colaboradores usan *bips* que van desde 1 ms hasta 300 ms de duración; con ese rango de valores es probable que el sujeto sea consciente de que se esté manipulando experimentalmente esa variable. Hay que tener en cuenta que el estado de conciencia del sujeto sobre los cambios en la variable manipulada podría modular el comportamiento del acople audio-motor. Por esta razón, si se quiere estudiar el acople audio-motor en la fase pre atencional sería recomendable utilizar cambios subliminales en la duración del *feedback* auditivo adicional. Por otro lado, los cuatro trabajos, incluido el nuestro, que encuentran que el sonido puede modular acciones motoras han usado paradigmas de sincronización (Vos et al., 1995; Mates et al., 1992; Chen et al., 2006). Sería interesante indagar sobre si el acople audio-motor es independiente del

mecanismo de sincronización o no. Para contestar esta pregunta podría proponerse que una de las condiciones de tapeo sea sin secuencia de estímulos ni sincronización, solo *feedback* auditivo adicional de los *taps*; y comparar esta condición con otra donde los sujetos se sincronicen a una secuencia de estímulos. También se puede observar que en los tres trabajos mencionados usaron variaciones en las características del estímulo; mientras que nosotros usamos variaciones en el *feedback*. El estímulo es un sonido generado por una fuente externa al sujeto; mientras que el *feedback* auditivo adicional es un sonido generado por el propio sujeto al tocar el sensor. Comparando los efectos en la duración del *tap*, se puede distinguir si un sonido externo tiene la misma influencia en las acciones motoras que un sonido disparado por una acción propia.

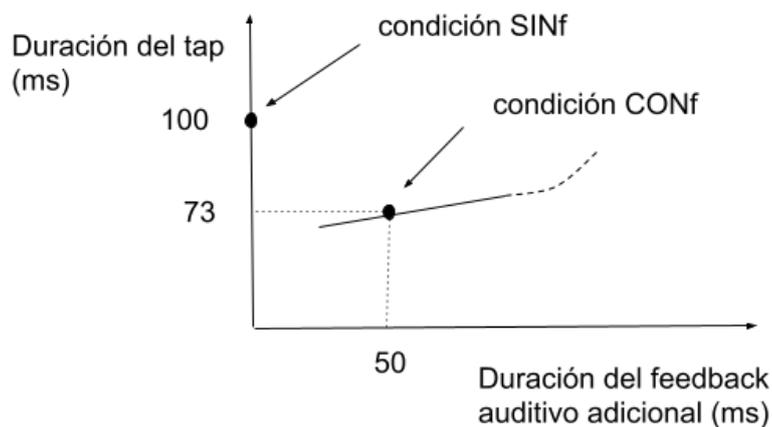


Figura 4. Predicciones derivadas del concepto de acople audio-motor para un experimento en el que la duración del *feedback* auditivo adicional fuera un factor controlado por los experimentadores. La duración del *tap* es proporcional a la duración del *bip* del *feedback*.

5. Conclusiones

- El *feedback* auditivo adicional condiciona la duración del *tap*, lo cual puede considerarse como evidencia del acople audio-motor: un sonido corto induce o está vinculado con una acción motora de corta duración.
- El acople audio-motor opera en un nivel pre atencional.
- La disminución de la duración del *tap* en las condiciones CONf no obedece a causas mecánicas como han propuesto otros autores (Mates, et al., 1992; Vos, et al., 1995), esto refuerza la idea del acople audio-motor como explicación para entender dicha disminución.

6. Referencias bibliográficas

- Chen, Y. (et. al.) (2002). Spectral decomposition of variability in synchronization and continuation tapping: Comparisons between auditory and visual pacing and *feedback* conditions. En: *Human movement science* 21(4), 515-532.
- Chen, J. L. (et al.) (2006). Interactions between auditory and dorsal premotor cortex during synchronization to musical rhythms. En: *Neuroimage* 32(4), pp. 1771-1781.
- Chen, J. (et al.) (2009). The role of auditory and premotor cortex in sensorimotor transformations. En: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169(1), 15-34.
- Hove, M. J. (et al.) (2013). Synchronization with competing visual and auditory rhythms: bouncing ball meets metronome. En: *Psychological Research* 77(4), 388-398.
- Kolers, P. A. y Brewster, J. M. (1985). Rhythms and responses. En: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 11(2), 150-167.
- Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: cracking the speech code. En: *Nature reviews neuroscience* 5(11), 831-843.
- López, S. L. y Laje, R. (2019). Spatiotemporal perturbations in paced finger tapping suggest a common mechanism for the processing of time errors. En: *Sci Rep* 9(1), 17814.
- Mates, J. (et al.) (1992). Cooperative tapping: Time control under different *feedback* conditions. En: *Perception & Psychophysics* 52(6), 691-704.
- McIntosh, G. C. (et al.) (1997). Rhythmic auditory-motor facilitation of gait patterns in patients with Parkinson's disease. En: *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 62(1), 22-26.
- Näätänen, R. (et al.) (2001). Primitive intelligence in the auditory cortex. En: *Trends in neurosciences* 24(5), 283-288.
- Näätänen, R. (et al.) (2005). Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the evidence. En: *Psychophysiology* 42(1), 25-32.
- Portal del Laboratorio de Dinámica Sensomotora (2021). Portal web Laboratorio de Dinámica Sensomotora, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Quilmes. Recuperado de: <http://ldsm.web.unq.edu.ar/en/attention2021/>
- Repp, B. H. (2002). The embodiment of musical structure: Effects of musical context on sensorimotor synchronization with complex timing patterns. En: *Common mechanisms in perception and action: Attention and performance XIX* (245-265). UK: University Press Oxford.
- Repp, B. H. (2010). Sensorimotor synchronization and perception of timing: effects of music training and task experience. En: *Hum Mov Sci* 29(2), 200-213.
- Rodríguez-Fornells, A. (et al.) (2012). The involvement of audio-motor coupling in the music-supported therapy applied to stroke patients. En: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1252(1), 282-293.
- Schultz, B. G. y van Vugt, F. T. (2016). Tap Arduino: An Arduino microcontroller for low-latency auditory *feedback* in sensorimotor synchronization experiments. En: *Behavior research methods* 48(4), 1591-1607.

- Thaut, M. H., et al. (1997). Rhythmic facilitation of gait training in hemiparetic stroke rehabilitation. En: *Journal of the neurological sciences* 151(2), 207-212.
- Thaut, M. H. y Abiru, M. (2010). Rhythmic auditory stimulation in rehabilitation of movement disorders: a review of current research. En: *Music perception* 27(4), 263-269.
- Versaci, L. y Lay, R. (2021a). Time-oriented attention improves accuracy in a paced finger-tapping task. En: *European Journal of Neuroscience* 54(1), 4212-4229.
- Versaci, L. (2021b). Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Quilmes. Recuperado de: <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/3579>
- Vos, P. G. (et al.) (1995). The perceptual centre of a stimulus as the cue for synchronization to a metronome: Evidence from asynchronies. En: *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 48(4), 1024-1040.
- Warren, J. (et al.) (2005). Sounds do-able: auditory-motor transformations and the posterior temporal plane. En: *Trends in neurosciences* 28(12), 636-643.
- Zatorre, R. J. (et al.) (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. En: *Nature reviews neuroscience* 8(7), 547-558.