

“ESCUCHAR” A TRAVÉS DEL SENTIDO DEL TACTO: LA SORDERA PROFUNDA COMO MODELO CLÍNICO PARA EL ESTUDIO DE LA PLASTICIDAD CEREBRAL¹

Dra. Vanessa D. Ruiz-Stovel

Dra. Fabiola R. Gómez-Velázquez

Laboratorio de Neurodesarrollo Cognitivo. Instituto de Neurociencias, CUCBA, Universidad de Guadalajara

Introducción

La percepción auditiva primaria se considera un determinante esencial del aprendizaje del lenguaje a lo largo del neurodesarrollo, en el que parece existir una relación causal entre la capacidad de procesamiento sensorial y la eficiencia en la adquisición del lenguaje (Leppänen *et al.*, 2010; Mueller *et al.*, 2012).

Durante el proceso de adquisición del lenguaje se integra una compleja red de conexiones entre distintas regiones cerebrales. Esta red del lenguaje se desarrolla con el tiempo, proporcionando la maduración y la organización neuronal asociadas a la percepción y la producción del habla. Sin embargo, la privación auditiva congénita afecta drásticamente

¹ *Financiamiento y Reconocimientos*. Los estudios realizados fueron financiados por el Instituto de Neurociencias (Universidad de Guadalajara, México), por el proyecto SEP-CONACYT-221809 y el proyecto SEP UDG-PTC-1594/NPTC. Agradecemos a la Asociación de Sordos de Jalisco, a la Asociación Deportiva, Cultural y Recreativa Silentes de Jalisco y a Educación Incluyente, A.C., así como a los participantes, familiares, profesores y alumnos que hicieron posible los estudios presentados en este capítulo.

a esta integración neurofuncional (Kral, 2007), comprometiendo así el desarrollo del lenguaje oral.

El lenguaje permite al individuo comunicarse y comprender el entorno, fomentando el desarrollo social y cognitivo, ambos cruciales para la alfabetización. Es fundamental para el desarrollo de aspectos cognitivos superiores, como el pensamiento categórico, la organización jerárquica y las estrategias de pensamiento crítico que nos permiten hacer inferencias, sintetizar información y hacer generalizaciones (Kushalnagar *et al.*, 2010b; Paul, 2009). Por lo tanto, la adquisición temprana y adecuada del lenguaje en la sordera profunda constituye un reto importante para evitar que la privación lingüística interfiera con el desarrollo cognitivo, lo que justifica la búsqueda continua de alternativas viables para facilitar este proceso.

Los enfoques multisensoriales para la educación oral han incluido el tacto como vía sensorial complementaria para facilitar la percepción de los sonidos del lenguaje. La percepción somatosensorial de la vibración y la audición dependen de un mecanismo similar para codificar los patrones oscilatorios que constituyen un sonido, ese mecanismo involucra la actividad de mecanorreceptores especializados. Con base en esta similitud de codificación neural, varios estudios han explorado la percepción del habla a través del sistema somatosensorial empleando dispositivos de estimulación vibrotáctil (Auer Jr *et al.*, 2007; Bernstein *et al.*, 1998). El uso de los métodos de discriminación vibrotáctil ha aumentado significativamente durante las últimas décadas, así como el desarrollo de dispositivos táctiles de bajo costo que permiten acceder a información acústica, que no proporciona la lectura de labios (Yuan *et al.*, 2005).

La discriminación vibrotáctil de los sonidos que se encuentran dentro del espectro del lenguaje debe entrenarse adecuadamente para que puedan ser reconocidos como estímulos lingüísticos (Moallem *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2003), el entrenamiento también puede facilitar la percepción de los elementos prosódicos del lenguaje mientras se leen los labios. En este contexto, la base de la decodificación vibrotáctil de los sonidos del lenguaje depende de la detección, la discriminación y la identificación de las características fundamentales de las ondas sonoras, como la amplitud, la frecuencia y la duración.

Las pruebas empíricas subrayan la importancia de un procesamiento neural adecuado de estas tres características de los sonidos. La discriminación de distintos sonidos dentro de un amplio rango de frecuencias es uno de los procesos funcionales más tempranos en el desarrollo del sistema auditivo. Esta discriminación es crucial para la distinción de fonemas, notas musicales y sonidos más complejos (por ejemplo, Bailey y Snowling, 2002).

Por otro lado, la discriminación de la duración de un sonido desempeña un papel vital en la percepción lingüística categórica (Fujisaki y Kawashima, 1971; Liberman *et al.*, 1957; Pisoni, 1973), la percepción de las vocales (Lehnert-Lehouillier, 2013; Yu *et al.*, 2014) y variaciones en el tono (Chen *et al.*, 2017) en individuos con audición normal.

En resumen, las dificultades para distinguir con éxito las diferentes características de los sonidos en los niños sordos prelocutivos parecen tener consecuencias perjudiciales en los procesos de aprendizaje básicos y pudieran afectar posteriormente su rendimiento académico. La mayoría de los niños sordos profundos encuentran grandes dificultades para adquirir la conciencia fonológica, junto con el reto de desarrollar un pensamiento alfabetizado cuando han experimentado un conocimiento lingüístico empobrecido y fuera de las ventanas óptimas del desarrollo.

Derivado del interés por estudiar la capacidad para reconocer las propiedades físicas de los sonidos a través del tacto, hemos llevado a cabo varios estudios sobre la discriminación perceptiva vibrotáctil de diferentes características sonoras en personas con sordera profunda, con la intención de evaluar si un breve entrenamiento en la percepción vibrotáctil puede modificar positivamente la discriminación conductual y revelar los cambios neurofuncionales cerebrales derivados de ese nuevo aprendizaje somatosensorial.

Este capítulo ofrecerá un panorama general de la sordera profunda y sus implicaciones cognitivas, pero principalmente hará una revisión sobre la investigación relacionada a la percepción somatosensorial de características básicas del sonido y del lenguaje en una población con sordera profunda prelocutiva y los mecanismos cerebrales asociados a este tipo de procesamiento vibrotáctil. ¿Cómo es que un sordo profundo puede aprender a "escuchar" a través del tacto? ¿Cuál es el verdadero

alcance de la sustitución sensorial audio-táctil cuando hay una pérdida auditiva severa desde temprana edad?

Los déficits auditivos

Prevalencia, clasificación y etiología

La elevada prevalencia de los déficits auditivos determina que esta limitación sensorial sea un tema importante para la salud pública, la educación especial y el desarrollo económico y social (Olusanya *et al.*, 2014). La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) reporta que más del 5% de la población mundial (aproximadamente 430 millones de personas) padece una pérdida de audición discapacitante de gravedad moderada a severa. El estudio de *Global Burden of Disease* (GBD) de 2019 midió el impacto global de las pérdidas auditivas realizando estimaciones de la prevalencia, gravedad y distribución de la pérdida auditiva en la población mundial a través de revisiones sistemáticas (en 2008, 2013 y 2016) de encuestas epidemiológicas representativas utilizando un total de 215 fuentes en 77 países. El estudio GBD estima que aproximadamente 70 millones de niños menores de 15 años tienen pérdida auditiva, afectando considerablemente el desarrollo de las habilidades lingüísticas, la alfabetización, el comienzo de la educación y, por lo tanto, la cognición y el bienestar social (Haile *et al.*, 2021).

En México, se estima que viven aproximadamente 4 250 910 personas con discapacidad y limitación para oír aun usando aparato auditivo, lo que representa el 3.37% de la población total (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021) del cual el 52% está conformado por hombres y el 48% por mujeres. Además, cerca del 6.77% (287 993) de las personas sordas se encuentran en un rango entre los 0 y los 19 años de edad.

La discapacidad auditiva es un término genérico que hace referencia a todos los tipos, las etiologías y los niveles de pérdida auditiva (Trezek *et al.*, 2010). Cabe resaltar que independientemente de la causa o la localización del daño que ocasiona la sordera, el grado de pérdida auditiva es un término audiológico general que se refiere a la agudeza de la audición y se mide en decibelios (dB), una unidad exponencial de intensidad de

sonido. Cuando se habla de la severidad de un déficit auditivo, convencionalmente se describe en términos de un umbral de audición que es la intensidad mínima que puede ser percibida por el paciente el 50% de las ocasiones. Lo que comúnmente se reporta para criterios diagnósticos es el umbral promedio de tonos puros (PTA, por sus siglas en inglés, *Pure Tone Average*) en el mejor oído (sin aparato) en tres frecuencias importantes para la percepción del habla: 500, 1000 y 2000 Hz. Este promedio tiene implicaciones importantes en las alternativas viables de métodos de comunicación, así como en el pronóstico de la oralización (adquisición del lenguaje oral). Sin embargo, como señalan Ling y De Manrique (2002), especialmente en los niños con pérdida auditiva profunda, no hay una relación clara entre el PTA y la habilidad para el reconocimiento de las palabras. Un ejemplo sería el caso de dos niños, ambos con un PTA de 95 dB, uno es capaz de discriminar palabras con un 70% de precisión, mientras que el otro lo hace con sólo un 24%.

Existen ligeras variaciones en cuanto a los rangos de severidad del déficit auditivo. En la Tabla 1, se muestran los rangos que corresponden a los diferentes grados de severidad según los estudios epidemiológicos de la OMS (2021) y de acuerdo con el estudio GBD 2019. Ambos definen como déficit auditivo aquellas hipoacusias con umbrales de audición mayores de 30 dB en niños y de 40 dB en adultos. Un paciente con un grado de pérdida auditiva moderada presenta dificultad para oír una conversación normal, ya que la intensidad de esta varía entre los 50 y los 65 dB. Aquellos pacientes con grados de pérdida superiores son incapaces de percibir muchos de los ruidos de su entorno, incluido el lenguaje oral, por lo que se les dificulta adquirir el lenguaje por la vía auditiva. Cuando la sordera profunda se presenta desde temprana edad, el déficit sensorial repercute de manera global en la vida del individuo que la padece, ya que la audición juega un papel crucial en la adquisición y el desarrollo del lenguaje.

Las distintas causas de la sordera son un importante factor de variabilidad entre los individuos sordos. Estas se dividen en dos grandes tipos, las sorderas congénitas y las sorderas adquiridas. Sin embargo, en 33% de los casos no es posible determinar la etiología con exactitud (Marchesi, 1998). De acuerdo con el cuestionario ampliado del INEGI se estima que en México el 9.65% de las pérdidas auditivas en edades

tempranas se originan alrededor del nacimiento, y se relacionan en gran medida con factores genéticos, factores no genéticos e incluso con complicaciones durante el embarazo (por ejemplo, rubéola, sarampión, varicela) y durante el parto, tales como hipoxia e ictericia severa neonatal. La mayoría de las sorderas congénitas son de carácter autosómico recesivo y únicamente el 10% de las sorderas congénitas son de herencia autosómica dominante. La mutación más comúnmente reportada es en el gen de conexina26 (Cx26); sin embargo, se han identificado alrededor de 11 genes relacionados con este tipo de sordera no sindrómica (Morton, 1991; Steel, 1998).

Cuadro 1. Clasificación de los grados de pérdida auditiva

<i>Grado de pérdida auditiva</i>	<i>OMS 2021</i>	<i>GBD 2019</i>
Leve	26-40 dB	20-34 dB
Moderada	41-60 dB	35-49 dB
Moderada severa	-----	50-64 dB
Severa	61-80 dB	65-79 dB
Profunda	≥ 81 dB	80-94 dB
Completa	-----	≥ 95 dB

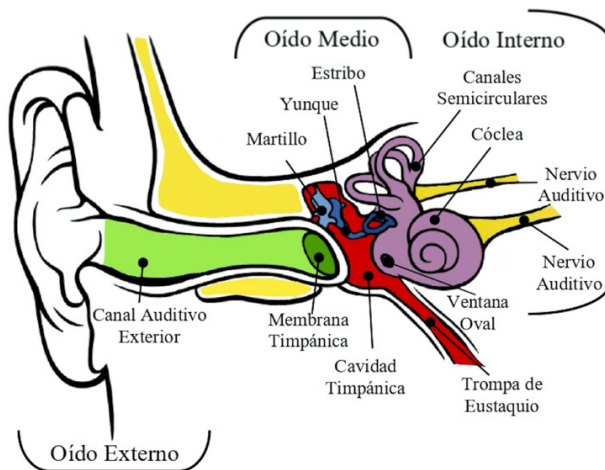
Fuente: Se muestra la clasificación de los grados de pérdida auditiva de acuerdo con estudios epidemiológicos de la OMS (2021) y *The Global Burden of Disease (GBD) Study 2019*. dB: decibelios.

Las sorderas adquiridas, excluyendo aquellas relacionadas con el envejecimiento, tienden a asociarse con otros trastornos o alteraciones de otro tipo y constituyen en México el 25.23% de los casos (INEGI, 2021b). La causa más común son las infecciones de oído crónicas, seguido de otras enfermedades como la rubéola y la meningitis, la administración de antibióticos ototóxicos (por ejemplo, aminoglicósidos), traumatismo o exposición a ruido con niveles de intensidad nocivos. La incidencia de las sorderas adquiridas ha disminuido con los avances médicos que permiten un mejor control de las enfermedades causales y la prohibición del uso de ciertos medicamentos. No obstante, de acuerdo a las estadísticas de la OMS, la implementación de mejores medidas

preventivas de salud pública e inmunización podrían prevenir el 50% de las sorderas adquiridas.

Los tipos de sordera se pueden clasificar de acuerdo con su etiología, pero también existe una clasificación que se relaciona con la parte específica en el sistema auditivo en donde se localiza el daño responsable del déficit. En la Figura 1 se señalan las tres partes principales en la que este se divide: el oído externo, el oído medio y el oído interno, además de mostrar las pequeñas estructuras que conforman cada una de ellas. En este contexto anatómico, las hipoacusias se clasifican en: hipoacusia conductiva, hipoacusia neurosensorial o hipoacusia mixta. Las hipoacusias conductivas se relacionan con alteraciones en el oído externo o medio, las de tipo neurosensorial en el oído interno y las mixtas existen cuando se presentan ambos tipos de alteraciones.

Figura 1. Esquema de la estructura anatómica del oído humano



Fuente: Adaptado de Wikimedia Commons (2009) https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Anatomy_of_the_Human_Ear.svg

Los medios alternativos de comunicación que pudieran beneficiar al individuo en el desarrollo del lenguaje hablado dependen en gran medida del tipo de sordera. Por ejemplo, los sordos con hipoacusia conductiva pueden utilizar un auxiliar auditivo que amplifique el sonido.

Las alteraciones en la parte externa y media del oído pueden ser causadas por una otitis media producida por infecciones o bloqueos de las trompas de Eustaquio, por una otoesclerosis, por lesiones traumáticas y por faringoamigdalitis, todo lo cual impide una vibración adecuada del tímpano y los huesecillos en respuesta a las ondas sonoras. Sin embargo, en este tipo de hipoacusia, las estructuras del oído interno encargadas de la codificación neural del sonido están intactas, por lo tanto, sí se puede codificar, siempre y cuando, las vibraciones lleguen a esta parte interna con una intensidad adecuada. En los casos que no se producen lesiones permanentes, este tipo de sordera puede ser temporal y reversible si recibe tratamiento farmacológico o incluso con una intervención quirúrgica.

Por otro lado, la hipoacusia neurosensorial es más grave y de pronóstico más reservado. Se asocia con alteraciones en la cóclea (pérdida de células ciliadas o malformaciones), daño en el nervio vestibulo-coclear o en la corteza cerebral encargada del procesamiento auditivo. Algunas de las causas de este tipo de sordera son las malformaciones del oído interno (por ejemplo, malformación de Mondini), medicamentos ototóxicos, neurinoma del acústico y otras diversas lesiones cerebrales. Los sordos con hipoacusia neurosensorial, sólo se benefician de los audífonos digitales que amplifican el sonido en frecuencias específicas, de acuerdo con sus necesidades individuales, cuando aún se cuenta con suficientes células ciliadas funcionales en la cóclea. En una pérdida en la audición mayor a los 90 dB las personas con sordera obtienen pocos beneficios de un amplificador de señales auditivas. Los aparatos auditivos se han usado sólo como una forma de ayudar a las personas con sordera severa en la lectura de labios durante la comunicación oral (Yuan *et al.*, 2003).

Las alternativas disponibles que existen para la oralización de pacientes con sordera neurosensorial profunda son los implantes cocleares y los implantes auditivos de tronco encefálico. La función de los implantes cocleares es sustituir la función de la cóclea mandando señales directamente hacia el canal del nervio auditivo por medio de electrodos implantados quirúrgicamente en los ductos de la cóclea, estos electrodos convierten la energía acústica en señales eléctricas. Lamentablemente, los implantes cocleares no son una opción viable para algunas personas con sordera profunda que no tienen el nervio auditivo o que está

ausente o dañado. En estos casos, el implante auditivo de tronco encefálico es una alternativa, se implanta directamente este aparato en los centros de procesamiento auditivo del tronco del encéfalo, traspasando la cóclea y el nervio auditivo, para su estimulación directa. Sin embargo, no es una posibilidad para todos acceder a un implante auditivo, por un lado, porque no cumplen con la estructura neuroanatómica para ello y, por otro, por su alto costo económico. En México, el costo aproximado de un implante coclear oscila alrededor de medio millón de pesos, adicionalmente, una vez que el individuo ya cuenta con un implante, el valor de la actualización del procesador es de alrededor de 310 mil pesos, a lo que se suma la necesidad de afrontar la compra de refacciones con un alto costo económico (Ayala, 2019). Por lo tanto, el costo es una limitante importante para que alguien pueda acceder a esta tecnología, que además requiere una intervención quirúrgica y años de terapia del lenguaje para que la persona aprenda a procesar los sonidos que son transmitidos por el implante. Se ha descrito que la implantación en una edad temprana es el predictor más importante de resultados favorables en esta intervención quirúrgica.

Por último, la hipoacusia mixta es la pérdida auditiva como resultado de una combinación de problemas conductivos y neurosensoriales. Las causas pueden abarcar cualquier combinación de los determinantes de hipoacusia conductiva y neurosensorial mencionados previamente.

Implicaciones cognitivas de los déficits auditivos

La sordera profunda prelocutiva implica no sólo una deficiencia sensorial específica, sino la incapacidad para adquirir el lenguaje oral del modo habitual. Lo anterior tiene importantes repercusiones sobre el neurodesarrollo del individuo, ya que la cognición y el lenguaje están íntimamente entrelazados y este vínculo se forja durante los primeros meses de vida. El lenguaje proporciona una "amplia red facilitadora" que promueve otros procesos fundamentales del aprendizaje (Vouloumanos & Waxman, 2014), como, por ejemplo: el aprendizaje de palabras abstractas (Ferguson & Lew-Williams, 2016), el aprendizaje asociativo (Reeb-Sutherland *et al.*, 2011) e incluso, el aprendizaje de respuestas

condicionadas (Gervain *et al.*, 2012). Además, el lenguaje ejerce una influencia importante sobre la formación de conceptos, promoviendo a temprana edad la categorización a través de su función comunicativa (Ferguson & Waxman, 2016). Con el desarrollo del lenguaje se adquiere una herramienta que facilita la codificación de información perceptual, al igual que la habilidad de combinar conceptos elementales para formar conceptos más complejos (Chomsky, 2011).

El estudio de la relación entre la privación auditiva desde temprana edad y la cognición ha sido un tema delicado y de difícil abordaje para la comunidad científica, ha tenido distintos enfoques que han evolucionado desde perspectivas que argumentan que los déficits auditivos ocasionan un “retraso cognitivo” que hace a los sordos intelectualmente inferiores a sus pares oyentes (Myklebust, 1960; Pintner & Patterson, 1971), hasta una visión más equilibrada que interpreta las diferencias reportadas en algunos de los dominios cognitivos, no como resultado de la sordera *per se* que causa una deficiencia, sino como el resultado de la interacción de varios factores. Entre los factores mencionados por Tharpe, Ashmead & Rothpletz (2002), se encuentran las estrategias para resolver tareas, las cuales están influenciadas por el método de comunicación primario del individuo sordo, y la cantidad de conocimiento cotidiano, conceptual y estratégico con la que éste cuenta (Bebko & Metcalfe-Haggert, 1997).

De manera más específica, algunos investigadores han señalado al lenguaje como el factor crucial en el desarrollo de la cognición en los sordos, Katheryn Meadow (1968) fue la primera en postular que la adquisición tardía y empobrecida del lenguaje era el problema primario de los individuos sordos. En la actualidad, hay evidencia suficiente que apoya esta postura (Marschark, 2003; Mayberry, 2002). El desarrollo del lenguaje es crítico para la organización de la memoria y de las habilidades lectoras y numéricas, entre otros aspectos del desarrollo cognitivo (Kushalnagar *et al.*, 2010b).

En la literatura se hace énfasis en la importancia de adquirir un lenguaje completo dentro de los tres primeros años de vida, independientemente de si este es oral o lengua de señas (Chamberlain *et al.*, 2000; Mayberry & Lock, 2003; Mayberry, 2007). Esta conclusión es sustentada por hallazgos en experimentos que comparan ciertas habilidades

cognitivas en sordos nativos (hijos de padres sordos) con las de los sordos profundos con padres oyentes (sordos no nativos). Estos dos grupos se distinguen principalmente por la calidad de la exposición lingüística que tuvieron desde nacimiento, los sordos no nativos fueron expuestos al lenguaje oral, que por su trastorno auditivo es de calidad comunicativa muy limitada porque se reduce a la información visual que obtienen de la lectura labiofacial. En cambio, los sordos nativos fueron expuestos de forma natural a una lengua materna de señas que usan sus padres para comunicarse. Esta experiencia es muy distinta debido a que los sordos señantes nativos adquieren su lengua materna durante las mismas etapas de maduración que los bebés oyentes (Petitto *et al.*, 2004) e incluso presentan balbuceo con las manos con una organización fonética y lingüística similar (Petitto & Marentette, 1991).

Las evidencias que sustentan esta postura también son compartidas por Mayberry (2002) y Marschark (2003), quienes postulan que las habilidades cognitivas de los sordos señantes nativos son equiparables a las de sus pares oyentes. Sin embargo, los resultados en este sentido han sido contradictorios, porque dependen en gran medida de la complejidad de la tarea, del dominio cognitivo que está siendo explorado, y además de factores sociales externos tales como las oportunidades académicas y el estatus socioeconómico. Por lo tanto, estas conclusiones deben ser interpretadas tomando en cuenta las limitaciones mencionadas.

A continuación, se mencionarán las evidencias de algunos estudios que han explorado en poblaciones con sordera diferentes dominios cognitivos como habilidades visuoespaciales, memoria y funciones ejecutivas.

En experimentos que estudian aspectos de percepción visual, se ha documentado un desempeño superior en sordos señantes en comparación a sus pares oyentes. Estos resultados se han reportado en tareas que evalúan la habilidad para cambiar de manera rápida el foco de la atención al rastrear estímulos visuales (Rettenback *et al.*, 1999), en la rapidez de rotación mental de figuras tridimensionales (Chamberlain, 1994), en la detección visual de movimiento (Neville & Lawson, 1987) y la detección de la lengua de señas en la periferia (Swisher, 1993), en la discriminación de rostros en diferentes orientaciones espaciales (Bellugi *et al.*, 1990), y en la discriminación de expresiones faciales de asco y miedo (Goldstein & Feldman, 1996). En un estudio que exploró los efectos

del bilingüismo-bimodal en sordos, se observó que estos cuentan con una ventaja en cuanto a la flexibilidad atencional en tareas visuales con carga cognitiva que requieren un procesamiento de nivel superior (Kushalnagar *et al.*, 2010a).

Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta al analizar los resultados de la mayor parte de los estudios que han explorado la retención de información en memoria inmediata y la capacidad de memoria de trabajo en poblaciones con sordera, es que se ha empleado material lingüístico escrito en inglés y no en lengua de señas, sin tomar en cuenta el grado de conocimiento del idioma o incluso la habilidad lectora de los participantes. Una de las hipótesis para explicar el porqué los sordos señantes tienden a recordar un menor número de ítems en tareas que evalúan el *span* (capacidad) de memoria verbal, en comparación a sordos oralizados y sus pares normoyentes, es que los sordos señantes emplean estrategias menos eficientes de retención de información a través de códigos visuales (Marshark, 2003), en lugar de códigos verbales que facilitan el sostenimiento y manipulación temporal de secuencias, y la evocación serial (Musselman, 2000). Se ha reportado una reducción en la capacidad de la memoria inmediata para palabras escritas y dígitos en sordos señantes, que abarca de 2 a 5 estímulos. Sin embargo, los resultados en sordos oralizados son distintos, debido posiblemente a que emplean códigos verbales, lo que hace que su capacidad sea más similar a la de personas oyentes. Otra posible explicación de las diferencias en la capacidad de memoria, es que toma más tiempo reproducir señas que palabras articuladas y, por lo tanto, estas abarcan más espacio en los almacenes de la memoria de trabajo que tiene una capacidad limitada (Marschark & Harris, 1996). En contraste, cuando Furth (1966) utilizó figuras complejas (elementos no lingüísticos) para evaluar la capacidad de memoria, los sordos se desempeñaron mejor que sus pares oyentes, excepto cuando la presentación de los estímulos y el orden de evocación fueron seriados. Este fenómeno reafirma la importancia que tienen las estrategias lingüísticas de codificación y cómo impactan sobre la capacidad de memoria.

También se ha planteado que las diferencias descritas en memoria y otras habilidades cognitivas, podrían deberse a un menor acceso a las relaciones conceptuales abstractas que influye de manera importante en

cómo se organiza y clasifica la información (Marschark, 2003; Marschark y Hauser, 2008). Un claro ejemplo, es el estudio de Marschark y Everhart (1999) que demostró que los niños sordos son menos propensos a utilizar información categórica para resolver problemas en un juego de deducción. En estudios previos que incursionaron en la exploración del desarrollo conceptual, como Furth (1963), que caracterizan el tiempo de aprendizaje de conceptos abstractos en niños sordos y oyentes, no han encontrado diferencias en el tiempo de aprendizaje de conceptos simples como igualdad y simetría, pero sí en aquellos más complejos que dependen de asociaciones o de conceptualización lingüística como en el concepto de oposición. En otro estudio, Furth (1966) observó un desarrollo tardío en la capacidad para utilizar símbolos abstractos y seguir reglas de lógica. Estas diferencias en la complejidad y la profundidad del conocimiento conceptual, son precisamente, las que tienen implicaciones que trascienden más allá de un dominio cognitivo o un entorno en particular.

De manera general en el ámbito académico, diversos trabajos de investigación han demostrado que en comparación con los estudiantes normoyentes, es menos probable que los estudiantes con déficits auditivos procesen de manera automática relaciones entre conceptos o estímulos en múltiples dimensiones (Marschark & Wauters, 2008). Como resultado, el conocimiento conceptual de estudiantes con déficits auditivos a menudo parece tener una interconexión más débil y menos rica que la de sus compañeros normoyentes. La falta de procesamiento integrador automático entre conceptos, durante el aprendizaje, probablemente también contribuya a los hallazgos recientes que indican la dificultad de los estudiantes con sordera para vincular la información obtenida en las clases en el aula con los materiales de lectura, aunado al relativo poco autoconocimiento que tienen de este hecho.

Por último, es importante mencionar que la audición no sólo juega un importante papel en la cognición, sino también en el bienestar psicológico de la persona y en la formación de una identidad dentro de un contexto social. La gran mayoría de los niños sordos están privados de un elemento crítico del desarrollo de la ecología del lenguaje, del contexto comunicativo e informativo que comparte un niño y su cuidador (Campbell & MacSweeney, 2004), todo esto puede ser devastador

en la formación de fuertes vínculos maternos durante el desarrollo y representar una gran limitante para la convivencia familiar. De hecho, se ha descrito que la pérdida auditiva puede generar sentimientos de aislamiento y soledad (Schick *et al.*, 2005).

La exploración del tacto para la percepción de los sonidos

La exploración del sentido del tacto como medio alternativo de recepción del lenguaje y como complemento importante para el aprendizaje del habla en personas con ciertos déficits sensoriales ha sido un área de investigación que podría tener implicaciones clínicas importantes. Es por esto que, desde mediados del siglo XVIII, se ha estudiado como una opción de apoyo para la mayoría de las personas con hipoacusia profunda, que como ya se ha mencionado, no se benefician de audífonos de sordera y/o que no tienen la posibilidad de ser implantados por diversos factores, como la edad, condiciones médicas o limitaciones económicas.

Particularmente, la interpretación táctil del habla oral basada en la capacidad de percibir los sonidos del habla a través del sistema somestésico tiene una larga historia. Los primeros registros se remontan a 1924, cuando Joseph Gault realizó varios experimentos en los que entrenó a un sujeto, en el cual se simulaban condiciones de sordera de forma artificial, para identificar palabras basándose en las vibraciones percibidas en la palma de su mano. Las palabras se emitían hablando a través de un tubo que él denominó “*Teletactor*”, con el objetivo de lograr que los sordos “escucharan a través de la piel”.

El interés por el uso del sentido del tacto como medio de comunicación existe desde hace muchos años, su potencial de recibir información de forma táctil queda bien ilustrado por el método Tadoma, un método de comunicación verbal táctil no relacionado con dispositivos (Reed *et al.*, 1985; Reed, 1996), desarrollado como alternativa para los sordociegos. El método Tadoma consiste en la percepción de vibraciones producidas por un hablante, ya que el receptor se coloca una mano en la cara y el cuello con el pulgar apoyado ligeramente en los labios. Mediante una práctica exhaustiva, el receptor aprende a comprender el habla integrando diversas acciones relacionadas con la producción del habla, como los

movimientos de los labios y la mandíbula, el flujo de aire en la boca y las vibraciones en el cuello.

Aunque el método Tadoma en la actualidad no se utiliza ampliamente, tiene un importante significado histórico en el estudio de la comunicación verbal táctil, ya que establece el antecedente en la investigación científica del potencial que pueden tener otras vías sensoriales alternativas que compensen o complementen los sentidos afectados. También, desde hace varias décadas, su estudio ha sido relevante en el diseño de sistemas artificiales transformadores de ondas acústicas a patrones táctiles para proveer la comunicación efectiva a distancia. Reed y colaboradores (1985) demostraron que el sentido del tacto puede ser un canal eficaz para percibir sonidos del habla.

En sus inicios, la sustitución sensorial tenía como objetivo principal proporcionar a los usuarios información sobre el entorno a través de un canal sensorial distinto del utilizado normalmente. Paul Bach-y-Rita junto con Stephen Kercel (2003) señalan que los estudios sobre la sustitución sensorial han demostrado que el cerebro tiene la capacidad de adaptarse a la información que entra por una vía sustituta de una vía sensorial dañada o completamente impedida, gracias a los avances en la tecnología de instrumentos diseñados para desarrollar sistemas de compensación de la pérdida sensorial. Bach-y-Rita y Kercel demostraron que el cerebro puede utilizar la información provista por un receptor artificial a través de un órgano sensorial intacto (como el oído o la piel) para compensar la pérdida de la vista o el mal funcionamiento del sistema vestibular debido a la capacidad plástica del cerebro. Esta capacidad de sustituir una vía sensorial dañada o impedida por otra vía sustituta, conocida como sustitución sensorial, puede ocurrir entre diferentes sistemas sensoriales, por ejemplo: tacto-visual, tacto-auditiva o auditiva-visual. El sistema de sustitución sensorial más exitoso hasta el momento es el Braille, en el cual la información del lenguaje escrito, que normalmente se capta a través de la vista, es procesada a través de las yemas de los dedos. Numerosos estudios han demostrado que este fenómeno puede producirse en distintos sistemas sensoriales, como el del tacto a la vista (Bach-y-Rita, 2004), y que la información visual, auditiva y táctil, puede ser procesada por los mecanorreceptores cutáneos

consiguiendo la sustitución tacto-visión y la sustitución tacto-auditiva (Kaczmarek *et al.*, 1991).

En el caso de las personas sordas, la sustitución sensorial audio-táctil consiste en sustituir la vía auditiva por la vía somatosensorial como medio de codificación de los sonidos. Por lo tanto, la percepción del sonido ya no depende de capacidades auditivas residuales, sino del funcionamiento de otra modalidad sensorial no afectada. La estimulación mecánica producida por las ondas sonoras en una frecuencia determinada puede ser detectada en las yemas de los dedos por mecanorreceptores de la piel llamados corpúsculos de Pacini, cuya estructura encapsulada multilaminar está especializada en detectar vibraciones.

Con el principio de la sustitución sensorial, la aplicación de Tadoma como alternativa para la recepción del lenguaje oral fue clave para la base teórica del desarrollo de dispositivos táctiles artificiales (Yuan *et al.*, 2003). Del mismo modo, la investigación de las opciones de recepción táctil del habla mediante dispositivos, sentó las bases para el diseño y la implementación de codificadores táctiles que filtran una forma de onda acústica y la transducen a patrones vibratorios que se sienten en la piel. Varios estudios han explorado la percepción del habla a través del sistema somatosensorial empleando dispositivos de estimulación vibrotáctil para transmitir información sonora y del habla a personas con deficiencias auditivas. Los primeros trabajos estudiaron la transmisión de información de intensidad temporal, sobre todo pistas prosódicas y cambios de entonación de contornos de tono vibrotáctiles, a través de ayudas táctiles de un solo canal que proporcionaban estimulación que codificaba sólo la frecuencia fundamental de la voz (F0) para complementar la lectura de labios (Plant & Risberg, 1983; Rothenberg & Molitor, 1979), mientras que los experimentos posteriores emplearon dispositivos multicanal para transmitir información espectral dirigida específicamente a pistas fonémicas. Algunos experimentos incluso se propusieron evaluar comparativamente a participantes sordos con diferentes experiencias con audífonos, empleando tres tipos diferentes de dispositivos de estimulación: un dispositivo F0 de un solo canal, un dispositivo de ocho canales y un *vocoder* de 16 canales (Bernstein *et al.*, 1998). Este estudio de Bernstein y colaboradores comprobó que los sordos con experiencia en el uso prolongado de aparatos auditivos desde edades tempranas tenían

la capacidad de beneficiarse al máximo de aparatos de estimulación vibrotáctil para procesar efectivamente información del lenguaje hablado. Concluyeron que el funcionamiento óptimo de estos aparatos depende de muchos factores, como la edad de inicio de la sordera, si sucedió antes o después de la adquisición del lenguaje oral, de la capacidad de lectura de labios y del uso previo de audífonos para sordos.

En 2002, se desarrolló un nuevo dispositivo de estimulación vibrotáctil portátil, un dedal que se coloca en el dedo índice llamado SEVITAC-D*. El dispositivo cuenta con una capacidad de registro con un ancho de banda de 10 Hz a 10K Hz, una batería de litio de 4.2v con una duración de 72 horas, tiene además un procesador con dimensiones de 5cm x 5cm x 1.5cm y pesa 80 gramos, que puede ir colgado o colocado sobre un brazo por medio de un brazalete. El dispositivo es una membrana plástica que se coloca sobre el dedo índice y cuenta con un micrófono no direccional con un alcance de aproximadamente 3 metros que capta la información sonora circundante. A diferencia de los aparatos vibrotáctiles anteriores, este no transforma ni filtra las ondas acústicas de un sonido en una sola señal que transmite únicamente una frecuencia fundamental (Plant & Risberg, 1983), ni tampoco descompone el estímulo sonoro en canales que codifican la frecuencia principal en bandas de frecuencia determinadas (Bernstein *et al.*, 1998), de modo que el sujeto percibe una vibración en el dedo que es producto de todos los componentes acústicos de un sonido complejo y no una distorsión de los sonidos del entorno.

Estudios recientes sobre la discriminación vibrotáctil de los sonidos

¿Es posible discriminar distintas propiedades físicas del sonido a través del tacto?

Como se mencionó en la introducción, la base de la decodificación vibrotáctil de los sonidos del lenguaje se basa en la detección, discriminación e identificación de las características fundamentales de las ondas sonoras, como la amplitud, la frecuencia y la duración. Las pruebas

empíricas subrayan la importancia de un procesamiento neural adecuado de estas tres características de un sonido.

La discriminación de frecuencias y la detección de altas frecuencias son cruciales para distinguir fonemas, notas musicales y sonidos más complejos. Los tonos puros consisten en formas de onda sinusoidales de frecuencia única sintetizadas digitalmente. La frecuencia es una propiedad física del sonido, una medida objetiva de la frecuencia de ciclo de una forma de onda relacionada con la experiencia perceptiva auditiva del tono. En general, los tonos puros de alta frecuencia se perciben como sonidos agudos y los tonos puros de baja frecuencia como sonidos graves. Sin embargo, la composición espectral de los sonidos ambientales, como los generados por los instrumentos musicales y los sonidos vocales del habla, es mucho más compleja. Por lo tanto, la naturaleza simple de los tonos puros los hace muy útiles para explorar los aspectos conductuales y los correlatos neurofisiológicos de la discriminación vibrotáctil de los sonidos elementales.

Existen grandes similitudes entre los sistemas sensoriales del tacto y la audición, ya que ambos pueden codificar la frecuencia temporal de los patrones oscilatorios generados por la presión mecánica (Bolognini *et al.*, 2012). La deformación estructural de las cápsulas mecanorreceptoras y el desplazamiento mecánico de las células ciliadas de la cóclea desencadenan señales neurales (Orr *et al.*, 2006). Se ha descrito que la discriminación de frecuencias a través de la vía auditiva depende de la organización tonotópica de las células ciliadas de la cóclea y de la forma en cómo estas para codificar los sonidos complejos, los descomponen en la frecuencia fundamental y sus armónicos. En cuanto a la vía somatosensorial, varios estudios han informado de hallazgos compatibles con un modelo de cuatro canales de sensibilidad táctil de la yema del dedo, en el que los canales de procesamiento de la información presentan selectividad de frecuencia, suma espacial y suma temporal. En concreto, la selectividad de frecuencia de estos canales se debe a las características fisiológicas de las fibras nerviosas pacinianas, y a dos tipos de fibras nerviosas no pacinianas, que son de adaptación rápida y de adaptación lenta (Gescheider *et al.*, 2002).

Ambas modalidades sensoriales transducen la energía física de las ondas sonoras en excitación neuronal; sin embargo, el sistema sensorial táctil tiene un rango de respuesta de frecuencia más estrecho que el sistema auditivo, aproximadamente de 2 Hz a 1000 Hz en comparación con el de la audición que va de 20 Hz a más de 20 kHz (Gescheider *et al.*, 1992; Rahman *et al.*, 2020). La experiencia perceptiva táctil dependerá de la frecuencia de onda de la estimulación vibrotáctil, la sensación no es la misma para toda la gama de frecuencias. En el rango de *flutter* o de cosquilleo (16 -34 Hz), la vibración se percibe como discreta, y por encima de 50 Hz, la estimulación se percibe como un continuo (Hegner *et al.*, 2010). Además, los umbrales de frecuencia pueden variar en función del lugar del cuerpo que se estimula (Verrillo & Capraro, 1974), de la temperatura (Verrillo & Bolanowski, 2003), del tamaño del área de contacto (Verrillo, 1963) y de la duración de la vibración (Verrillo & Smith, 1976).

Young, Murphy y Weeter (2015) realizaron un experimento que confirmó que los seres humanos son capaces de distinguir entre formas de onda sinusoidales puras y complejas con forma periódica no sinusoidal. Asimismo, Birnbaum (2007) sugirió que, dentro del rango de 20 Hz a 40 Hz, el umbral de detección de vibraciones es independiente de la frecuencia de vibración. Sin embargo, el umbral de sensibilidad entre las frecuencias de 40 Hz y 700 Hz es una función de la frecuencia, con un pico de sensibilidad alrededor de los 250 Hz.

El área del cuerpo con mayor sensibilidad a la respuesta del sistema somatosensorial a diferentes frecuencias de estimulación sinusoidal es la yema del dedo índice, esta es una característica fundamental cuando el objetivo es el explorar el potencial de los dispositivos de comunicación táctil para complementar la lectura labial en personas sordas profundas. Se ha demostrado que, únicamente a través de la percepción vibrotáctil, las personas sordas pueden distinguir el timbre de distintos instrumentos musicales (Russo *et al.*, 2012) y discriminar el timbre particular de la voz de interlocutores masculinos y femeninos (Ammirante *et al.*, 2013).

¿Se puede diferenciar exitosamente entre tonos agudos y graves empleando un aparato de estimulación vibrotáctil que se coloca en la yema del dedo índice?

Además de buscar mejorar el desempeño en actividades que requieren del procesamiento e identificación de los sonidos a través del tacto, las investigaciones centradas en el aprovechamiento de aparatos de estimulación vibrotáctil por parte de los sordos, se han interesado por conocer los cambios plásticos derivados de ese aprendizaje a través de la técnica conocida como electroencefalografía. La electroencefalografía (EEG) es una técnica electrofisiológica que permite registrar la suma de potenciales post-sinápticos de conjuntos de neuronas corticales y subcorticales que genera campos eléctricos detectables por electrodos inertes colocados en la superficie del cuero cabelludo. La actividad eléctrica cerebral espontánea permanece constante (en sueño y vigilia) y es totalmente aleatoria e independiente de estímulos específicos. Los Potenciales Relacionados a Eventos (PREs) son cambios rápidos en la actividad eléctrica cerebral que se dan en respuesta a eventos o estímulos específicos. Los PREs se obtienen al promediar varios segmentos del EEG que correspondan a la repetición de estímulos con las mismas características (Carretié, 2001; Gumá-Díaz & González-Garrido, 2001). En particular, la técnica de los PREs es de gran utilidad para estudiar diferentes funciones cognitivas como la memoria, el lenguaje, la conciencia y la atención.

En nuestro grupo de investigación se ha desarrollado una línea de investigación enfocada en el estudio de los cambios plásticos derivados del entrenamiento en el reconocimiento de diferentes propiedades del sonido, usando la estimulación vibrotáctil en personas con sordera profunda, sobre la actividad eléctrica cerebral. El primer experimento que se realizó en esta línea de investigación empleó la técnica de PREs para explorar los cambios electrofisiológicos en adultos jóvenes con sordera profunda en comparación con jóvenes con audición normal (González-Garrido *et al.*, 2017), en una tarea de discriminación vibrotáctil de tonos de distintas frecuencias, usando el dispositivo SEVITAC-D[®].

Es importante señalar que las poblaciones de pacientes, por lo general, constituyen muestras con una gran variabilidad, por las diferencias

en la gravedad y las consecuencias de la pérdida de audición, además de las diferencias en el ambiente en el que se han desarrollado, en las experiencias de aprendizaje que han tenido y en la capacidad de aprendizaje inherente a cada individuo, todo esto contribuye a la variabilidad de los resultados terapéuticos y por ende en los resultados de las investigaciones.

En este primer estudio participaron catorce jóvenes con sordera bilateral profunda (media de pérdida auditiva de tonos puros binaurales superior a 90 dB), que habían nacido sordos o habían sufrido una pérdida auditiva en los primeros seis meses de vida. La sordera profunda es la forma más pronunciada de pérdida de audición. Todos los participantes sordos eran diestros y tenían entre 13 y 31 años (media: 21.96, *DE*: 6.63 años). Sólo un participante había nacido de padres sordos y había adquirido de forma natural la Lengua de Señas Mexicana (LSM) como lengua materna. En cambio, los otros 13 habían recibido una instrucción en LSM al comenzar la escuela primaria, aproximadamente a los siete años. Todos ellos se comunicaban principalmente a través del LSM, y sólo cuatro de los que portaban regularmente audífonos de sordera estaban parcialmente oralizados.

El grupo control estaba conformado por participantes con umbrales de audición normales, que tenían la misma edad y sexo (siete varones; edad promedio: 21.93 años, *DE*: 5.02 años) que los individuos del grupo de sordos. Al inicio del estudio, evaluamos mediante una entrevista clínica que los participantes de los dos grupos no tuvieran antecedentes personales o familiares de enfermedades psiquiátricas, neurológicas o neurodegenerativas y que tuvieran un examen neurológico normal.

Dado que nuestro objetivo era evaluar los cambios relacionados con el entrenamiento en la discriminación vibrotáctil de frecuencias sonoras, los participantes realizaron el mismo experimento de discriminación de tonos agudos y graves en dos momentos distintos. El primero se realizó sin experiencia previa en discriminación vibrotáctil. El segundo se realizó tras completar cinco sesiones de entrenamiento con un sistema estimulador portátil (modelo adaptado del SEVITAC-D*), colocado en el dedo índice derecho.

El breve programa de entrenamiento fue impartido por un instructor en 2.5 semanas, con sesiones individuales de una hora con una

frecuencia de dos a tres veces por semana. Se enseñó a los participantes a identificar y discriminar secuencias de tonos puros, con frecuencias y duraciones variables, y sonidos no verbales más complejos como sonidos naturales de animales (ladridos, mugidos, etc.) y sonidos asociados a objetos (la sirena de una ambulancia, una melodía de piano, el timbre de un teléfono, etc.). El diseño y la metodología del programa de entrenamiento se tratarán en detalle en otra sección de este capítulo.

Antes y después del programa de entrenamiento, los participantes realizaron una tarea experimental con el registro simultáneo del EEG, que consistía en una variante del paradigma clásico de *odd ball* con la presentación de estímulos frecuentes e infrecuentes. Se administraron en forma secuencial un total de 150 tonos en la yema del dedo índice derecho a través de un estimulador vibrotáctil portátil conectado a la salida de audio de una computadora. Se presentaron aleatoriamente dos tonos puros sintetizados digitalmente, uno grave de 700 Hz y otro agudo de 900 Hz, ambos con una duración de 200 milisegundos (mseg), con un intervalo entre los tonos de 1500 mseg. La frecuencia de presentación de los tonos fue de 20 (infrecuente): 80 (frecuente), y estas condiciones se contrabalancearon entre los sujetos. Es decir, a la mitad de los participantes se les presentaron 20% tonos agudos y 80% tonos graves y a la otra mitad 20% tonos agudos y 80% tonos graves. En estudios previos sobre la detección vibrotáctil de tonos con diferentes frecuencias (Auer Jr *et al.*, 2007; Levänen *et al.*, 1998), se han discriminado estímulos en rangos de frecuencia mucho más bajos (alrededor de 250 Hz), pero dado que estábamos interesados en explorar la discriminación somatosensorial dentro del rango de frecuencia del espectro del lenguaje, se seleccionaron los tonos dentro de ese rango.

Al realizar la tarea, los participantes estaban cómodamente sentados en una sala insonorizada y blindada eléctricamente, con ambos antebrazos apoyados en reposabrazos y las manos en posición relajada. Se les indicó que miraran a un punto de fijación en forma de cruz en el centro de un monitor para minimizar los movimientos oculares y se les indicó que respondieran pulsando una tecla con el dedo índice izquierdo cada vez que percibieran vibrotáctilmente en el dedo índice derecho el tono infrecuente (el tono puro de 700 Hz o 900 Hz), realizaron varios ensayos de prueba para garantizar la comprensión de la instrucción. Un asistente

de investigación les comunicó las instrucciones en LSM a los participantes sordos y verificó que las entendían correctamente. Los participantes del grupo control recibieron las instrucciones verbalmente por parte del investigador.

Para eliminar cualquier señal auditiva creada por el estimulador portátil, los participantes normoyentes colocaron su mano derecha dentro de una caja de atenuación acústica para garantizar que los tonos no fueran perceptibles auditivamente y sólo se procesaran a través de la vía somatosensorial. Además, se les colocaron tapones de espuma para los oídos diseñados para proporcionar una atenuación de 30 dB y se les colocaron unos audífonos a través de los cuales estuvieron expuestos a ruido blanco de fondo (70 dB SPL).

La actividad eléctrica cerebral se registró simultáneamente en 19 sitios de electrodos según el sistema internacional 10/20 (Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, C3, C4, P3, P4, O1, O2, T3, T4, T5, T6, Fz, Cz y Pz), utilizando un gorro Electrocap comercial. Todos los lugares de registro estaban referenciados a lóbulos cortocircuitados y las impedancias entre electrodos eran inferiores a 5 kOhms. Las señales de EEG y EOG se amplificaron con un filtro de paso de banda de 0.5 a 30 Hz (puntos de corte de 3 dB de curvas de atenuación de 6 dB/octava) con un periodo de muestreo de 5 milisegundos en un sistema MEDICID-04 (Neuronic S. A.).

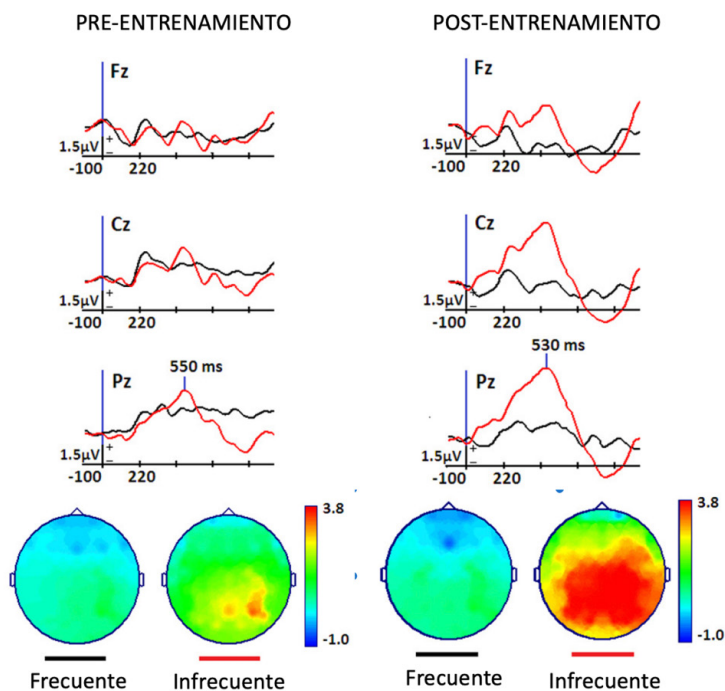
Posteriormente, los datos de cada ensayo se examinaron fuera de línea para promediarlos y analizarlos. Mediante inspección visual, se seleccionaron para cada condición las ventanas correspondientes a los ensayos con respuestas correctas que además estuvieran libres de artefactos. De esta forma, se obtuvieron ventanas temporales de 1 100 mseg en total, que comenzaban 100 mseg antes del inicio del estímulo (utilizado como periodo de corrección de la línea base) y concluían 1 000 mseg después. Se promediaron un mínimo de quince ensayos por condición con el fin de obtener los promedios individuales y grupales para poder observar el componente de los Potenciales Relacionados con Eventos denominado P300, este componente es un cambio de voltaje positivo generado alrededor de los 300 ms posteriores a la presentación de un estímulo, el cual se ha relacionado con la detección de un estímulo relevante, en este caso, la detección del tono infrecuente.

Según los datos conductuales de la tarea, ambos grupos se beneficiaron del entrenamiento vibrotáctil al aumentar significativamente el número de respuestas correctas y disminuir el número de respuestas incorrectas. Los índices de precisión conductual de la tarea de discriminación, basados en la media de respuestas correctas del grupo control, mejoraron del 42% antes del entrenamiento, al 59% posterior a este; mientras que el grupo de sordos profundos mejoró del 48% al 62%. Las pruebas sugieren que, tras completar un breve periodo de entrenamiento de sólo cinco sesiones, todos los participantes mejoraron su capacidad para identificar los tonos agudos y graves, percibidos a través de la estimulación vibrotáctil en el dedo índice derecho, y fueron menos propensos a cometer errores de detección.

Los cambios electrofisiológicos que acompañan a la mejora conductual en la capacidad de discriminación se reflejan en un aumento significativo de la amplitud del componente P300 como resultado del entrenamiento en ambos grupos. En la Figura 2 se puede observar una clara tendencia en el grupo de sordos a mostrar mayores amplitudes después del entrenamiento, que reflejan una nueva capacidad de los individuos para reconocer diferencias entre dos estímulos de diferente frecuencia a través de la yema de los dedos. Además, se encontró una robusta lateralización, con mayor amplitud del componente P300 en el hemisferio derecho en las áreas parietales, durante la discriminación vibrotáctil de estímulos infrecuentes en el grupo de sordos profundos.

Junto con la discriminación somatosensorial de frecuencias, también se ha estudiado la capacidad de distinguir entre estímulos de ondas sonoras de diferente duración o longitud comparando el rendimiento de individuos sordos y normoyentes en diversas tareas en el dominio temporal. El fundamento de que el sistema auditivo desempeña un papel crucial en el desarrollo de un procesamiento temporal eficiente en todas las modalidades sensoriales (Bavelier & Hirshorn, 2010; Dye & Bavelier, 2010; Gori *et al.*, 2012), subyace a esta línea de investigación. Unos pocos estudios recientes han examinado la capacidad táctil para procesar información temporal en condiciones de privación auditiva, aunque estos se han centrado en las habilidades de discriminación temporal visual en el rango de los segundos.

Figura 2. PREs promedio del grupo de sordos profundos en la tarea de discriminación vibrotáctil de tonos de diferente frecuencia (Fz, Cz y Pz) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes



Fuente: Elaboración propia.

¿Cambia el procesamiento temporal de los estímulos somatosensoriales en función de la experiencia auditiva?

Heming y Brown (2005) realizaron un estudio para examinar si la capacidad de medir el tiempo de la información táctil y visual se veía afectada por la privación auditiva temprana. Midieron los umbrales temporales (la cantidad de tiempo que separa el inicio de dos estímulos sensoriales en las modalidades visual y táctil) en participantes sordos y en controles pareados por edad y sexo. En la tarea táctil se presentaron

pares de estímulos, uno en el dedo medio y el otro en el dedo índice, en dos condiciones experimentales (estimulación unimanual y bimanual), y se pidió a los participantes que realizaran una tarea de juicio de simultaneidad respecto al momento de presentación del par de estímulos. Los umbrales temporales fueron significativamente mayores en el grupo de sordos ($M= 84.14$ mseg; $DE = 25.34$) que en el de control ($M= 21.59$ mseg; $DE = 14.99$), lo que sugiere una afectación del procesamiento temporal tras la sordera temprana. Los umbrales temporales significativamente más altos del grupo de sordos en tareas táctiles y visuales pueden atribuirse a la reorganización funcional de las vías neurales que soportan el procesamiento temporal. Es posible que los individuos sordos reclutaran más regiones cerebrales para procesar los aspectos temporales de las tareas sensoriales. Estos y otros resultados experimentales han confirmado una sensibilidad alterada en la discriminación táctil de la información relacionada con el tiempo en adultos que han sufrido una pérdida auditiva temprana en comparación con participantes con audición normal (Bolognini *et al.*, 2012; Heming & Brown, 2005). Sin embargo, los resultados conductuales disponibles son contradictorios y parecen variar en función del tipo de tarea y de los estímulos empleados (Amadeo *et al.*, 2019).

Los experimentos que exploran la percepción vibrotáctil en el dominio temporal en individuos con sordera profunda y controles con audición normal implican tareas muy diferentes. Desde tareas de juicio de simultaneidad de estímulos puntuales (Heming & Brown, 2005), hasta la resolución temporal táctil medida en términos de discriminación temporal de orden de inicio y orden de desplazamiento (Moallem *et al.*, 2010).

Bolognini y colaboradores (2012) también quisieron investigar los efectos de la sordera temprana sobre el papel causal y el momento del reclutamiento de áreas somatosensoriales y auditivas durante la discriminación temporal de estímulos táctiles. Nueve adultos con sordera congénita realizaron tareas temporales y seis de ellos espaciales. Las tareas temporales requerían la distinción de dos estímulos táctiles (vibración larga: 25 mseg vs. vibración corta: 15 mseg), administrados a 100 Hz a los dedos índice derecho o izquierdo, y se les indicó responder sólo a la vibración larga. Utilizaron la estimulación magnética transcraneal (EMT) para estudiar el sustrato neural dirigiéndose al área

somatosensorial primaria (SI) o al córtex de asociación auditiva (giro temporal superior: GTS). La sensibilidad perceptiva (medida como d prima según la teoría de detección de señales) fue significativamente menor en los individuos sordos que en los controles auditivos sanos, sólo en el procesamiento temporal táctil.

Las pruebas empíricas sugieren que el procesamiento cortical de las características espaciales y temporales de los estímulos táctiles es diferente. El SI contribuye al procesamiento táctil contralateral (Hegner *et al.*, 2010) en una ventana temporal temprana (60-120 msec), mientras que el GTS se recluta habitualmente a los 180 msec en el procesamiento táctil para participar en la discriminación de la información temporal en sujetos oyentes. El experimento de Bolognini y colaboradores demostró que la EMT del GTS en etapas tempranas (60-120 msec) alteraba el procesamiento temporal perjudicando la discriminación táctil de la información relacionada con el tiempo, demostrando así que la audición temprana parece ser crítica para desarrollar un procesamiento temporal eficiente.

En nuestra línea de investigación, también exploramos el procesamiento temporal de estímulos auditivos a través de la estimulación vibrotáctil. Este segundo estudio nos permitió evaluar comparativamente la discriminación vibrotáctil del sonido, ahora implicando directamente un juicio temporal en el dominio del tiempo, antes y después del mismo programa de entrenamiento breve de discriminación diseñado e implementado en el estudio mencionado previamente, para determinar los cambios inducidos por el entrenamiento en las medidas cuantitativas subyacentes del EEG (Ruiz-Stovel *et al.*, 2021). En esta tarea de discriminación temporal, evaluamos una muestra análoga a la estudiada en el primer experimento, compuesta por quince participantes sordos profundos prelocutivos ($M= 21.84$ años; $DE = 6.41$ años), siete mujeres y sus controles normoyentes emparejados por edad y género ($M=21.95$ años, $DE = 4.84$ años).

Se siguió el mismo procedimiento experimental y el mismo protocolo de registro de EEG que el descrito para el primer estudio (González-Garrido *et al.*, 2017). En la tarea actual, sin embargo, los participantes realizaron una tarea que implicaba la discriminación entre dos tonos puros con la misma frecuencia (700 Hz), pero de diferente duración

(un tono corto de 250 mseg y un tono más largo de 500 mseg). Se les pidió que respondieran únicamente a las vibraciones de larga duración pulsando una tecla con el dedo índice izquierdo, ya que llevaban el estimulador portátil en el índice derecho. En este estudio se analizaron los datos de la actividad del EEG de forma diferente al anterior. En lugar de examinar los PREs para evaluar los cambios electrofisiológicos relacionados con el entrenamiento, ahora nos propusimos a explorar los cambios cuantitativos del EEG en la energía absoluta en las bandas espectrales individuales que van de 0.06 Hz a 30 Hz, que incluyen los intervalos de frecuencia de la banda delta (0.6-3.3 Hz), la banda theta (4-7.3 Hz), la banda alfa (8-13.3 Hz) y la banda beta (14-30 Hz). Las medidas cuantitativas de EEG han demostrado ser útiles para estudiar procesos cognitivos en individuos sanos, como la atención focalizada, la memoria de trabajo, el lenguaje, el aprendizaje y la toma de decisiones, entre varios otros. En consecuencia, el EEG cuantitativo también se ha utilizado para estudiar a pacientes que sufren una amplia variedad de patologías, entre las que se incluyen lesiones cerebrales traumáticas, deterioro cognitivo leve, diversos trastornos neurodegenerativos como la enfermedad de Alzheimer, la enfermedad de Parkinson, la demencia con cuerpos de Lewy, las enfermedades priónicas, así como el trastorno depresivo mayor y un conjunto considerable de enfermedades psiquiátricas (véase una revisión en Jung *et al.*, 2019), entre muchas otras.

Aplicamos la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro de potencia. Posteriormente, se calculó la mediana del valor absoluto de energía en cada uno de los 19 sitios de registro de electrodos del sistema de montaje internacional 10/20. Este cálculo se realizó seleccionando quince ventanas libres de artefactos, cada una con una duración de 1500 mseg comenzando 100 mseg antes de la presentación del estímulo, para cada una de las condiciones de la tarea experimental (patrón vibrotáctil largo y corto) antes y después del entrenamiento.

Esta tarea específica, que implicaba una simple discriminación vibrotáctil entre vibraciones sinusoidales largas y cortas de una frecuencia de 700 Hz, arrojó resultados conductuales que no apoyan la noción de que el procesamiento temporal táctil en individuos con sordera temprana esté comprometido, como se ha reportado anteriormente (Bolognini *et al.*, 2012; Heming & Brown, 2005). Hacemos

esta afirmación teniendo en cuenta lo que Amadeo y colaboradores (2019) comentaron sobre los resultados conductuales existentes relacionados con el juicio temporal en participantes sordos; son contradictorios porque parecen variar en función del tipo de tarea y estímulos que se utilicen. La capacidad de discriminación temporal en nuestros participantes sordos, descrita en términos de precisión y promedio de tiempos de respuestas correctas durante la ejecución de la tarea, fue comparable a la de los controles tanto en las condiciones previas como en las posteriores al entrenamiento. El cambio significativo en estas dos variables, consistió en un aumento de la tasa de precisión y una disminución de la identificación falsa de estímulos cortos como largos, se asocia a la modificación conductual relacionada con el entrenamiento. Los porcentajes promedio de precisión mejoraron significativamente del 88.7% al 93.3% después del entrenamiento en el grupo de control, y del 91.33% al 95.33% en el grupo de sordos profundos. Consideramos que este cambio favorable en el rendimiento es un reflejo del proceso facilitador asociado a un tipo específico de aprendizaje perceptivo táctil (Braun *et al.*, 2002) similar al que observamos en el estudio de discriminación de tonos de diferentes frecuencias.

Curiosamente, a pesar de un rendimiento conductual similar entre los dos grupos, la discriminación temporal parece tener mecanismos neurales subyacentes diferentes. Las mediciones cuantitativas del EEG revelan diferentes patrones neurofisiológicos en cada banda de frecuencia, lo que afecta claramente a la topografía funcional del cerebro. Existen muy pocos estudios que hayan examinado la actividad neural en individuos sordos mediante EEG cuantitativo. En la década de 1990, Wolff y Thatcher compararon un grupo de 79 niños con sordera profunda prelocutiva y sus controles correspondientes, observaron una mayor coherencia frontotemporal izquierda en el EEG y una mayor potencia en los electrodos frontales bilaterales. Otro estudio que utilizó el análisis EEG no lineal de la dinámica cortical en sujetos sordos prelocutivos durante el reposo con los ojos cerrados y durante una tarea cognitiva (Micheloyannis *et al.*, 1998), sus resultados llevaron a los autores a señalar que la privación sensorial de inicio temprano puede provocar una disminución de la diferenciación cerebral, ya que observaron una activación cortical más difusa durante el reposo en los sordos que en el

grupo de control. Además, los autores postularon que la corteza cerebral de los sujetos sordos muestra una mayor reactividad incluso cuando no se está realizando ninguna tarea cognitiva. En nuestro estudio también encontramos esta tendencia general, particularmente en bandas de frecuencia más bajas como delta y theta, una excitabilidad cortical aumentada y más difusa durante el procesamiento de los dos tipos de vibraciones en los sordos. Otro estudio reportó respuestas electrofisiológicas más significativas y tempranas en adolescentes sordos durante el procesamiento de estímulos visuales y somatosensoriales (Güdücü *et al.*, 2019), este hallazgo se interpretó como reflejo de un procesamiento más eficiente (también denominado “procesos de atención extraordinarios”). Como hallazgo general, las mediciones de potencia absoluta más altas en la literatura se han asociado con el procesamiento de tareas en poblaciones con trastornos cognitivos (por ejemplo, Cartier *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2016; Tedrus *et al.*, 2019), y con tareas con mayores demandas cognitivas en diferentes contextos.

Las dos bandas de frecuencia espectral en las que se observaron diferencias significativas entre grupos y/o cambios relacionados con el entrenamiento en la energía absoluta media fueron las bandas delta (0.6-3.3 Hz) y beta (14-30 Hz). Las diferencias electrofisiológicas entre los grupos se caracterizaron por magnitudes más altas y difusas de la banda delta en los sordos, junto con una disminución generalizada de la energía absoluta en ambos grupos, posterior al entrenamiento, que podría reflejar un proceso facilitador asociado al aprendizaje.

Las evidencias existentes demuestran que la actividad delta aumenta en casi cualquier estado patológico asociado a daño del tejido cerebral, trastorno del desarrollo o incluso trastornos más sutiles sin causa orgánica conocida (para una revisión, véase Knyazev, 2012). Una posible interpretación es que los patrones de activación delta en el grupo de sordos pueden reflejar mayores niveles de dificultad de procesamiento en este grupo, dada la ausencia de experiencia con la representación auditiva del lenguaje.

En cuanto a la potencia absoluta observada en el espectro de la banda beta, esta activación neural era esperada dada la modalidad sensorial en la que se presentaba el estímulo, ya que la banda beta ha sido precisamente identificada como moduladora en el procesamiento de

estímulos somatosensoriales (Lalo *et al.*, 2007). Además, sobre la tarea *oddball* y el juicio temporal que se requiere para la ejecución de la tarea, se ha propuesto que las correlaciones de oscilaciones rápidas y lentas pueden facilitar la interacción intermodal entre canales que procesan información en diferentes escalas temporales, como la amplificación visual del habla (Schroeder *et al.*, 2008). Consideramos muy probable que los cambios específicos observados en la banda beta en los participantes controles tras el entrenamiento, puedan implicar diferencias grupales en los mecanismos cognitivos adaptativos, ya que se ha hipotetizado que las oscilaciones beta son un reflejo del mantenimiento del estado sensorimotor o cognitivo actual, favoreciendo así la flexibilidad y el control cognitivo (Engel & Fries, 2010; Fries, 2015).

Adicionalmente, se ha observado que la potencia en la banda del espectro beta tiende a disminuir con la participación activa. Por ejemplo, la supresión de las oscilaciones beta antes de la presentación del estímulo parece facilitar la percepción y la detección de la vibración (Jones *et al.*, 2010; Van Ede *et al.*, 2011).

En conclusión, las diferencias en la magnitud de potencia espectral en individuos sordos y normoyentes al discriminar la duración de la representación vibrotáctil de un sonido, sugieren algo más que un efecto de amplificación debido a una mayor excitabilidad cortical. La diversidad y lateralidad en el patrón disímil de los cambios corticales subyacentes a las respuestas parecen representar una red neuronal compleja, así como relaciones y mecanismos adaptativos desarrollados para sobrellevar las limitaciones de la sordera mientras se benefician de la especialización intrínseca de varias áreas cerebrales. El significado funcional de los presentes hallazgos queda por explorarse a profundidad en futuros estudios.

¿Puede un entrenamiento de larga duración en la discriminación vibrotáctil permitir una distinción semántica de las vibraciones?

Se llevó a cabo un tercer estudio de seguimiento, dado que había suficiente evidencia para sugerir que la aplicación de tecnologías novedosas

e intervenciones, específicamente adaptadas que faciliten la percepción vibrotáctil y la discriminación de sonidos dentro del espectro lingüístico, podría tener un impacto benéfico en el desarrollo del lenguaje oral.

La mayoría de los estudios que implican el entrenamiento en el uso de dispositivos vibrotáctiles apoyan la noción de que aprender a utilizar ayudas táctiles para mejorar la lectura labial requiere tiempo y práctica, únicamente unos pocos estudios han demostrado una mejora en el rendimiento después de tan sólo 10 a 20 horas de entrenamiento, mientras que en la mayoría de los estudios, los participantes obtienen beneficios después de al menos 50 a 80 horas de práctica durante un período de 3 a 4 meses (para una revisión, véase Andersson *et al.*, 2001). En la literatura, existe una gran variabilidad en cuanto al tipo y a la duración del entrenamiento empleado, que va desde la identificación de fonemas consonánticos individuales y sílabas sin sentido consonante-vocal, hasta palabras acentuadas en frases e incluso la identificación de frases (por ejemplo, Boothroyd & Hnath-Chisolm, 1988; Eberhardt *et al.*, 1990; Plant *et al.*, 2000; Waldstein & Boothroyd., 1995).

Este estudio conductual tuvo como objetivo examinar el efecto de un programa de entrenamiento de quince sesiones centrado en promover la capacidad de identificar palabras (estímulos lingüísticos) únicamente mediante la estimulación vibrotáctil. Un total de 12 adultos jóvenes (edad media = 19.92, rango = 17-24 años, cuatro mujeres) con sordera bilateral profunda de inicio prelocutivo, matriculados en un centro de educación secundaria inclusiva, completaron una intervención más larga en discriminación vibrotáctil de sonidos complejos, incluidas palabras. Los participantes llevaban ahora el estimulador portátil en la mano izquierda para dejar libre la mano dominante para la comunicación manual y la escritura, para adaptarse mejor a un entorno educativo natural en el que podría ser benéfico complementar la lectura de labios con la información vibrotáctil del estimulador. En entrenamiento en sesiones de 45 minutos de duración, se impartían individualmente, después del horario de clases de los estudiantes, por dos instructores en una zona reservada de la biblioteca del colegio, con una frecuencia de dos a tres veces por semana en función del horario del participante. La mayoría de los participantes completaron el programa en un periodo de diez a doce semanas.

Para evaluar la eficacia del programa, los participantes realizaron dos tareas diferentes antes y después de completar las 15 sesiones de entrenamiento. La primera, fue una tarea de discriminación temporal y la segunda una tarea de discriminación semántica. La tarea de discriminación de la duración era muy similar a la tarea que utilizamos en el segundo estudio (Ruiz-Stovel *et al.*, 2021). A los participantes se les presentó una serie de tonos puros y tenían que responder al estímulo vibratorio más largo, consideramos importante contar con el parámetro inicial de discriminación de tonos puros, ya que esas eran las habilidades y tareas con las que habíamos estado trabajando anteriormente. Esta tarea fue útil porque sirvió de referencia para comparar los estímulos simples de tonos puros con la discriminación más compleja de estímulos vibrotáctiles con un componente lingüístico.

La tarea semántica requirió que los participantes identificaran y respondieran únicamente a las palabras de los nombres de los colores de la bandera mexicana (verde, rojo y blanco) de entre otros cuatro nombres de colores (azul, rosa, negro y café). El proceso de discriminación entre las siete palabras bisilábicas correspondientes a nombres de colores dependía principalmente de la identificación de fonemas iniciales, ya fuera una vocal (en el caso de *azul*) o consonantes sonoras como /v/, /rr/, /b/ y /n/.

Los archivos de audio de los nombres de colores se grabaron con voz femenina utilizando el programa Audacity y su duración se ajustó a 600 milisegundos. La tarea consistió en un total de 66 palabras, que se presentaron de forma pseudoaleatoria, con intervalos variables entre las palabras de 2 000 mseg, 2 200 mseg o 2 400 mseg, divididas en seis bloques, cada uno de los cuales contenía once estímulos: cuatro estímulos blanco (nombres de los colores de la bandera mexicana) y siete no blanco (otros nombres de colores).

La modificación conductual asociada al programa de entrenamiento se evaluó comparando el rendimiento de los sujetos en las dos tareas (el *oddball* de discriminación de la duración del tono puro y la tarea de discriminación semántica de colores) antes y después de la intervención. Un análisis de varianza con medidas repetidas mostró que se produjo una disminución significativa del número de respuestas incorrectas en la tarea de duración, también denominadas falsas alarmas, en

las que el participante identifica erróneamente un estímulo. Es importante resaltar que en la tarea de discriminación semántica observamos una disminución más pronunciada del número de falsas alarmas junto con un aumento significativo del tiempo de reacción de acierto. Esto podría indicar que los participantes después del entrenamiento eran menos propensos a identificar erróneamente los estímulos. Esto se debió en parte a una estrategia de respuesta diferente revelada por tiempos de reacción más largos, lo que podría estar reflejando una identificación vibrotáctil más precisa e intencionada de las palabras entrenadas.

El entrenamiento mejoró la capacidad de los participantes para discriminar la duración del tono y, lo que es más importante, su precisión para discriminar correctamente las palabras objetivo. Basándonos en nuestros resultados, no podemos afirmar que nuestros sujetos se hayan convertido en expertos en la decodificación de palabras tras el periodo de entrenamiento de 10 a 12 semanas. No obstante, la modificación conductual resultante de la práctica indica que los adultos jóvenes sordos pueden aprender la representación vibrotáctil de varias palabras, incluso cuando no se proporciona información visual complementaria de lectura labial.

Descripción del programa de entrenamiento empleado en los tres estudios

Se inició con cinco sesiones de detección, discriminación e identificación vibrotáctil de tonos puros con diferentes frecuencias y duración, seguidas de estímulos no verbales complejos, como sonidos naturales de animales y objetos. Se editaron seis sonidos de animales para que tuvieran una duración de cinco segundos (vaca, perro, caballo, elefante, burro, cordero) y seis sonidos de objetos (campana, reloj, martillo, ambulancia, teléfono, piano) para que tuvieran una duración de nueve segundos. El procedimiento fue muy similar al seguido con las secuencias de tonos: ensayo y repetición emparejando las vibraciones con su representación visual. La discriminación de animales y objetos se entrenó por separado. En primer lugar, se pidió a los participantes que realizaran una comparación por pares relativamente sencilla: distinguir

entre el ladrido de un perro frente al mugido de una vaca, o el sonido de una campana frente al de un martillo. Una vez que las comparaciones por pares se realizaban con un 85% de éxito, se incorporaba otro estímulo sonoro complejo hasta que se hacía lo mismo con los seis sonidos.

El objetivo de la primera parte del programa de entrenamiento era centrar las cinco primeras sesiones en la sintonización de la percepción de estímulos vibrotáctiles consistentes en tonos puros, y la decodificación de las secuencias vibrotáctiles, seguida del emparejamiento de los estímulos vibrotáctiles con su representación visual correspondiente. Se entrenó a los participantes para discriminar entre tonos de diferentes frecuencias y duración a varios niveles de dificultad y múltiples velocidades mediante la exposición repetida a estas secuencias. Al principio, la secuencia de tonos se presentaba tres veces y luego se pedía al participante que pulsara la opción correcta eligiendo entre cuatro secuencias representadas visualmente en la pantalla. A medida que este proceso se hacía más eficaz, la repetición de la secuencia de tonos dejaba de ser necesaria. La dificultad de discriminación se ajustó progresivamente a lo largo de las sesiones de entrenamiento.

En el tercer experimento se impartieron las mismas actividades que se habían utilizado en los dos experimentos anteriores; sin embargo, en esta ocasión, utilizando una versión automatizada de las actividades utilizando una computadora portátil con pantalla táctil, y con una duración ligeramente más corta. En lugar de durar 60 minutos las sesiones de entrenamiento, éstas se adaptaron para durar sólo 45 minutos.

Además, el programa progresó de forma acumulativa hacia la identificación de palabras aisladas, concretamente los siete nombres de colores bisilábicos descritos como estímulos de la tarea descrita. Se utilizaron las mismas grabaciones de audio para entrenar la identificación vibrotáctil de las palabras. En Ruiz-Stovel y González-Garrido (2020) se encuentra la descripción de las actividades realizadas en cada sesión. Estas incluyen las actividades de discriminación de tonos puros y sonidos complejos ya mencionadas y las actividades que implicaban practicar la identificación de los nombres de los colores.

La primera actividad consistió en una práctica de identificación de palabras mediante exposición repetida. Los participantes utilizaron un programa computarizado para mejorar su capacidad de discriminación.

A partir de la sexta sesión, se entrenó a los sujetos a discriminar entre estímulos lingüísticos comenzando con la presentación de las palabras: rojo y verde. Se presentaron un cuadrado de color rojo y un cuadrado de color verde en el centro de la pantalla. Cada vez que el participante tocaba estos cuadrados de color, se reproducía automáticamente el archivo de audio correspondiente y se enviaba vibrotáctilmente a través del estimulador portátil a la yema de su dedo índice izquierdo. Los participantes alternaban y repetían libremente la estimulación hasta que se sentían preparados para intentar que el sistema les presentara aleatoriamente las palabras exigiéndoles que respondieran tocando correctamente la palabra que se les entregaba (la segunda actividad incluida en el contenido de las sesiones 6 a 15 denominada “juego de discriminación computarizado”). A medida que avanzaban las sesiones, también aumentaba el número de palabras que se presentaban simultáneamente para la discriminación, hasta que en la sesión número quince aparecían en pantalla las siete palabras y sus correspondientes cuadrados de colores.

Otro elemento incluido como parte del programa es una actividad que consistía en que el participante dibujara el patrón de vibración que sentía durante la presentación de cada palabra. Esta actividad facilitó la identificación de los contornos de frecuencia, especialmente de la sílaba acentuada de la palabra. En algunos casos, los participantes fueron capaces de aislar la vibración que caracterizaba al primer fonema de la palabra, distinguiendo, por ejemplo, el marcado patrón vibratorio de alta frecuencia asociado a un sonido /rr/ en comparación con el sonido más sutil que acompaña a un sonido /v/.

Para jugar a la Lotería de Colores, los participantes recibieron “cartones de lotería” personalizados. Se trataba de cartones blancos tamaño carta con 9 o 16 casillas (dispuestas en una matriz de 3 x 3 o de 4 x 4). El participante también recibía un montón de fichas de póquer de colores (verde, rojo, blanco, azul, rosa, negro y/o café). Sólo estaban disponibles las fichas correspondientes a las palabras que se estaban practicando en esa sesión concreta. Por ejemplo, para jugar durante la sesión nueve, el participante sólo disponía de fichas de color rojo, verde, blanco y azul. El instructor elegiría al azar un nombre de color para pronunciarlo vibrotáctilmente. Por cada palabra correctamente identificada, el

participante colocaba la ficha del color correspondiente en una ranura vacía del "cartón de lotería". El juego terminaba cuando todos los espacios del "cartones de lotería" contenían una ficha.

Por último, la actividad denominada "práctica de producción oral del habla" solía ser un periodo breve, de entre 10 y 5 minutos. El sujeto experimentaba libremente la retroalimentación vibrotáctil con su propia voz. El instructor guiaba y entrenaba al sujeto para lograr la articulación correcta de las palabras.

Conclusiones

Los hallazgos electrofisiológicos y conductuales analizados en este capítulo aportan pruebas de las consecuencias para el neurodesarrollo de la privación auditiva temprana y consideramos que sientan las bases para futuras investigaciones destinadas a estudiar la variación dinámica neurofisiológica del cerebro relacionada con el entrenamiento de la discriminación vibrotáctil de características sonoras y estímulos lingüísticos, además de que demuestran la gran capacidad plástica del cerebro para reorganizarse y hacer uso de la vía somatosensorial para procesar estímulos auditivos.

En el primer estudio, discutimos cómo González-Garrido y colaboradores (2017) observaron un componente P300 de mayor amplitud y más distribuido después del entrenamiento, como evidencia de la nueva habilidad de los participantes sordos para la discriminación vibrotáctil de tonos de diferente frecuencia. Esto se interpretó como la necesidad de un ajuste funcional más significativo y una mayor demanda de recursos de atención y memoria. Además, la exploración del segundo estudio de las medidas de EEG cuantitativo (Ruiz-Stovel *et al.*, 2021) sugiere que las medidas de mayor potencia delta ampliamente distribuidas en el grupo de sordos con respecto de los controles, pueden representar mecanismos cognitivos menos especializados dedicados a procesar las características de los estímulos, como la frecuencia o la duración, en individuos con sordera profunda. Por último, el tercer estudio explora conductualmente cómo el entrenamiento de estímulos lingüísticos aporta valiosa

información sobre la forma en que podrían diseñarse e implementarse estudios futuros de entrenamiento orientados al lenguaje.

En resumen, la organización intermodal del cerebro, la distribución más difusa de los recursos, así como la mayor excitabilidad cortical que se ha observado en los individuos sordos profundos, podrían representar una ventana de oportunidad para lograr un procesamiento eficiente de los estímulos del lenguaje con información somatosensorial complementaria mediante programas de entrenamiento más prolongados.

Los cambios plásticos asociados a un nuevo aprendizaje, como resultado de tan solo unas cuantas semanas de entrenamiento, permitieron desarrollar una nueva habilidad para procesar información auditiva en adultos sordos y dotarla de contenido semántico de indudable base lingüística. No podemos asegurar que pudiera alcanzarse una experticia en la discriminación vibrotáctil de estímulos lingüísticos y no lingüísticos en personas con sordera profunda, pero con base en nuestros hallazgos cabe preguntarse: ¿Cuál sería el grado de desarrollo a alcanzar, en términos neurofuncionales, si un niño sordo profundo adquiere desde temprana edad el lenguaje oral a través de este código vibrotáctil? ¿Qué implicaciones tendría para su desarrollo cognitivo y su adaptación académica?

Considerando que la estimulación vibrotáctil puede favorecer el procesamiento de sonidos en personas con sordera profunda, por lo que nos proponemos en futuros experimentos explorar la estimulación vibrotáctil como un mecanismo de apoyo en el aprendizaje de la correspondencia grafema-fonema en niños con sordera profunda prelocutiva que inician el aprendizaje de la lectura. Además de la importante contribución que la estimulación vibrotáctil puede tener para la atención de las personas con sordera, sin duda, el estudio de este tipo de pacientes representa un interesante modelo clínico para estudiar el neurodesarrollo, clave para el conocimiento de la dinámica del desarrollo neurofuncional cerebral y sus determinantes genéticas y ambientales.

Referencias

- Amadeo, M. B., Campus, C., Pavani, F., & Gori. (2019). Spatial cues influence time estimations in deaf individuals. *iScience*, 19, 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.07.042>
- Ammirante P., Russo F. A., Good A., & Fels D. I. (2013). Feeling voices. *PloS One*, 8(1), 369-377. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053585>
- Andersson, U., Lyxell, B., Rönnerberg, J., & Spens, K. E. (2001). Effects of tactile training on visual speechreading: Performance changes related to individual differences in cognitive skills. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 6(2), 116-129. <https://doi.org/10.1093/deafed/6.2.116>
- Auer Jr, E. T., Bernstein, L. E., Sungkarat, W., & Singh, M. (2007). Vibrotactile activation of the auditory cortices in deaf versus hearing adults. *Neuroreport*, 18(7), 645. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3280d943b9>
- Ayala, A. (15 de mayo de 2019) *Gaceta: LXIV/1SPR-3/95429*. Gaceta del Senado. https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_comision_permanente/documento/95429
- Bach-y-Rita, P. (2004). Tactile sensory substitution studies. *Annals-New York Academy of Sciences*, 1013, 83-91.
- Bach-y-Rita, P., & Kerchel, S. W. (2003). Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12), 541-546. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.10.013>
- Bailey, P. J., & Snowling, M. J. (2002). Auditory processing and the development of language and literacy. *British Medical Bulletin*, 63(1), 135-146.
- Bavelier, D., & Hirshorn, E. A. (2010). I see where you're hearing: how cross-modal plasticity may exploit homologous brain structures. *Nature Neuroscience*, 13(11), 1309. <https://doi.org/10.1038/nn1110-1309>
- Bebko, J. M., & Metcalfe-Haggert, A. (1997). Deafness, language skills, and rehearsal: A model for the development of a memory strategy. *Journal Of Deaf Studies And Deaf Education*, 131-139.
- Bellugi, U., O'Grady, L., Lillo-Martin, D., Hynes, M. G., van Hoek, K., & Corina, D. (1990). Enhancement of spatial cognition in deaf

- children. En V. Volterra, & C.J. Erting (Eds.), *From gesture to language in hearing and deaf children* (pp. 278-298). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bernstein, L. E., Tucker, P. E., & Auer E. T., Jr. (1998). Potential perceptual bases for successful use of a vibrotactile speech perception aid. *Scandinavian Journal of Psychology*, 39(3), 181-186. <https://doi.org/10.1111/1467-9450.393076>
- Birnbaum, D. M. (2007). *Musical vibrotactile feedback* [tesis de maestría, McGill University]. Escholarship Mcgill. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/xd07gx894>
- Bolognini, N., Cecchetto, C., Geraci, C., Maravita, A., Pascual-Leone, A., & Papagno, C. (2012). Hearing shapes our perception of time: temporal discrimination of tactile stimuli in deaf people. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(2), 276-286. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00135
- Boothroyd, A., & Hnath-Chisolm, T. (1988). Spatial, tactile presentation of voice fundamental frequency as a supplement to lipreading: Results of extended training with a single subject. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 25(3), 51-56.
- Braun C., Haug M., Wiech K., Birbaumer N., Elbert T., & Roberts L. E (2002). Functional organization of the primary somatosensory cortex depends on the focus of attention. *Neuroimage*, 17(3), 1451-1458. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1277>
- Campbell, R., & MacSweeney, M. (2004) Neuroimaging studies of crossmodal plasticity and language processing in deaf people. En G. Calvert, C. Spence, & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 773-784). The MIT Press.
- Chamberlain, C. (1994). *Do the deaf "see" better?: effects of deafness on visuospatial skills* [tesis de maestría, McGill University]. Escholarship Mcgill. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/6969z308b>
- Carretié, A. (2001). *Psicofisiología*. Ediciones Pirámide.
- Cartier, C., Diniz, C., Di Girogio, L., Bittencourt, J., Gongora, M., Tanaka, G. K., Teixeira, S., Basile, L. F., Novis, F., Silveira, L. A., De Assis Da Silva, R., Cagy, M., Cheniaux, E., Ribeiro, P., & Velasques, B. (2015). Changes in absolute theta power in bipolar patients during a saccadic attention task. *Psychiatry Research*, 228(3), 785-790. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2015.05.025>

- Chamberlain, C., Morford, J. P., & Mayberry, R. I. (2000). *Language acquisition by eye: Early language acquisition*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Chen, S., Zhu, Y., & Wayland, R. (2017). Effects of stimulus duration and vowel quality in cross-linguistic categorical perception of pitch directions. *PLoS One*, *12*(7), e0180656. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180656>
- Chomsky, N. (2011). Language and other cognitive systems. What is special about language?. *Language Learning and Development*, *7*(4), 263-278. <https://doi.org/10.1080/15475441.2011.584041>
- Dye, M. W., & Bavelier, D. (2010). Attentional enhancements and deficits in deaf populations: an integrative review. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *28*(2), 181-192. <https://doi.org/10.3233/RNN-2010-0501>
- Eberhardt, S. P., Bernstein, L. E., Demorest, M. E., & Goldstein Jr, M. H. (1990). Speechreading sentences with single-channel vibrotactile presentation of voice fundamental frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *88*(3), 1274-1285.
- Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations-signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, *20*(2), 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2010.02.015>
- Ferguson, B., & Lew-Williams, C. (2016). Communicative signals support abstract rule learning by 7-month-old infants. *Scientific Reports*, *6*(1). <https://doi.org/10.1038/srep25434>
- Ferguson, B., & Waxman, S. (2016). Linking language and categorization in infancy. *Journal of Child Language*, 1-26.
- Fries, P. (2015). Rhythms for cognition: communication through coherence. *Neuron*, *88*(1), 220-235. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.034>
- Fujisaki, H., & Kawashima, T. (1971). A model of the mechanisms for speech perception: Quantitative analysis of categorical effects in discrimination. *Annual Report of the Engineering Research Institute*, *30*, 59-68.
- Furth, H. G. (1963). Conceptual discovery and control on a pictorial part-whole task as a function of age, intelligence and language. *Journal of Educational Psychology*, *54*(4), 191-196. <https://doi.org/10.1037/h0041351>

- Furth, H. G. (1966). A comparison of reading test norms of deaf and hearing children. *PubMed*, 111(2), 461-462. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/5931107>
- Gervain, J., Berent, I., & Werker, J. F. (2012). Binding at birth: The newborn brain detects identity relations and sequential position in speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(3), 564-574. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00157
- Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., Pope, J. V., & Verrillo, R. T. (2002). A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory & Motor Research*, 19(2), 114-124. <https://doi.org/10.1080/08990220220131505>
- Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., & Pelli, D. G. (1992). Effects of noise on detection of amplitude increments of sinusoidal vibration of the skin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(1), 348-353. <https://doi.org/10.1121/1.402777>
- Goldstein, N. E., & Feldman, R. S. (1996). Knowledge of American Sign Language and the ability of hearing individuals to decode facial expressions of emotion. *Journal of Nonverbal Behavior*, 20(2), 111-122. <https://doi.org/10.1007/bf02253072>
- González-Garrido, A. A., Ruiz-Stovel, V. D., Gómez-Velázquez, F. R., Vélez-Pérez, H., Romo-Vázquez, R., Salido-Ruiz, R.A., Espinoza-Valdez, A., & Campos, L. R. (2017). Vibrotactile discrimination training affects brain connectivity in profoundly deaf individuals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 28. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00028>
- Gori, M., Sandini, G., & Burr, D. (2012). Development of visuo-auditory integration in space and time. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnint.2012.00077>
- Güdücü, Ç., Ergönül, İ., Öñiz, A., İ̇kiz, A. Ö., & Özgören, M. (2019). Deaf adolescents have bigger responses for somatosensory and visual stimulations. *Neuroscience Letters*, 707, 134283. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.134283>
- Gumá-Díaz, E., & González-Garrido, A. A. (2001). Los potenciales relacionados a eventos cognitivos. En V.M. Alcaraz-Romero y E. Gumá-Díaz (Eds.), *Texto de neurociencias cognitivas* (pp. 413-442). Manual Moderno.

- Haile, L. M., Kamenov, K., Briant, P. S., Orji, A. U., Steinmetz, J. D., Abdoli, A., Abdollahi, M., Abu-Gharbieh, E., Afshin, A., Ahmed, H. and Rashid, T. A., & Rao, C. R. (2021). Hearing loss prevalence and years lived with disability, 1990–2019: findings from the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 397(10278), 996-1009. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00516-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00516-X)
- Hegner, Y. L., Lee, Y., Grodd W., & Braun C. (2010). Comparing tactile pattern and vibrotactile frequency discrimination: A human fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 103(6), 3115-3122. <https://doi.org/10.1152/jn.00940.2009>
- Heming, J. E., & Brown, L. N. (2005). Sensory temporal processing in adults with early hearing loss. *Brain and Cognition*, 59(2), 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2005.05.012>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021, 16 de marzo). *Censo de Población y Vivienda 2020, Tabulados*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Tabulados>
- Jones, S. R., Kerr, C. E., Wan, Q., Pritchett, D. L., Hämäläinen, M., & Moore, C. I. (2010). Cued spatial attention drives functionally relevant modulation of the mu rhythm in primary somatosensory cortex. *Journal of Neuroscience*, 30(41), 13760-13765. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.2969-10.2010>
- Jung, W., Jang, K., & Lee, S. H. (2019). Heart and brain interaction of psychiatric illness: a review focused on heart rate variability, cognitive function, and quantitative electroencephalography. *Clinical Psychopharmacology and Neuroscience*, 17(4), 459-474. <https://doi.org/10.9758/cpn.2019.17.4.459>
- Kaczmarek, K. A., Webster, J. G., Bach-y-Rita, P., & Tompkins, W. J. (1991). Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38(1), 1-16.
- Knyazev, G. G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(1), 677-695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
- Kral, A. (2007). Unimodal and cross-modal plasticity in the 'deaf' auditory cortex. *International Journal of Audiology*, 46(9), 479-493.
- Kushalnagar, P., Hannay, H. J., & Hernandez, A. E. (2010a). Bilingualism and attention: A study of balanced and unbalanced bilingual deaf

- users of American Sign Language and English. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 15(3), 263-273. <https://doi.org/10.1093/deafed/enq011>
- Kushalnagar, P., Mathur, G., Moreland, C. J., Napoli, D. J., Osterling, W., Padden, C., & Rathmann, C. (2010b). Infants and children with hearing loss need early language access. *The Journal of Clinical Ethics*, 21(2), 140-142. <https://doi.org/10.1086/jce201021208>
- Lai, S., Mecarelli, O., Pulitano, P., Romanello, R., Davi, L., Zarabla, A., ... & Lai, C. (2016). Neurological, psychological, and cognitive disorders in patients with chronic kidney disease on conservative and replacement therapy. *Medicine*, 95(48), e5191. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005191>
- Lalo, E., Gilbertson, T., Doyle, L., Lazzaro, V. D., Cioni, B., & Brown, P. (2007). Phasic increases in cortical beta activity are associated with alterations in sensory processing in the human. *Experimental Brain Research*, 177(1), 137-145. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0655-8>
- Lehnert-Lehouillier, H. (2013). From long to short and from short to long: Perceptual motivations for changes in vocalic length. En Yu, A. (Ed.), *Origins of sound change: approaches to phonologization* (pp. 98-111). Oxford University Press.
- Leppänen, P. H. T., Hämäläinen, J. A., Salminen, H. K., Eklund, K. M., Guttorm, T. K., Lohvansuu, K., & Lyytinen, H. (2010). Newborn brain event-related potentials revealing atypical processing of sound frequency and the subsequent association with later literacy skills in children with familial dyslexia. *Cortex*, 46(10), 1362-1376. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.06.003>
- Levänen S., Jousmäki V., & Hari R. (1998). Vibration-induced auditory-cortex activation in a congenitally deaf adult. *Current Biology*, 8(15), 869-872. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(07\)00348-X](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(07)00348-X)
- Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54(5), 358-368. <https://doi.org/10.1037/h0044417>
- Ling, D., & de Manrique, C. M. (2002). *El maravilloso sonido de la palabra: programa auditivo-verbal para niños con pérdida auditiva*. Trillas.

- Marchesi, A. (1998). *El desarrollo cognitivo y lingüístico de los niños sordos: perspectivas educativas*. Alianza Editorial.
- Marschark, M. (2003). Interactions of language and cognition in deaf learners: From research to practice. *International Journal of Audiology*, 42(sup1), 41-48.
- Marschark, M., & Everhart, V. S. (1999). Problem-solving by deaf and hearing students: Twenty questions. *Deafness & Education International*, 1(2), 65-82. <https://doi.org/10.1179/146431599790561370>
- Marschark, M., & Harris, M. (2013). Success and failure in learning to read: The special case (?) of deaf children. En *Reading comprehension difficulties* (pp. 279-300). Routledge.
- Marschark, M., & Hauser P. C. (Eds.). (2008). *Deaf cognition: Foundations and outcomes*. Oxford University Press.
- Marschark, M., & Wauters, L. (2008). Language comprehension and learning by deaf students. En M., Marschark, & P.C., Hauser (Eds.), *Deaf cognition: Foundations and outcomes* (pp. 309-351). Oxford University Press.
- Mayberry R. I. (2002). Cognitive development in deaf children: The interface of language and perception in neuropsychology. En S.J. Segalowitz y I. Rapin (Eds.), *Handbook of neuropsychology* (pp. 71-107). Elsevier Science B.V.
- Mayberry, R. I. (2007). When timing is everything: Age of first-language acquisition effects on second-language learning. *Applied Psycholinguistics*, 28(3), 537-549. <https://doi.org/10.1017/s0142716407070294>
- Mayberry, R. I., & Lock, E. (2003). Age constraints on first versus second language acquisition: Evidence for linguistic plasticity and epigenesis. *Brain and Language*, 87(3), 369-384. [https://doi.org/10.1016/s0093-934x\(03\)00137-8](https://doi.org/10.1016/s0093-934x(03)00137-8)
- Meadow, K. P. (1968). Toward a developmental understanding of deafness. *Journal of Rehabilitation of the Deaf*, 2(1), 14.
- Micheloyannis, S., Stam, C. J., Fountoulakis, E., Bourkas, M., Arvanitis, S., & Papanikolaou, E. (1998). Use of non-linear EEG analysis to study abnormal brain dynamics in deaf human subjects. *Neuroscience Letters*, 249(2-3), 167-171. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(98\)00287-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(98)00287-0)

- Moallem, T. M., Reed, C. M., & Braidia, L. D. (2010). Measures of tactual detection and temporal order resolution in congenitally deaf and normal-hearing adults. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6), 3696-3709. <https://doi.org/10.1121/1.3397432>
- Morton, N. E. (1991). Genetic epidemiology of hearing impairment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 630(1), 16-31.
- Mueller, J. L., Friederici, A. D., & Männel, C. (2012). Auditory perception at the root of language learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(39), 15953-15958. <https://doi.org/10.1073/pnas.1204319109>
- Musselman, C. (2000). How do children who can't hear learn to read an alphabetic script? A review of the literature on reading and deafness. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 5(1), 9-31.
- Myklebust, H. R. (1960). *The psychology of deafness: Sensory deprivation, learning, and adjustment*. Grune & Stratton.
- Neville, H. J., & Lawson, D. (1987). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task. III. Separate effects of auditory deprivation and acquisition of a visual language. *Brain Research*, 405(2), 284-294. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(87\)90297-6](https://doi.org/10.1016/0006-8993(87)90297-6)
- Olusanya, B. O., Neumann, K. J., & Saunders, J. E. (2014). The global burden of disabling hearing impairment: A call to action. *Bulletin of the World Health Organization*, 92(5), 367-373. <https://doi.org/10.2471/BLT.13.128728>
- Orr, A. W., Helmke, B.P., Blackman, B.R., & Schwartz, MA. (2006). Mechanisms of mechanotransduction. *Developmental Cell*, 10(1), 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2005.12.006>
- Paul, P.V. (2009). *Language and Deafness* (4a ed.). Jones and Barlett Learning, LLC.
- Petitto, L. A., Holowka, S., Sergio, L. E., Levy, B., & Ostry, D. J. (2004). Baby hands that move to the rhythm of language: hearing babies acquiring sign languages babble silently on the hands. *Cognition*, 93(1), 43-73. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.10.007>
- Petitto, L. A., & Marentette, P. F. (1991). Babbling in the manual mode: Evidence for the ontogeny of language. *Science*, 251(5000), 1493-1496. <https://doi.org/10.1126/science.2006424>
- Pintner, R., & Patterson, D. G. (1971). Psychological tests for deaf children. *Volta Review*, 19, 661-667.

- Pisoni, D. B. (1973). Auditory and phonetic memory codes in the discrimination of consonants and vowels. *Perception & Psychophysics*, 13(2), 253-260. <https://doi.org/10.3758/BF03214136>
- Plant, G., & Risberg, A. (1983). The transmission of fundamental frequency variations via a single channel vibrotactile aid. *Speech Transmission Lab. Quarterly Progress and Status Report*, 24, 61-84.
- Plant, G., Gnosspelius, J., & Levitt, H. (2000). The use of tactile supplements in lipreading Swedish and English: A single-subject study. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 43(1), 172-183. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4301.172>
- Rahman, Md.S., Barnes, K.A., Crommett, L.E., Tommerdahl, M., & Yau, J.M. (2020). Auditory and tactile frequency representations are co-embedded in modality-defined cortical sensory systems. *Neuroimage*, 215, 116837. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116837>
- Reed C.M. (1996). The implications of the Tadoma method of speech reading for spoken language processing. *Spoken Language*, 3, 1489-1492. <https://doi.org/10.1109/ICSLP.1996.607898>
- Reed, C. M., Rabinowitz, W. M., Durlach, N. I., Braidia, L. D., Conway-Fithian, S., & Schultz, M. C. (1985). Research on the Tadoma method of speech communication. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 247-257. <https://doi.org/10.1121/1.392266>
- Reeb-Sutherland, B. C., Fifer, W. P., Byrd, D. L., Hammock, E. A., Levitt, P., & Fox, N. A. (2011). One-month-old human infants learn about the social world while they sleep. *Developmental Science*, 14(5), 1134-1141. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01062.x>
- Rettenback, R., Diller, G., & Sireteanu, R. (1999). Do deaf people see better? Texture segmentation and visual search compensate in adult but not in juvenile subjects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(5), 560-583. <https://doi.org/10.1162/089892999563616>
- Rothenberg, M., & Molitor, R. D. (1979). Encoding fundamental frequency into vibrotactile frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 66(4), 1029-1038. <https://doi.org/10.1121/1.383322>
- Ruiz-Stovel, V. D & González-Garrido, A.A. (2020). Vibrotactile perception: an alternative to facilitate language acquisition and promote neurodevelopment in prelingual, profoundly deaf individuals. En

- P.R. Pettit (Ed.), *Deafness: Current perspectives and research developments* (pp. 71-116). NovaScience Publishers, Inc.
- Ruiz-Stovel, V. D., González-Garrido, A., Gómez-Velázquez, F., Alvarado-Rodríguez, F., & Gallardo-Moreno, G. (2021). Quantitative EEG measures in profoundly deaf and normal hearing individuals while performing a vibrotactile temporal discrimination task. *International Journal of Psychophysiology*, 166, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.05.007>
- Russo, F. A., Ammirante, P., & Fels, D. I. (2012). Vibrotactile discrimination of musical timbre. *Journal of Experimental Psychology Human Perception Performance*, 38(4), <https://doi.org/822-6>. 10.1037/a0029046
- Schick, B., Marschark, M., & Spencer, P. E. (2005). *Advances in the sign language development of deaf children* (Vol. 15). Oxford University Press.
- Schroeder, C. E., Lakatos, P., Kajikawa, Y., Partan, S., & Puce, A. (2008). Neuronal oscillations and visual amplification of speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.002>
- Steel, K. P. (1998). Progress in progressive hearing loss. *Science*, 279(5358), 1870-1871.
- Swisher, M. V. (1993). Perceptual and cognitive aspects of recognition of signs in peripheral vision. En M. Marschark y D. Clark (Eds.), *Psychological perspectives on deafness* (pp. 209-227). Lawrence Erlbaum.
- Tedrus, G. M., Negreiros, L. M., Ballarim, R. S., Marques, T. A., & Fonseca, L. C. (2019). Correlations between cognitive aspects and quantitative EEG in adults with epilepsy. *Clinical EEG and Neuroscience*, 50(5), 348-353. <https://doi.org/10.1177/1550059418793553>
- Tharpe, A. M., Ashmead, D. H., & Rothpletz, A. M. (2002). Visual attention in children with normal hearing, children with hearing aids, and children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45(2), 403-413.
- Trezek, B. J., Wang, Y., & Paul, P. V. (2010). *Reading and deafness: Theory, research, and practice*. Delmar Cengage Learning.
- Van Ede, F., de Lange, F., Jensen, O., & Maris, E. (2011). Orienting attention to an upcoming tactile event involves a spatially and

- temporally specific modulation of sensorimotor alpha-and beta-band oscillations. *Journal of Neuroscience*, 31(6), 2016-2024. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5630-10.2011>
- Verrillo, R. T. (1963). Effect of Contactor Area on the Vibrotactile Threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(12), 1962-1966. <https://doi.org/10.1121/1.1918868>
- Verrillo, R. T., & Bolanowski, S. J. (2003). Effects of temperature on the subjective magnitude of vibration. *Somatosensory & Motor Research*, 20(2), 133-137. <https://doi.org/10.1080/089902203100105163>
- Verrillo, R. T., & Capraro, A. J. (1974). Effect of simultaneous auditory stimulation on vibrotactile thresholds. *Perception & Psychophysics*, 16(3), 597-600. <https://doi.org/10.3758/bf03198591>
- Verrillo, R. T., & Smith, R. L. (1976). Effect of stimulus duration on vibrotactile sensation magnitude. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8(2), 112-114. <https://doi.org/10.3758/bf03335097>
- Vouloumanos, A., & Waxman, S. R. (2014). Listen up! Speech is for thinking during infancy. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(12), 642-646.
- Waldstein, R. S., & Boothroyd, A. (1995). Comparison of two multi-channel tactile devices as supplements to speechreading in a post-lingually deafened Adult. *Ear and Hearing*, 16(2), 198-208. <https://doi.org/10.1097/00003446-199504000-00007>
- Wolff, A. B., & Thatcher, R. W. (1990). Cortical reorganization in deaf children. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 12(2), 209-221. <https://doi.org/10.1080/01688639008400968>
- Yu, A.C., Lee, H., & Lee, J. (2014, May 13-16). *Variability in perceived duration: pitch dynamics and vowel quality* [Conference paper]. *Fourth International Symposium on Tonal Aspects of Languages*, International Speech Communication Association (ISCA), Nijmegen, The Netherlands.
- Yuan, H. F., Reed, C. M., & Durlach, N. I. (2003). Tactual displays of consonant voicing to supplement speechreading. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(4), 2291-2291. <https://doi.org/10.1121/1.4808834>
- Yuan, H. F., Reed, C. M., & Durlach, N. I. (2005). Tactual display of consonant voicing as a supplement to lipreading. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(2), 1003-1015. <https://doi.org/10.1121/1.1945787>

Young, G. W., Murphy, D., & Weeter, J. (2015, julio). Vibrotactile discrimination of pure and complex waveforms. En *Proceedings of the 12th Sound and Music Computing Conference (SMC)* (pp. 359-362).