

El contexto de perturbación en finger tapping con metrónomo calibra el mecanismo de corrección de errores (*)

TRADUCCIÓN

Ariel D. Silva

Universidad Nacional de Quilmes, Argentina. Contacto: arieldario.silva83@gmail.com

Rodrigo Laje

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

Recibido: abril de 2025

Aceptado: mayo de 2025

Resumen

La sincronización sensomotora (SMS) es la capacidad, principalmente humana, de moverse en sincronía con un estímulo externo periódico, como por ejemplo al ritmo de la música. El paradigma experimental más común para estudiar su mecanismo subyacente, en gran parte desconocido, es la tarea de *finger tapping*, en la que un participante golpetea con el dedo al ritmo de una secuencia periódica de estímulos breves. A diferencia del tiempo de reacción, esta tarea implica una predicción temporal porque el participante necesita desencadenar la acción motora con antelación para que el golpeteo y el estímulo se produzcan simultáneamente, y luego un mecanismo de corrección de errores toma el desempeño pasado como entrada para ajustar la siguiente predicción. En una tarea diferente y más sencilla, se ha demostrado que la exposición a una distribución de intervalos temporales individuales crea un "contexto temporal" que puede sesgar las estimaciones, producto de un único intervalo objetivo. Como la estimación y la producción temporales también están implicadas en la SMS, nos preguntamos si una tarea de *finger tapping* con perturbaciones de período mostraría algún efecto de contexto relacionado con el tiempo. En este trabajo demostramos que un contexto de perturbación puede generarse de hecho mediante la exposición a perturbaciones de período durante el *finger tapping*, lo que afecta la forma y el tamaño de la curva de resincronización. La asimetría de la respuesta también se ve afectada, lo que evidencia una interacción entre el contexto y las no linealidades intrínsecas del mecanismo de corrección. Concluimos que el contexto de perturbación calibra el mecanismo de corrección de errores subyacente en SMS.

* Este artículo constituye una traducción adaptada y reducida de un texto publicado originariamente en el idioma inglés: Silva, A.D., Laje, R. (2024). Perturbation context in paced finger tapping tunes the error-correction mechanism. *Sci Rep* 14, 27473. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78786-5>

Palabras clave: golpeteo rítmico con los dedos; sincronización sensoriomotora; contexto temporal.

Introducción

En el estudio del procesamiento del tiempo en la escala de cientos de milisegundos, conocido tradicionalmente como cronometraje de milisegundos, la descripción de la conducta y la comprensión de sus mecanismos neuronales han mostrado grandes avances en las últimas dos décadas (Tsao & Yousefzadeh & Meck & Moser, M. B. & Moser, E. I. 2022; Hogendoorn, 2022; Monteiro *et al.*, 2023, Paton & Buonomano, 2018). La necesidad de considerar el procesamiento del tiempo en las múltiples escalas de tiempo involucradas en la planificación y el control motor está siendo reconocida como un paso fundamental hacia la comprensión de la interacción entre el cerebro y el cuerpo (Inagaki *et al.*, 2022).

La sincronización sensomotora (SMS), es decir, la capacidad de moverse en sincronía con un estímulo externo periódico, pertenece a esta escala de tiempo y subyace a muchas actividades específicas de los humanos, como la música y la danza (Repp, 2005; Repp & Su, 2013).

En relación a cuál es la relevancia y/o motivación para estudiar *paced finger tapping*, es la de analizar una habilidad motora con la que se sincroniza movimientos rítmicos con un estímulo auditivo externo, generalmente proveniente de un metrónomo o un ritmo musical. Esta capacidad, que parece ser casi exclusivamente humana, ha despertado un creciente interés en la comunidad científica debido a su posible vinculación con habilidades cognitivas superiores, como el aprendizaje vocal y la sincronización musical (Patel *et al.*, 2009a; Patel *et al.*, 2009b; Schachner *et al.*, 2009; Large & Grey, 2015).

La tarea más sencilla para estudiar la SMS es el *finger tapping*, en el que se le indica al participante que golpee al ritmo de un metrónomo externo (normalmente una secuencia periódica de tonos breves). La secuencia de estímulos puede verse perturbada por un cambio inesperado del período entre estímulos. Esta tarea permitió a los investigadores dar los primeros pasos hacia la identificación de los correlatos neuronales de la SMS, como el hallazgo de un componente perceptivo y un componente sensoriomotor durante la resincronización después de una perturbación del período (Rosso & Moens & Leman & Moumdjian 2023) y una asimetría en el procesamiento de errores positivos frente a negativos que reproduce una asimetría conductual conocida (Bavassi & Kamienkowski & Sigman & Laje 2017). En esta línea, cabe destacar los avances en un paradigma experimental relacionado con los monos, donde los registros de neuronas individuales mostraron perfiles temporales claros (Merchant & Zarco & Rez & Prado & Bartolo, 2011) y actividad neuronal metronómica a lo largo de toda la jerarquía de áreas sensoriales, asociativas y motoras (de

Lafuente *et al.*, 2024). En un paradigma relacionado, donde los monos tenían que sincronizar sacadas con estímulos visuales periódicos (Okada & Takeya & Tanaka, 2022), la actividad de neuronas individuales en el giro dentado cerebeloso mostró correlación con el error de sincronización actual o con el momento de la siguiente sacada.

A pesar de estos importantes avances, quedan por resolver muchos problemas fundamentales. En este trabajo nos centramos en el mecanismo de corrección de errores subyacente que permite a una persona recuperar la sincronía media después de una perturbación de período inesperada en una tarea *finger tapping* a ritmo constante. En la investigación de SMS se acepta universalmente que tanto el mantenimiento de la sincronía media como su recuperación después de una perturbación se logran gracias a un mecanismo de corrección de errores (Repp, 2005; Bavassi & Kamienkowski & Sigman & Laje, 2017; López & Laje, 2019; Bavassi & Tagliazucchi & Laje, 2013). A pesar de una larga historia de uso de modelos lineales para describir el comportamiento de resincronización (Repp & Su, 2013), la evidencia creciente de los análisis de las series temporales de resincronización bajo diferentes tipos y signos de perturbación sugiere que el mecanismo de corrección de errores es intrínsecamente no lineal (Bavassi & Kamienkowski & Sigman & Laje, 2017; López & Laje, 2019; González & Bavassi & Laje, 2019). Otros hallazgos experimentales también requieren modelos no lineales (Haken & Kelso & Bunz, 1985; Loehr & Large & Palmer, 2011; Egger & Le & Jazayeri, 2020; Large *et al.*, 2023; Lainscsek *et al.*, 2012; Roman & Washburn & Large & Chafe & Fujioka, 2019). Este conocimiento podría influir en la forma en que diseñamos experimentos y analizamos los datos.

En paradigmas experimentales temporales distintos del *finger tapping*, se ha demostrado que la estimación y la producción del tiempo están sesgadas por muchos factores (Rhodes, 2018). Nos interesa el efecto del contexto temporal. En un paradigma de cronometraje de intervalos tradicional en el que se pide a los participantes que estimen un único intervalo de tiempo delimitado por dos estímulos parpadeantes y lo reproduzcan pulsando una tecla (una tarea de reproducción del tiempo), se demostró que las estimaciones de tiempo para una duración particular dependían de la distribución de intervalos presentada al participante (Jazayeri & Shadlen, 2010), con un sesgo hacia la media de la distribución. El procesamiento del tiempo en este rango se "calibra" por la exposición a diferentes distribuciones de intervalos de tiempo que crean un contexto temporal que sesga las estimaciones.

En los últimos años, el efecto del contexto temporal también se ha encontrado en paradigmas experimentales relacionados con SMS. Un ejemplo de ello se ha observado durante la fase de sincronización - en un paradigma de sincronización-continuación (Egger & Le & Jazayeri, 2020; Narain & Remington & Zeeuw & Jazayeri, 2018)- donde los participantes mostraron el "efecto de tendencia central", es decir, un sesgo hacia la media como en el efecto de contexto temporal discutido anteriormente. Los participantes sesgaron

su estimación del intervalo entre estímulos dependiendo de la distribución de la que se extrajo (hacia la media de la distribución), y la magnitud del sesgo disminuyó a lo largo del ensayo a medida que se presentaban más estímulos. En un trabajo diferente, los participantes en un experimento de sincronización-continuación (Kaya & Henry 2022) mostraron un efecto de tendencia central similar. La diferencia entre el intervalo entre estímulos presentado y los intervalos entre respuestas producidos en un ensayo (es decir, el error de coincidencia de tiempo) reveló una pendiente negativa como una función del intervalo entre estímulos. Es decir, los participantes tocaron demasiado lento cuando los estímulos tenían un ritmo rápido, y demasiado rápido cuando los estímulos tenían un ritmo lento. Cabe aclarar que los investigadores agruparon los datos de sincronización y continuación para calcular el error de coincidencia de tiempo, por lo que el resultado real para la sincronización específicamente puede verse oscurecido.

Aunque la evidencia apunta a la existencia de un contexto relacionado con el tiempo en el procesamiento temporal tanto para intervalos de tiempo individuales como para la sincronización con una secuencia periódica, hasta la fecha no hay evidencia directa de que el mecanismo de corrección de errores subyacente a SMS esté influenciado o calibrado por él. En este trabajo, primero analizamos una compilación de evidencia cuantitativa de diferentes fuentes que sugiere que el momento del primer toque después de una perturbación depende del contexto, a pesar de tener el mismo momento de las respuestas anteriores y el mismo momento de los estímulos hasta ese punto. Este nuevo contexto relacionado con el tiempo parece generarse por la exposición a un solo tipo de perturbación durante todo el experimento o dos tipos de perturbación alternados aleatoriamente. Motivados por esto, a continuación mostramos los resultados de nuestro experimento específico que prueba la existencia del contexto de perturbación en SMS y su efecto durante la fase de resincronización. Un análisis más profundo y detallado de este dataset puede encontrarse en Silva & Laje (2024).

Resultados

La Figura 1 muestra un esquema de la tarea para los dos tipos de perturbación considerados en este trabajo. El período de la secuencia de estímulos es T , también conocido como intervalo entre estímulos (ISI). La asincronía en el paso n se define como $e_n = R_n - S_n$, que es la diferencia entre los tiempos de ocurrencia de la respuesta R_n y el estímulo S_n . En las perturbaciones de cambio de tiempo (SC), el período de referencia T_0 de la secuencia se modifica inesperadamente en $n = 0$ en una cantidad ΔT ; la asincronía en $n = 0$ muestra, por lo tanto, un error forzado igual a $-\Delta T$ (en promedio). En las perturbaciones de desplazamiento de fase (PS), el cambio en $n = 0$ es seguido por un desplazamiento opuesto en $n = 1$, lo que hace que la secuencia recupere su período original. En ambos

casos, la resincronización sigue como una convergencia de los valores de asincronía a la línea base posterior a la perturbación (Bavassi & Tagliazucchi & Laje, 2013).

Evidencia previa: el contexto de perturbación influye en el mecanismo de corrección de errores

En esta subsección, recopilamos evidencia previa obtenida de la literatura sobre *finger tapping* para demostrar que la exposición a cualquier tipo de perturbación puede generar un efecto de contexto de perturbación que modifica la respuesta de resincronización. La evidencia es la siguiente y se basa en la comparación del tiempo de respuesta después de las perturbaciones SC y PS. Digitalizamos datos de artículos publicados sobre *finger tapping* donde los participantes fueron expuestos a un solo tipo de perturbación ("pura") o dos tipos de perturbación diferentes al azar durante el mismo experimento ("combinada").

En experimentos en los que las perturbaciones son inesperadas (es decir, ocurren en un estímulo aleatorio en un ensayo), la asincronía en el paso perturbado $n = 0$ representa un error forzado y, en promedio, es igual al intervalo de tiempo en el que se desplazó el estímulo correspondiente, con signo opuesto (Figura 1). La respuesta en el paso siguiente ($n = 1$) ya se ve afectada por el mecanismo de corrección que intenta disminuir el error forzado. Sin embargo, la comparación de los valores de asincronía de diferentes perturbaciones debe hacerse con cuidado porque el momento de los estímulos posteriores a la perturbación S_n no es el mismo entre SC y PS (González & Bavassi & Laje, 2019), es decir, las referencias de tiempo de cada asincronía en $n \geq 1$ son distintas para diferentes perturbaciones, como se muestra en la Figura 1. Para comparar y determinar correctamente si el tiempo de respuesta posterior a la perturbación difiere entre diferentes tipos de perturbación, para las perturbaciones SC mostramos la asincronía "virtual" entre la respuesta y el estímulo extrapolado (como se define en la Figura 1), perturbaciones, como se muestra en la Figura 1. Para comparar y determinar correctamente si el tiempo de respuesta posterior a la perturbación difiere entre diferentes tipos de perturbación, para las perturbaciones SC mostramos la asincronía "virtual" entre la respuesta y el estímulo extrapolado (como se define en la Figura 1), fijando así la referencia de tiempo entre los tipos de perturbación. Supongamos por un momento que no hay efecto de contexto; es decir, supongamos que el mecanismo de corrección después de un tipo específico de perturbación tiene la misma calibración ya sea un experimento "puro" o "combinado". En este caso, las respuestas en $n = 1$ deberían coincidir en tiempo absoluto (misma asincronía virtual) porque tanto el desempeño pasado como la secuencia de estímulos eran idénticos hasta ese momento. Lo que se observa en las perturbaciones de PS, en cambio, es que difieren (datos no mostrados, consulte Métodos, subsección Justificación del tamaño de la muestra).

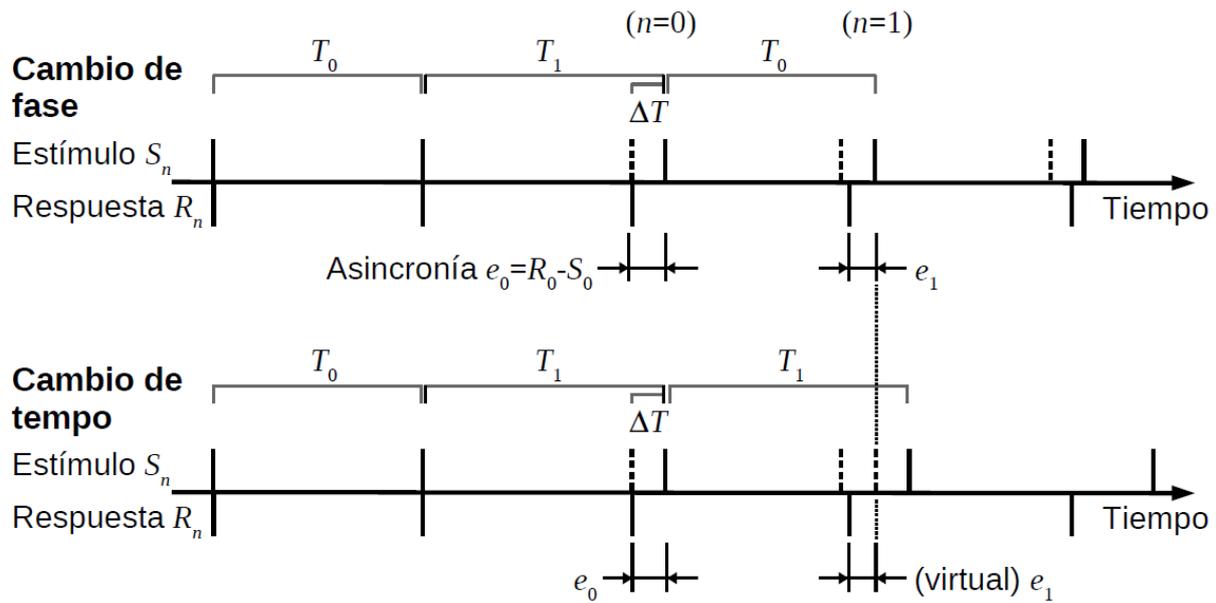


Figura 1. Esquema de una tarea de *finger tapping* con perturbaciones de período. Para simplificar, los valores de asincronía previos a la perturbación son cero. Como el tiempo de perturbación es inesperado, en $n = 0$ hay un error forzado para ambos tipos de perturbación y se produce la resincronización. En $n = 1$ el mecanismo de corrección de errores subyacente ya está funcionando con base en el desempeño anterior; si no hubiera efecto del contexto, el tiempo de ocurrencia de la respuesta (en tiempo absoluto) debería ser el mismo para ambos tipos de perturbación como se muestra.

Aislar el efecto del contexto de perturbación

La desviación entre PS puro y combinado en $n = 1$ sugiere que hay un efecto del contexto de perturbación producido por la exposición a uno o los dos tipos de perturbación. Sin embargo, reunimos datos de diferentes artículos donde los experimentos no fueron diseñados específicamente para probar esto. Además, la forma tradicional de comparar en la literatura es de un tipo de perturbación contra el otro, lo que implica una confusión potencial porque los dos tipos de perturbación tienen un efecto por sí mismos, tanto a nivel perceptual (diferentes saliencias) como a nivel conductual (diferente cambio de estímulos a partir de $n = 1$, por lo tanto de referencias de tiempo) (Repp, 2005). Para aislar el efecto potencial del contexto de perturbación y hacer la comparación correcta para determinar una relación causal, en este trabajo expusimos a 51 participantes a diferentes tipos de perturbación de acuerdo con los siguientes tres grupos: el Grupo 1 fue expuesto solo a perturbaciones SC; el Grupo 2 fue expuesto solo a perturbaciones PS; el Grupo 3 fue expuesto a perturbaciones SC y PS en orden aleatorio. Los Grupos 1 y 2 pertenecen al contexto "puro", mientras que el Grupo 3 pertenece al contexto "combinado". De esta manera, podemos comparar respuestas entre diferentes contextos en el mismo experimento mientras mantenemos constante el tipo de perturbación.

El experimento consiste en golpear con los dedos a un ritmo con estímulos auditivos y perturbaciones de período para determinar si el contexto de perturbación tiene algún efecto durante la fase de resincronización después de una perturbación. Se instruye al participante para que mantenga la sincronía promedio lo mejor posible y, en caso de que surja una perturbación, recupere la sincronía sin dejar de golpear. Las perturbaciones pueden ser de dos tipos diferentes: perturbaciones de cambio de tempo ("SC", donde el período de estímulo cambia abruptamente en una cantidad ΔT en un paso aleatorio de la secuencia) o perturbaciones de cambio de fase ("PS", donde el período cambia en dos pasos consecutivos en cantidades opuestas ΔT y $-\Delta T$ de modo que vuelve a su valor original). Estos tipos de perturbación son dos de los más utilizados tradicionalmente en la literatura de *finger tapping* (Bavassi & Tagliazucchi & Laje 2013). Una perturbación puede tener dos signos diferentes: positivo, donde el período aumenta en el paso perturbado ($\Delta T > 0$, "pos"), o negativo, donde el período disminuye en el paso perturbado ($\Delta T < 0$, "neg"); y el tamaño: $|\Delta T| = 50$ ms. Es importante destacar que los participantes están expuestos a cualquiera de los contextos: "puro" (Grupos 1 y 2) o "combinado" (Grupo 3). El diseño experimental final es una combinación completamente factorial de condiciones Contexto x Tipo de perturbación x Signo de perturbación. El número de participantes se determinó mediante un análisis de potencia estadística a priori utilizando datos publicados.

El contexto de perturbación afecta la respuesta de resincronización

La Figura 2 muestra la serie temporal promedio de asincronía para cada condición, como una función del número de pasos a lo largo de la prueba (renumerada de modo que la perturbación ocurra en $n = 0$). El comportamiento de resincronización es cualitativamente similar en todas las condiciones. Como las perturbaciones son inesperadas debido a que la perturbación real ocurre en un paso aleatorio en la prueba, en $n = 0$ la asincronía muestra un error forzado que, en promedio, es opuesto al tamaño de la perturbación. Luego, el participante recupera gradualmente la sincronía y alcanza una nueva línea base.

Sin embargo, cuantitativamente, las series temporales muestran diferencias sistemáticas entre las condiciones de contexto puro y combinado durante la fase de resincronización. Ampliando los hallazgos de la literatura previa, las diferencias en nuestro experimento van mucho más allá de $n = 1$ y, en consecuencia, también aparecen diferencias en las perturbaciones de SC que no eran evidentes en los datos de la literatura.

Para probar adecuadamente el efecto del Contexto, ajustamos un Modelo Lineal Mixto (LMM) con Asincronía como variable dependiente (restringida a la fase de resincronización, $n = 1$ a 6, agrupada) y los factores Contexto (niveles puro/combinado), Tipo de Perturbación (niveles PS/SC) y Signo de Perturbación (niveles pos/neg). Dado que, como nos interesa el efecto del Contexto, ya sea por su efecto principal o sus interacciones, incluimos las

interacciones dobles del Contexto y la interacción triple. El participante se incluyó como un efecto aleatorio. Los resultados indican que existe un efecto significativo de interacción triple, lo que significa que el efecto del Contexto depende del tipo y signo de la perturbación (interacción triple significativa: $\chi^2(2) = 87.3$, $p = 2 \times 10^{-16}$. Esto se puede interpretar observando la Figura 2, donde la interacción triple se muestra como una interacción invertida clara, casi cruzada: en las perturbaciones PS negativas, el Contexto “combinado” produce valores de Asincronía más bajos que el “puro” (estimación de la diferencia entre combinado y puro: 8.8 ms; IC del 95% CI: [1.9; 15.7] ms, corregida $p = 0.025$), mientras que en las perturbaciones PS positivas produce valores de Asincronía más altos (diferencia: -14.5 ms, IC del 95%: [-22.1; -6.9] ms, corregida $p = 0.001$); mientras que lo opuesto es cierto para las perturbaciones SC (diferencia SCneg: -4.8 ms, IC del 95%: [-11.9; 2.3] ms, corregida $p = 0.19$; diferencia SCpos: 7.8 ms, IC del 95%: [0.6; 15.1] ms, corregida $p = 0.048$).

Un modelo alternativo (los mismos tres factores y todas las interacciones dobles, pero sin interacción triple) funciona significativamente peor, lo que quiere decir que la interacción triple representa un aspecto importante de los datos (ver Métodos).

Es importante destacar que todas las comparaciones en la Figura 2 se realizan entre perturbaciones del mismo tipo y signo pero provenientes de diferentes contextos. Por ejemplo, en el panel superior izquierdo ambas series temporales son la respuesta a una perturbación PS negativa, con la única diferencia de que una corresponde al Grupo 2 (contexto puro) y la otra al Grupo 3 (contexto combinado). Es decir, todas las comparaciones involucran la misma secuencia de estímulos y, por lo tanto, cualquier diferencia observada puede atribuirse inequívocamente a diferentes estados psicológicos (contexto).

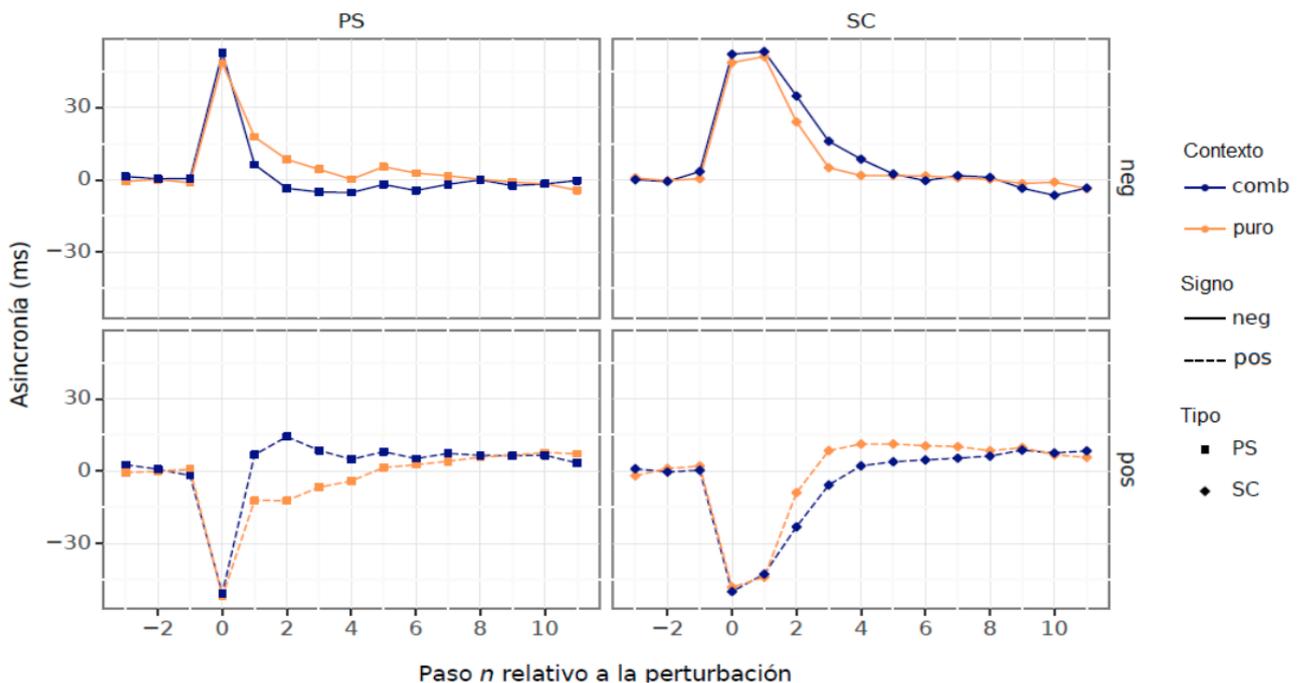


Figura 2. Efecto del contexto en la resincronización después de una perturbación. Asincronía en función del número de estímulos a lo largo de un ensayo ($n = 0$ es el paso de perturbación). Existen diferencias sistemáticas entre los contextos (curvas azul y naranja): cambiar de contexto combinado a contexto puro desplaza la curva de asincronía durante la resincronización hacia arriba o hacia abajo según la condición, lo que se representa mediante una interacción triple significativa Contexto x Tipo de perturbación x Signo de perturbación. Media entre los participantes. Los paneles superiores pertenecen a las perturbaciones negativas, mientras que los inferiores a las positivas.

La asimetría de la respuesta durante la resincronización depende del contexto de perturbación

La asimetría de respuesta, un sello distintivo de la no linealidad, cuantifica el grado de similitud de imagen especular entre series temporales correspondientes a perturbaciones de signos opuestos (López & Laje, 2019; Bavassi & Tagliazucchi & Laje, 2013; González & Bavassi & Laje, 2019). La Figura 3 muestra los mismos datos que antes, pero organizados de tal manera que ahora la asimetría entre perturbaciones positivas y negativas se puede analizar más fácilmente. En esta figura, invertimos el signo de la asincronía de las perturbaciones positivas, de modo que si las respuestas originales a perturbaciones positivas y negativas son simétricas, las dos series temporales representadas serán en su mayoría coincidentes o superpuestas, mientras que si son asimétricas, se mostrarán como no superpuestas.

Para comprobar si existe una asimetría significativa, ajustamos un LMM a los datos que se muestran en la Figura 3. Gracias a la inversión de signos de las condiciones positivas, cualquier asimetría estaría representada por una diferencia entre las condiciones negativas y positivas invertidas, por lo que es apropiada para la regresión lineal y el ANOVA. Es decir, buscamos cualquier efecto del Signo de perturbación (ya sea el efecto principal o cualquiera de sus interacciones). El LMM es similar al anterior con Asincronía como variable dependiente (pasos $n = 1$ a 6, agrupados), factores Contexto (niveles puro/combinado), Tipo de perturbación (niveles PS/SC) y Signo de perturbación (niveles neg/inv-pos). El participante se incluyó como un efecto aleatorio.

Los resultados del modelo reflejan lo que se puede ver en la Figura 3: hay distintos grados de asimetría, es decir, no todas las condiciones muestran la misma diferencia entre las series negativas y las positivas invertidas, y depende tanto de los niveles de Contexto como de Tipo de Perturbación (interacción significativa de tres vías: $\chi^2(2) = 14.5$; $p = 0.0007$). Un modelo alternativo con todas las interacciones dobles y sin interacción triple muestra un rendimiento comparable (diferencia no significativa en la comparación de modelos: $\chi^2(1) = 1.3$; $p = 0.25$), pero se prefiere el que contiene la interacción triple porque

ofrece una interpretación teórica compatible con los resultados anteriores, como se analiza en la siguiente sección.

Aumento gradual de la asimetría

El resultado anterior nos indica que algunas condiciones son más asimétricas que otras. En esta subsección mostramos que existe un orden específico que puede interpretarse en términos de nuestros nuevos resultados con respecto al efecto del contexto y la literatura previa. En la Figura 4a mostramos la asimetría real, que es la diferencia entre las series de tiempo correspondientes de la Figura 3. En la fase de resincronización ($n = 1$ a 6) las condiciones tienen diferentes evoluciones temporales de asimetría, con algunas condiciones más cercanas a cero (menos asimétricas) y otras más alejadas de cero (más asimétricas). El orden específico es, de menos a más asimétrico: PS puro < PS comb < SC comb < SC puro, y se puede ver más claramente en la Figura 4b donde mostramos la asimetría promedio a lo largo de la fase de resincronización.

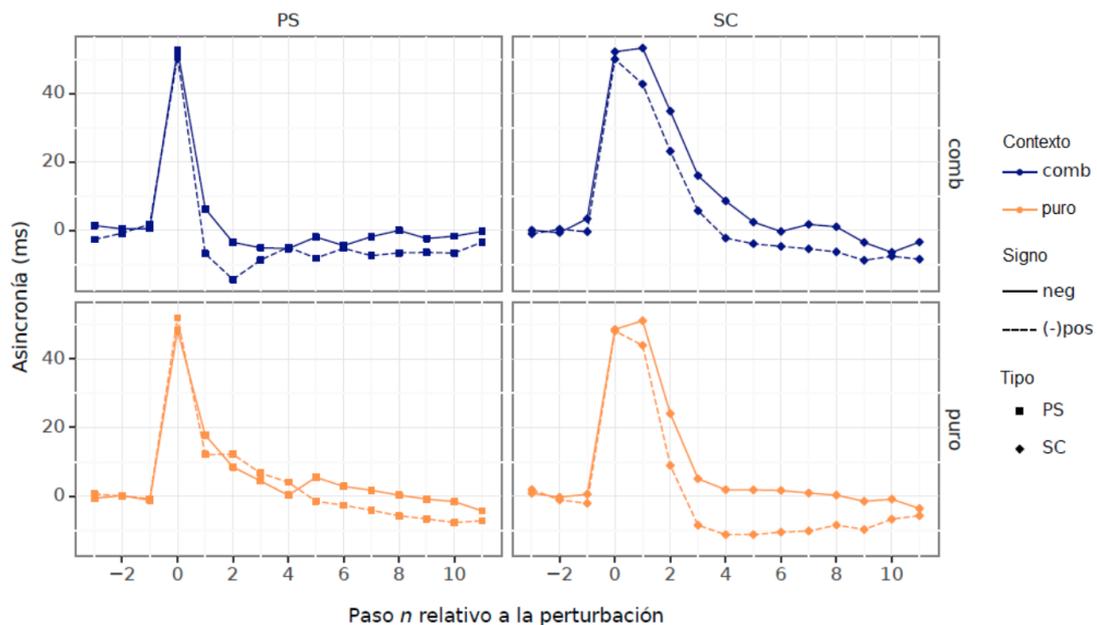


Figura 3. Asimetría entre respuestas a perturbaciones de signos opuestos. Los mismos datos que antes (asincronía en función del número de estímulos a lo largo de un ensayo), aquí después de invertir el signo de la asincronía a partir de perturbaciones positivas. De esta manera, cualquier asimetría se mostrará como una diferencia entre las series temporales dentro de cada panel (respuesta negativa menos respuesta positiva invertida). Media entre los participantes.

Aunque las diferencias entre las condiciones consecutivas en la Figura 4b no son significativas después de corregir las comparaciones múltiples (ver Métodos), su ordenamiento tiene una interpretación muy clara basada en dos hechos. En primer lugar, se

sabe que las perturbaciones SC puras son más asimétricas que las perturbaciones PS puras (López & Laje, 2019; González & Bavassi & Laje, 2019), lo que en este trabajo se apoya adicionalmente en una diferencia significativa entre ellas (estimación de la diferencia de asimetría entre SC y PS: 10.8 ms, IC del 95%: [2.3; 19.3] ms, $t(718) = 2.49$, $p = 0.013$). En segundo lugar, nótese que las condiciones “combinadas” tienen valores de asimetría intermedios. El efecto de interacción cruzada del Contexto que mostramos anteriormente hace que las respuestas menos asimétricas sean más asimétricas y viceversa. Interpretaremos esto en una perspectiva más amplia en la Discusión.

Discusión

El mecanismo de corrección de errores depende del contexto de perturbación

En este trabajo demostramos que la exposición a diferentes tipos de perturbaciones de período en una tarea de *finger tapping* crea un nuevo contexto relacionado con el tiempo que modifica la respuesta de resincronización. En otras palabras, la respuesta después de un tipo específico de perturbación es distinta y depende de si el participante estuvo expuesto a ese tipo de perturbación sólo durante el experimento o a dos tipos de perturbación al azar. Interpretamos esto en términos del mecanismo de corrección de errores subyacente que produce la respuesta de resincronización, lo que sugiere que el mecanismo está calibrado por el contexto de perturbación. En términos de un posible modelo matemático del mecanismo de corrección (Bavassi & Tagliazucchi & Laje, 2013; González & Bavassi & Laje 2019), la calibración por contexto de perturbación puede implementarse, por ejemplo, como un ajuste de los valores de los coeficientes de corrección dependiendo de si el participante estuvo expuesto a un solo tipo de perturbación o a múltiples tipos de perturbación durante un experimento. Una vez que se establece un contexto, el mecanismo calibrado produce respuestas a todos los tipos y signos de perturbación (López & Laje, 2019; González & Bavassi & Laje, 2019).

Nuestros resultados desafían la idea de varios mecanismos diferentes, a saber, los dos procesos independientes propuestos de “corrección de fase” y “corrección de período” (Repp & Su, 2013) (ver discusión en Bavassi & Tagliazucchi & Laje (2013)), donde el primero solo está activo en perturbaciones PS pero ambos están activos en perturbaciones SC. Si el participante no sabe de antemano qué tipo de perturbación viene a continuación (contexto combinado), entonces es difícil acomodar la idea de establecer el mecanismo apropiado de antemano, particularmente después de considerar que las perturbaciones PS y SC son idénticas hasta $n = 0$ inclusive.

El mecanismo de corrección de errores es intrínsecamente no lineal

Nuestros resultados concuerdan con la literatura previa con respecto a la simetría de perturbaciones PS y SC puras, y también nos permiten interpretar el comportamiento después de diferentes tipos de perturbación en una perspectiva más amplia. Por un lado, las respuestas a perturbaciones PS puras del 10% del período o menos como las utilizadas en este trabajo son en su mayoría simétricas (Repp, 2005; 2002) (Figura 4b), lo que lleva a modelos matemáticos de comportamiento que tradicionalmente eran lineales (Repp & Keller, 2004; Schulze & Cordes & Vorberg, 2005, Van der Steen & Keller, 2013). Por otro lado, las respuestas a perturbaciones SC puras son asimétricas (López & Laje, 2019; Bavassi & Tagliacruzchi & Laje, 2013) (Figura 4b), lo que lleva a modelos matemáticos no lineales (López & Laje, 2019; González & Bavassi & Laje, 2019). Sin embargo, cuando se establecen en un contexto combinado, las respuestas a perturbaciones PS son más asimétricas que lo tradicionalmente informado con un grado de asimetría más cercano al de las perturbaciones SC. Por lo tanto, el uso tradicional de modelos lineales para representar respuestas a perturbaciones PS podría no ser la mejor opción.

Interpretamos esto nuevamente en términos del mecanismo de corrección subyacente, agregando apoyo a la hipótesis parsimoniosa de un mecanismo de corrección único y no lineal para los tipos y signos de perturbación. Nuestros resultados se suman a la creciente evidencia que respalda un mecanismo de corrección intrínsecamente no lineal incluso para magnitudes de perturbación tan pequeñas como el 10% del período (Bavassi & Kamienkowski & Sigman & Laje, 2017; López & Laje, 2019; González & Bavassi & Laje, 2019), que, no obstante, podrían calibrarse según el contexto. El contexto combinado es particularmente importante para esta conclusión porque los participantes no saben de antemano qué tipo de perturbación viene a continuación, ya que en cada ensayo las secuencias de estímulos hasta $n = 0$ son idénticas para ambos tipos de perturbación. Modelamos conceptualmente la calibración del mecanismo de corrección dependiente del contexto como un ajuste de los valores de los coeficientes del mecanismo (González & Bavassi & Laje; 2019), de modo que en contextos puros los coeficientes se ajustan al tipo de perturbación específico, pero en un contexto combinado se llega a un compromiso entre los dos tipos de perturbación, debido a que el participante no sabe cuál viene a continuación.

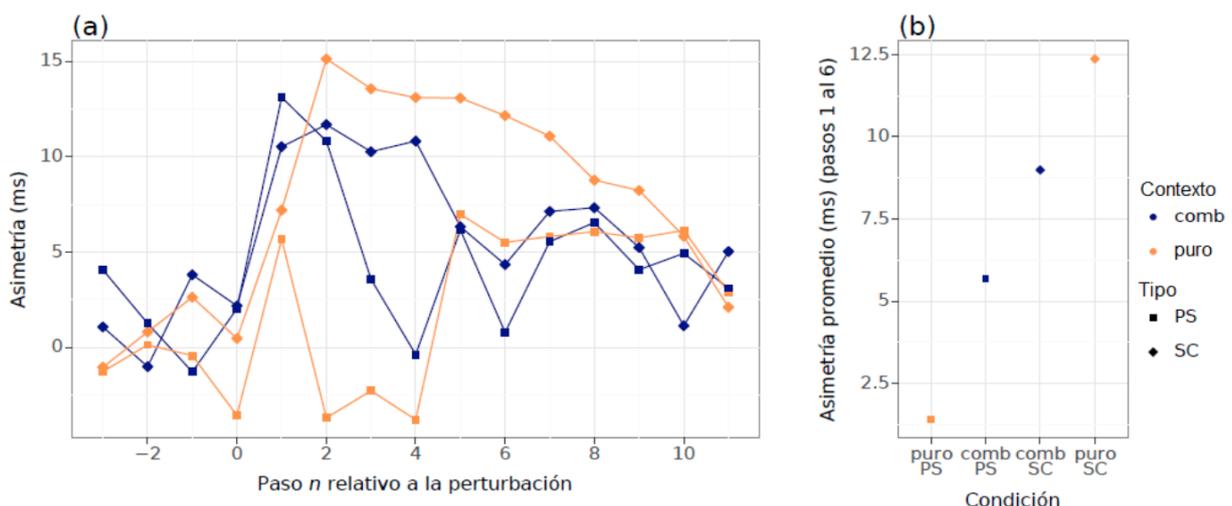


Figura 4. La asimetría aumenta de una manera específica dependiendo tanto del contexto como del tipo de perturbación. **(a)** Asimetría entre respuestas de perturbaciones de signos opuestos (negativo menos positivo invertido). Diferencia entre series de tiempo correspondientes de la figura anterior. **(b)** Asimetría media durante la fase de resincronización (pasos $n = 1$ a 6) del panel a. Media entre pasos.

Implicaciones metodológicas

Nos gustaría destacar la importancia de medir y analizar la fase de resincronización completa ($n = 1$ a 6) en lugar de solo la primera respuesta después de la perturbación ($n = 1$, tradicionalmente informada como la respuesta de corrección de fase o PCR en la literatura sobre tapping) o solo la línea base posterior a la perturbación (promedio de $n = 7$ hasta el final del ensayo). Si hubiéramos analizado solo $n = 1$ o solo $n \geq 7$, donde las perturbaciones de SC no muestran ningún efecto del contexto (Figura 2), habríamos pasado por alto su papel crítico tanto en la determinación del efecto del contexto como en la interpretación de la asimetría.

La existencia de un efecto de contexto relacionado con el tiempo y generado por la perturbación en *finger tapping* nos obliga a realizar comparaciones más cuidadosas cuando los datos provienen de experimentos con diferentes tipos de perturbación. El tamaño de la respuesta y su evolución temporal durante la resincronización dependerán del conjunto completo de tipos de perturbación a los que estuvieron expuestos los participantes, incluso cuando la comparación se realiza entre datos de un solo tipo de perturbación.

Métodos

Experimento

Consideraciones éticas

Los protocolos experimentales fueron diseñados de acuerdo a las normas nacionales e internacionales y fueron aprobados por el Comité de Ética de la Universidad Nacional de Quilmes. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado por escrito.

Participantes

Se reclutaron 59 voluntarios, de los cuales cinco no pudieron completar el experimento debido a dificultades de sincronización y tres fueron excluidos de acuerdo con los criterios de casos atípicos (ver más abajo). El número final de participantes fue $N = 51$ (edades entre

18 y 63 años, media 30,1 años; 17 mujeres; 46 diestros).

Tarea y perturbaciones

La tarea consistía en golpear con los dedos a un ritmo auditivo con perturbaciones inesperadas del período. Se instruyó a los participantes para que mantuvieran la sincronía promedio lo mejor posible, utilizando el dedo índice de la mano dominante. En caso de perturbación, el participante tenía que volver a la sincronía promedio sin dejar de golpear. Un solo ensayo consistió en la sincronización con una secuencia de 35 tonos breves con un período de referencia entre estímulos $T_0 = 500$ ms y una sola perturbación. Las perturbaciones ocurrieron en un paso en la secuencia elegida aleatoriamente en el rango 17-22 (los pasos se renumeraron después, de modo que $n = 0$ corresponde a la perturbación). Las perturbaciones podían ser de cambio de tempo (SC) donde el período de secuencia T cambia una vez por una cantidad ΔT , o de cambio de fase (PS) donde el período cambia dos veces en pasos consecutivos (primero por una cantidad ΔT y luego $-\Delta T$ en el paso siguiente). Cada tipo de perturbación podría ser positivo ($\Delta T = 50$ ms o 20 ms, pos) o negativo ($\Delta T = -50$ ms o -20 ms, neg) o neutro ($\Delta T = 0$, secuencia isócrona, utilizada como control, datos no incluidos en el análisis). Un participante expuesto a perturbaciones de solo SC o solo PS pertenecía al contexto "puro" (Grupos 1 y 2, respectivamente), mientras que un participante expuesto a ambos tipos de perturbación (intercalados aleatoriamente) pertenecía al contexto "combinado" (Grupo 3). Consulte la Tabla 1 para obtener un resumen de las condiciones experimentales.

Dispositivo experimental

El dispositivo consistía en una placa de desarrollo Arduino Mega que funcionaba como esclava de un programa controlador maestro en Python. La comunicación entre la placa y el controlador se realizaba a través del puerto serie. En cada prueba, la placa recibía parámetros del controlador (período entre estímulos, número de estímulos en la prueba, si debía haber una perturbación, número de pasos y tamaño de la perturbación, etc.) y generaba los estímulos auditivos, registraba los toques y enviaba los datos registrados de vuelta al controlador. La placa se complementaba con una segunda placa hecha a medida para interactuar con el usuario (Caral *et al.*, 2023) (sensor de fuerza para detectar toques, señales de audio, etc.). Cada vez que la placa detectaba un toque en el sensor de fuerza, se enviaba una retroalimentación auditiva al participante como un medio para reducir la variabilidad temporal (Bavassi & Tagliazucchi & Laje, 2013) y para comparar más directamente con la literatura. Tanto los tonos de estímulo como de retroalimentación eran sonidos sinusoidales de 50 ms de duración de 440 Hz (A4) y 660 Hz (alrededor de E5),

respectivamente. Para evitar que el participante tuviera retroalimentación visual, se colocó una pantalla para ocultar la mano. El sonido se reprodujo de forma dióptica a través de auriculares Sennheiser HD419. Los participantes pudieron ajustar el volumen del sonido a un nivel cómodo. Se encuentra disponible una descripción detallada, libre y gratuita del dispositivo experimental, tanto software como hardware (Caral *et al.*, 2023).

Diseño experimental

Asignamos aleatoriamente a los participantes a uno de los siguientes tres grupos: el Grupo 1 estuvo expuesto a perturbaciones SC (18 participantes), el 2 a perturbaciones PS (18 participantes) y el 3 a ensayos SC y PS intercalados aleatoriamente (18 participantes; total de 54 participantes antes de la eliminación de valores atípicos). Los Grupos 1 y 2 pertenecen al contexto "puro", mientras que el Grupo 3 al contexto "combinado". Cada tipo de perturbación se presentó en dos signos posibles: $\Delta T = \pm 50$ ms ($\Delta T = 0$ "isócrono" se utilizó como control; $\Delta T = \pm 20$ ms en Grupos 1 y 2 para compensar duración de experimentos; datos no incluidos en el análisis, pero disponibles en el repositorio). El conjunto de datos final (excluyendo los ensayos isócronos) está representado por una combinación factorial completa de condiciones Contexto (niveles pure/comb) x Tipo de perturbación (niveles PS/SC) x Signo de perturbación (niveles pos/neg). En la Tabla 1 se muestra un resumen de las condiciones experimentales.

Grupo	Contexto	Tipo	Signo	Tamaño (ms)	Largo exp. (ensayos)	N particip
1	Puro	SC	pos, neg	50, 20	60	17
2	Puro	PS	pos, neg	50, 20	60	16
3	Combinado	SC, PS	pos, neg	50	72	18

Tabla 1. Resumen de las condiciones experimentales. El número de participantes por grupo se calcula después de eliminar los valores atípicos.

Cada participante realizó el experimento en una única sesión con dos etapas: Demo y Test. La Demo permitió al participante familiarizarse con la tarea (un ensayo por cada condición). El Test consistió en 12 ensayos por cada condición experimental (incluyendo ensayos isócronos, la duración del experimento fue de $2 \times 2 \times 12 + 1 \times 12 = 60$ ensayos para los Grupos 1 y 2, y $2 \times 2 \times 12 + 2 \times 12 = 72$ ensayos para el Grupo 3). Los ensayos se distribuyeron equitativamente en tres bloques y se presentaron en orden aleatorio (aleatorización dentro del bloque), con un intervalo aleatorio entre ensayos de 0,5 y 1 s. Los participantes pasaban al siguiente ensayo al presionar una tecla. Se les pidió a los participantes que tomaran un breve descanso entre bloques para evitar la fatiga.

Cada etapa finalizó cuando se completaron con éxito todos los ensayos. Un ensayo se

consideró válido si el participante comenzó a dar golpecitos antes del sexto estímulo, no se saltó ninguna respuesta después y no produjo respuestas en exceso (más de una por estímulo). Cada ensayo inválido se repitió al final del bloque, hasta que el participante pudo completar todos los ensayos con éxito.

Criterios de valores atípicos

Utilizamos una definición sólida de valores atípicos (límites de Tukey) y aplicamos criterios uniformes a nivel de ensayo, participante y condición.

- Nivel de ensayo
 - Asincronía media de los ensayos. Para cada participante y condición, calculamos la asincronía media de cada ensayo y encontramos los cuartiles inferior (Q1) y superior (Q3) de la distribución. Cualquier ensayo con una asincronía media fuera del intervalo $[Q1-1,5 IQR; Q3+1,5 IQR]$ (límites de Tukey, donde $IQR=Q3-Q1$ es el rango intercuartil) se marcó como atípico y se eliminó del conjunto de datos.
 - Desviación estándar de asincronías en los ensayos. Para cada participante y condición, calculamos la desviación estándar de las asincronías de cada ensayo y los cuartiles superior e inferior de la distribución. Cualquier ensayo con una desviación estándar fuera de los límites de Tukey se marcó como atípico y se eliminó del conjunto de datos.
- Nivel de participante
 - Participante en una condición. Si más del 50% de los ensayos del mismo participante se eliminaron como valores atípicos en una condición determinada, entonces se eliminó a todo el participante de la condición.
 - Asincronía media de los participantes. Calculamos la asincronía media de cada participante en una condición y los cuartiles inferior y superior de la distribución. Cualquier participante con una media fuera de los límites de Tukey fue marcado como atípico y eliminado de la condición.
 - Desviación estándar de asincronías de los participantes. Calculamos la desviación estándar de las asincronías de cada participante en una condición. Cualquier participante con una desviación estándar fuera de los límites de Tukey fue marcado como atípico y eliminado de la condición.
- Nivel de condición
 - Condición en el experimento. Si un participante fue eliminado como un caso atípico en más del 50% de las condiciones, entonces fue eliminado de todo el experimento. Un participante fue eliminado del Grupo 1 y dos fueron eliminados del Grupo 2.

El mayor número de ensayos atípicos por participante fue 11, lo que representa el 15% de sus ensayos totales (se detectó al menos 1 ensayo atípico por cada participante). El porcentaje de ensayos atípicos fue del 8,5% en el Grupo 1, del 9,3% en el Grupo 2, del 8,1% en el Grupo 3, lo que sugiere que las diferentes duraciones del experimento tuvieron un efecto insignificante en el rendimiento.

Preprocesamiento de datos

Todos los ensayos se desplazaron en el tiempo para que estuvieran alineados en el paso de perturbación. Este paso se renombró $n = 0$ y se definió un rango de análisis de $n = -6$ a $n = 11$ (rango en el que todos los participantes respondieron a todos los estímulos). Para cada ensayo, definimos tres regiones temporales: pre-perturbación (pasos $n = -6$ a -1); resincronización (pasos $n = 1$ a 6 para SC, pasos $n = 2$ a 6 para PS); y pos-perturbación (pasos $n = 7$ a 11); consulte las regiones definidas para una serie temporal ejemplar en Versaci y Laje, 2021, Figura 1c (Versaci & Laje, 2021). Para cada participante y condición, definimos la línea base pre-perturbación como el promedio de asincronías en los ensayos durante la región pre-perturbación y luego la restamos de cada ensayo.

Justificación del tamaño de la muestra

Con base en la literatura previa, estimamos la cantidad de participantes necesarios para observar una diferencia significativa entre los contextos puros y combinados en el primer paso después de la perturbación ($n = 1$) para las perturbaciones de PS más grandes (50 ms) mediante análisis de potencia (Lakens, 2022). El código para reproducir la estimación y la gráfica de datos de la literatura previa se puede encontrar en el siguiente repositorio de GitHub: Silva & Laje. (2024). (Context, 2024).

Búsqueda de datos publicados

Como no se había realizado antes la manipulación experimental específica del contexto, buscamos en la literatura sobre *finger tapping*, datos de experimentos publicados con un solo tipo de perturbación (condición "pura") y con dos tipos de perturbación en orden aleatorio (condición "combinada"). Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- *Finger tapping* con estímulos auditivos;
- Tipos de perturbación PS y/o SC;
- Tamaño de perturbación de ± 50 ms, período de referencia de 500 ms;
- Suficiente información estadística (tamaño de la muestra, error estándar / desviación estándar, etc.);

- Condiciones experimentales comparables, p. ej. perturbación inesperada.

Los datos, que se muestran en la Tabla 2, se digitalizaron a partir de las cifras publicadas utilizando g3data en Ubuntu. Ejemplos de publicaciones potencialmente relevantes que se excluyeron por razones específicas:

- [Repp 2010] Resultados inusuales en participantes con formación musical, reconocidos por el autor (“...un patrón que no se ha observado previamente en numerosos estudios con participantes con formación musical”).
- [López & Laje 2019] Hay datos disponibles para perturbaciones SC pero ΔT es menor a 50 ms y no hay datos suficientes para interpolar.
- [Repp & Keller & Jacoby 2012] (Fig. 1) Los datos deben interpolarse; se descartan porque la condición PS pura está bien representada por otros tres artículos sin interpolación.

Condición	Referencia	Fig. original	Condición original
Puro SC (pos y neg)	(Thaut et al., 1998) (Bavassi et al., 2013)	Fig. 2A Fig. 2B Fig. 5B	SC: ISI=500 ms, $\Delta T=\pm 50$ ms SC: ISI=500 ms, $\Delta T=\pm 50$ ms
Puro PS (pos y neg)	(Repp, 2002a) (Repp, 2002b) (Repp, 2010)	Fig. 9 Fig. 2A Fig. 1A	Respuesta de corrección de fase (PCR): ISI=500 ms, $\Delta T=\pm 50$ ms Respuesta de corrección de fase (PCR): ISI=500 ms, $\Delta T=\pm 50$ ms Respuesta de corrección de fase (PCR): ISI=500 ms, $\Delta T=\pm 50$ ms
Combinado SC (pos y neg)	(Large et al., 2002)	Fig. 2A	Perturbación de tempo: Interpolación lineal entre ISI=400 ms, $\Delta T=\pm 32$ ms y ISI=600 ms, $\Delta T=\pm 48$ ms
Combinado PS (pos y neg)	(Large et al., 2002)	Fig. 2.A	Perturbación de tempo: Interpolación lineal entre ISI=400 ms, $\Delta T=\pm 32$ ms y ISI=600 ms, $\Delta T=\pm 48$ ms

Tabla 2. Fuentes de literatura para cada condición.

Análisis de potencia estadística

Estimamos el número mínimo de participantes N_{estim} tal que la probabilidad de rechazar

la hipótesis nula dado que la hipótesis alternativa es verdadera sea mayor o igual a la potencia deseada ($1 - \beta$) (ver por ejemplo Suresh & Chandrashekara 2012, sección “Estimación del tamaño de muestra con dos medias”). Se consideró $\beta = 0.1$ o una potencia de 0.9 bajo la aproximación de la distribución normal. Al aplicar esto a los datos PSneg y PSpos, obtuvimos $N_{estim} \geq 12$. Obtuvimos una estimación similar utilizando la función `solve_power` de `statsmodel/TTTestIndPower` (Seabold & Perktold, 2010) en Python. Obtuvimos una estimación ligeramente superior al descartar las aproximaciones habituales para $t_{1-\alpha}$ y $z\beta$, es decir, al utilizar en su lugar:

$$t_{1-\alpha} = \text{iCDF}(1 - \alpha; 2N_{estim} - 2)$$

$$z\beta = \text{iCDF}(\beta; 2N_{estim} - 2)$$

(donde iCDF es la función de distribución de probabilidad inversa de Student o función cuantil con $2N_{estim} - 2$ grados de libertad) y luego encontrar el valor de N_{estim} que cumple la condición de manera consistente. Sin las aproximaciones obtuvimos $N_{estim} \geq 13$, por lo que mantuvimos esta estimación más grande.

Prueba de datos publicados

Para comprobar la significación estadística de las diferencias observadas en $n = 1$, calculamos una prueba t para cada comparación entre contextos (PSpos, PSneg, SCpos, SCneg, todos en $n = 1$) y ajustamos los valores p mediante Bonferroni para cuatro comparaciones. Los valores p ajustados son 0.00023, 1.7×10^{-6} , 0,059 y 0,59, respectivamente.

Prueba de hipótesis: efecto del contexto

El código para reproducir todas las pruebas de hipótesis estadísticas está disponible en el siguiente repositorio de GitHub: Silva & Laje. (2024). (Context, 2024b).

Regresión lineal

Modelo principal: Modelo lineal mixto con asincronía como variable dependiente (pasos agrupados $n = 1$ a 6 para SC, $n = 2$ a 6 para PS), factor de efectos fijos Contexto (niveles puros/combinados), factor de efectos fijos Tipo de perturbación (niveles PS/SC), factor de efectos fijos Signo de perturbación (niveles pos/neg), interacciones bidireccionales Contexto x Tipo de perturbación y Contexto x Signo de perturbación, interacción tridireccional y factor de efectos aleatorios Sujeto. Funciones `lmer` (de la biblioteca `lme4` (Bates & Mächler & Bolker & Walker, 2015)) y `Anova` (de la biblioteca `car` (Fox & Weisberg, 2019)) en R.

Análisis de la tabla de desviación: Tabla Anova de parámetros del modelo; prueba

del efecto del contexto en la figura 2; consulte la tabla 3 (pruebas de Wald χ^2 de tipo III).

Factor	χ^2	df	p
Contexto	6.38	1	0.011
Tipo de perturbación	4.01	1	0.045
Signo de perturbación	12.66	1	3.7x10 ⁻⁴
Contexto: Tipo de perturbación	8.47	1	0.0036
Contexto: Signo de perturbación	27.41	1	1.6x10 ⁻⁷
Contexto: Tipo de perturbación: Signo de perturbación	85.28	2	2.2x10 ⁻¹⁶

Tabla 3.

Resultados de Anova, prueba de contexto.

Comparaciones post hoc: Diferencias de contexto para cada condición; consulte la Tabla 4 (valores p corregidos por FDR e intervalos de confianza; funciones emmeans, pairs y test de la biblioteca emmeans (Lenth, 2023) en R).

Condición	puro-comb dif estimada (ms)	SE (ms)	95% CI (ms)	df	t	p
PS neg	8.84	3.50	[1.98; 15.68]	125.9	2.53	0.025
PS pos	-14.49	3.87	[-22.08; -6.89]	155.1	-3.74	0.001
SC neg	-4.79	3.63	[-11.92; 2.32]	140.9	-1.32	0.189
SC pos	7.81	3.70	[0.56; 15.06]	143.5	2.11	0.048

Tabla 4. Medias marginales estimadas y contrastes para cada condición (valores p corregidos por FDR e intervalos de confianza).

Modelo alternativo: Igual que el anterior, pero sin interacción de tres vías y todas con interacciones de dos vías. Modelo lineal mixto con asincronía como variable dependiente (pasos agrupados $n = 1$ a 6 para SC, $n = 2$ a 6 para PS), factor de efectos fijos Contexto

(niveles puros/combinados), factor de efectos fijos Tipo de perturbación (niveles PS/SC), factor de efectos fijos Signo de perturbación (niveles pos/neg), todas las interacciones de dos vías Contexto x Tipo de perturbación, Contexto x Signo de perturbación y Tipo de perturbación x Signo de perturbación, sin interacción de tres vías y factor de efectos aleatorios Sujeto. La comparación de modelos se muestra en la Tabla 5 (función anova de la biblioteca stats [R Core Team 2024] en R).

Prueba de hipótesis: efecto del signo de perturbación (asimetría)

El código para reproducir todas las pruebas de hipótesis estadísticas está disponible en el siguiente repositorio de GitHub: Silva & Laje. (2024). (Context, 2024c).

Cuantificamos el grado de asimetría de respuesta en una combinación Contexto x Tipo de Perturbación como la diferencia de imagen especular entre respuestas a perturbaciones de signos opuestos (Figura 3). Para utilizar la regresión lineal y el ANOVA, implementamos esto invirtiendo el signo de la asincronía de las perturbaciones positivas, de modo que la asimetría se pueda interpretar como la diferencia entre los niveles del factor Signo de Perturbación (negativo menos positivo invertido).

	npar	AIC	BIC	logLik	desviación	χ^2	Df	p-valor
Modelo alt. (contexto)	9	6600.5	6641.9	-3291.3	6582.5			
Modelo princ. (contexto)	10	6570.4	6616.4	-3275.2	6550.4	32.08	1	1.5x10 ⁻⁸

Tabla 5. Comparación de modelos, prueba de contexto. Se prefiere el modelo principal.

Regresión lineal

Modelo principal: Modelo lineal mixto con asincronía como variable dependiente (pasos agrupados $n = 1$ a 6 para SC, $n = 2$ a 6 para PS) después de invertir el signo de las asincronías de las perturbaciones positivas como se describió anteriormente. Factor de efectos fijos Contexto (niveles puro/combinado), factor de efectos fijos Tipo de perturbación (niveles PS/SC), factor de efectos fijos Signo de perturbación (niveles neg/inv-pos), interacciones bidireccionales Signo de perturbación x Contexto y Signo de perturbación x Tipo de perturbación, interacción de tres vías y factor de efectos aleatorios Sujeto. Funciones lmer (de la biblioteca lme4) y Anova (de la biblioteca car) en R.

Análisis de la tabla de desviación: Tabla Anova de parámetros del modelo; prueba

del efecto del signo de perturbación (asimetría) en la Figura 3; consulte la Tabla 6 (pruebas de Wald χ^2 tipo III).

Factor	χ^2	df	p
Contexto	4.07	1	0.044
Tipo de perturbación	3.44	1	0.063
Signo de perturbación	0.095	1	0.758
Contexto: Tipo de perturbación	0.38	1	0.537
Contexto: Signo de perturbación	6.25	1	0.012
Contexto: Tipo de perturbación: Signo de perturbación	14.54	2	6.9×10^{-4}

Tabla 6. Resultados de Anova, prueba de asimetría.

Comparaciones post hoc: Diferencias de asimetría entre condiciones consecutivas en la Figura 4b; ver Tabla 7 (valores p corregidos por Sidak e intervalos de confianza; funciones emmeans, pairs y test de la biblioteca emmeans en R).

Modelo alternativo: Igual que el anterior pero sin interacción de tres vías y todas con interacciones de dos vías. Modelo lineal mixto con asincronía como variable dependiente (pasos agrupados $n = 1$ a 6 para SC, $n = 2$ a 6 para PS) después de invertir el signo de las perturbaciones positivas. Factor de efectos fijos Contexto (niveles puro/combinado), factor de efectos fijos Tipo de perturbación (niveles PS/SC), factor de efectos fijos Signo de perturbación (niveles neg/inv-pos), todas las interacciones de dos vías Contexto x Tipo de perturbación, Contexto x Signo de perturbación y Tipo de perturbación x Signo de perturbación, sin interacción de tres vías y factor de efectos aleatorios Sujeto. La comparación de modelos se muestra en la Tabla 8 (función anova de la biblioteca stats (R Core Team, 2024) en R).

Asimetría diferencia	Estimación (ms)	SE (ms)	95% CI (ms)	df	t	p
PS comb - PS puro	2.57	4.16	[-5.59; 10.73]	700.7	0.62	0.901
SC comb - PS comb	4.13	3.97	[-3.65; 11.91]	680.5	1.04	0.655
SC puro - SC comb	4.11	4.19	[-4.12; 12.33]	714.4	0.98	0.697

Tabla 7. Estimación de medias marginales y contrastes para diferencias de asimetría entre condiciones consecutivas en la Figura 4b (valores p corregidos por Sidak e intervalos de confianza).

	npar	AIC	BIC	logLik	desviación	χ^2	Df	p-valor
Modelo alt. (contexto)	9	6495.3	6536.6	-3238.6	6477.3			
Modelo princ. (contexto)	10	6496.0	6541.9	-3238.0	6476.0	1.309	1	0.253

Tabla 8. Comparación de modelos, prueba de asimetría. Se prefiere el modelo principal debido a la interpretación teórica.

Gráficos aptos para daltónicos y en escala de grises

Utilizamos el mapa de colores de plasma

Disponibilidad de datos y códigos

Todos los datos y códigos para reproducir nuestros resultados (experimento, análisis, figuras) están disponibles en el sitio web del Laboratorio de Dinámica Sensoriomotora <http://www.ldsm.web.unq.edu.ar/context2024> y en el repositorio de Github: <https://github.com/SMDynamics Lab/Context2024>.

Referencias bibliográficas

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* 67, 1–48. DOI: [10.18637/jss.v067.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01)

Bavassi, M. L., Tagliazucchi, E. & Laje, R. (2013). Small perturbations in a finger-tapping task reveal inherent nonlinearities of the underlying error correction mechanism. *Hum Mov Sci* 32, 21–47.

Bavassi, L., Kamienkowski, J. E., Sigman, M. & Laje, R. (2017). Sensorimotor

synchronization: neurophysiological markers of the asynchrony in a finger-tapping task. *Psychol Res* 81, 143–156.

Caral, P. *et al.* (2023). Tappingduino: A versatile shield for paced finger tapping experiments with arduino. OSF. DOI: <https://doi.org/10.31234/osf.io/wa9j3>

Context (2024). Código. Portal de Github. Recuperado de <https://github.com/SMDynamicsLab/Context2024> (archivo “/analysis/power_analysis.py”).

Context (2024b). Código. Portal de Github. Recuperado de <https://github.com/SMDynamicsLab/Context2024>, (archivo “/analysis/hypothesis_testing.Rmd”)

Context (2024c). Código. Portal de Github. Recuperado de: <https://github.com/SMDynamicsLab/Context2024>, (archivo “/analysis/hypothesis_testing.Rmd”)

de Lafuente, V. *et al.* (2024). Keeping time and rhythm by internal simulation of sensory stimuli and behavioral actions. *Sci Adv* 10, eadh8185.

Egger, S. W., Le, N. M. & Jazayeri, M. (2020). A neural circuit model for human sensorimotor timing. *Nat Commun* 11, 3933.

Fox, J. & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression*. Estados Unidos: Sage

González, C. R., Bavassi, M. L. & Laje, R. (2019). Response to perturbations as a built-in feature in a mathematical model for paced finger tapping. *Phys Rev E* 100, 062412 (2019).

Haken, H., Kelso, J. A. & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biol Cybern* 51, 347–356.

Hogendoorn, H. (2022). Perception in real-time: predicting the present, reconstructing the past. *Trends Cogn Sci* 26, 128–141.

Inagaki, H. K. (*et al.*) (2022). Neural Algorithms and Circuits for Motor Planning. *Annu. Rev Neurosci* 45, 249–271.

Jazayeri, M. & Shadlen, M. N. (2010). Temporal context calibrates interval timing. *Nat Neurosci* 13, 1020–1026.

Kaya, E. & Henry, M. J. (2022). Reliable estimation of internal oscillator properties from a novel, fast-paced tapping paradigm. *Sci Rep* 12, 20466.

Lainscsek, C. *et al.* (2012). Finger tapping movements of Parkinson’s disease patients automatically rated using nonlinear delay differential equations. *Chaos* 22, 013119.

Lakens, D. (2022). Sample size justification. *Collabra: Psychol.* 8, 33267.

Large, E. W., & Gray, P. M. (2015). Spontaneous Tempo and Rhythmic Entrainment in a

- Bonobo (*Pan paniscus*). *Journal of Comparative Psychology*, 129(4), 317–328.
- Large, E. W. *et al.* (2023). Dynamic models for musical rhythm perception and coordination. *Front Comput. Neurosci* 17, 1151895.
- Lenth, R. V. (2023). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R package version 1.8.7.
- Loehr, J. D., Large, E. W. & Palmer, C. (2011). Temporal coordination and adaptation to rate change in music performance. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 37, 1292–1309.
- López, S. L. & Laje, R. (2019). Spatiotemporal perturbations in paced finger tapping suggest a common mechanism for the processing of time errors. *Sci Rep* 9, 17814.
- Merchant, H., Zarco, W., Rez, O., Prado, L. & Bartolo, R. (2011). Measuring time with different neural chronometers during a synchronization-continuation task. *Proc Natl Acad Sci U S A* 108, 19784–19789.
- Monteiro, T. (*et al.*) (2023). Using temperature to analyze the neural basis of a time-based decision. *Nat Neurosci* 26, 1407–1416.
- Narain, D., Remington, E. D., Zeeuw, C. I. D. & Jazayeri, M. (2018). A cerebellar mechanism for learning prior distributions of time intervals. *Nat. communications* 9, 469.
- Okada, K.-i., Takeya, R. & Tanaka, M. (2022). Neural signals regulating motor synchronization in the primate deep cerebellar nuclei. *Nat. Commun.* 13, 2504.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Bregman, M. R., & Schulz, I. (2009a). Experimental Evidence for Synchronization to a Musical Beat in a Nonhuman Animal. *Current Biology*, 19(10), 827–830.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Chen, Y., & Repp, B. H. (2009b). Studying Synchronization to a Musical Beat in Nonhuman Animals. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 459–469.
- Paton, J. J. & Buonomano, D. V. (2018). The Neural Basis of Timing: Distributed Mechanisms for Diverse Functions. *Neuron* 98, 687–705.
- R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R. Vienna, Austria: Foundation for Statistical Computing.
- Repp, B. H. (2002). Phase correction in sensorimotor synchronization: nonlinearities in voluntary and involuntary responses to perturbations. *Hum Mov Sci* 21, 1–37.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychon Bull Rev* 12, 969–992.
- Repp, B. H. (2010). Sensorimotor synchronization and perception of timing: effects of music training and task experience. *Hum Mov Sci* 29, 200–213.
- Repp, B. H., Keller, P. E. & Jacoby, N. (2012). Quantifying phase correction in sensorimotor

synchronization: empirical comparison of three paradigms. *Acta Psychol (Amst)* 139, 281–290.

Repp, B. H. & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006-2012). *Psychon Bull Rev* 20, 403–452.

Repp, B. H. & Keller, P. E. (2004). Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: effects of intention, attention, and awareness. *Q J Exp Psychol A* 57, 499–521.

Rhodes, D. (2018). On the Distinction Between Perceived Duration and Event Timing: Towards a Unified Model of Time Perception. *Timing & Time Percept.* 6, 90–123.

Roman, I. R., Washburn, A., Large, E. W., Chafe, C. & Fujioka, T. (2019). Delayed feedback embedded in perception-action coordination cycles results in anticipation behavior during synchronized rhythmic action: A dynamical systems approach. *PLoS Comput. Biol* 15, e1007371.

Rosso, M., Moens, B., Leman, M. & Moumdjian, L. (2023). Neural entrainment underpins sensorimotor synchronization to dynamic rhythmic stimuli. *Neuroimage* 277, 120226.

Schachner, A., Brady, T. F., Pepperberg, I. M., & Hauser, M. D. (2009). Spontaneous motor entrainment to music in multiple vocal mimicking species. *Current Biology*, 19(10), 831–836.

Schulze, H., Cordes, A. & Vorberg, D. (2005). Keeping Synchrony While Tempo Changes: Accelerando and Ritardando. *Music. Percept.* 22, 461–477.

Seabold, S. & Perktold, J. (2010). Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. In *9th Python in Science Conference*.

Silva, A. D., Laje, R. (2024). Perturbation context in paced finger tapping tunes the error-correction mechanism. *Scientific Reports* 14:27473.

Suresh, K. & Chandrashekhara, S. (2012). Sample size estimation and power analysis for clinical research studies. *J Hum Reprod Sci* 5, 7–13.

Tsao, A., Yousefzadeh, S. A., Meck, W. H., Moser, M. B. & Moser, E. I. (2022). The neural bases for timing of durations. *Nat Rev Neurosci* 23, 646–665.

Van der Steen, M. C. & Keller, P. E. (2013). The ADaptation and Anticipation Model (ADAM) of sensorimotor synchronization. *Front Hum Neurosci* 7, 253.

Versaci, L. & Laje, R. (2021). Time-oriented attention improves accuracy in a paced finger-tapping task. *Eur J Neurosci*.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Nacional de Quilmes (Argentina, subvención PUNQ #53/1028) y CONICET (Argentina). Agradecemos a Laura C. Estrada y Diego

Fernández Slezak por su ayuda durante la recolección de datos.

Declaración de contribuciones del autor

A.D.S. y R.L. diseñaron los experimentos. R.L. concibió el enfoque. A.D.S. escribió el código y realizó los experimentos.

A.D.S. y R.L. analizaron los datos. R.L. escribió el borrador del manuscrito. A.D.S. y R.L. editaron y revisaron el manuscrito.

Información adicional

Los autores declaran no tener intereses en competencia.