

DINÁMICA DEL SISTEMA MOTOR DURANTE LA LECTURA DE NARRACIONES DE ACCIÓN EN BILINGÜES

MOTOR SYSTEM DYNAMICS DURING THE READING OF ACTION NARRATIVES IN BILINGUALS.

DINÂMICA DO SISTEMA MOTOR DURANTE A LEITURA DE NARRAÇÕES DE AÇÃO EM PESSOAS BILÍNGUES

RECIBIDO: 08 febrero 2023

ACEPTADO: 28 septiembre 2023

**Agustina Birba^{1,2} David Beltrán Guerrero² Miguel Martorell Caro³ Piergiorgio Trevisan⁴
Angela Morales⁵ Edinson Muñoz⁵ Boris Kogan^{1,3} Lucas Sedeño³ Agustín Ibañez^{1,6,7}
Adolfo M. García^{5*}**

¹ Centro de Neurociencias Cognitivas, Universidad de San Andrés, Vito Dumas 284, Buenos Aires, Argentina

² Instituto Universitario de Neurociencia (IUNE), Universidad de la Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Spain

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

⁴ University of Trieste, Trieste, Italy

⁵ Departamento de Lingüística y Literatura, Facultad de Humanidades, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile

⁶ Latin American Brain Health Institute (BrainLat), Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile

⁷ Global Brain Health Institute, University of California, San Francisco, United States, and Trinity College Dublin, Dublin, Ireland

Palabras Clave: Cognición

corporizada, semántica de acción, textos naturalistas, bilingüismos, conectividad funcional.

Keywords: Embodied cognition,

action semantics, naturalistic texts, bilingualism. Functional connectivity.

Palavras-chave: cognição

corporizada; semântica de ação, textos naturalistas, bilinguismos, conectividade funcional.

RESUMEN

¿Cómo se modulan los mecanismos corporizados ante textos naturalistas según la experiencia lingüística? Para abordar esta pregunta, evaluamos dinámicas del sistema motor en 26 bilingües mientras leían textos de acción (TA, con énfasis en movimientos corporales) y textos neutros (TnA, con baja motilidad) en su primera y segunda lengua (L1: español, L2: inglés). Durante la tarea, registramos señales electroencefalográficas de alta densidad y las sometimos a análisis de conectividad funcional. En la L1, la lectura del TA (respecto del TnA) arrojó mayor conectividad entre electrodos centrales izquierdos y derechos implicados en procesos motores. En la L2, si bien no hubo efectos a nivel de grupo, la conectividad de electrodos motores/frontales durante la lectura del TA correlacionó positivamente con la competencia en L2 y negativamente con su edad de apropiación. Estos hallazgos sugieren que el involucramiento de las redes motoras durante el procesamiento de TA es proporcional a la consolidación de la lengua empleada.

Correspondencia: Dr. Adolfo M. García, Universidad de San Andrés, Vito Dumas 284, B1644BID Victoria, Buenos Aires, Argentina. Teléfono: (54-11) 4725-7000. E-mail: adolfofomartingarcia@gmail.com



Publicado bajo licencia Creative Commons Reconocimiento 3.0. (cc-by).

ABSTRACT

Is the recruitment of embodied mechanisms modulated by linguistic experience in the face of naturalistic texts? To tackle this question, we assessed motor-system dynamics in 26 bilinguals as they read action texts (ATs, highlighting bodily movements) and neutral texts (NTs, featuring low motility) in their first and second languages (L1: Spanish, L2: English). During the task, we recorded high-density electroencephalographic signals and subjected them to functional connectivity analysis. In L1, AT (relative to NT) reading involved increased connectivity between left and right central electrodes subserving action processes. In L2, despite null group-level effects, enhanced motor-related connectivity during AT reading correlated positively with L2 proficiency and negatively with age of L2 appropriation. These findings suggest that the engagement of motor networks during AT processing is proportional to how consolidated the language at hand is.

RESUMO

Como se modulam os mecanismos corporizados diante de textos naturalistas segundo a experiência linguística? Para abordar esta pergunta, avaliamos as dinâmicas do sistema motor em 26 pessoas bilíngues enquanto faziam a leitura de textos de ação (TA, com ênfase em movimentos corporais) e textos neutros (TnA, com baixa mobilidade) em sua primeira e segunda língua (L1: espanhol, L2: inglês). Durante a tarefa, registramos sinais eletroencefalográficos de alta densidade e os submetemos à análise de conectividade funcional. Na L1, a leitura do TA (a respeito do TnA) mostrou maior conectividade entre eletrodos centrais esquerdos e direitos implicados em processos motores. Na L2, ainda que não teve efeitos a nível de grupo, a conectividade de eletrodos motores/frontais durante a leitura da TA correlacionou positivamente com a competência no L2 e negativamente com sua idade de apropriação. Estes achados sugerem que o envolvimento das redes motoras durante o processamento da TA é proporcional à consolidação da língua empregada.

¿Cómo se modulan los fenómenos corporizados del lenguaje de acción según la experiencia lingüística? Esta pregunta clave para las teorías de cognición corporizada se ha tratado de responder examinando palabras de acción en la primera y segunda lengua (L1, L2) de personas bilingües (Kogan, Muñoz, Ibáñez, & García 2020; Vukovic & Shtyrov, 2014). Sin embargo, el campo carece de validez ecológica. Para superar tal limitación, el presente estudio examina la conectividad funcional de circuitos motores en bilingües con diferentes niveles de competencia y edad de apropiación de su L2, durante la lectura de textos de acción y no acción (TA, TnA) en sus dos lenguas.

MARCO TEÓRICO

Los sistemas corporizados, enraizados en circuitos cerebrales de modalidad específica, se activan según las experiencias dominantes evocadas por los estímulos (Pulvermüller, 2013a). Por ejemplo, los sustantivos que denotan partes del rostro (*boca*), aromas (*canela*), o sabores (*salado*) suponen reactivaciones específicas de redes faciales (García, Hesse, Birba, Adolfi, Mikulan, Caro...Ibáñez, 2020), olfativas (González, Barros-Loscertales, Pulvermüller, Meseguer, Sanjuán, Belloch, & Ávila, 2006) y gustativas (Barrós-Loscertales, González, Pulvermüller, Ventura-Campos, Bustamante, Costumero, ...Ávila, 2012), respectivamente. Esta evidencia respalda la perspectiva corporizada del lenguaje, según la cual el *procesamiento semántico dependería de nuestras experiencias corporales con el entorno* (Barsalou, 2010). El estudio de estos sistemas resulta fundamental para caracterizar procesos lingüísticos, ya que pueden activarse incluso antes que los sistemas multimodales durante la comprensión verbal (García, Moguilner, Torquati, García-Marco, Herrera, Muñoz, . . . Ibáñez, 2019) y su disrupción puede arrojar déficits selectivos en tales procesos (Birba, García-Cordero, Kozono, Legaz, Ibáñez, Sedeño, & García, 2017).

El principal paradigma del campo radica en explorar la relación entre los mecanismos motores y el “lenguaje de acción” – expresiones verbales que denotan movimientos corporales (p. ej., los verbos *saltar* o *correr*). El procesamiento de verbos de acción implica reactivaciones de la corteza motora, ya sea a nivel somatotópico o general. Así, el verbo *escribir* se asocia con la activación de regiones especializadas en movimientos manuales (Pulvermüller, 2005; Pulvermüller & Fadiga, 2010), pero también implica activaciones más generalizadas de los circuitos motores (García, et al., 2019). Lo mismo se demostró a nivel electrofisiológico, ya que verbos de acción realizados con la cara, los brazos y las piernas se asocian con topografías corticales diferentes dependiendo del efector (Pulvermüller, Härle, & Hummel, 2001), aunque también pueden modular mecanismos motores más generales (García et al., 2019).

Ahora bien, los sistemas corporizados, en general, y los que se especializan en el lenguaje de acción, en particular, no son universales ni inmutables. Su activación y acoplamiento durante el procesamiento lingüístico se reconfiguran según la experiencia individual (Kogan et al., 2020), incluyendo la edad de apropiación (el periodo aproximado de incorporación de la lengua) y la competencia (el nivel de desempeño alcanzado en ella) (Paradis, 2009). Un modelo ideal para abordar dicho fenómeno es el que ofrecen los bilingües tardíos (personas que aprendieron una L2 luego de los siete años), ya que permite evaluar el rol de los sistemas corporizados en una lengua adquirida desde la vida intrauterina (L1) y otra aprendida a partir de la infancia media (L2), cuando las ventanas óptimas para la adquisición incidental de varias funciones lingüísticas ya se cerraron (Paradis, 2009). Además, a diferencia de los bilingües simultáneos o tempranos, la edad de apropiación y el nivel de competencia de los bilingües tardíos son muy heterogéneas, lo cual permite estudiar la influencia de ambas variables en el reclutamiento de los sistemas corporizados para la comprensión en L2 (Kogan et al., 2020; Vukovic & Shtyrov, 2014).

La comprensión del lenguaje de acción en L1 se afecta por movimientos físicos concomitantes (Bergen, Lau, Narayan, Stojanovic, & Wheeler, 2010; García & Ibáñez, 2016), aumenta la actividad de regiones motoras (Aziz-Zadeh, Wilson, Rizzolatti, & Iacoboni, 2006) y modula marcadores neurofisiológicos de la acción motora (Aravena, Hurtado, Riveros, Cardona Manes & Ibáñez, 2010; Ibáñez, Cardona, Dos Santos, Blenkman, Aravena, Roca, . . . Gómez-Arévalo, 2013). Por otro lado, estudios en L2 han revelado efectos similares a nivel conductual (Buccino, Marino, Bulgarelli, & Mezzadri, 2017) y neurofuncional (Bergen et al., 2010; Vukovic, 2013; Vukovic & Shtyrov, 2014), aunque estos últimos son más débiles (Vukovic & Shtyrov, 2014) y menos extendidos (De Grauwe, Willems, Rueschemeyer, Lemhofer & Schriefers, 2014) que en L1.

Además, la magnitud de los efectos corporizados es sensible a variables específicas de la L2, como la competencia y la edad de apropiación de dicha lengua. Diversos modelos psicolingüísticos (Dijkstra, Wahl, Buytenhuijs, Van Halem, Al-Jibouri, De Korte & Rekké, 2018; Kroll, van Hell, Tokowicz, & Green, 2010) y neurocientíficos (Paradis, 2009) postulan que ambos factores pueden modular las funciones lingüísticas en bilingües. Por ejemplo, niveles de competencia más altos se asocian con un procesamiento menos asimétrico cuando se comparan tareas en L1 y L2 (García, 2015a) y un reclutamiento más convergente de recursos neurales en ambas lenguas (Abutaleb, 2008). Asimismo, se ha relacionado una menor edad de apropiación de la L2 con una activación más paralela de ambas lenguas (Canseco-Gonzalez, Brehm, Brick, Brown-Schmidt, Fischer & Wagner, 2010), una mayor sensibilidad neural a distinciones semánticas finas en L2 (Vilas, Santilli, Mikulan, Adolfi, Caro, Manes, . . . García, 2019) y diferencias menos marcadas en activación cerebral entre L2 y L1 (Liu & Cao, 2016). De modo más particular, los efectos corporizados durante el procesamiento de lenguaje de acción en L2 se correlacionan con la competencia en dicha lengua (Bergen et al., 2010) o incluso se presentan solo en sujetos con alta competencia (Ibáñez, Manes, Escobar, Trujillo, Andreucci & Hurtado, 2010; Vukovic, 2013). Así, los sistemas corporizados podrían reclutarse de manera diferencial según qué tan bien (y posiblemente cuándo) se aprendió una lengua.

De cara a dicha conjetura, realizamos un experimento con dos tareas (en L1 y en L2) para examinar los efectos del procesamiento corporizado sobre la conectividad funcional durante la lectura de textos naturalistas. Evaluamos en cada lengua los macroestados cognitivos distribuidos en la lectura libre de TA y TnA. A la luz de hallazgos previos (Ibáñez et al., 2010; Vukovic & Shtyrov, 2014), hipotetizamos que, en comparación con el TnA, el TA en L1 involucraría hiper-conectividad entre electrodos centrales derechos e izquierdos (relacionados con la actividad motora). Además, anticipamos que este patrón se vería atenuado en L2, pero se asociaría con la competencia en L2 y la edad de apropiación de esta lengua. Con este enfoque, pretendemos evaluar si la conectividad de circuitos motores durante el procesamiento de TA varía según la experiencia lingüística.

MÉTODO, MATERIALES Y PARTICIPANTES

Participantes

El estudio incluyó a 30 voluntarios bilingües. Todos adquirieron el español como L1 y aprendieron inglés como L2, principalmente a través de instrucción formal en una sala de clases. Todos tenían una visión normal o corregida a normal y no presentaban historial de enfermedades psiquiátricas o neurológicas. Cuatro sujetos se excluyeron debido a errores técnicos durante los registros. El grupo final constó de 26 bilingües, tamaño muestral que alcanza una potencia de 0,97 (Apéndice 1). El grupo estaba compuesto por 21 mujeres y 5 hombres, con una media de 30,30 ($DE = 7,94$) años de edad, una edad promedio de apropiación de la L2 de 7,28 ($DE = 3,52$) y 16,80 ($DE = 7,35$) años de estudio de la L2. Datos obtenidos mediante un cuestionario validado (Vilas et al., 2019) indicaron que, en una escala de 1 (completa inhabilidad para ejecutar tareas lingüísticas) a 7 (alta capacidad para llevarlas a cabo de manera rutinaria), la muestra tenía altos niveles de competencia en L1 ($M = 6,61$; $DE = 0,50$) y L2 ($M = 6,07$; $DE = 0,84$).

Todos los participantes leyeron y firmaron un formulario de consentimiento informado antes de comenzar el estudio. El protocolo se puso en práctica de acuerdo con la Declaración de Helsinki y fue aprobado por el comité de ética institucional.

Materiales

Los materiales fueron cuatro historias breves, elaboradas mediante un protocolo sistemático (Trevisan & García 2019) y reportadas en estudios previos (García, Bocanegra, Herrera, Moreno, Carmona, Baena, . . . Ibáñez, 2018; Trevisan, Sedeño, Birba, Ibáñez & García, 2017). Dos fueron creadas en español (L1) y otras dos en inglés (L2). Cada par de textos incluía un TA, focalizado en los movimientos corporales de los personajes; y un TnA, caracterizado por un bajo contenido de acción. Las narraciones eran comparables en cuanto a múltiples variables sintácticas, léxicas, semánticas, pragmáticas y textuales (Apéndices 2 y 3).

Procedimiento

Primero, los participantes completaron el cuestionario descrito en la sección 2.1. Luego, se sentaron frente a la pantalla del computador en una sala de electroencefalografía con iluminación tenue. Se les informó que se les mostrarían textos escritos en la pantalla, algunos en español y otros en inglés, y que simplemente debían leerlos en silencio, a su propio ritmo y sólo una vez, sin mover su cabeza, brazos o cuerpo. También se les informó que después de leer cada texto, tendrían que responder tres preguntas de comprensión (lo cual fuerza la atención y garantiza un procesamiento semántico profundo). El estudio comenzó con un breve bloque de práctica, que contenía una narración con la misma extensión y estructura que las de los experimentos, seguida por tres preguntas de ejemplo. Después del bloque de práctica, los participantes leyeron el TA y el TnA en una lengua y después los otros dos textos en la otra. Se les presentó cada texto todo de una vez, en un solo párrafo justificado y escrito en fuente blanca (Calibri, 22) sobre fondo negro. Se instruyó a los participantes presionar una tecla para que aparecieran cada uno de los textos y para sacarlos de la pantalla una vez leídos. El orden de las tareas (L1, L2) y la secuenciación del TA y del TnA dentro de ellas, se contrabalancearon entre participantes –con la restricción estratégica de que dos textos de la misma categoría (por ejemplo, el TA en español y el TA en inglés) nunca se presentaban de manera sucesiva. Después de cada narración, se presentaban tres preguntas de verdadero o falso y se pedía seleccionar la respuesta correcta presionando teclas predefinidas. El experimento duró aproximadamente diez minutos. La estructura de la sesión experimental se diagrama en la **Figura 1A**.

Métodos de EEG

Preprocesamiento

Durante la lectura de cada texto, obtuvimos señales online de EEG a través de un sistema Biosemi Active-two de 128 canales con sensores pre-amplificados y un amplificador de acoplamiento DC, con una velocidad de muestreo de 1024 Hz. Los filtros análogos se ajustaron en 0,03 y 100 Hz. Se aplicó un filtro digital de paso de banda entre 0,5 y 30 Hz *offline* para eliminar componentes de frecuencias no deseados. Durante la adquisición se fijó la referencia en los electrodos de los mastoides y luego se realizó una referencia *offline* al promedio de todos los electrodos. Los movimientos oculares y artefactos de parpadeo se removieron mediante un análisis independiente de componentes y los artefactos se rechazaron a través de la inspección visual de un experto, con el mismo enfoque utilizado por nuestro equipo en estudios previos con EEG para evaluar los procesos lingüísticos y no lingüísticos en diversas poblaciones (Aravena et al., 2010; Ibáñez et al., 2013; Ibáñez et al., 2010; Vilas et al., 2019). Los canales defectuosos se reemplazaron con interpolación esférica estadísticamente compensada (basada en todos los sensores) y luego se calculó la varianza de la señal entre pruebas para garantizar la estabilidad de la forma de onda promediada (Courellis, Iversen, Poizner, & Cauwenberghs, 2016). Se insertaron eventos cada un segundo desde el principio hasta el término de la lectura de cada prueba, lo que dio como resultado cuatro tipos de eventos: texto de acción en L1 (TA-L1), texto neutro en L1 (TnA-L1), texto de acción en L2 (TA-L2) y texto neutro en L2 (TnA-L2). El número de eventos de cada texto dependía del tiempo que el participante se demoraba en leer el texto. Es importante destacar que las latencias de lectura promedio no diferían de manera significativa [$F(3,75) = 1,48; p = 0,23$] entre los cuatro textos (TA-L1: $M = 58,60$ s; $DE = 14,54$ s; TnA-L1: $M = 66,23$ s; $DE = 18,00$ s; TA-L2: $M = 64,14$ s; $DE = 21,40$ s; TnA-L2: $M = 60,87$ s; $DE = 23,22$ s). Asimismo, el número de eventos resultante fue similar [$F(3,75) = 1,45; p = 0,25$] en los cuatro textos (TA-L1: $M = 62,65$; $DE = 3,93$; TnA-L1: $M = 69,57$; $DE = 3,93$; TA-L2: $M = 68,46$; $DE = 3,93$; TnA-L2: $M = 63,96$; $DE = 3,93$). Tal como se realizó en estudios de EEG que emplearon el método wSMI (*weighted symbolic mutual information*, ver Material suplementario, **S5**) para examinar estados cognitivos temporalmente variables (Imperatorii, Betta, Cecchetti, Canales-

Johnson, Ricciardi, Siclari,... Bernardi, 2019), seleccionamos segmentos de un segundo a partir de datos continuos. Estas etapas de procesamiento se implementaron con *scripts* de MATLAB, el *toolbox* EEGLAB (Delorme & Makeig, 2004) y *scripts* específicos para fases de procesamiento posterior.

2.5. Análisis de datos

Todos los análisis se realizaron de manera independiente para cada tarea: se comparó, por una parte, el TA- L1 con el TnA-L1; y, por otra, el TA-L2 y el TnA- L2. Para analizar la matriz de conectividad de cada participante en cada una de las tareas, realizamos una prueba de permutación de clúster no paramétrico para las muestras dependientes (Maris & Oostenveld, 2007), un enfoque que ha demostrado ser sensible a los efectos semánticos (Moreno, I., De Vega, M., León, I., Bastiaansen, M., Lewis, A. G., & Magyari, L., 2015), incluso en individuos bilingües (Vilas et al., 2019). Tanto en la tarea en L1 como en la tarea en L2, se evaluaron las redes de conectividad y se compararon el TA y el TnA a través de permutaciones (con 1000 iteraciones). Los pares de electrodos se consideraron parte del mismo clúster si su conectividad alcanzaba un nivel de significancia $p < 0,05$. Estos clústeres se consideraron significativos con un mínimo de diez electrodos y un $p < 0,025$ (asumiendo un nivel alfa de 0,05), tal como se hizo en trabajos previos (Aravena et al., 2010; Vilas et al., 2019). Los clústeres significativos se usaron para enmascarar la matriz promedio. Luego, para cada lengua, se substrajeron los datos del TnA de los datos de TA y se trazaron en un registro topográfico, donde los valores positivos de clúster representaban una mayor conectividad para el TA y los valores negativos representaban una mayor conectividad para el TnA.

Además, para evaluar si el reclutamiento de los mecanismos corporizados estaba relacionado con el grado de consolidación de la L2, establecimos correlaciones de Pearson entre la conectividad de las regiones motoras y (a) la competencia en L2 de los participantes y (b) la edad de apropiación de la L2. Para aumentar la exigencia metodológica de nuestro análisis, se replicaron las correlaciones sobre tres estimaciones de la conectividad motora. En primer lugar, derivamos una región de interés (Rdi) *basada en datos* a partir de los resultados del análisis del clúster. Específicamente, dado que no se observaron clústeres significativos para la tarea en L2 (ver sección 3.2.1), establecimos una Rdi motora que abarcaba los electrodos que mostraban una conectividad aumentada durante el procesamiento del TA-L1 [B30, B32, C2, C20, C21, D5, D11, D12, D20, D22, D28] (Datos suplementarios, sección S4, **Figura S1A**) y la usamos para enmascarar la matriz de conectividad de las condiciones de la L2. Este análisis se complementó con una Rdi de control compuesta por los electrodos que produjeron una conectividad aumentada durante el procesamiento del TnA-L1- [B27, B28, B29, B31, C1, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, D1, D2, D3, D4, D6, D7, D8, D9, D10, D13, D14, D16, D17, D18, D21, D23, D24, D25, D26, D27, D29, D30, D31, D32] (Apéndice 4, Figura A1A). En segundo lugar, replicamos el análisis de correlación usando dos Rdi *basadas en hipótesis*, específicamente: una Rdi corporizada derivada de un estudio previo sobre semántica de acción [D12, D19, D28] (Vukovic & Shtyrov, 2014) (Apéndice 4, Figura A1B), y una Rdi sensible al movimiento tomada de un experimento *motor-tapping* [D11, D12, D13, D18, D19, D20] (Yoris et al., 2017) (Apéndice 4, Figura A1C). Luego, para cada sujeto, promediamos la conectividad de todos los electrodos en la Rdi después de sustraer los valores del TnA del TA. Por otra parte, para las dos Rdi basadas en hipótesis, promediamos directamente la conectividad de todos los electrodos de la Rdi después de sustraer los valores del TnA del TA, sin enmascarar la matriz de conectividad. Además, para asegurar que las correlaciones predichas fueran específicas para la corporeidad de la L2, analizamos si la competencia en L2 y la edad de apropiación de esta lengua estaban relacionadas con la conectividad aumentada durante (i) el procesamiento del TnA-L2 y (ii) el TA-L1. El análisis de clúster se realizó con el *software* MATLAB y se ejecutaron las correlaciones de Pearson en el *software* R 3.5.2.

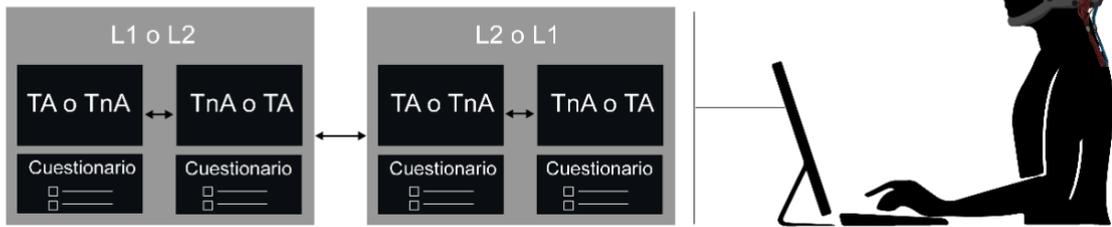
RESULTADOS

Tarea en L1

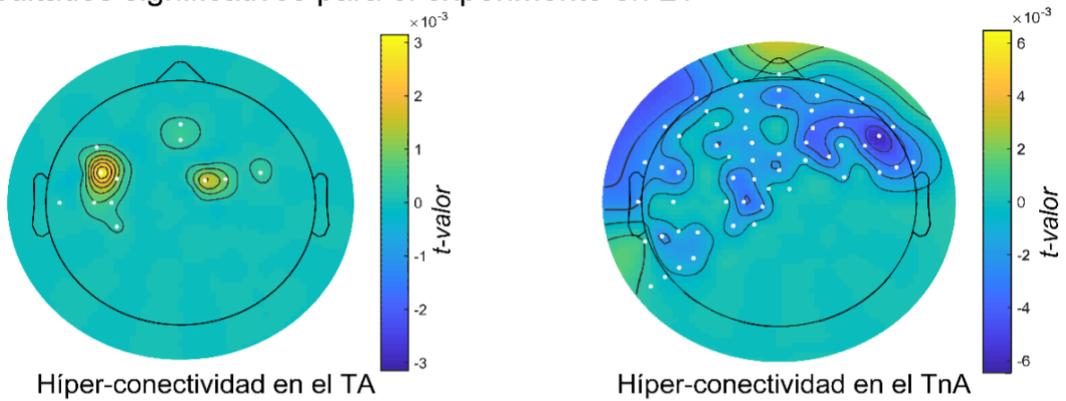
Análisis de clúster en L1

Las comparaciones de la actividad funcional entre el TA y el TnA en L1 revelaron clústeres significativamente diferentes ($p = 0,005$; con corrección de clúster; **Figura 1B**, recuadros izquierdo y central). Específicamente, el TA presentaba una conectividad aumentada entre los electrodos implicados en las áreas motoras derecha e izquierda (**Figura 1B**, recuadro izquierdo), mientras que el TnA mostró mayor conectividad sobre el resto de los electrodos significativos del clúster, cubriendo las áreas frontal y temporal izquierda y derecha (**Figura 1B**, recuadro del centro).

A Paradigma experimental



B Resultados significativos para el experimento en L1



C Resultados significativos para el experimento en L2

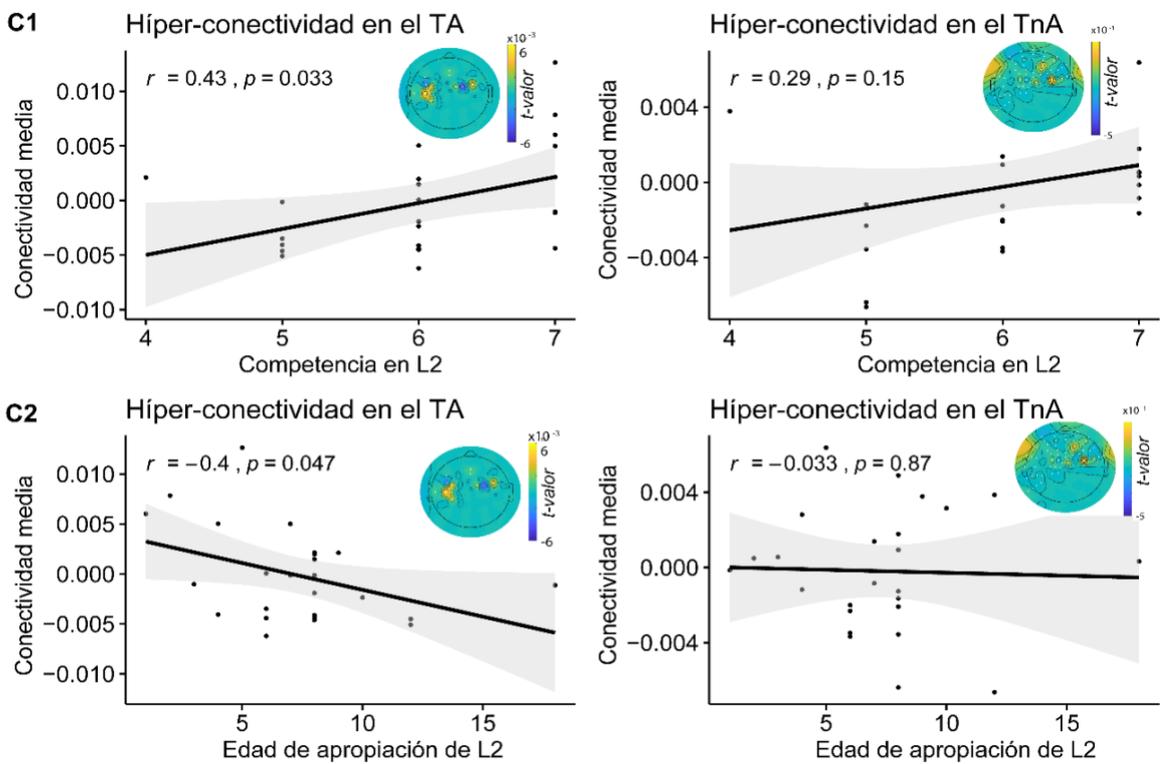


Figura 1. Diseño experimental y resultados. La figura ilustra el paradigma experimental (A), los resultados significativos para la tarea en L1 (B) y los resultados significativos para la tarea en L2 (C). Los puntos blancos representan los electrodos significativos del clúster. TA: texto de acción; TnA: texto de no acción; L1: primera lengua; L2: segunda lengua.

Tarea en L2

Análisis de clúster en L2

El contraste directo entre el TA y el TnA no reveló diferencias significativas de conectividad funcional en L2 ($p > 0,025$; con corrección de clúster).

Correlaciones entre conectividad de TA en L2 y consolidación de la L2

A pesar de la ausencia de diferencias en la conectividad entre los textos en L2 al promediar la muestra completa, examinamos si la conectividad aumentada entre los electrodos relacionados con el sistema motor durante el procesamiento del TA estaba relacionada con medidas de consolidación de la L2 (específicamente, competencia en L2 y edad de apropiación de la L2). Los resultados de nuestro enfoque *basado en datos* revelaron una correlación positiva entre la competencia en L2 y la hiper-conectividad de la Rdl basada en el TA en L2 (TA vs. TnA) ($r = 0,43$; $p = 0,03$, **Figura 1C1**, recuadro izquierdo) pero no así en la Rdl basada en el TnA ($r = 0,29$; $p = 0,15$, **Figura 1C1**, recuadro izquierdo). Estos resultados son específicos para la L2, ya que las correlaciones entre la competencia en L2 y la conectividad de las Rdl basadas en el procesamiento del TA y en TnA en L1 (TA vs. TnA) no revelaron resultados significativos (consulte Apéndice 6). Estos resultados fueron replicados por las correlaciones según las Rdl basadas en hipótesis, ya que la competencia en L2 correlacionó positivamente con la conectividad de la Rdl corporizada ($r = 0,43$, $p = 0,03$) y de la Rdl sensible al movimiento ($r = 0,41$, $p = 0,03$) durante el procesamiento de la L2 (TA vs. TnA). Además, estos resultados son específicos para L2, ya que las correlaciones entre la competencia en L2 y la conectividad de las *Rdl basadas en hipótesis* (corporizada y sensible al movimiento) no revelaron resultados significativos en L1 (Apéndice 6).

También inspeccionamos la relación entre la edad de apropiación de la L2 y la conectividad para el TA y el TnA en L2. Encontramos una correlación negativa con la Rdl derivada del clúster significativo ($r = -0,40$; $p = 0,047$; **Figura 1C2** panel izquierdo) pero no con la conectividad de la Rdl control (basada en el análisis de clúster de L1) del TnA ($r = -0,03$; $p = 0,87$; **Figura 1C2**, panel derecho). Como en el análisis de la competencia en L2, estos resultados fueron específicos para la L2, ya que no se observaron correlaciones significativas con la conectividad de ninguna de las Rdl durante el procesamiento de la L1 (TA vs TnA) (Material suplementario sección **S6**). Sin embargo, la correlación significativa observada para la Rdl basada en datos del TA no se replicó en los análisis según las dos Rdl basadas en hipótesis, específicamente: la Rdl corporizada ($r = -0,25$; $p = 0,21$) y la Rdl sensible al movimiento ($r = -0,23$; $p = 0,26$). Además, volvimos a ejecutar estos análisis después de retirar a un sujeto cuya edad de apropiación de la L2 (específicamente, 18) se consideró valor atípico (mayor a 2 *DE* a partir de la media muestral). La correlación entre la conectividad en la Rdl del TA y la edad de apropiación de la L2 siguió siendo significativa, mientras que todas las correlaciones de control se mantuvieron poco significativas (para obtener detalles, consulte el Apéndice 7, Figura A2).

DISCUSIÓN

Este estudio examinó si el reclutamiento de los sistemas motores durante la lectura de textos naturalistas se ve influenciado por la edad y el nivel en que se aprendió una lengua. Durante el procesamiento de la L1, la lectura del TA involucró mayor conectividad entre electrodos centrales izquierdo y derecho (relacionados con procesos motores). Además, aunque no se observó ese patrón para la L2, la conectividad de electrodos motores durante el procesamiento del TA-L2 mostró una correlación positiva con la competencia en L2 y una negativa con la edad de apropiación de dicha lengua. Estos patrones fueron específicos para la lectura del TA (comparado con el TnA). Por ende, la función de los sistemas semánticos corporizados durante el procesamiento de discurso naturalista parece ser sensible al grado de consolidación del lenguaje.

El principal hallazgo en las tareas en L1 es que la lectura del TA-L1 implicó una mayor conectividad entre los electrodos canónicos de procesos motores (centrales izquierdo y derecho). Los electrodos de este clúster han sido consistentemente relacionados con marcas de procesos relacionados con acciones, como por ejemplo la desincronización de la banda beta relacionada con eventos al agarrar objetos (Ewen, Lakshmanan, Pillai, McAuliffe, Nettles, Hallett,....Mostofsky, 2016), los cambios de la actividad oscilatoria en tareas de imaginación motora (Pfurtscheller, Brunner, Schlögl, & Da Silva, 2006) y la alteración de esos patrones en pacientes con tetraplejia subaguda (López-Larraz, Montesano, Gil-Agudo, Minguez, & Oliviero, 2015). Más específicamente, grupos similares de electrodos han mostrado modulaciones de ritmos mu (Vukovic & Shtyrov, 2014) y el potencial pre-motor (Melloni et al., 2015) durante el acceso a verbos de acción. Considerando la manipulación específica entre el TA y el TnA, este patrón sugiere que la comprensión de acciones puede reclutar distintivamente

mecanismos motores distintivamente, tal como se indicó previamente por medio de estudios de neuroimágenes (Aziz-Zadeh et al., 2006; García et al., 2019), electrofisiológicos (Aravena et al., 2010; Ibáñez et al., 2013), y conductuales (Bergen et al., 2010; García & Ibáñez, 2016) que examinan el procesamiento de verbos de acción a través de palabras y oraciones aisladas. Esto sugiere que la comprensión del lenguaje es mediada por reconstrucciones tácitas de las experiencias sensoriomotoras evocadas por el material verbal (Pulvermuller, 2013a, 2018).

Es importante destacar que el intercambio de información, significativa entre estos electrodos relacionados con el sistema motor fue específico para el procesamiento del TA, ya que el TnA- L1 se caracterizó por una mayor conectividad en los electrodos frontales y temporales derecho e izquierdo (y no entre los electrodos que se asocian más frecuentemente con los procesos motores). Este patrón de resonancia motora selectiva para el TA replica resultados previos basados en los mismos textos naturalistas en usuarios de L1. De hecho, se ha demostrado que la disfunción motora (García et al., 2018) y el entrenamiento corporal sostenido (Trevisan et al., 2017), respectivamente, dificultan y potencian la comprensión de acciones en TA-L1 sin efectos comparables en el TnA. Así, el patrón de hiper-conectividad observado para el TA (comparado con el TnA) parece reflejar efectos específicos de reactivación motora antes que marcadores inespecíficos de lectura de textos en general.

Se debe resaltar que los resultados presentados constituyen nueva evidencia sobre el *intercambio de información* no lineal asociada a procesos motores durante el procesamiento del lenguaje de acción. En este sentido, el uso de métricas de conectividad funcional para la investigación sobre el lenguaje corporizado (García et al., 2016; Melloni et al., 2015) complementa los enfoques clásicos con perspectivas sobre patrones de actividad transregional (Mišić & Sporns, 2016). Diversos mecanismos motores operarían en conjunto durante el procesamiento semántico de modalidad específica. Además, y de manera más decisiva, esto indica que el reclutamiento de sistemas corporizados cumple un rol importante durante *la lectura libre de narraciones naturalistas*. Este hallazgo aporta evidencia neurocientífica novedosa a la propuesta de que los mecanismos de activación motora pueden ser robustos para funcionar incluso en escenarios ecológicos (García et al., 2018; Trevisan et al., 2017).

La tarea en L2 arroja precisiones adicionales. En primer lugar, no se observaron clústeres significativamente diferentes entre el TA-L2 y el TnA-L2. Aunque ningún estudio ha evaluado la conectividad no lineal en el mismo rango de frecuencia, nuestro resultado se alinea con experimentos que muestran que otros marcadores neurales corporizados se atenúan en la L2 en relación con la L1. Por ejemplo, se ha demostrado que modulaciones del ritmo mu (un marcador cortical de actividad motora) durante el procesamiento de verbos de acción están presentes en L1 pero ausentes en L2 (Vukovic & Shtyrov, 2014) y lo mismo se aplica al reclutamiento de áreas premotoras y motoras primarias (De Grauwe et al., 2014). En sintonía con los estudios previos (García, 2015b; Paradis, 2009), esto sugiere que los mecanismos putativos que subyacen al procesamiento de la L1 no necesariamente participarían de tareas similares en L2 a lo largo de la población bilingüe.

Sin embargo, contrario a propuestas anteriores (Pavlenko, 2012), la comprensión de la L2 no opera de modo “descorporizado”. Nuestros resultados sugieren que el reclutamiento de los sistemas motores durante el procesamiento de la L2 depende de qué tan consolidada esté la lengua (Kogan et al., 2020). De hecho, la hiper-conectividad relacionada con el sistema motor durante el procesamiento del TA-L2 correlacionó positivamente con el nivel de competencia en L2 –patrón que se replicó en dos Rdl alternativas derivadas de tareas motoras (Yoris et al., 2017) y de semántica de acción (Vukovic & Shtyrov, 2014) y ausente en correlaciones de control con conectividad del TnA-L2. Estos resultados son compatibles con evidencia de que solo los bilingües con niveles altos de competencia muestran modulaciones mayores del N400 ante estímulos incongruentes en un paradigma de compatibilidad entre oraciones y gestos en L2 (Ibáñez et al., 2010). Además, durante tareas de asociación de imágenes y verbos (Bergen et al., 2010) y de traducción (Vukovic, 2013) se observó interferencia de efector específico durante el procesamiento de palabras de acción en individuos bilingües con alta competencia, pero no en sujetos con baja competencia. Como se demostró en otros estudios que comparan las dos lenguas de un individuo (Liu & Cao, 2016) o usuarios de L2 de alta y baja competencia (Oh, Graham, Ng, Yeh, Chan, & Edwards, 2019), nuestros resultados sugieren que el reclutamiento de sistemas corporizados durante el procesamiento ecológico de la L2 está relacionado con la consolidación de la lengua.

En el mismo sentido, la hiper-conectividad relacionada con el sistema motor durante el procesamiento del TA-L2 mostró una correlación negativa con la edad de apropiación de la L2 –un patrón específico, ya que no surgieron resultados significativos de las correlaciones de control. Estos resultados se alinean con estudios que demuestran que la edad de aprendizaje de la L2 modula múltiples aspectos del procesamiento de lenguaje, incluidos los efectos semánticos (Vilas et al., 2019). No obstante, como se observa en otras tareas verbales (De Carli, Dessi, Mariani, Girtler, Greco, Rodriguez,... & Morelli, 2015; Green, 2003) y no verbales (De Carli et al., 2015), puede que la edad de apropiación de la L2 no module los

efectos neurocognitivos de forma tan robusta como la competencia en L2. En este sentido, es importante destacar que las correlaciones de las dos Rdl basadas en hipótesis no replicaron los resultados de los análisis de competencia en L2. Tentativamente, esto podría sugerir que la activación sensoriomotora durante el procesamiento naturalista de la L2 depende de qué tan bien se aprendió una lengua más que de la etapa en que ocurrió este aprendizaje. Sin embargo, dicha conjetura debería contrastarse en futuras investigaciones.

En ambas tareas, los resultados de conectividad se capturaron dentro del rango de 0,5-11 Hz. Este rango incorpora las bandas de frecuencia implicadas en procesos semánticos generales, la semántica corporizada (incluidos el lenguaje de acción y la imaginación de acción) y la planificación y ejecución motora, según lo revelan medidas de actividad oscilatoria o conectividad funcional (Babiloni, Del Percio, Lopez, Di Gennaro, Quarato, Pavone,...Esposito, 2017; Hanouneh, Amin, Saad, & Malik, 2018), como así también marcadores de lenguaje de acción medido con wSMI (Melloni et al., 2015). Además, análisis de conectividad funcional (Elmer & Kühnis, 2016) y de actividad oscilatoria (Vilas et al., 2019; Vukovic & Shtyrov, 2014) dentro de este rango de frecuencia muestran efectos semánticos diferenciales en L1 y L2, e incluso patrones distintivos de corporización del lenguaje de acción en esas lenguas (Vukovic & Shtyrov, 2014). Por lo tanto, nuestros hallazgos sugieren que el mismo rango de frecuencias que indexa efectos relevantes en paradigmas a nivel de palabra u otros estímulos atomísticos también se involucra de manera distintiva durante la lectura ecológica.

Desde una perspectiva teórica más amplia, nuestros hallazgos enfatizan la importancia de considerar la experiencia individual como determinante de los mecanismos corporizados. Como se muestra en otras investigaciones, los fenómenos específicos de corporeidad (incluidos patrones de conectividad) dependen de las habilidades atléticas de los individuos (Tomasino, Maieron, Guatto, Fabbro, & Rumiati, 2013), su nivel de destreza (Locatelli, Gatti & Tettamanti, 2012) o dificultad (Birba et al., 2017) para ejecutar acciones motoras y su grado de compromiso corporal durante el apropiación de una L2 en una sala de clases (Macedonia & Klimesch, 2014). En línea con estos antecedentes, nuestra investigación indica que mientras que la exposición temprana a una lengua y la competencia lograda en ella también representan variables a nivel de sujeto que modulan efectos corporizados. En conjunto, esta evidencia enfatiza la invalidez de las posiciones teóricas que encasillan el procesamiento del lenguaje como una habilidad totalmente corporizada o totalmente descorporizada (Pavlenko, 2012; Pulvermüller, 2013b). Estos datos apoyan, en cambio, conceptualizaciones con una mayor variedad de matices de acuerdo a los cuales la función de los efectos de consolidación depende de las experiencias lingüísticas y motoras de cada persona (Gramann, 2013).

Cabe señalar que nuestra evaluación del nivel de la L2 en los participantes está parcialmente sesgada por el uso de autoinformes. A pesar de su uso extendido en investigaciones sobre el bilingüismo (Hulstijn, 2012), las medidas subjetivas de la competencia en L2 son susceptibles al sesgo de deseabilidad social y autoimagen. Sin embargo, estas medidas predicen de manera confiable la habilidad en L2 (Marian, Blumenfeld, & Kaushanskaya, 2007), predicen resultados de tiempo de reacción en tareas en L2 (Langdon, Wiig, & Nielsen, 2005) e incluso replican puntajes en pruebas de denominación multilingües (Gollan, Weissberger, Runnqvist, Montoya, & Cera, 2012). No obstante, como lo demuestran (Tomoschuk, Ferreira, & Gollan, 2018), las autocalificaciones de competencia en L2 y el desempeño objetivo no siempre coinciden, particularmente cuando los participantes demuestran ser heterogéneos en cuanto a sus combinaciones lingüísticas, perfiles culturales y patrones de dominancia de una lengua. Aunque nuestro estudio elude parcialmente estos problemas al presentar una muestra compuesta exclusivamente por individuos bilingües español-inglés del mismo contexto sociogeográfico, esto no permite excluir totalmente los sesgos e imprecisiones mencionadas anteriormente. Además, aun cuando el cuestionario específico que utilizamos ha sido empleado con éxito tanto para separar como para asociar muestras bilingües en base a factores de experiencia con el lenguaje (Santilli, Vilas, Mikulan, Martorell Caro, Muñoz, Sedeño,...García, 2018; Vilas et al., 2019), no contiene elementos que permitan abordar separadamente cada macro-habilidad (hablar, escuchar, leer, escribir). Afortunadamente, estas desventajas podrían ser superadas en futuras réplicas del estudio incorporando herramientas de autoinforme más detalladas, como por ejemplo el *Language History Questionnaire* (Li, Zhang, Yu, & Zhao, 2019), idealmente en conjunto con mediciones objetivas de la competencia (Hulstijn, 2012).

Finalmente, más allá de todas estas cautelas, no se puede dejar de hacer hincapié en la importancia de detectar efectos corporizados en una tarea de lectura libre de un texto. Hasta ahora, toda la investigación sobre corporeidad neurofisiológica en individuos bilingües ha dependido de oraciones o palabras aisladas aleatoriamente secuenciadas (Bergen et al., 2010; Buccino et al., 2017; De Grauwe et al., 2014; Ibáñez et al., 2010; Vukovic, 2013; Vukovic & Shtyrov, 2014). Aunque entregan una gran variedad de información, no se puede asumir a priori que estos hallazgos se mantienen durante la comprensión de textos coherentes y cohesionados, ricos en contexto, dado que la información contextual modula el procesamiento de palabras (García & Ibáñez, 2016; Van Dam, Rueschemeyer, Lindemann, & Bekkering, 2010) y afecta de diversas maneras el

desempeño lingüístico al favorecer la mantención de información pertinente (Ledoux, Camblin, Swaab, & Gordon, 2006). En este estudio, la presencia de efectos corporizados que se distribuyen sobre la lectura de las narraciones completas, y no simplemente se adhieren a elementos individuales dentro de ellas (p. ej., Desai, Choi, Lai, & Henderson, 2016), sugiere que las simulaciones de acciones inducidas por el lenguaje son suficientemente robustas para expresar la riqueza textual, con variadas ramificaciones, que caracterizan al discurso naturalista. De manera más particular, el hecho de que aparezcan en ambientes de lectura libre indica que ese fenómeno no se limita a las condiciones de procesamiento artificial del ambiente de laboratorio, lo que demuestra la potencial relevancia traslacional del enfoque de la corporeidad en general (García et al., 2018; Trevisan et al., 2017).

Limitaciones y proyecciones de la investigación

Se pueden identificar varias limitaciones en este estudio. Primero, nuestro tamaño muestral fue modesto, lo que invita a replicar el estudio con grupos más grandes. Segundo, los textos que se usaron en ambas tareas eran relativamente breves y fáciles. Por lo tanto, sería interesante realizar futuras investigaciones incorporando textos más largos y variados. Tercero, dadas las diferencias idiosincráticas entre el español y el inglés (y por lo tanto, entre los textos utilizados en cada lengua), no pudimos comparar directamente la conectividad funcional de L1 y L2. Nuevas aplicaciones del protocolo que se detalla en Trevisan y García (2019) deberían orientarse a la construcción de pares de textos que sean comparables entre las lenguas y dentro de ellas y así permitir comparaciones interlingüísticas directas. Por último, dado que la métrica wSMI no permite analizar rangos de frecuencia aislados, futuros estudios podrían replicar este estudio con métricas de conectividad diferentes.

CONCLUSIONES

Nuestros resultados indican que los sistemas semánticos corporizados cumplen una función crítica durante la lectura de narraciones naturalistas en L1, y que el reclutamiento de esos sistemas en L2 se asocia con el grado de consolidación de la lengua (qué tan bien y qué tan temprano se incorporó tal idioma). Estos hallazgos abonan la validez ecológica de los efectos de resonancia motora, ofreciendo nuevas perspectivas sobre su relación con variables experienciales. Otros esfuerzos en esta línea podrían fortalecer la integración empírica de propuestas corporizadas y situadas en el estudio neurocognitivo del lenguaje.

Declaración de autoría y ausencia de conflictos de interés.

Ningún autor declara conflictos de interés.

Financiamiento

Agustín Ibáñez cuenta con apoyo del Latin American Brain Health Institute (BL-SRGP2020-02), ReDLat (National Institutes of Health y Fogarty International Center, National Institutes of Aging (R01 AG057234, R01 AG075775, AG021051, R01 AG083799, CARDS-NIH 75N95022C00031), Alzheimer's Association (SG-20-725707), Rainwater Charitable Foundation, The Bluefield project to cure frontotemporal dementia y el Global Brain Health Institute), ANID/FONDECYT Regular (1210195, 1210176 y 1220995) y ANID/FONDAP/15150012. Adolfo García cuenta con apoyo del National Institute on Aging de los National Institutes of Health (R01AG075775, R01AG083799, 2P01AG019724); ANID (FONDECYT Regular 1210176, 1210195); GBHI, Alzheimer's Association y Alzheimer's Society (Alzheimer's Association GBHI ALZ UK-22-865742); DICYT-USACH (032351GDAS); Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (01-PICTE-2022-05-00103); y el Multi-partner Consortium to Expand Dementia Research in Latin America (ReDLat), que cuenta con el apoyo del Centro Internacional Fogarty y los National Institutes of Health, el National Institute on Aging (R01AG057234, R01AG075775, R01AG21051 y CARDS - NIH), la Alzheimer's Association (SG-20-725707), el Consorcio Tau de Rainwater Charitable Foundation, el Bluefield Project to Cure Frontotemporal Dementia y el Global Brain Health Institute. El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva de los autores y no representa la opinión oficial de estas instituciones.

REFERENCIAS

- Abutalebi, J. (2008). Neural aspects of second language representation and language control. *Acta Psychol (Amst)*, 128(3), 466-478.
- Aravena, P., Hurtado, E., Riveros, R., Cardona, J. F., Manes, F., & Ibáñez, A. (2010). Applauding with closed hands: neural signature of action-sentence compatibility effects. *PLoS one*, 5(7), e11751.
- Aziz-Zadeh, L., Wilson, S. M., Rizzolatti, G., & Iacoboni, M. (2006). Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions. *Current biology*, 16(18), 1818-1823.
- Babiloni, C., Del Percio, C., Lopez, S., Di Gennaro, G., Quarato, P. P., Pavone, L., . . . Esposito, V. (2017). Frontal functional connectivity of electrocorticographic delta and theta rhythms during action execution versus action observation in humans. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 11, 20.
- Barrós-Loscertales, A., González, J., Pulvermüller, F., Ventura-Campos, N., Bustamante, J. C., Costumero, V., . . . Ávila, C. (2012). Reading salt activates gustatory brain regions: fMRI evidence for semantic grounding in a novel sensory modality. *Cerebral Cortex*, 22(11), 2554-2563.
- Barsalou, L. W. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in cognitive science*, 2(4), 716-724.
- Bergen, B., Lau, T. T., Narayan, S., Stojanovic, D., & Wheeler, K. (2010). Body part representations in verbal semantics. *Mem Cognit*, 38(7), 969-981.
- Birba, A., García-Cordero, I., Kozono, G., Legaz, A., Ibáñez, A., Sedeño, L., & García, A. M. (2017). Losing ground: Frontostriatal atrophy disrupts language embodiment in Parkinson's and Huntington's disease. *Neurosci Biobehav Rev*, 80, 673-687.
- Buccino, G., Marino, B. F., Bulgarelli, C., & Mezzadri, M. (2017). Fluent speakers of a second language process graspable nouns expressed in L2 like in their native language. *Frontiers in Psychology*, 8, 1306.
- Canseco-Gonzalez, E., Brehm, L., Brick, C., Brown-Schmidt, S., Fischer, K., & Wagner, K. (2010). Carpet or Cárcel: The effect of age of acquisition and language mode on bilingual lexical access. *Language and Cognitive Processes*, 25(5), 669-705.
- Courellis, H. S., Iversen, J. R., Poizner, H., & Cauwenberghs, G. (2016). *EEG channel interpolation using ellipsoid geodesic length*. Paper presented at the 2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS).
- De Carli, F., Dessi, B., Mariani, M., Girtler, N., Greco, A., Rodriguez, G., ... & Morelli, M. (2015). Language use affects proficiency in Italian-Spanish bilinguals irrespective of age of second language acquisition. *Bilingualism: Language and Cognition*, 18(2), 324-339.
- De Grauwe, S., Willems, R. M., Rueschemeyer, S. A., Lemhofer, K., & Schriefers, H. (2014). Embodied language in first- and second-language speakers: neural correlates of processing motor verbs. *Neuropsychologia*, 56, 334-349.
- Delorme, A., & Makeig, S. J. J. o. n. m. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Method*, 134(1), 9-21.
- Desai, R. H., Choi, W., Lai, V. T., & Henderson, J. M. (2016). Toward semantics in the wild: activation to manipulable nouns in naturalistic reading. *Journal of Neuroscience*, 36(14), 4050-4055.
- Dijkstra, T. O. N., Wahl, A., Buytenhuijs, F., Van Halem, N., Al-Jibouri, Z., De Korte, M., & Rekké, S. (2018). Multilink: a computational model for bilingual word recognition and word translation. *Bilingualism: Language and Cognition*, 1-23.
- Elmer, S., & Kühnis, J. J. F. i. h. n. (2016). Functional connectivity in the left dorsal stream facilitates simultaneous language translation: an EEG study. *Front. Hum. Neurosci*, 10, 60.
- Ewen, J. B., Lakshmanan, B. M., Pillai, A. S., McAuliffe, D., Nettles, C., Hallett, M., . . . Mostofsky, S. H. J. F. i. h. n. (2016). Decreased modulation of EEG oscillations in high-functioning autism during a motor control task. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 198.
- García, A. M. (2015a). Psycholinguistic explorations of lexical translation equivalents: Thirty years of research and their implications for cognitive translatology. *Translation Spaces*, 4(1), 9-28.
- García, A. M. (2015b). Translating with an injured brain: Neurolinguistic aspects of translation as revealed by bilinguals with cerebral lesions. *Meta: Translators' Journal*, 60(1), 112-134.
- García, A. M., Bocanegra, Y., Herrera, E., Moreno, L., Carmona, J., Baena, A., . . . Ibáñez, A. (2018). Parkinson's disease compromises the appraisal of action meanings evoked by naturalistic texts. *Cortex*, 100, 111-126.
- García, A. M., Hesse, E., Birba, A., Adolphi, F., Mikulan, E., Caro, M. M., . . . Ibáñez, A. (2020). Time to Face Language: Embodied Mechanisms Underpin the Inception of Face-Related Meanings in the Human Brain. *Cerebral Cortex*.
- García, A. M., & Ibáñez, A. (2016). Hands typing what hands do: Action-semantic integration dynamics throughout written verb production. *Cognition*, 149, 56-66.
- García, A. M., Moguilner, S., Torquati, K., García-Marco, E., Herrera, E., Muñoz, E., . . . Ibáñez, A. (2019). How meaning unfolds in neural time: Embodied reactivations can precede multimodal semantic effects during language processing. *Neuroimage*, 197, 439-449.

- Gollan, T. H., Weissberger, G. H., Runnqvist, E., Montoya, R. I., & Cera, C. M. (2012). Self-ratings of Spoken Language Dominance: A Multi-Lingual Naming Test (MINT) and Preliminary Norms for Young and Aging Spanish-English Bilinguals. *Biling (Camb Engl)*, 15(3), 594-615.
- González, J., Barros-Loscertales, A., Pulvermüller, F., Meseguer, V., Sanjuán, A., Belloch, V., & Ávila, C. (2006). Reading cinnamon activates olfactory brain regions. *NeuroImage*, 32(2), 906-912.
- Gramann, K. (2013). Embodiment of Spatial Reference Frames and Individual Differences in Reference Frame Proclivity. *Spatial Cognition & Computation*, 13(1), 1-25.
- Green, D. W. (2003). The neural basis of the lexicon and the grammar in L2 acquisition. *The interface between syntax and the lexicon in second language acquisition*, 1, 197-208.
- Hanouneh, S., Amin, H. U., Saad, N. M., & Malik, A. S. J. I. A. (2018). EEG power and functional connectivity correlates with semantic long-term memory retrieval. *IEEE Access* 6, 8695-8703.
- Hulstijn, J. H. (2012). The construct of language proficiency in the study of bilingualism from a cognitive perspective. *Bilingualism: Language Cognition*, 15(2), 422-433.
- Ibáñez, A., Cardona, J. F., Dos Santos, Y. V., Blenkmann, A., Aravena, P., Roca, M., . . . Gómez-Arévalo, G. (2013). Motor-language coupling: direct evidence from early Parkinson's disease and intracranial cortical recordings. *Cortex*, 49(4), 968-984.
- Ibáñez, A., Manes, F., Escobar, J., Trujillo, N., Andreucci, P., & Hurtado, E. (2010). Gesture influences the processing of figurative language in non-native speakers: ERP evidence. *J Neuroscience Letters*, 471(1), 48-52.
- Imperator, L. S., Betta, M., Cecchetti, L., Canales-Johnson, A., Ricciardi, E., Siclari, F., . . . Bernardi, G. J. S. R. (2019). EEG functional connectivity metrics wPLI and wSMI account for distinct types of brain functional interactions. *Scientific reports*, 9(1), 8894.
- Kogan, B., Muñoz, E., Ibáñez, A., & García, A. M. (2020). Too late to be grounded? Motor resonance for action words acquired after middle childhood. *Brain and Cognition*, 138, 105509.
- Kroll, J. F., van Hell, J. G., Tokowicz, N., & Green, D. W. (2010). The Revised Hierarchical Model: A critical review and assessment. *Bilingualism: Language and Cognition*, 13, 373-381.
- Langdon, H. W., Wiig, E. H., & Nielsen, N. P. (2005). Dual-Dimension Naming Speed and Language-Dominance Ratings by Bilingual Hispanic Adults. *Bilingual Research Journal*, 29(2), 319-336.
- Ledoux, K., Camblin, C. C., Swaab, T. Y., & Gordon, P. C. (2006). Reading words in discourse: The modulation of lexical priming effects by message-level context. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 5(3), 107-127.
- Li, P., Zhang, F., Yu, A., & Zhao, X. (2019). Language History Questionnaire (LHQ3): An enhanced tool for assessing multilingual experience. *Bilingualism: Language and Cognition*, 1-7.
- Liu, H., & Cao, F. (2016). L1 and L2 processing in the bilingual brain: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Brain Lang*, 159, 60-73. doi: 10.1016/j.bandl.2016.05.013
- Locatelli, M., Gatti, R., & Tettamanti, M. (2012). Training of manual actions improves language understanding of semantically related action sentences. *Front Psychol*, 3, 547.
- López-Larraz, E., Montesano, L., Gil-Agudo, Á., Minguez, J., & Oliviero, A. J. P. o. (2015). Evolution of EEG motor rhythms after spinal cord injury: a longitudinal study. *PLoS one* 10(7), e0131759.
- Macedonia, M., & Klimesch, W. (2014). Long-Term Effects of Gestures on Memory for Foreign Language Words Trained in the Classroom. *Mind, Brain, and Education*, 8(2), 74-88.
- Marian, V., Blumenfeld, H. K., & Kaushanskaya, M. (2007). The Language Experience and Proficiency Questionnaire (LEAP-Q): Assessing language profiles in bilinguals and multilinguals. *J of Speech, Language, hearing Research*.
- Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG-and MEG-data. *Journal of neuroscience methods*, 164(1), 177-190.
- Melloni, M., Sedeño, L., Hesse, E., García-Cordero, I., Mikulan, E., Plastino, A., . . . Lopera, F. (2015). Cortical dynamics and subcortical signatures of motor-language coupling in Parkinson's disease. *Scientific Reports*, 5, 11899.
- Mišić, B., & Sporns, O. J. C. o. i. n. (2016). From regions to connections and networks: new bridges between brain and behavior. *Current opinion in neurobiology*, 40, 1-7.
- Moreno, I., De Vega, M., León, I., Bastiaansen, M., Lewis, A. G., & Magyari, L. (2015). Brain dynamics in the comprehension of action-related language. A time-frequency analysis of mu rhythms. *NeuroImage*, 109, 50-62.
- Oh, T. M., Graham, S., Ng, P., Yeh, B. I., Chan, B. P., & Edwards, A. M. J. F. i. C. (2019). Age and proficiency in the bilingual brain revisited: Activation patterns across different L2-learner types. *Frontiers in Communication* 4, 39.
- Paradis, M. (2009). *Declarative and Procedural Determinants of Second Languages*. Amsterdam: John Benjamins.
- Pavlenko, A. (2012). Affective processing in bilingual speakers: disembodied cognition? *Int J Psychol*, 47(6), 405-428.
- Pfurtscheller, G., Brunner, C., Schlögl, A., & Da Silva, F. L. J. N. (2006). Mu rhythm (de) synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. *NeuroImage*, 31(1), 153-159.
- Pulvermuller, F. (2018). Neural reuse of action perception

- circuits for language, concepts and communication. *Prog Neurobiol*, 160, 1-44.
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(7), 576-582.
- Pulvermüller, F. (2013a). How neurons make meaning: brain mechanisms for embodied and abstract-symbolic semantics. *Trends in cognitive sciences*, 17(9), 458-470.
- Pulvermüller, F. (2013b). Semantic embodiment, disembodiment or misembodiment? In search of meaning in modules and neuron circuits. *Brain Lang*, 127(1), 86-103.
- Pulvermüller, F., & Fadiga, L. (2010). Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nature Reviews: Neuroscience*, 11(5), 351-360.
- Pulvermüller, F., Härle, M., & Hummel, F. (2001). Walking or talking?: Behavioral and neurophysiological correlates of action verb processing. *Brain Language and Cognitive Processes*, 78(2), 143-168.
- Santilli, M., Vilas, M. G., Mikulan, E., Martorell Caro, M., Muñoz, E., Sedeño, L., . . . García, A. M. (2018). Bilingual memory, to the extreme: Lexical processing in simultaneous interpreters. *Bilingualism: Language and Cognition*, 1-18.
- Tomasino, B., Maieron, M., Guatto, E., Fabbro, F., & Rumiati, R. I. (2013). How are the motor system activity and functional connectivity between the cognitive and sensorimotor systems modulated by athletic expertise? *Brain Res*, 1540, 21-41.
- Tomoschuk, B., Ferreira, V. S., & Gollan, T. H. (2018). When a seven is not a seven: Self-ratings of bilingual language proficiency differ between and within language populations. *Bilingualism: Language and Cognition*, 22(3), 516-536.
- Trevisan, P., & García, A. (2019). Systemic functional grammar as a tool for experimental stimulus design: new applicable horizons in psycholinguistics and neurolinguistics. *Language Sciences*, 75, 35-46.
- Trevisan, P., Sedeño, L., Birba, A., Ibáñez, A., & García, A. M. (2017). A moving story: Whole-body motor training selectively improves the appraisal of action meanings in naturalistic narratives. *Scientific Reports*, 7(1), 12538.
- Van Dam, W. O., Rueschemeyer, S.-A., Lindemann, O., & Bekkering, H. (2010). Context effects in embodied lexical-semantic processing. *Frontiers in Psychology*, 1, 150.
- Vilas, M. G., Santilli, M., Mikulan, E., Adolphi, F., Caro, M. M., Manes, F., . . . García, A. M. (2019). Reading Shakespearean tropes in a foreign tongue: Age of L2 acquisition modulates neural responses to functional shifts. *Neuropsychologia*, 124, 79-86.
- Vukovic, N. (2013). *When words get physical: evidence for proficiency-modulated somatotopic motor interference during second language comprehension*. Paper presented at the Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society <https://mindmodeling.org/cogsci2013/papers/0657/index.html>
- Vukovic, N., & Shtyrov, Y. (2014). Cortical motor systems are involved in second-language comprehension: Evidence from rapid mu-rhythm desynchronisation. *NeuroImage*, 102, 695-703.
- Yoris, A., García, A. M., Traiber, L., Santamaría-García, H., Martorell, M., Alifano, F., . . . Manes, F. (2017). The inner world of overactive monitoring: neural markers of interoception in obsessive-compulsive disorder. *Psychological medicine*, 47(11), 1957-1970.

APÉNDICES

A1. Estimación de potencia

Para determinar el tamaño de la muestra requerida para nuestro experimento, realizamos un análisis de estimación en el *software* R con la librería *pwr*. Dado nuestro diseño estadístico, basado en *t*-tests pareados, consideramos tres parámetros. En primer lugar, establecimos el nivel alfa de $p = 0,05$. En segundo lugar, consideramos un tamaño de efecto de 0,80 (basado en la *d* de Cohen). Finalmente, establecimos una potencia de 0,8. Este análisis mostró que un tamaño de muestra de 14 es suficiente para alcanzar los efectos estimados. El tamaño final de la muestra de 26 alcanza una potencia de 0,97.

A2. Textos usados en el experimento con la L1

Tarea en L1: historias en español

Las dos historias en L1, que se reproducen en el material suplementario (sección S2), fueron extraídas de (García et al., 2018). El TA-L1 narra una tarde en la vida de Juancito y se centra en sus acciones corporales mientras juega con sus padres en una plazoleta. Sus actividades incluyen correr sobre el césped, jugar fútbol e interactuar con sus padres y con diversos objetos. También se destacan las acciones corporales de otros personajes, como un payaso que baila y niños que lo aplauden. Por ejemplo, en una de las oraciones se puede leer: “*Juancito corrió velozmente hacia el lugar donde el payaso saltaba y bailaba*”. Además, el texto ofrece ricos detalles sobre la plazoleta, los objetos que hay allí y sobre cómo se ejecutan las acciones corporales. Un aspecto clave sobre este texto es que 24 de sus 32 verbos denotan acciones motoras explícitas. Los otros ocho verbos (que no se relacionan con acciones) representan estados mentales, relacionales o emocionales (por ejemplo, el niño se queda dormido) y sucesos impersonales (por ejemplo, el sol se oculta).

El TN-L1 describe los sentimientos, pensamientos y percepciones de Alberto, un joven que se divierte en el bar de una discoteca. Se pone énfasis en sus procesos afectivos, mentales y sensoriales mientras conversa con su amigo, Mario, y con su novia, Elsa. En particular, varias oraciones se centran en sus respuestas emocionales hacia los sucesos que los rodean (por ejemplo, “*Alberto escuchó su canción favorita y se entusiasmó mucho*”). Además, el texto entrega abundante información circunstancial sobre los lugares, los objetos y las características temporales de los estados internos de Alberto. Esencialmente, 31 de los 32 verbos de la historia representaban procesos no motores. El otro verbo denotaba movimiento bípedo (específicamente, cruzar la calle).

Es importante mencionar que ambas narraciones eran comparables en cuanto a múltiples variables sintácticas, léxicas, semánticas, pragmáticas y textuales, tal como se describe en (García et al., 2018; Trevisan et al., 2017). La Tabla 1 presenta los detalles estadísticos.

Texto de acción: sábado por la tarde. ¡El momento favorito de Juancito en toda la semana! Tomó a sus padres de la mano y juntos corrieron hasta la plazoleta. Al lado de las hamacas, un grupo de niños aplaudía las ocurrencias de un colorido payaso. Juancito corrió velozmente hacia el lugar donde el payaso saltaba y bailaba sin cesar. Al terminar el espectáculo, el payaso escribió su nombre en el pavimento. ¡Qué sorpresa! ¡También se llamaba Juan! Luego, entre toda la muchedumbre, Juancito caminó hacia el banco donde se sentaron sus padres. Abrazó a su padre con mucha fuerza y le jaló la camisa para que se levantara. ¡Era hora de jugar al fútbol! Juancito tomó la pelota y la puso en el césped. Su padre se movía de izquierda a derecha, en posición de arquero. Juancito pateó y... ¡gol! De repente salió el sol. Juancito se sacó el suéter y lo apoyó en el banco. Luego, su madre se acercó y le entregó un chocolate. Se lo comió de un bocado. Como siempre, al terminarlo, arrojó el envoltorio en el basurero. Había sido una intensa jornada. Se sentía muy cansado. Ya en la falda de su madre, mientras se limpiaba los restos de golosina de la boca, se quedó dormido.

Texto de no acción: La noche recién comenzaba. Alberto estaba eufórico. ¡Gracias a Dios por los fines de semana! A unas pocas cuadras, la discoteca. Sus amigos lo aguardaban allí y juntos compartirían un buen momento. Al cruzar la calle, Alberto leyó el nombre de la discoteca en un cartel: “Ni jefe ni reloj”. Siempre lo ponía de buen humor. Una vez adentro, lo encandilaron las luces. Sintió calor y se encontró muy transpirado. Al lado del bar, un grupo de mujeres se entretenía con las ocurrencias de su amigo, Mario. Las muchachas se reían sin pausa junto a ese joven que bromeaba e inventaba personajes. Luego, entre toda la gente, Alberto reconoció a su novia, Elsa. Ella lo esperaba en una silla. Desde atrás, Alberto le preguntó si le gustaba la música. “¡Por supuesto!”, respondió Elsa. Aunque ella tenía sueño, Alberto le insistió para que lo acompañara a la pista. ¡Era hora de disfrutar la música! Como siempre, al decidirse, Elsa se olvidó la cartera en la silla. Alberto escuchó su canción favorita y se entusiasmó mucho. Elsa, fiel compañera, lo ayudó a recordar la letra. ¡Qué buen equipo! De regreso en su casa, mientras sentía el sudor y el cansancio en el cuerpo, se quedó dormido.

A3. Textos usados en el experimento con la L2

Tarea en L2: historias en inglés

Las historias en L2 fueron extraídas de (Trevisan et al., 2017). El TA-L2 narra el día en que Donald perdió su monedero y se concentra en sus acciones corporales mientras lo busca. Sus actividades incluyen correr hacia la casa de su amigo e interactuar con él y con diversos objetos. La historia describe también las acciones corporales de otros personajes, como una recepcionista que escribe un aviso para el periódico. Por ejemplo, en una de las oraciones se lee: “*He gave him the money and added some more coins*” (“Le dio el dinero y le agregó algunas monedas”). Además, el texto especificaba aspectos sobre las ubicaciones y los objetos involucrados en la historia, junto con detalles sobre la manera en que se ejecutaban las acciones

físicas. Es importante especificar que 25 de los 32 verbos de este TA se relacionaban con acciones motoras. Los otros siete verbos se referían a sucesos que no necesariamente implicaban movimientos corporales, por ejemplo, pensar o perder un objeto.

El TN-L2 narra el día en que Steve descubrió el sabor del chocolate y se centra en sus procesos mentales, sensoriales y afectivos. La narración se mueve principalmente alrededor de sus respuestas emocionales a los sucesos en desarrollo (por ejemplo, "How much he loved them!"; "¡Cómo le encantó!). Además, el texto ofrece abundante información circunstancial para describir el pueblo donde vive Steve, los objetos utilizados y las características temporales de sus estados internos. Es importante destacar que la mayoría de los verbos de esta historia (23 de 32) denotan procesos no motores. Los nueve verbos restantes aluden a sucesos que podrían relacionarse con la necesidad de movimiento, por ejemplo, desplazarse, enseñar e iniciar un viaje. Además, el número de verbos de acción en el TA-L2 y verbos sin acción en el TN-L2 no diferían significativamente de sus contrapartes en L1 (TA-L1 verbos de acción = 24, TA-L2 verbos de acción = 25, $\chi^2_{(1)} = 0,02, p = .88$; TnA-L1 verbos sin acción = 31, TnA-L2 verbos sin acción = 23, $\chi^2_{(1)} = 1,18, p = 0.27$).

Esencialmente, las dos narraciones en L2 eran comparables en múltiples variables sintácticas, léxicas, semánticas, pragmáticas y textuales, como se describe en (García et al., 2018; Trevisan et al., 2017). La Tabla 2 presenta los detalles estadísticos.

Texto de acción: Donald looked into his bag for his money, but it was not there. Had someone taken it from him? He moved back and forth thinking what to do. He ran to his friend Tommy's house to take the money he had left there. Tommy was working when Donald rang the bell. He gave him the money and added some more coins. Donald counted the lot in great exultation. Soon after, he went to the newspaper office. He put his money and his coins on the table and asked the receptionist to put an ad in the newspaper the next day. "I have lost my moneybag. If you find it, please call me!", the ad said. When Donald got up the next day, a man came to his house. He had found the moneybag! Donald thanked the kind man and jumped with exultation. To show his appreciation, he took the man to a bar and they had breakfast together. What a great time it was! Donald had found his moneybag!

Texto de no acción: Poppy lived in a very nice village. The inhabitants there were really nice and supported each other. He was extremely happy and had many friends. However, the inhabitants were very frightened by chocolate. "If you eat it, you'll be very sick", a girl said. He thought about this in great curiosity. Was that really true? To find out, he started a journey towards a nearby village, and asked the people there. They found his doubts quite funny and offered him to try some different flavours. How much he loved them! It seemed now difficult to believe the things his friends had told him. During his days there, he ate a lot of chocolate but he never felt sick. He knew the truth now! His friends had believed in a lie when that stranger had come to town. When he went back to his village, he brought a lot of chocolate. He was very proud of himself now. He spent a lot of days teaching people what to believe in.

A4. Distribución topográfica de Rdl basadas en datos y en hipótesis

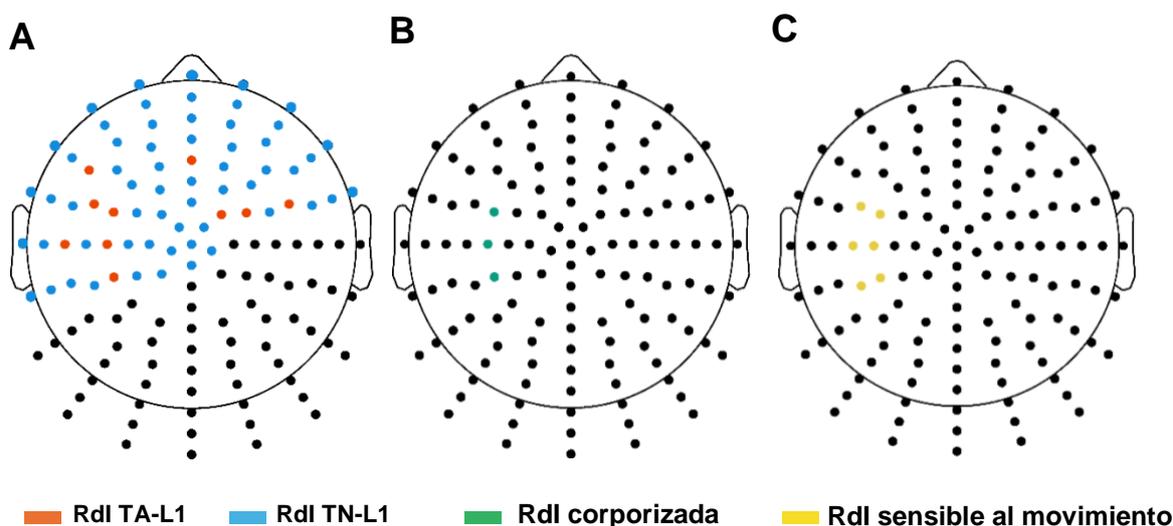


Figura A1. Distribución topográfica de las Rdl basadas en datos y en hipótesis. **A.** Rdl basadas en datos. Los electrodos rojos integran las Rdl basadas en datos correspondientes a una conectividad funcional aumentada para el TA en relación con el TA en L1. Los electrodos azules integran las Rdl basadas en datos correspondientes a la conectividad funcional aumentada para el TN en relación con el TA en L1. **B.** Rdl corporizada. Los electrodos verdes indican las Rdl corporizadas, en base a los resultados de Vukovic and Shtyrov (2014). **C.** Rdl sensible al movimiento. Los electrodos amarillos indican las Rdl sensibles al movimiento, en base a los resultados de Yoris et al. (2017). TA: texto de acción; TN: texto neutro; L1: primera lengua; L2: segunda lengua; Rdl: región de interés.

A5. Método wSMI

La métrica wSMI es un método de conectividad funcional que capta información no lineal compartida entre electrodos. Este método es sensible a modulaciones que escapan a las posibilidades de métodos estrictamente lineales, como las correlaciones o las métricas de coherencia. Además, se demostró que capta diferencias en operaciones cognitivas de alto nivel (Melloni et al., 2015), incluidos procesos semánticos generales (Hesse et al., 2019) y corporizados (Melloni et al., 2015), como así también diferencias entre estados cognitivos contrastivos durante periodos variables (Imperator et al., 2019). Siguiendo procedimientos estándar (King et al., 2013), las señales fueron transformadas en símbolos. Al definir los valores de k (el número de muestras que representan un símbolo, fijado en 3) y τ (la separación temporal entre ellos, fijada en 32 ms), ajustamos la sensibilidad de wSMI a un rango de frecuencia de 0,5-11 Hz, que es apto para capturar modulaciones relacionadas con procesos de motores (Pfurtscheller & Neuper, 1997) y de semántica de la acción (Vukovic & Shtyrov, 2014), y que también discrimina entre individuos bilingües de alta y baja competencia durante el procesamiento de discurso naturalista en L1 y L2 (Reiterer et al., 2005). Luego se calculó la probabilidad conjunta entre las señales para cada par de canales, para cada segmento de datos, y se estimó el valor de wSMI usando una matriz de probabilidad conjunta multiplicada por pesos binarios. Estos pesos fueron definidos como cero para pares de (a) símbolos idénticos y (b) símbolos opuestos que podrían haberse originado en una única fuente común.

A6. Correlaciones control entre conectividad del TA en L2 y competencia en L2

La competencia en L2 no reveló interacciones significativas con la hiperconectividad de la Rdl basada en el TA ($r = 0,11$; $p = 0,56$) o de la Rdl basada en el TnA ($r = 0,12$; $p = 0,53$) durante el procesamiento de la L1 (TA vs. TnA). Lo mismo ocurrió con las dos Rdl basadas en hipótesis: La competencia en L2 no mostró una correlación significativa con la conectividad de la Rdl corporizada ($r = -0,12$; $p = 0,55$) o con la Rdl sensible al movimiento ($r = -0,13$; $p = 0,52$) durante el procesamiento de la L1 (TA vs. TnA).

A7. Correlaciones control entre conectividad de TA en L2 y edad de apropiación de la L2

La edad de apropiación de la L2 no mostró una correlación significativa con la hiperconectividad de la Rdl basada en el TA ($r = -0,27$; $p = 0,186$) ni en la Rdl basada en el TN ($r = -0,21$; $p = 0,30$) durante el procesamiento en L1 (TA vs. TnA). De manera similar, no hubo una asociación significativa entre la edad de apropiación de la L2 y la conectividad de la Rdl corporizada ($r = -0,04$; $p = 0,83$) o de la Rdl motora sensible al movimiento Rdl ($r = -0,004$; $p = 0,85$) durante el procesamiento en L1 (TA vs. TnA).

Además, como se describe en el manuscrito principal, ejecutamos nuevamente la correlación entre la edad de apropiación de la L2 y la conectividad de la Rdl del TA basada en datos después de retirar a un sujeto cuya edad de apropiación de la L2 (específicamente, 18) se consideró un valor atípico. Esta correlación se mantuvo negativa y significativa ($r = -0,49$; $p = 0,016$). Además, todas las otras correlaciones se mantuvieron poco significativas. Específicamente, la edad de apropiación de la L2 no mostró una correlación significativa con ningún tipo de hiperconectividad de la Rdl basada en el TA ($r = -0,05$; $p = 0,80$) ni con hiperconectividad de la Rdl basada en el TN ($r = -0,12$, $p = 0,56$) durante el procesamiento en L1 (TA vs. TnA). Lo mismo se aplica a las Rdl basadas en hipótesis. La edad de apropiación de la L2 no mostró una correlación significativa con la conectividad de la Rdl corporizada ($r = 0,05$; $p = 0,81$) ni con la conectividad de la Rdl motora sensible al movimiento ($r = 0,06$; $p = 0,77$) durante el procesamiento de la L1 (TA vs. TnA).

REFERENCIAS SUPLEMENTARIAS

- Davis, C. J. (2005). N-Watch: A program for deriving neighborhood size and other psycholinguistic statistics. *Behavior research methods*, 37(1), 65-70.
- Hesse, E., Mikulan, E., Sitt, J.D., del Carmen García, M., Silva, W., Ciralo, C., Vaucheret, E., Raimondo, F., Baglivo, F., Adolphi, F., 2019. Consistent gradient of performance and decoding of stimulus type and valence from local and network activity. *Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 27, 619-629.
- Imperatori, L.S., Betta, M., Cecchetti, L., Canales-Johnson, A., RicciaRdl, E., Siclari, F., Pietrini, P., Chennu, S., BernaRdl, G.J., 2019. EEG functional connectivity metrics wPLI and wSMI account for distinct types of brain functional interactions. *Scientific Reports* 9, 8894.
- King, J.-R., Sitt, J.D., Faugeras, F., Rohaut, B., El Karoui, I., Cohen, L., Naccache, L., Dehaene, S.J.C.B., 2013. Information sharing in the brain indexes consciousness in noncommunicative patients. *Current Biology* 23, 1914-1919.
- Melloni, M., Sedeño, L., Hesse, E., García-Cordero, I., Mikulan, E., Plastino, A., . . . Lopera, F. (2015). Cortical dynamics and subcortical signatures of motor-language coupling in Parkinson's disease. *Scientific Reports*, 5, 11899.
- Pfurtscheller, G., Neuper, C., 1997. Motor imagery activates primary sensorimotor area in humans. *Neuroscience Letters* 239, 65-68.
- Reiterer, S., Hemmelmann, C., Rappelsberger, P., Berger, M. (2005). Characteristic functional networks in high-versus low-proficiency second language speakers detected also during native language processing: an explorative EEG coherence study in 6 frequency bands. *Brain Research: Cognitive Brain Research* 25, 566-578.
- Vukovic, N., Shtyrov, Y., 2014. Cortical motor systems are involved in second-language comprehension: Evidence from rapid mu-rhythm desynchronisation. *NeuRdImage* 102, 695-703.
- Yoris, A., García, A.M., Traiber, L., Santamaría-García, H., Martorell, M., Alifano, F., Kichic, R., Moser, J.S., Cetkovich, M., Manes, F., 2017. The inner world of overactive monitoring: neural markers of interoception in obsessive-compulsive disorder. *Psychological Medicine* 47, 1957-1970.

Tabla 1.
Características de los textos de acción y neutros para la tarea en L1 (español).

	Texto de acción	Texto neutro	Estadística	Valor p *
Caracteres ^a	944	978	$\chi^2 = .60$	.44
Palabras	208	204	$\chi^2 = .04$	.84
Sustantivos	48	44	$\chi^2 = .17$	.68
Adjetivos	7	9	$\chi^2 = .25$	.62
Adverbios	6	8	$\chi^2 = .29$	.59
Verbos	32	32	$\chi^2 = 0$	1
Verbos de acción	24	1	$\chi^2 = 21.16$	< .001
Verbos sin acción	8	31	$\chi^2 = 13.56$	< .001
Media frecuencia de palabras de contenido ^b	1.63	1.79	$t = 1.53$	.13
Media familiaridad de palabras de contenido ^b	6.15	6.24	$t = .74$	.46
Media imaginabilidad de palabras de contenido ^c	5.25	4.97	$t = 1.39$	.17
Media longitud silábica de palabras de contenido ^c	2.52	2.49	$t = .25$	.80
Media longitud ortográfica de palabras de contenido ^c	6.16	6.26	$t = .36$	.72
Oraciones	22	22	$\chi^2 = 0$	1
Oraciones menores	3	3	$\chi^2 = 0$	1
Oraciones simples	8	8	$\chi^2 = 0$	1
Oraciones compuestas	4	3	$\chi^2 = .14$	.71
Oraciones complejas/compuestas complejas	7	8	$\chi^2 = .07$	.80
Coherencia	4.05	3.86	$t = .62$	.54
Comprensibilidad	4.24	4.10	$t = 1.05$	.30
Legibilidad (Índice de Szigriszt Pazos) ^d	79.92	77.3	$\chi^2 = .04$	.83
Legibilidad (escala Inflezs) ^e	Bastante fácil	Bastante fácil	-----	-----

^a Conteo de caracteres realizado sin contar los espacios.

^b Datos psicolingüísticos extraídos de la base de datos LEXESP, por medio de B-Pal (C. J. Davis & Perea, 2005).

^c Datos de frecuencia extraídos de B-Pal (C. J. Davis & Perea, 2005).

^d Fórmula aplicada según se describe en Szigriszt Pazos, (1993).

^e Fórmula aplicada según se describe en Barrio-Cantalejo et al. (2008).

valores p calculados con prueba de Chi cuadrado. Nivel Alfa ajustado en 0.05

* valores p calculados con medidas independientes ANOVA. Nivel Alfa ajustado en 0.05

Tabla 2.
Características de los textos de acción y neutro de la tarea en L2 (inglés).

	Texto de acción	Texto neutro	Estadística	Valor p^*
Caracteres ^a	696	743	$\chi^2 = 1.53$	.215 [#]
Palabras	167	169	$\chi^2 = 0.01$	.913 [#]
Sustantivos	33	25	$\chi^2 = 1.10$	.293 [#]
Adjetivos	6	14	$\chi^2 = 3.20$	.073 [#]
Adverbios	6	16	$\chi^2 = 4.54$	.3 [#]
Verbos	32	32	$\chi^2 = 0$	.999 [#]
Verbos de acción	25	9	$\chi^2 = 5.44$	.020 [#]
Verbos sin acción	7	23	$\chi^2 = 7$	.008 [#]
Media frecuencia de palabras de contenido ^{b,c}	802.05	974.6	$t = 0.71$	.474 [*]
Media familiaridad de las palabras de contenido ^{b,d}	593.2	582.4	$t = 1.63$	.104 [*]
Media imaginabilidad de las palabras de contenido ^{b,e}	442.8	394.9	$t = 1.98$	.07 [*]
Media longitud silábica de las palabras de contenido ^b	1.3	1.5	$t = 1.60$	.111 [*]
Media longitud ortográfica de las palabras de contenido ^b	4.8	5.1	$t = 1.98$	.324 [*]
Oraciones	17	17	$\chi^2 = 0$	.999 [#]
Oraciones menores	0	0	$\chi^2 = 0$	.999 [#]
Oraciones compuestas	3	3	$\chi^2 = .0$	.999 [#]
Oraciones complejas/compuestas complejas	7	6	$\chi^2 = .07$	.80
Comprensibilidad	3.9	3.6	$t = 0.684$	.502 [*]
Coherencia	3.7	3.6	$t = 0.186$	.855 [*]
Legibilidad (PSKF) ^f	4.4	4.55	4.22	-----
Legibilidad (SRI) ^g	3	2.8	3.5	-----

^a Conteo de caracteres realizados sin contar los espacios.

^b Datos psicolingüísticos extraídos de N-Watch (C. J. J. B. r. m. Davis, 2005), basado en conteo de lema (*lemma counts*).

^c Datos de frecuencia extraídos de la base de datos CELEX, por medio de N-Watch (C. J. J. B. r. m. Davis, 2005).

^d Datos de familiaridad extraídos de la base de datos MRC, por medio de N-Watch (C. J. J. B. r. m. Davis, 2005).

^e Datos de imaginabilidad extraído de la base de datos Bristol/MRC, por medio de N-Watch (C. J. J. B. r. m. Davis, 2005).

^f Calculado mediante la Fórmula Powers-Sumner-Kearl (PSKF).

^g Calculado mediante el Índice de Legibilidad de Spache (SRI) revisado.

[#] valores p calculados con la prueba de Chi cuadrado. Nivel Alfa fijado en .05.

^{*} valores p calculados con medidas independientes ANOVA. Nivel Alfa fijado en .05.