



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

**Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
División de Ciencias Biológicas
Departamento de Ciencias Ambientales**

INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS

**Cambios electrofisiológicos asociados al entrenamiento
en la decodificación de estímulos vibro-táctiles en
individuos sordos.**

Tesis

que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIA DEL COMPORTAMIENTO
(ORIENTACIÓN NEUROCIENCIA)**

presenta

Vanessa Doreen Ruiz Stovel

Comité tutorial

Dr. Andrés González Garrido (Director)

Dra. Julieta Ramos Loyo

Dra. María Esmeralda Matute Y Villaseñor

Agradecimientos

Mi mas sincera gratitud a todas la personas que hicieron posible llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mis jefes de laboratorio Fabiola y Andrés, todo mi respeto y mi cariño. Gracias por su apoyo incondicional, dedicación y paciencia. Es mucho lo que he aprendido y lo que me queda por aprender de ustedes.

Al Dr. Andrés, director de este trabajo, gracias por su creatividad y pasión por la ciencia y por ese espíritu innovador.

A Faby por su entusiasmo, su seguridad, por su estilo didáctico siempre tan enriquecedor y su gran habilidad para aterrizar lo imposible.

A Luis Campos por su espíritu soñador y por haberme compartido su vocación y sus experiencias de vida.

A todos los participantes y sus familiares por su tiempo y disposición de aportar a la ciencia.

A la Asociación de Sordos de Jalisco, A.C. y La Asociación Deportiva, Cultural y Recreativa de Silentes de Jalisco A.C. por su interés, su participación y buena voluntad.

A mis asesoras de tesis, Dra. Julieta Ramos y Dra. Esmeralda Matute, por sus observaciones y sugerencias a lo largo de este proceso creativo.

A todos mis maestros y compañeros de maestría del Instituto de Neurociencias que fueron parte esencial de mi formación académica y personal.

A tres generaciones del Laboratorio de Neurofisiología Clínica, todos de alguna manera son colaboradores y aportaron un granito de arena, en especial al Mtro. Erwin Villuendas por su valiosa asesoría.

A mis padres y mi hermanos, quienes han sido las constantes de mi vida y un sólido pilar siempre, esto no hubiera sido posible sin su compañía y apoyo en cada momento de mi trayectoria. En especial a mis padres, les debo mis logros y todo lo que soy porque me han brindado una vida con infinitas oportunidades.

A mi esposo Paul por su amor, su apoyo constante, su paciencia, sus palabras de aliento y por ser una fuerza que siempre impulsa a superarme. Gracias por compartir la visión de este proyecto.

RESUMEN

La privación de la audición desde temprana edad implica no sólo una deficiencia sensorial específica, sino la incapacidad para adquirir el lenguaje oral del modo habitual, teniendo importantes repercusiones sobre el neurodesarrollo del individuo y afectando subsecuentemente el desarrollo de las habilidades cognitivas. El método de sustitución sensorial que consiste en la discriminación vibro-táctil de ondas sonoras, es uno de los métodos de asistencia que se han implementado para lograr la percepción y discriminación del sonido, e incluso, para facilitar la adquisición del lenguaje oral en pacientes con sordera bilateral profunda. El objetivo fue analizar los cambios en el desempeño conductual y en la actividad eléctrica cerebral (particularmente respecto al componente P300) de un grupo de sordos bilaterales profundos (n=10) respecto a un grupo de normo-oyentes (n=10) en 2 tareas de discriminación vibro-táctil de tonos puros y una tarea control de discriminación visual, después de un periodo de entrenamiento (5 sesiones de 1 hora en un periodo de 2 a 3 semanas) en la discriminación vibro-táctil de ondas sonoras. Se obtuvieron los Potenciales Relacionados con Eventos (PREs de cada grupo) durante la ejecución de tres paradigmas de tipo odd-ball (150 estímulos; frecuencia: 20/80; IIE: 1500 mseg), en los cuales los sujetos debían detectar un estímulo infrecuente (I) en tonos puros de diferente frecuencia (Tarea 1: 700 Hz [I] vs 900 Hz [F]), en tonos de diferente duración (Tarea 2: 500 mseg [I] vs 250 mseg [F]) y en estímulos visuales de diferente color (Tarea 3: círculo amarillo [I] vs círculo azul [F]). Posterior al entrenamiento, se observa una tendencia en la ejecución conductual a mostrar un incremento en las respuestas correctas en ambas tareas vibro-táctiles en los dos grupos, siendo significativa la mejoría únicamente en la tarea de discriminación de duración de

tonos. No se encontraron diferencias significativas respecto al tiempo de reacción, ni en la ejecución de la tarea visual. En los resultados electrofisiológicos, hay un aumento significativo en la amplitud de P300 en los dos grupos en las tareas de discriminación vibro-táctil como producto del entrenamiento. En el grupo de los sordos el componente parece alcanzar mayor voltaje y una distribución topográfica más amplia tanto en el pre-entrenamiento, como en el post-entrenamiento. Un hallazgo significativo fue el incremento parietal derecho en la amplitud de voltaje del componente P300 obtenido post-entrenamiento en los sordos. Los cambios en la actividad eléctrica cerebral parecen estar ligados con el proceso de aprendizaje al que se someten todos los sujetos. Las diferencias entre los grupos podrían ser explicadas en términos de la neuroplasticidad compensatoria que ha sido observada en el neurodesarrollo cuando existe la privación de la audición desde temprana edad.

Palabras claves: sordera bilateral profunda, discriminación vibro-táctil, P300.

ABSTRACT

Early auditory deprivation has serious neurodevelopmental and cognitive repercussions mainly explained by the inability of most deaf individuals to acquire spoken language conventionally. Vibrotactile stimulation has been considered an alternative method that allows perception and discrimination of sound, and even oral language. Two oddball vibrotactile tasks (pure-tone frequency [target (T): 700Hz; non-target (NT): 900Hz] and pure-tone duration discrimination [T: 500ms; NT: 250ms]), as well as, a control visual discrimination task (target (T): yellow circle); non-target (NT): blue circle) were performed by 10 profound deaf and 10 normal-hearing (NH) subjects before and after a training period (5 one-hour sessions; in 2-3 weeks) with simultaneous EEG recording. Sound-wave stimuli were delivered by a stimulator system worn on the right index finger. Behavioral results showed a general tendency of increment in correct responses in the two vibrotactile tasks in both the deaf group and the NH group. There was only a significant performance improvement in the duration discrimination task, but no significant group differences were observed. No relevant latency differences were found. A significant P3 amplitude increase was found in both vibrotactile tasks as a function of learning in the two groups. However, ERPs showed a P3-like component in the 2 tasks displaying greater amplitude and wider topographical distribution in the deaf group both before and after training. In the deaf group specifically, there was a significant voltage increase in the right parietal region in the frequency discrimination task. As expected, no behavioral or electrophysiological differences were found in the visual discrimination task. In conclusion, learning-related performance and brain activity changes were observed in both the deaf group and the NH group after a brief training period in

vibrotactile discrimination of sound. Electrophysiological differences in the deaf group may be interpreted as reflecting greater neural processing efficiency of rare vibrotactile stimuli after training. Moreover, group differences may be partially due to learning-related brain activity changes and/or underlying neurodevelopmental differences related to early auditory deprivation.

Key words: deafness, vibrotactile, P300.

ÍNDICE

Introducción	11
1. Audición	15
1.1. El Sonido y sus Características.....	15
1.2. Anatomía Funcional del Sistema Auditivo	17
1.3. Sinopsis de la Función Auditiva.....	20
2. Los Déficits Auditivos	23
2.1. Clasificación y Etiología	23
2.2. Implicaciones cognitivas, psicológicas y sociales	26
3. Métodos de Comunicación para Sordos	27
3.1 Comunicación manual: Lenguajes de Señas.....	28
3.2 Comunicación Oral: Lectura labio-facial y oralización	29
3.2.1 Aparatos de asistencia auditiva	29
3.3 Comunicación alternativa: Método de Sustitución Sensorial.....	30
3.3.1 El Método Tadoma: Comunicación a través del tacto	31
3.3.2 Sistemas de estimulación vibro-táctil para sordos.....	33
4. El Sistema Somatosensorial	37
4.1. Los Mecanorreceptores.....	39
4.1.1 Detección de vibración	40
4.2 Procesamiento Cortical Somatosensorial	42
5. Plasticidad Cerebral	45
5.1. Reorganización cortical intermodal	46
5.2 Procesamiento cortical heteromodal.....	50
6. Estudios de la Actividad Cerebral	50
6.1. Potenciales Relacionados con Eventos (PREs)	51
6.2. Estudios con Potenciales Relacionados con Eventos (PREs).....	57
7. Planteamiento del Problema	59
8. Objetivos e Hipótesis	61
8.1. Objetivo General	61
8.2. Objetivos específicos	61

8.3. Hipótesis general	62
8.4. Hipótesis específicas	62
9. Método	63
9.1 Participantes	63
9.2. Criterios de inclusión:	65
9.3 Criterios de no inclusión:	65
9.4 Criterios de exclusión:	65
9.5 Variables	66
9.6 Material, instrumentos y equipo	66
9.7 Tareas Experimentales	67
9.7.1 TAREAS EXPERIMENTALES SOMATOSENSORIALES.....	68
9.7.2 TAREA EXPERIMENTAL VISUAL.....	69
9.8. Procedimiento	71
9.8.1 Entrenamiento.....	74
9.8.2. Registro electrofisiológico.....	83
10. Resultados	85
10.1. Resultados conductuales	85
10.2. Resultados electrofisiológicos	90
11. Discusión General	109
Referencias Bibliográficas	123
Anexos	135

Introducción

La sordera profunda es un complejo déficit sensorial que repercute en la vida del individuo en aspectos sociales, económicos, cognitivos y psicológicos. La audición juega un importante papel en habilidades cognitivas tales como el pensamiento abstracto, la metacognición y otras funciones ejecutivas complejas, dado que las anteriores, son mediadas en gran parte por el lenguaje. La pérdida auditiva puede incluso generar sentimientos de aislamiento y soledad influyendo en el bienestar psicológico de la persona y la formación de una identidad dentro de un contexto social. En consecuencia, la sordera siempre ha sido un tema delicado y difícil de abordar por la comunidad científica.

La instrucción de métodos de comunicación para sordos ha tenido dos enfoques principales: el manual y el oral. Sin embargo, la gran variabilidad entre los diferentes tipos de sordera, las numerosas etiologías y la inconsistencia de resultados de los diferentes medios alternativos de comunicación que se han utilizado, son factores que han dificultado la búsqueda de avances que ofrezcan a las personas sordas una mejor calidad de vida. Durante muchos años, se han diseñado aditamentos para ayudar a mejorar la recepción y transmisión de información auditiva, buscando darles a las personas con sordera bilateral profunda acceso al mundo de los sonidos que los rodean y abriéndoles la posibilidad de adquirir el lenguaje hablado.

Los aparatos de asistencia auditiva, como los audífonos, amplían el sonido con diferentes niveles de fidelidad, pero sólo pueden beneficiarse de ellos los individuos con alguna capacidad auditiva residual; los aparatos que transducen la señal auditiva en impulsos eléctricos al nervio auditivo, como los implantes cocleares, han sido de gran utilidad para individuos con sordera bilateral profunda, aunque la calidad de la

información transmitida está en función de la cantidad de canales que se dispongan para tal propósito, donde a menor número de canales mayor es la pérdida o distorsión de la información auditiva.

Tanto los audífonos como los implantes cocleares han representado importantes avances en esta área, sin embargo, siguen presentando limitaciones que restringen las posibilidades de los individuos sordos para alcanzar un desarrollo armónico y una adecuada adaptación social.

Este trabajo de investigación gira en torno a una tercera opción de apoyo para las personas con sordera, el percibir el sonido por medio de la sustitución sensorial, fenómeno que se refiere en este caso al uso del sentido del tacto para recibir información normalmente recibida por otra modalidad sensorial, la auditiva. Esta manera diferente de procesar el sonido no busca aprovechar las capacidades auditivas residuales de los individuos, sino más bien sustituirlas por la vía somatosensorial como medio de codificación de los estímulos auditivos. Se han diseñado varios equipos que pretenden aprovechar esta vía para decodificar estímulos auditivos, aunque la investigación en esta área es aún escasa y los estudios realizados han obtenido resultados variables en dependencia de la forma en que se transmite la señal auditiva a la vía somatosensorial.

En este proyecto estudiamos la manera en la que los individuos sordos pueden llegar a percibir y reconocer estímulos auditivos a través del tacto, y cómo un entrenamiento en esta decodificación puede modificar el procesamiento cerebral de la información a nivel electrofisiológico. El método de sustitución sensorial empleado implica la percepción de los estímulos sonoros a través de una membrana plástica que vibra en respuesta a las ondas de presión generadas por los sonidos, la cual es colocada

en el dedo índice del individuo. Esta membrana plástica tiene un rango de vibración muy amplio sin distorsión de la señal auditiva, lo que parece abrir la posibilidad de procesar señales auditivas complejas de manera continua a través de la estimulación vibro-táctil.

La codificación, identificación y procesamiento posterior de características distintivas del estímulo vibro-táctil pueden, eventualmente, determinar la aparición de cambios eléctricos cerebrales cuyo estudio nos permitiría comprender mejor estos procesos y las diferencias determinadas por una pérdida auditiva temprana, lo que constituye el objeto principal del presente trabajo.

En los antecedentes teóricos de este estudio, se describe el sistema sensorial de la audición, los déficits auditivos, los métodos de comunicación para sordos, el método de sustitución sensorial como método de comunicación alternativa, el funcionamiento del sistema somatosensorial, algunos mecanismos de plasticidad cerebral y estudios relacionados de la actividad cerebral. Posteriormente, se plantean las preguntas, objetivos e hipótesis de investigación, así como el método utilizado. Para finalizar, se dan a conocer los resultados y se realiza la discusión de los hallazgos.

1. Audición

El sistema sensorial auditivo es un sentido particularmente importante cuyo objetivo principal es la percepción del sonido. Los receptores tienen la capacidad de transducir vibraciones tan pequeñas como del tamaño de un átomo y su tiempo de respuesta es miles de veces más rápido que el de los fotorreceptores del sistema visual. El oído humano tiene la capacidad de procesar vibraciones moleculares entre los 20 Hz y los 2,000 Hz (ciclos por segundo). El espectro auditivo del humano no es constante en las diferentes etapas de la vida y es diferente al de otras especies en función de la especialización anatómica del sistema auditivo determinada por sus necesidades evolutivas. Por ejemplo, los bebés nacen con una sensibilidad mayor para las frecuencias altas, incluso superiores a los 20 kHz, pero esta sensibilidad disminuye con la maduración. En promedio, el límite superior de audición de un adulto sin afectaciones auditivas está entre los 15 y los 17 kHz. A pesar de que los humanos somos altamente “visuales”, la audición forma parte esencial no únicamente de la percepción del entorno sino también de la comunicación (Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia, McNamara & Williams, 2004).

1.1. El Sonido y sus Características

El sonido es un fenómeno físico que consiste en ondas de presión generadas por la vibración de las moléculas del aire. Las ondas sonoras se propagan en 3 dimensiones creando ondas esféricas, concéntricas y periódicas alternando la compresión y la

rarefacción de partículas. El estímulo sonoro tienen 4 características físicas principales: amplitud, frecuencia, complejidad de la onda y duración. Estas dimensiones físicas del estímulo tienen una relación con la dimensión perceptual que experimentamos al escuchar un sonido.

Por ejemplo, la amplitud es una característica que se expresa en decibeles (dB) y representa la cualidad subjetiva percibida como intensidad de un sonido. De acuerdo a la intensidad, que depende principalmente de la presión sonora, es que se puede caracterizar a un sonido como fuerte o débil. La frecuencia de una vibración se expresa en hercios (Hz), o ciclos de la onda por segundo, y esta característica determina lo que percibimos como el tono o la altura del sonido que nos permite distinguir entre un tono agudo o alto y un tono grave o bajo. La duración percibida, siendo el intervalo temporal en el que el sonido persiste sin discontinuidad, es muy similar a la duración del estímulo físico del sonido debido a la rápida transducción que realiza el sistema nervioso. Y por último, la cuarta característica que nosotros experimentamos como el timbre de un sonido está definida por una característica física más compleja, la forma de la onda que depende de sus componentes y determina la complejidad de una onda sonora. Una onda sonora compleja está constituida por un espectro de sonido, una serie de ondas sinusoidales, cada una con su propia frecuencia y amplitud que en conjunto conforma el sonido percibido. Los sonidos escuchados en la naturaleza y la vida diaria son en su mayoría complejos patrones de vibración. Existen también sonidos compuestos por una sola onda sinusoidal, estos son los tonos puros, aquellos utilizados en los laboratorios y en estudios de grabación (Pinel, 2004; Purves et al., 2004).

1.2. Anatomía Funcional del Sistema Auditivo

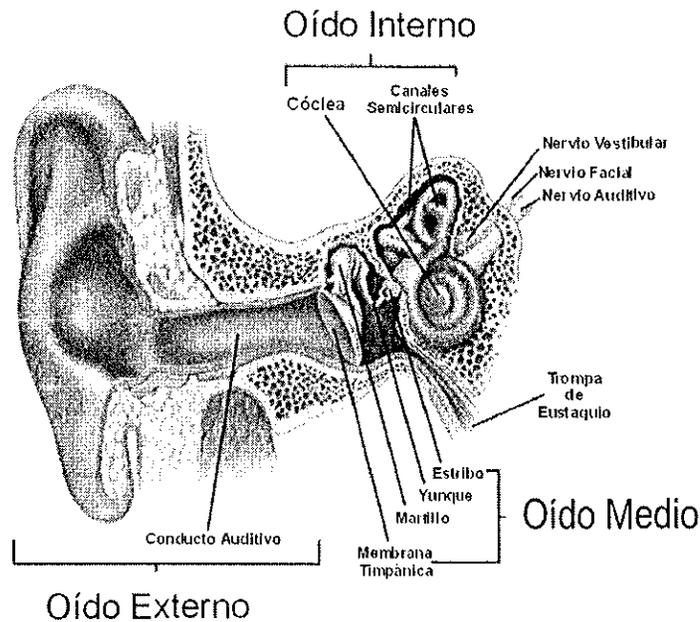


Figura 1.1. Estructura anatómica del sistema auditivo. Tomado de http://orlcba.com/estudios_audiologicos.htm

El órgano auditivo por medio del cual se percibe el sonido puede ser dividido en 3 partes anatómicas: el oído externo, el oído medio y el interno. El oído externo está conformado por la púa, la concha y el meato auditivo externo, también conocido como el canal auditivo externo. En conjunto estas tres estructuras se encargan de capturar la energía del sonido y amplificarla dirigiéndola hacia las estructuras del oído medio. La forma que tiene el canal auditivo externo selectivamente amplifica la presión del sonido de 30 hasta 100 veces en frecuencias alrededor de los 3kHz, lo cual hace al humano más sensible a frecuencias en el rango de los 2 a los 5 kHz. Esta sensibilidad del sistema auditivo humano está directamente relacionada con la percepción del lenguaje oral, dado

que este ocurre en el rango de frecuencias de menores kHz (2-5 kHz) para sobrepasar el ruido del entorno. Por ejemplo, la energía de las consonantes “plosivas” (como la “b” y la “p”) que distingue a los diferentes fonemas (las unidades elementales de los sonidos del lenguaje hablado), se concentra alrededor de los 3kHz. Otra cosa que justificaría la selectividad humana de frecuencias es que el aparato vocal del humano, a diferencia de otros animales, no está diseñado para emitir fácilmente sonidos de altas frecuencias. Una segunda función importante del oído externo, es que las convoluciones de la pina y la concha filtran de manera selectiva diferentes frecuencias con el objetivo de proporcionar pistas de la elevación de la fuente de sonido.

El oído medio, formado por la membrana timpánica y 3 osículos o huesecillos auditivos (el martillo, yunque y estribo), es la parte anatómica en donde ocurren dos procesos mecánicos importantes para la audición. Su función principal es la de emparejar la baja impedancia (resistencia al movimiento del medio) del aire por el cual viaja la energía del sonido con la mayor impedancia del fluido del oído interno por el cual viajarán las vibraciones del sonido. El oído medio soluciona el problema de la diferencia de impedancias entre un medio y otro, al amplificar la presión casi 200 veces de la membrana timpánica al oído interno. Una primera amplificación se logra cuando la fuerza ocasionada en la membrana timpánica por las vibraciones del sonido es canalizada a través de la ventana oval que es una estructura de mucho menor diámetro. El segundo proceso mecánico es producto de la acción de los huesecillos que conectan la membrana timpánica con la ventana oval. Es por esto que en sorderas de conducción una amplificación artificial de la presión del sonido puede parcialmente superar la ineficiencia con la que se transmite la energía del sonido por el mal funcionamiento de

los huesecillos en el oído medio. Hay 2 pequeños músculos asociados con el movimiento mecánico de los huesecillos del oído medio que protegen al oído interno de ruidos intensos, estos son el músculo tensor del tímpano y el estapedio. Ambos se activan de manera refleja con sonidos de 60 a 80 dB.

En el oído interno se encuentra el órgano crítico para la percepción sensorial del sonido, la cóclea, misma que transforma las ondas de presión que componen un sonido en impulsos eléctricos. Sin embargo este proceso no es tan sencillo, adicionalmente actúa como un analizador mecánico de frecuencias que descompone las ondas acústicas complejas en elementos más sencillos. Muchas de las características de la percepción auditiva se derivan de las propiedades físicas de la cóclea. La cóclea es un tubo de aproximadamente 35 mm de largo y 10 mm de ancho que está enroscado en forma de caracol. En su interior tiene 3 compartimentos llamados rampa vestibular, rampa media y rampa timpánica que contienen perilinfa. El órgano de Corti está compuesto por 2 membranas: la membrana basilar (localizada entre la rampa timpánica y la rampa media) y la membrana tectorial. Las células ciliadas, que son las células receptoras auditivas, están montadas sobre la membrana basilar y la membrana tectorial descansa sobre ellas.

La manera en que vibra la membrana basilar ante las ondas de sonido es la clave para entender el funcionamiento de la cóclea. Diferentes partes de la membrana responden de manera más intensa a un sonido de una frecuencia específica y esto se debe a la geometría de la membrana, que es más rígida y estrecha en la base y más ancha y flexible en la terminación apical. El movimiento generado por la energía de un estímulo siempre comienza en la base y se propaga en dirección de la parte de la membrana más flexible. El punto máximo de desplazamiento de la membrana se localiza en función de la

frecuencia del estímulo. Los puntos que responden ante altas frecuencias se encuentran en la base rígida de la membrana basilar y aquellos que responden ante bajas frecuencias están en el apex. A esta distribución topográfica de frecuencias a lo largo de la membrana se le llama tonotopía, organización que se conserva incluso en la corteza auditiva. Los sonidos complejos compuestos por varios tonos individuales generan un patrón de vibraciones equivalente. Este proceso de descomposición espectral del sonido es lo que nos permite detectar varias combinaciones armónicas que distinguen a diferentes sonidos naturales (Kandel, Schwartz & Jessell, 2000; Purves et al., 2004).

1.3. Sinopsis de la Función Auditiva

La función primaria del sistema auditivo es la transformación de las ondas de sonido en diferentes patrones de actividad neuronal. La primera etapa de esta transformación ocurre en el oído externo y el oído medio que captan las ondas sonoras y amplifican su presión para que la energía del sonido propagada en el aire pueda ser exitosamente transmitida al medio líquido dentro de la cóclea en el oído interno. Las ondas de presión que viajan a través del canal auditivo generan movimiento de la membrana timpánica cuya vibración activa una reacción en cadena de movimiento de los huesecillos que canaliza la energía a la ventana oval, el sitio de contacto del oído medio con el oído interno. En el oído interno una serie de procesos biomecánicos descomponen la señal en componentes sinusoidales más simples. Las características del estímulo sonoro original como la frecuencia, la amplitud y la fase son fielmente transducidas por las células ciliadas y codificadas en la actividad eléctrica de las fibras aferentes del nervio auditivo. La onda de movimiento provocada por la vibración del sonido desplaza la

membrana basilar generando un movimiento de la membrana tectorial que dobla las células ciliadas hiperpolarizando o despolarizando la célula así generando potenciales de acción en los axones del nervio auditivo (el par craneal VIII).

El procesamiento auditivo a nivel del sistema nervioso central inicia en el núcleo coclear, donde la información auditiva periférica diverge en numerosas vías centrales paralelas. Los axones de cada nervio auditivo hacen sinapsis con el núcleo coclear ipsilateral, del cual salen múltiples proyecciones a las olivas superiores, estructura donde por primera vez interactúa información proveniente de los dos oídos, interacción importante para la localización del sonido en el espacio. Los axones de los núcleos olivares a su vez se proyectan vía el lemnisco lateral al colículo inferior. Este núcleo del mesencéfalo es el centro integrador de información auditiva y donde esta información interactúa con el sistema sensorial motor, siendo un núcleo de relevo de información hacia el núcleo geniculado medial del tálamo y la corteza. Finalmente es en la corteza donde se procesan integradamente aspectos de las combinaciones temporales y armónicas características del lenguaje y de la música.

La corteza auditiva primaria (A1) está localizada en el giro temporal superior del lóbulo temporal y está rodeada de varias áreas auditivas secundarias. Esta corteza primaria tiene una organización tonotópica, ya que la cóclea se encargó de fragmentar los estímulos acústicos complejos de manera tonotópica a lo largo de la membrana basilar. Por ende, A1 conserva esta tonotopía y se activan las regiones anteriores ante las frecuencias altas y las áreas posteriores en respuesta a frecuencias bajas. De manera ortogonal al eje de frecuencia de este mapa tonotópico, se organizan columnas de neuronas de acuerdo a propiedades binaurales. Las neuronas en una columna son excitadas

por información proveniente de ambos oídos y la columna de neuronas adyacente se excita por la estimulación de un oído al mismo tiempo que son inhibidas por el oído contrario. Estas columnas se alternan de manera muy similar a las columnas de dominancia ocular en la corteza primaria visual. Pero más allá de un procesamiento tonotópico y binaural, en la corteza auditiva y áreas adyacentes se encuentran distribuidas redes neurales independientes que procesan diferentes tipos de patrones de sonidos complejos, como de sonidos naturales y patrones complejos del habla.

Las neuronas de la corteza auditiva secundaria no conservan la misma organización tonotópica descrita, probablemente porque estas áreas procesan sonidos complejos como los de la música y el lenguaje. Las áreas de comprensión del lenguaje están localizadas en zonas inmediatamente adyacentes a la corteza auditiva. Kanwal y colaboradores (2000, citado en Purves et al., 2004) realizaron un estudio de resonancia magnética funcional (IRMf) para examinar la localización neural del procesamiento de 3 diferentes tipos de patrones acústicos complejos: patrones complejos acústicos del habla, de la música y del entorno. La activación de estas distintas redes neurales para cada procesamiento reveló una importante lateralización hemisférica para cada una de los patrones, una activación predominante en cortezas auditivas en el hemisferio izquierdo ante patrones complejos de sonidos del habla, una activación predominante en el hemisferio derecho ante patrones complejos de melodías musicales y una activación principalmente bilateral ante patrones complejos de sonido del entorno (Gazzaniga, 2004; Kandel et al., 2000; Pinel, 2004; Purves et al., 2004).

2. Los Déficits Auditivos

2.1. Clasificación y Etiología

Los déficits auditivos son la discapacidad con mayor prevalencia a nivel mundial (ASHA, 2011). En México, 498,640 personas padecen de discapacidad auditiva (INEGI, 2010). En general la discapacidad auditiva se clasifica en 4 tipos: la hipoacusia conductiva, la hipoacusia neurosensorial, la hipoacusia mixta y la hipoacusia central. Esta clasificación está relacionada principalmente con la parte específica en donde se localiza el daño responsable del déficit auditivo. El tipo de sordera también define los medios alternativos de comunicación que pudieran beneficiar al individuo en el desarrollo del lenguaje hablado (Marchesi, 1998).

En la hipoacusia conductiva el trastorno auditivo está causado por alteraciones en el oído externo o el oído medio. Los problemas del oído externo se pueden deber a malformaciones congénitas del pabellón auditivo o del canal auditivo, a la inmovilización de los huesecillos del oído medio, a obstrucciones en el oído externo o a la presencia de secreciones. Las causas más comunes de la hipoacusia conductiva son la otitis media producida por infecciones o bloqueos de las trompas de Eustaquio, la otoesclerosis, las lesiones traumáticas y la faringoamigdalitis, que impiden una vibración adecuada del tímpano y los huesecillos en respuesta a las ondas sonoras. En los casos que no se producen lesiones permanentes este tipo de sordera puede ser temporal y reversible, ya sea con tratamiento o con determinada intervención quirúrgica. Los sordos con hipoacusia conductiva pueden utilizar un auxiliar auditivo que amplifique el sonido.

Por otro lado, la hipoacusia neurosensorial es más grave y de pronóstico más complicado. Se debe a problemas en la cóclea (malformaciones o pérdida de células

ciliadas), daño en el nervio vestibulo-coclear o en las cortezas auditivas. Hay varias causas de este tipo de sordera tales como malformaciones del oído interno, medicamentos ototóxicos, neurinoma del acústico y otras diversas lesiones cerebrales. Más adelante se mencionará la clasificación general de las etiologías de la hipoacusia. Los sordos con hipoacusia neurosensorial, sólo se benefician de los audífonos digitales que amplifican el sonido en frecuencias específicas de acuerdo a sus necesidades individuales. El implante coclear también es una opción para esta población, siendo el alto costo una limitante. Se ha visto que una edad temprana de implantación es el predictor más importante de resultados favorables en esta intervención quirúrgica (Marchesi, 1998). La hipoacusia mixta es la pérdida auditiva como resultado de una combinación de problemas conductivos y neurosensoriales. Las causas pueden abarcar cualquier combinación de aquellas determinantes de hipoacusia conductiva y neurosensorial mencionadas. Por último, la hipoacusia central está causada por alguna lesión cortical o subcortical, por ejemplo ocasionada por la presencia de un tumor o un problema cerebro vascular.

Las diferentes causas de la sordera son un importante factor de variabilidad entre los sujetos 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 diagnosticar la etiología con exactitud. Algunos estudios han estimado que el 50% de las sorderas tienen bases hereditarias, específicamente un 10% son determinadas por un gen dominante y el resto por genes recesivos. Las sorderas adquiridas tienden a asociarse con otros trastornos o alteraciones de otro tipo cuando son producidas por enfermedades como la rubéola y la meningitis, la anoxia perinatal, la incompatibilidad de factor Rh o la administración de antibióticos ototóxicos (ej. aminoglicósidos). La incidencia de las sorderas adquiridas ha

disminuido con los avances médicos que controlan enfermedades y prohíben el uso de ciertos medicamentos (Kandel et al., 2000; Marchesi, 1998).

El grado de pérdida auditiva es un término audiológico general que se refiere a todos los grados de pérdida, independientemente de la etiología o la localización del daño que ocasiona la hipoacusia. La agudeza de la audición se mide en decibeles (dB) a lo largo de un espectro de frecuencias, típicamente de 125 a 8000 Hz. El oído humano responde logarítmicamente a la potencia del sonido. Esta es la razón por la cual el sonido también se mide en dB, una medida exponencial de intensidad. El umbral de audición es la intensidad mínima que puede ser percibida por el paciente y este se mide tanto en la conducción aérea, como en la conducción ósea. En el caso de las pérdidas conductivas, los umbrales de conducción aérea están aumentados y los de conducción ósea están normales. En pérdidas neurosensoriales ambos umbrales están aumentados (Marchesi, 1998).

La agudeza auditiva se reporta como el umbral promedio de tonos puros (PTA: *pure tone average*) en el mejor oído (sin aparato) en tres frecuencias importantes para la percepción del habla: 500, 1000 y 2000 Hz. De acuerdo con la Acoustical Society of America (1982), existen 5 categorías audiológicas que corresponden al grado de pérdida auditiva en relación al PTA (Paul, 2009): la hipoacusia menor (27-40 dB), leve (41-55 dB), moderada (56-70 dB), severa (71-90 dB) y profunda (mayor a 91 dB). Las intensidades de algunos sonidos comunes nos proporciona un panorama de qué tipo de ruidos puede o no percibir un paciente según su grado de pérdida auditiva; por ejemplo, la intensidad de un susurro (30 dB), una conversación normal (50 a 65 dB), el ruido de una aspiradora o secadora de pelo (70 dB), una licuadora (85 dB), instrumentos de

construcción como un taladro o una sierra eléctrica (110 dB), un trueno (120 dB), el motor de un avión (140 dB), y un estéreo de alto sonido de un automóvil (145 dB). En este contexto, un paciente con un grado de pérdida auditiva moderada ya presenta dificultad para oír una conversación normal y aquellos pacientes con grados de pérdida superiores son incapaces de percibir muchos de los ruidos de su entorno y el lenguaje oral, por lo que se les dificulta adquirir el lenguaje por la vía auditiva (National Institute on Deafness and other Communication Disorders, 2012).

2.2. Implicaciones cognitivas, psicológicas y sociales

Las sordera profunda es un complejo déficit sensorial que repercute en la vida del individuo en aspectos sociales, económicos, cognitivos y psicológicos. La privación de la audición desde temprana edad implica no sólo una deficiencia sensorial específica, sino la incapacidad para adquirir el lenguaje oral de modo habitual, teniendo importantes repercusiones sobre el neurodesarrollo del individuo y afectando subsecuentemente el desarrollo de las habilidades cognitivas. El pensamiento abstracto, la metacognición y otras funciones ejecutivas complejas son mediadas en gran parte por el lenguaje oral (ver Marschark & Hauser, 2008, para revisión extensa).

Más allá del desarrollo cognitivo, la audición también juega un importante papel en el bienestar psicológico de la persona y la formación de una identidad dentro de un contexto social. De acuerdo con Sutton-Spence y Woll (2000, citado en Campbell & MacSweeney, 2004) aproximadamente entre el 90-95% de los sordos nacen en un hogar con padres normo-oyentes, cuyo medio de comunicación primario no es el lenguaje de señas, sino oral. El otro 5-10% de la población con sordera son sordos nacidos de

padres sordos y aprenden lenguaje de señas en el hogar como lengua materna, adquiriendo el lenguaje de manera muy similar a los niños normo-oyentes (Bellugi & Fischer, 1972; Klima & Bellugi, 1979; Lidell, 1980; Sacks, 1989; Petitto et al, 2001, citados en Campbell & MacSweeney, 2004). Es por ello que la gran mayoría de los niños sordos están privados de un elemento crítico del desarrollo de la ecología del lenguaje, el contexto comunicativo e informativo que comparte un niño y su cuidador (Vygotsky, 1962, 1978, citados en Campbell & MacSweeney, 2004), lo que puede ser devastador en cuanto a la formación de fuertes vínculos maternos en el desarrollo y una gran limitante para la convivencia familiar. De hecho, se ha descrito que la pérdida auditiva puede generar sentimientos de aislamiento y soledad (Kandel et al., 2000).

3. Métodos de Comunicación para Sordos

La comunicación es una necesidad del ser humano y por lo tanto la búsqueda de métodos de comunicación para personas con limitaciones de esta naturaleza es de suma importancia. Se estima que en México el 12.4% de la población con discapacidad auditiva tiene una limitación para hablar o comunicarse (INEGI, 2010), estadística que implica que este porcentaje de la población no ha sido oralizada, ni ha aprendido el lenguaje de señas para comunicarse. En la actualidad, los métodos alternativos de comunicación para personas con sordera severa han tenido resultados muy variables probablemente debido a la gran heterogeneidad de esta población. Es por esto que la búsqueda de medios de comunicación alternativos que faciliten la adquisición del

lenguaje oral y permitan a este grupo de personas una mejor integración a la sociedad sigue siendo un enorme reto para la investigación científica (Marschark & Hauser, 2008).

A lo largo de la historia y alrededor del mundo, la instrucción de métodos de comunicación para sordos ha tenido dos enfoques principales, el manual y el oral. El sistema de signos metódicos fue inventado por el abate francés Charles Michel L'Épée alrededor de 1760, cuando fundó en París la primera institución pública que ofreció educación a los sordos. Por otro lado, desde 1778 en Alemania se estaba desarrollando un método diferente, el método llamado oral puro. Samuel Heinicke, al igual que L'Épée fundó la primera escuela para sordos de su país. El método alemán enfatizaba la importancia de un enfoque exclusivamente oral basado principalmente en el uso de los auxiliares auditivos, el entrenamiento auditivo y la lectura labio-facial. En ambos métodos es obvia la importancia de la visión tanto para percibir el lenguaje de señas, como el oral. (Segura Malpica, 2005)

3.1 Comunicación manual: Lenguajes de Señas

Los lenguajes de señas, como el lenguaje de señas mexicano (LSM), representan medios de comunicación muy importantes dentro de la comunidad de sordos (Segura Malpica, 2005). Sin embargo, factores socioeconómicos y educativos pueden limitar el aprendizaje de este medio de comunicación. La incompatibilidad entre los diferentes sistemas de señas en el mundo e inclusive las diferencias regionales dentro de un mismo país es problemática. Por ejemplo, el lenguaje de señas norteamericano (ASL) y el lenguaje de señas británico (BSL) son distintos, aún cuando los dos son lenguajes utilizados en países angloparlantes. Este medio es parte importante de la identidad de la

comunidad sorda, pero se ha visto que no promueve la integración y formación de vínculos sociales con la mayoría de la población que es oyente y se comunica por medio del lenguaje hablado (Paul, 2009).

3.2 Comunicación Oral: Lectura labio-facial y oralización

La educación del lenguaje oral no ha evolucionado mucho en los últimos 25 años, aunque la tecnología, como los implantes cocleares y audífonos que lo facilitan sí. La oralización de sordos consta de dos abordajes principales, un abordaje unisensorial y otro multisensorial. El abordaje unisensorial se enfoca en desarrollar la audición, en caso que el individuo tenga audición residual, o el sentido del tacto o visión (lectura de labios). El uso del tacto es importante para personas que no se benefician de abordajes orales tradicionales y que se enfocan en audición y/o visión. El abordaje multisensorial es más balanceado ya que combina el uso de varios sentidos. Para algunas personas la combinación de la audición residual y la lectura de labios ha resultado ser más efectiva que un abordaje unisensorial. El desarrollo del lenguaje en el caso de niños sordos en hogares oyentes depende principalmente de la lectura de labios. En la mayoría de los casos para estos niños la lectura de labios es el único medio que les da acceso al lenguaje que los rodea (Paul, 2009).

3.2.1 Aparatos de asistencia auditiva

Durante muchos años se han diseñado aditamentos para ayudar a mejorar la recepción y transmisión de información auditiva, buscado darles a las personas con

sordera bilateral profunda acceso al mundo de los sonidos que los rodean y abriéndoles la posibilidad de adquirir el lenguaje hablado.

Los aparatos de asistencia auditiva, como los audífonos, amplían el sonido con diferentes niveles de fidelidad, pero sólo pueden beneficiarse de ellos los individuos con alguna capacidad auditiva residual. Los aparatos que transducen la señal auditiva en impulsos eléctricos al nervio auditivo, como los implantes cocleares, han sido de gran ayuda para los individuos con sordera bilateral profunda, aunque la calidad de la información transmitida está en función de la cantidad de canales que se dispongan para tal propósito, donde a menor número de canales mayor es la pérdida o distorsión de la información auditiva.

Tanto los audífonos como los implantes cocleares han representado importantes avances en esta área, sin embargo, siguen presentando limitaciones que restringen las posibilidades de los individuos sordos para alcanzar un desarrollo armónico y una adecuada adaptación social (Marschark & Hauser, 2008; Paul, 2009).

3.3 Comunicación alternativa: Método de Sustitución Sensorial

La sustitución sensorial se refiere al uso de un sentido humano para recibir información normalmente recibida por otra modalidad sensorial (Kaczmarek, Webster, Bach-y-Rita & Tompkins, 1991) y puede ser audio-táctil, vibro-táctil o incluso visual-táctil. Por ejemplo, en los sistemas de sustitución visual-táctil desarrollados para ciegos (Bach-y-Rita et al., 1969 citado en Kaczmarck et al., 1991) se emplean estimuladores sobre una matriz bidimensional que presentan información espacial sobre la piel de manera similar en que la información espacial se presenta sobre la retina.

El potencial existente para desarrollar sistemas de comunicación basados en una vía de percepción vibro-táctil ha sido menos explorado, sin embargo, como comenta Abbate (2007, p.2), “la extendida heterogeneidad de la población está demostrando el aumento en las limitaciones de un abordaje único de instrucción y comunicación ...” (citado en Marschark & Hauser, 2008). Desde los lenguajes de señas e implantes cocleares hasta los aparatos de estimulación vibro-táctil, la diversificación de medios alternativos de comunicación ha sido imprescindible para mejorar la calidad de vida de los pacientes afectados con una pérdida auditiva.

3.3.1 El Método Tadoma: Comunicación a través del tacto

La utilidad del tacto como sentido complementario para el desarrollo del lenguaje y la comunicación fue inicialmente evaluada tras la implementación de un sistema para personas sordo-ciegas que utilizó el método Tadoma entre 1930 y 1960 en Massachusetts. El método consiste en obtener información a través de las articulaciones y las vibraciones emitidas al hablar. Ambas muy útiles para la recepción del lenguaje como para el aprendizaje de la producción del lenguaje en estos individuos. La recepción del sonido se logra colocando el dedo pulgar ligeramente sobre los labios y extendiendo los otros dedos sobre la mejilla y cuello del interlocutor. Tanto los fonemas vocálicos como consonánticos podían ser percibidos táctilmente.

Reed (1996) realizó un estudio que evaluaba esta capacidad de usar exclusivamente el sentido del tacto para la recepción del lenguaje hablado en sujetos sordo-ciegos entrenados para emplear el método Tadoma. Los experimentos de su estudio evaluaban la recepción de sílabas aisladas, palabras aisladas y oraciones (2.5 sílabas por

segundo). Los autores suponen que el éxito de los sordos-ciegos experimentados en el uso de esta modalidad sensorial como medio de comunicación, está basado en su habilidad única para procesar los estímulos táctiles de una conversación continua, abstrayendo el significado de patrones de vibración táctil en combinación con movimientos faciales. En el estudio, los sordo-ciegos integraban segmentos de información junto con conocimiento semántico y sintáctico, y así lograban la recepción de un mensaje en un contexto específico con un grado razonable de precisión. Reed (1996) concluyó que la capacidad de recepción del lenguaje hablado y de hacer uso de información contextual que requiere cierto grado de conciencia lingüística, indica que la estimulación táctil establece una base del lenguaje y permite acceso al lenguaje hablado.

Existen estudios del empleo del método Tadoma en sujetos normo-oyentes y videntes, sin entrenamiento alguno. Reed, Rubin, Braida y Durlach (1978, citados en Chomsky, 1986) exploraron la capacidad de estos sujetos para discriminar componentes básicos del lenguaje como vocales, consonantes, sílabas y palabras aisladas. Los resultados de esta investigación revelaron que la sensibilidad táctil de un sujeto típico inexperimentado en el método Tadoma, es comparable con la de un sordo-ciego experimentado. En un estudio posterior (Reed, Doherty, Braida & Durlach, 1982, citados en Reed, 1996), sujetos normales sin experiencia, después de 50 a 100 horas de práctica, lograron identificar sólo segmentos de palabras, mas no lograron la recepción de una conversación como la de los usuarios sordo-ciegos experimentados, ni siquiera después de 500-600 horas de práctica.

Aunque efectivo para sordo-ciegos que han recibido un entrenamiento adecuado, el método Tadoma tiene sus limitaciones. La rapidez de la recepción auditiva de un sujeto

sordo-ciego usando el método Tadoma es de 30-36 palabras por minuto, un tercio de la rapidez de recepción auditiva bajo circunstancias normales (Reed, 1996). Además la percepción táctil de vibraciones emitidas al hablar por el interlocutor requiere contacto físico, no viable en todas las circunstancias sociales. Sin embargo, estudios en esta línea de investigación proporcionaron pruebas convincentes del potencial del sentido del tacto como medio de recepción del lenguaje y complemento importante para aprendizaje del habla en personas con ciertos déficits sensoriales. Cabe mencionar que se abrió la puerta para futuras investigaciones enfocadas en el desarrollo de aparatos que sustituyeran a la audición como sentido exclusivo de procesamiento del lenguaje hablado.

3.3.2 Sistemas de estimulación vibro-táctil para sordos

Robert H. Gault en 1926 propuso el uso de aparatos vibro-táctiles para sordos con el fin de sustituir la audición con el tacto y se dedicó a desarrollar un “nuevo método” que lograra que los sordos, como él mismo lo describe, “escucharan a través de la piel”. Esta propuesta fue rechazada por Liberman y colaboradores (1968, citados en Plant & Risberg, 1983) quienes creían que la percepción del lenguaje requería un decodificador especial biológicamente conectado al sistema auditivo. Sin embargo, Cole, Rudnicky, Zue y Reddy (1980, citados en Plant & Risberg, 1983) comprobaron que por medio de la información visual presentada en forma de espectrograma una persona podía identificar correctamente 85% de los fonemas articulados. Concluyeron entonces que la audición no es el único sentido por el cual se podía interpretar el lenguaje hablado, sino que también esto era posible por medio de la vista. Estos hallazgos se unen a las evidencias provenientes del éxito en el uso del método Tadoma (dependiente del sistema

somatosensorial para la percepción del lenguaje hablado) todo lo cual parece rechazar la hipótesis de Liberman y colaboradores (Plant & Risberg, 1983).

La señal sonora de la voz tiene una frecuencia fundamental (F0) que puede ser percibida vibro-táctilmente. La capacidad de detectar las pulsaciones transducidas a partir de ondas acústicas sinusoidales es el primer requisito para la percepción de patrones de voz a través de aparatos vibro-táctiles. Bernstein, Schecter & Goldstein (1986, citados en Auer Jr., Bernstein, Sungkarat & Singh, 2007) no encontraron diferencias psicofísicas en la sensibilidad a estímulos vibro-táctiles entre niños sordos y niños oyentes.

Resultados de estudios realizados en los 70's y 80's, indicaron que un aparato vibro-táctil que codificaba la frecuencia fundamental de la voz (F0) podía ser un medio efectivo para proporcionar a personas con sordera severa información útil tanto para la percepción, como para la producción del lenguaje oral. Estos aparatos que codificaban en una señal táctil elementos prosódicos del habla como la variación de la frecuencia fundamental de la voz (F0), mejoraron significativamente la habilidad de lectura de labios (Risberg & Lubker, 1978). En una serie de experimentos con un aparato vibro-táctil, Plant y Risberg (1983) observaron en personas normo-oyentes que la estimulación producida por un rango de frecuencias bajas (< 500 Hz), facilitaba la percepción de la entonación y el conteo de sílabas de una palabra y que el desempeño mejoraba con mayor número de entrenamientos.

El funcionamiento óptimo de estos aparatos depende de muchos factores como edad de inicio de la sordera, si ésta fue prelingual o postlingual, la capacidad de lectura de labios y el uso previo de audífonos para sordos. En sus inicios, la lógica detrás del diseño y de las primeras evaluaciones sugería que adultos con sordera postlingual que

tuvieron un desarrollo normal del lenguaje y tienen habilidades psicolingüísticas tendrían los mejores resultados (Bernstein, Tucker & Auer, Jr., 1998). Rothenberg & Molitor (1979) evaluaron la capacidad de 5 adultos sordos y 8 normo-oyentes para identificar la entonación del lenguaje utilizando un aparato vibro-táctil (F0). El desempeño entre grupos fue similar, aunque se observó una ligera desventaja en los dos sordos congénitos prelingüales, especialmente en el individuo que jamás había utilizado audífono de sordera.

Por su parte, Bernstein y colaboradores (1998) evaluaron el beneficio potencial de tres aparatos de estimulación vibro-táctil que facilitaban la lectura de labios en sordos adultos. Los tres aparatos portátiles utilizados fueron: uno de un solo canal que transducía la frecuencia fundamental de la voz (F0), el segundo de ocho canales y el último de 16 canales. El estudio de Bernstein comprobó que sordos con experiencia en el uso prolongado de aparatos auditivos desde edades tempranas tenían la habilidad de beneficiarse al máximo de aparatos de estimulación vibro-táctil para procesar efectivamente información del lenguaje hablado.

Autores	Descripción	Resultados
Reed, Doherty, Braida & Durlach (1982)	Discriminación de componentes básicos del lenguaje con método Tadoma.	<ul style="list-style-type: none"> • Sujetos normales= sólo palabras (50 a 100 hrs.) • Sordo-ciegos= conversación.
Reed (1996)	Implicaciones del método Tadoma.	<ul style="list-style-type: none"> • Sordo-ciegos lograron recepción de mensaje en un contexto específico con razonable precisión. • 30-36 palabras/min.
Risberg & Lubker (1978) Plant & Risberg (1983)	Aparato vibro-táctil (F0) en normo-oyentes.	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora significativa en lectura de labios. • Entonación, conteo de sílabas y mejoría con entrenamiento.
Rothenberg & Molitor (1979)	Aparato vibro-táctil comparación de sordos y normo-oyentes.	<ul style="list-style-type: none"> • Desempeño similar entre grupos identificando estrés y entonación. • Excepción: sordo congénito pre-lingual.
Bernstein, Tucker & Auer, Jr. (1998)	Comparación de 3 aparatos vibro-táctiles en sujetos sordos.	<ul style="list-style-type: none"> • Máximo beneficio: sordos con un uso prolongado de audífono desde temprana edad.

Tabla 3.1. Resumen de estudios anteriores de la percepción vibro-táctil del sonido.

En 2002 se desarrolló un dispositivo de estimulación vibro-táctil que a diferencia de los primeros aparatos vibro-táctiles, no filtra ni transforma las ondas acústicas de un sonido en una sola señal que transmite únicamente una frecuencia fundamental (Plant & Risberg, 1983), ni fragmenta el sonido en varios canales con distintas bandas de frecuencia (Bernstein et al., 1998). Por lo tanto, el individuo 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. El estimulador cuenta con un micrófono con un alcance de tres metros a la redonda y capta sonidos hasta de 20 dB en esa circunferencia. La transmisión de información a la membrana plástica que vibra en respuesta a las ondas de presión generadas por los sonidos es análoga. Esta membrana plástica es colocada sobre el dedo índice del individuo a través de un porta membrana tipo dedal y tiene un rango de vibración muy amplio (0-10 kHz) sin distorsión de la señal auditiva, lo que parece abrir la posibilidad de procesar señales acústicas de manera diferente.

Sin embargo, no existen reportes de estudios sistemáticos sobre las posibilidades reales de emplear, por medio de este instrumento, la estimulación vibro-táctil como un método eficiente de decodificación y discriminación de los sonidos, ni del lenguaje oral.

4. El Sistema Somatosensorial

Para poder utilizar eficiente y efectivamente la información obtenida por un sistema de sustitución sensorial, el cerebro debe formar nuevas vías neurales funcionales, al desenmascarar vías pre-existentes no utilizadas o redundantes. Si nuestros sentidos se desarrollan a lo largo de años, la habilidad para utilizar sistemas de sustitución sensorial también tardará tiempo en desarrollarse (Kaczmarek et al., 1991). La mano humana contiene miles de mecanorreceptores, aproximadamente 150,000 conectados al SNC por 30,000 fibras aferentes. La densidad de estos receptores es variable según el área de la mano, siendo mayor en las yemas de los dedos (2500 por cm³) y cada yema está inervada por 250 a 300 fibras aferentes. Esta gran convergencia de aferencias en las yemas de los dedos es lo que confiere a las yemas su gran agudeza táctil que permite realizar discriminaciones de texturas y leer Braille (Gardner, 2010).

Todos los sistemas sensoriales codifican cuatro atributos fundamentales de un estímulo: la modalidad (depende del tipo de energía procesada y transducida a impulsos eléctricos por receptores especializados), la ubicación espacial (definida por el conjunto de receptores sensoriales activados por el estímulo), la intensidad (codificada por la frecuencia de potenciales de acción generados) y la duración o el curso temporal (codificado por el patrón de inicio y fin de la respuesta del receptor). Esto implica que

para codificar esta información los sistemas sensoriales en general comparten una organización similar en el sistema nervioso central (Gardner & Martin, 2000).

Tanto la audición como el tacto, son sentidos sensoriales que dependen de mecanorreceptores. En la modalidad auditiva los mecanorreceptores están localizados en el oído interno en la membrana basilar de la cóclea. Estos receptores responden a la deformación de las células ciliadas. La deflexión de células ciliadas en una dirección causada por la estimulación mecánica de las ondas sonoras de un sonido de una frecuencia determinada despolarizan el receptor, en cambio una deflexión en dirección opuesta lo hiperpolariza (Kandel et al., 2000; Purves et al., 2004).

Los procesos neurobiológicos que subyacen la percepción táctil inician con mecanismos de transducción sensorial, la deformación mecánica de la piel se transduce a impulsos eléctricos (potenciales de acción) transmitidos por las terminales nerviosas al sistema nervioso central. Los mecanorreceptores son receptores somatosensoriales localizados en la piel que detectan la energía aplicada sobre la piel. La elasticidad de la piel permite que estos receptores detecten la forma, textura y presión generada por un objeto. Los mecanorreceptores de la piel son las terminales distales de las neuronas somatosensoriales, llamadas aferentes primarias. Las aferentes primarias tiene 3 componentes principales: el cuerpo celular que se encuentra en el asta dorsal de la médula espinal (excepto de las aferentes primarias de la cara y la cabeza), la fibra nerviosa periférica que termina en los receptores especializados de la piel y una rama central que se proyecta al SNC (Pinel, 2004; Purves et al., 2004).

4.1. Los Mecanorreceptores

Las fibras aferentes primarias responden de manera individual y selectiva a clases de estímulos específicos debido a la especialización morfológica y molecular de las terminales periféricas. A diferencia de otras fibras aferentes sensoriales de la piel, los mecanorreceptores tienen una cápsula que envuelve las terminaciones nerviosas distales. Las estructuras capsulares son la conexión entre la terminal nerviosa y la piel por eso desempeñan un rol crucial. La respuesta de los receptores ante el tacto depende la deformación mecánica de la cápsula y la sensibilidad del receptor al desplazamiento mecánico es una propiedad de los canales iónicos en la membrana de la terminación nerviosa (Pinel, 2004; Purves et al., 2004).

Los Corpúsculos de Meissner son receptores que se encuentran principalmente en los labios, las palmas y dedos de la mano y en la planta del pie (Johansson & Valbo, 1983) y están localizados en las indentaciones que forman los patrones de las huellas digitales, justo bajo la superficie del epidermis. Estos son los receptores de adaptación rápida (AR) de la mano por lo cual responden al contacto inicial con la piel y al movimiento, pero no a la presión constante. Cuando la mano se recorre a lo largo de una textura estos receptores disparan potenciales de acción antes las irregularidades de la superficie. Los corpúsculos de Pacini y las terminaciones de Ruffini también son tipos de receptores de tacto subcutáneos que están en la dermis (Talbot, Darian-Smith, Kornhuber & Mountcastle, 1968).

4.1.1 Detección de vibración

Los corpúsculos de Pacini por su estructura morfológica están diseñados para detectar vibración. Son los mecanorreceptores principalmente responsables de la percepción de la vibración, esto fue demostrado por primera vez por Hunt en 1961 (Talbot et al., 1968). Békésy en 1939 realizó el primer experimento que demostró que la detección de vibraciones a frecuencias que exceden los 20 Hz se debe a la actividad de las fibras aferentes que inervan los receptores de Pacini. Más tarde se estableció que tienen un mecanismo capaz de detectar un rango de frecuencias de los 40 a los 300Hz. Hay una hipótesis acerca de la detección de la vibración que postula que la detección de frecuencias “altas” (>30 Hz) se debe a la actividad de los receptores de Pacini (Talbot et al., 1968) y que un conjunto diferente de aferentes correspondientes a los mecanorreceptores de Meissner detectan vibraciones bajas (Verillo, 1963, citado en Brisben, Hsiao & Johnson, 1999). Este mecanismo dual de percepción vibro-táctil se representa con una curva umbral versus frecuencia en la cual la intersección define la transición de frecuencias dominadas por los corpúsculos de Meissner y los de Pacini. La frecuencia de transición es a partir de los 20 a 25 Hz (Brisben et al., 1999).

Hay distintas variables que pueden afectar el desempeño de la percepción vibro-táctil: la frecuencia de la vibración, la duración, la dirección (perpendicular o paralela), la fuerza de contacto, la adaptación de los receptores, el contexto, el sitio de contacto, la temperatura de la piel, etc. (Brisben et al., 1999). Brisben y colaboradores encontraron que la fuerza de contacto en un rango de vibración de 40 a 300 Hz no tiene efecto, que la dirección de la vibración mostró un efecto pequeño más no significativo con un menor

umbral de detección para la vibración en paralelo. Estos autores concluyeron que las variables con mayor efecto fueron el área de contacto y la ubicación del estímulo.

El efecto debido a la ubicación del estímulo en la palma de la mano depende probablemente de la variación de densidad de los receptores de Pacini, ya que no hay evidencias de que haya variaciones en la sensibilidad de los receptores en diferentes áreas de la mano (Mountcastle, 1972, citado en Talbot et al., 1968). Estudios sobre la distribución de estos mecanorreceptores sugieren que hay aproximadamente 350 corpúsculos de Pacini en cada dedo (1,600 en todos los dedos) y 800 en la palma de la mano. Una relación 2 a 1 entre la palma y los dedos (Johansson & Valbo, 1979). Las características físicas más destacadas del corpúsculo es su gran tamaño, múltiples láminas y membrana encapsulada continua (Zelena, 1994, citado en Brisben, 1999). El corpúsculo es una cápsula multilaminar que mide aproximadamente 1mm de largo que contiene fluido y encapsula las terminaciones de las fibras aferentes primarias. El nervio dentro de la cápsula no está recubierto de mielina y las terminaciones tienen canales mecanorreceptores en su membrana sensibles a la compresión. La función principal de las láminas es el proteger la terminal nerviosa aferente que es extremadamente sensible de fuerzas estáticas de bajas frecuencias (alrededor de los 10 Hz). Ante el tacto, las múltiples láminas de la cápsula filtran el estímulo de tal manera que únicamente los desplazamientos rápidos son transmitidos a las terminaciones nerviosas. La distorsión mecánica leve causa simplemente una redistribución del fluido en las láminas externas, sin alterar las láminas internas y las terminaciones nerviosas sin recubrimiento de mielina. En cambio el movimiento mecánico rápido causa una distribución del fluido viscoso en todas las láminas (Lowenstein & Skalak, 1966, citados en Brisben, 1999).

Ante vibraciones alrededor de los 200 Hz, la cápsula es lo suficientemente rígida que no cambia de forma tan rápidamente como las ondas de vibración. Por lo tanto, lo que sucede es que las láminas se mueven hacia arriba y hacia abajo en sincronía con las ondas de vibración, presionando y descomprimiendo el nervio. Cada ciclo de vibración evoca una breve respuesta de despolarización en la terminal nerviosa suficientemente intensa para generar un potencial de acción. Sin embargo, si la frecuencia de la vibración se enlentece a los 20 Hz, el desplazamiento es tan lento que las láminas superiores dentro de la cápsula se comprimen desplazando el fluido lateralmente, mientras que las láminas inferiores que están cerca del nervio se mantienen rígidas. Las terminaciones nerviosas no responden a estímulos de frecuencia baja porque la energía no se transmite de la cápsula a los canales mecanosensoriales en las terminaciones de las fibras aferentes. Esta estructura física del corpúsculo de Pacini explica el por qué su rango de sensibilidad a la vibración es de 100 a 400 Hz. Es el mecanorreceptor más sensible del cuerpo y captura señales en áreas grandes de la piel por su gran tamaño. A una frecuencia de 250 Hz, los humanos son capaces de detectar vibraciones leves desde 1 μm de amplitud (Talbot et al., 1968).

4.2 Procesamiento Cortical Somatosensorial

La información sensorial codificada por el sentido del tacto es conferida al SNC por nervios periféricos aferentes que entran a la médula espinal por el asta dorsal y ascienden por la columna dorsal, junto con las fibras que transmiten información de propiocepción, hasta los núcleos de la columna dorsal en bulbo raquídeo, los núcleos gracilis y cuneatus. Las neuronas de segundo orden que se encuentran en estos núcleos de

la columna dorsal tienen axones que se proyectan y cruzan la línea media de la médula, decusando y ascendiendo por el tracto del lemnisco-medial hasta el núcleo ventral posterolateral (VPL) y el núcleo ventral posterior medial (VPM) del tálamo. En estos núcleos ocurre una gran convergencia de aferencias sensoriales que integran información sensorial de áreas de la piel cercanas. También, las interneuronas inhibitorias en estos núcleos inhiben (suprimen) la actividad de neuronas estimuladas débilmente, agudizando la señal de los grupos de mecanorreceptores más activos, para que así las señales más potentes sean relevadas a áreas superiores. Las redes neurales inhibitorias también se encargan de filtrar el ruido de actividad neural azarosa. Por lo tanto, la señal que es transmitida a la corteza cerebral conserva de manera precisa la información espacial y de intensidad codificada por los mecanorreceptores, al mismo tiempo que integra estas señales para maximizar el reconocimiento de ciertas características.

Penfield y Boldrey en 1937 estudiaron la representación sensorial en la corteza por medio de estimulación eléctrica directa. Estos autores realizaron mediciones de los tamaños relativos de las áreas de proyección primaria en la corteza somatosensorial para diferentes zonas de la piel. Las mediciones permitieron esquematizar la representación cortical de cada parte del cuerpo en proporción a la densidad de inervación cutánea. Es por eso que el “homúnculo”; representación somatotópica de las partes del cuerpo en la corteza somatosensorial, exagera la mano, el pie y la boca comprimiendo otras partes del cuerpo (Purves et al., 2004). Hay aproximadamente 100 veces más neuronas corticales por centímetro cuadrado de piel que codifican el tacto en las yemas de los dedos que en la espalda (Sur, Nelson & Kaas, 1980).

La información somestésica del tálamo es conferida inicialmente a la corteza somatosensorial primaria (SI) localizada en el giro postcentral en el lóbulo parietal (Jones & Friedman, 1982). La corteza SI tiene 4 áreas citoarquitectónicas (áreas de Brodmann 3a, 3b, 1 y 2) que están organizadas en tiras paralelas a lo largo del eje rostro-caudal del lóbulo parietal. Estas 4 áreas están extensamente interconectadas, de tal manera que hay redes neurales de procesamiento en serie y paralelo de información (Pons, Garraghty & Mishkin, 1992). Las aferencias talámicas de los núcleos VPL y VPM se proyectan a las áreas 3a y 3b y estas células sucesivamente proyectan sus axones a otras áreas de la corteza, 1 y 2 respectivamente. La información de los receptores de la piel se procesa en las áreas 3a y después en el área 1, por el contrario las áreas 3b y 2 procesa información propioceptiva. Esta información es transmitida en paralelo de estas 4 áreas en SI a la corteza somatosensorial secundaria (SII), la corteza parietal posterior y la corteza motora primaria (MI).

La SII está localizada en el banco superior adyacente al opérculo parietal de la fisura lateral (Robinson & Burton, 1980) y juega un papel importante en el reconocimiento táctil de los objetos. El contexto en el que se presenta la estimulación influye en la respuesta de las neuronas en la SII. Los patrones de disparo de las neuronas se modifican por la relevancia conductual de la información táctil presentada, o por las memorias de estímulos precedentes, sugiriendo que la corteza SII tal vez sea el punto decisivo en el cual se forma la memoria táctil (Gardner, 2010). Esta hipótesis es consistente con las conexiones anatómicas que existen entre SII y la corteza insular, que a su vez enerva regiones en el lóbulo temporal importantes para la memoria táctil (Friedman, Murray, O'Neill & Mishkin, 1986).

5. Plasticidad Cerebral

Hay cambios en la organización cerebral humana tras la alteración de la experiencia sensorial temprana y la alteración temprana en el curso natural de la adquisición del lenguaje. Algunos sistemas están predominantemente determinados genéticamente y sufren pocos cambios ante alteraciones de la experiencia (ej. ceguera y sordera total). Otros sistemas neurales sin embargo, cambian considerablemente cuando la experiencia es diferente, pero únicamente durante periodos sensitivos limitados y estos varían para los diferentes sistemas. El tercer tipo de sistemas neurales corresponde a aquellos que parecen modificarse con la experiencia a lo largo de la vida. No se conoce mucho sobre los mecanismos que determinan estos diferentes grados de plasticidad en distintos sistemas neurales. Una hipótesis principal es que un factor importante es la sobreproducción de sinapsis que se observan durante el desarrollo cortical (Huttenlocher, 2002; Neville & Bavelier, 1998).

Jordan, Huttenlocher y Levine (1992) y Huttenlocher y Dabholkar (1997), compararon el proceso de sinaptogénesis y eliminación sináptica en diferentes áreas corticales. Estos autores describen los cambios que acompañan el desarrollo de las diferentes áreas corticales importantes para el desarrollo del lenguaje: corteza auditiva primaria, giro angular y área de Broca. Al nacer la corteza auditiva está más avanzada en términos del desarrollo medido en densidad sináptica que las otras dos áreas del lenguaje. Algunos hallazgos estructurales y fisiológicos apoyan el concepto de que los cambios maduracionales son diferentes para áreas cerebrales distintas y sugieren mecanismos mediante los cuales las influencias ambientales podrán afectar diferentes sistemas neurales a diferentes grados y en diferentes periodos. Uno de estos cambios ocurre en los

patrones de utilización de glucosa en el cerebro durante el desarrollo como los describen Chungani y colaboradores (1996, citados en Neville & Bavelier, 1998). En este estudio metabólico, las áreas con un aumento en el metabolismo de la glucosa temprano son las cortezas primarias sensoriales y la corteza motora primaria.

5.1. Reorganización cortical intermodal

Estudiar el peso específico de los factores maduracionales y de la experiencia en la organización cortical funcional del procesamiento sensorial es un problema fundamental en la neurociencia cognitiva. El estudio de la neuroplasticidad en el cerebro en desarrollo ha revelado la capacidad compensatoria del cerebro cuando existe la privación de alguna modalidad, particularmente cuando la pérdida de aferencias sensoriales resulta en una reorganización intermodal. Los cambios plásticos en una misma modalidad parecen estar mediados por cambios locales limitados a un grupo de áreas corticales, sin embargo se piensa que la reorganización intermodal es una modificación más extensa de la conectividad entre ciertas áreas (Neville & Bavelier, 1998).

Varios estudios en modelos animales han mostrado que las áreas corticales destinadas normalmente al procesamiento de una modalidad sensorial asumen el procesamiento de otra modalidad sensorial tras ceguera o sordera temprana. Estos modelos animales (Frost, 1990; Sur, Pallas & Roe, 1990; Von Melchner, Pallas & Sur, 2000) involucran quirúrgicamente dirigir las aferencias de una modalidad a la corteza primaria de otra modalidad. Como se ha hecho con hurones en que las neuronas de la corteza auditiva primaria adquieren sensibilidad a estimulación visual, incluso

preferencia de orientación y dirección de movimiento (von Melchner et al., 2000). Estudios como estos sugieren que temprano en el desarrollo la áreas corticales tienen la capacidad de cambiar su especificidad funcional dependiendo de las aferencias que reciba esta área.

A diferencia de las evidencias existentes de la neuroplasticidad durante el desarrollo, se ha investigado menos la capacidad de reorganización intermodal de la corteza adulta. De acuerdo con Huttenlocher (2002), una de las bases neuroanatómicas de la plasticidad es el proceso de formación neuronal en cortezas de asociación que se ha observado en primates. Allman, Keniston y Meredith (2009) han demostrado que la reorganización intermodal puede ocurrir después de un periodo de maduración cortical sensorial en la corteza auditiva de hurones adultos sordos.

Actualmente hay pruebas contundentes de plasticidad y reorganización intermodal ante la falta de estimulación en una modalidad sensorial específica. Estudios en personas sordas y ciegas, han brindado la oportunidad de examinar las consecuencias neurales en modalidades restantes, ante la privación de una modalidad específica. De acuerdo con Kujala, Palva, Salonen, Alku, Huotilainen, Järvinen & Näätänen (2005) otra modalidad se beneficia cuando otra ha sido privada de estimulación. Se ha demostrado que la corteza auditiva de sujetos sordos se activa ante la presentación de estímulos visuales (Finney, Clementz, Hickok y Dobkins, 2003) y vibro-táctiles (Auer Jr., Bernstein, Sungkarat y Singh, 2007; Levanen, Jousmaki y Hari, 1998).

Los primeros estudios realizados en sordos con aparatos vibro-táctiles se basaban en la evaluación de su desempeño conductual y estas les permitían simplemente especular sobre las bases perceptuales y neurales detrás de su funcionamiento (Ej. Bernstein et al.

1998), aunque no usaban técnicas de neuroimagen como la magnetoencefalografía (MEG) o la resonancia magnética funcional (RMf), ni el electroencefalografía (EEG) que les permitieran hacer inferencias sobre los mecanismos y las estructuras cerebrales involucradas en la percepción de sonidos codificados en patrones de estimulación somestésica. En la actualidad, los estudios hemodinámicos han sido de gran utilidad para observar la activación de áreas corticales para tratar de explicar qué sucede en el cerebro de un sordo que “escucha” con la asistencia de un aparato vibro-táctil colocado sobre el dedo índice.

Existen estudios de caso de dos sujetos sordos, con resultados contradictorios en cuanto a la activación de la corteza superior temporal por estímulos somatosensoriales (Hickock et al., 1997; Levänen, Jousmaki & Hari, 1998). En 1997, Hickock y colaboradores se propusieron investigar el proceso biológico de la neuroplasticidad compensatoria en la corteza auditiva de un sordo congénito. En dos estudios, uno de RMf y otro de MEG, estudiaron la respuesta evocada por estímulos somestésicos en las áreas auditivas del sujeto sordo. El experimento comparaba la activación de distintas áreas cerebrales ante estímulos de diferentes modalidades sensoriales (auditiva, somatosensorial y visual) y una tarea motora. En todas las modalidades, excepto la auditiva, se activaron las típicas áreas corticales primarias correspondientes al estímulo. No se detectó ningún tipo de activación electromagnética, ni hemodinámica intermodal, en la corteza superior temporal incluyendo el área auditiva primaria.

Un año después, otro estudio de caso con neuroimagen realizado por Levänen, Jousmaki y Hari (1998) reportó resultados contradictorios que apoyaban la noción de plasticidad cerebral compensatoria en sordos. En su experimento un estímulo vibro-táctil

aplicado sobre la palma de la mano y los dedos de un sordo congénito activó sus cortezas auditivas primarias. Adicionalmente demostraron que las cortezas auditivas podían discriminar vibraciones entre los 180 Hz y 250 Hz. Estos autores emplearon un paradigma tipo *odd-ball* somestésico y observaron que sólo en el sujeto sordo (no en los controles) se observaba una activación bilateral de las cortezas auditivas supratemporales posterior a la activación de la corteza somatosensorial primaria (SI). Los estímulos infrecuentes producían señal en áreas supratemporales dos a tres veces mayores que los estímulos frecuentes, muy similar a la activación supratemporal que se ha observado en sujetos normales cuando escuchan sonidos de diferentes frecuencias. El estudio de Levänen y colaboradores (1998) concluyó que las áreas corticales que normalmente se utilizan para la audición, pueden en los sordos congénitos procesar información vibrotáctil debido a un posible “desenmascaramiento” de aferencias somatosensoriales en áreas corticales que se creía eran exclusivamente auditivas.

Con base en estos hallazgos, Auer Jr., Bernstein, Sungkarat y Singh (2007) realizaron un estudio comparativo, también de RMf, para estudiar la activación vibrotáctil de regiones de la corteza auditiva en sujetos normo-oyentes y sordos utilizando un aparato vibrotáctil. Tanto ante la presentación de estímulos vibrotáctiles que codificaban la frecuencia fundamental de la voz, como ante estímulos vibrotáctiles de frecuencia fija, se observó mayor activación en los sujetos sordos. Particularmente, estas diferencias focales estaban localizadas en la corteza auditiva primaria y en áreas adyacentes al giro de Heschl. Estos resultados no sólo comprobaban una mayor activación, sino también una expansión de las regiones corticales que responden a estímulos táctiles en sujetos sordos.

5.2 Procesamiento cortical heteromodal

Una línea de investigación enfocada a explorar el papel funcional de las áreas corticales heteromodales ha demostrado, en personas normo-oyentes, que los estímulos auditivos y los vibro-táctiles comparten un área de activación cortical común (Ozcan, Baumgartner, Vucurevic, Stoeter & Treede, 2005; Foxe, Wylie, Martinez et al., 2002) una región de 85 mm³ en la parte posterior de la corteza auditiva (Schürmann, Caetano, Jousmaki & Hari, 2006). A diferencia de los sordos, en personas normo-oyentes, esta respuesta ante estimulación somestésica no se observa en la corteza auditiva primaria, sino en la corteza auditiva secundaria (Kayser, Petkov, Augath y Logothetis, 2005; Schürmann et al., 2006). Los estudios de Touge et al. (2005) y Foxe et al. (2000) no observaron la co-activación en esta área audio-táctil, sino que estudiaron el proceso de integración multi-sensorial de estímulos auditivos y somatosensoriales en estas áreas corticales heteromodales con potenciales relacionados a eventos.

6. Estudios de la Actividad Cerebral

Los primeros estudios de sordos con aparatos vibro-táctiles eran evaluaciones del desempeño conductual de los sujetos y estas permitían simplemente especular sobre las bases perceptuales y neurales detrás de su funcionamiento (Ej. Bernstein et al. 1998), porque no usaban técnicas de neuroimagen o registros electrofisiológicos que les permitieran hacer inferencias sobre los mecanismos y las estructuras cerebrales involucradas en la percepción de sonidos codificados en patrones de estimulación somestésica. No obstante, con el devenir del desarrollo tecnológico se han incrementado

sustancialmente los estudios que incorporan un monitoreo funcional con medios de imagen como la resonancia magnética funcional (IRMf) y la tomografía por emisión de positrones (PET), así como aquellos que usan herramientas de alta resolución temporal como el electroencefalograma (EEG) o la magnetoencefalografía (MEG).

6.1. Potenciales Relacionados con Eventos (PREs)

Las técnicas de registro de actividad eléctrica cerebral son muy difundidas y de amplio uso en la actualidad, principalmente por su carácter no invasivo, lo que permite estudiar situaciones naturales o casi naturales, por su relativo bajo costo y por su alta resolución temporal.

La suma de potenciales post-sinápticos de conjuntos de neuronas corticales y subcorticales genera campos eléctricos detectables por electrodos inertes colocados en la superficie del cuero cabelludo. El EEG es el registro de estas señales eléctricas que pueden ser espontáneas o relacionadas a eventos. 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 por eventos o estímulos puntuales. Estos potenciales son de tan pequeña amplitud que están ocultos en la actividad espontánea del registro de EEG, que puede ser hasta 50 veces mayor en amplitud. La técnica de promediación disminuye el ruido (la actividad cerebral espontánea) permitiendo la detección de los PREs contenidos en el registro de EEG. Los PREs se obtienen al promediar varias ventanas de tiempo del EEG que correspondan a la

repetición de un mismo estímulo (Carretié, 2001; González Garrido & Gumá Díaz, 2001).

Existen dos tipos de PREs que se distinguen por su relación con las características de los estímulos y la topografía de sus generadores neuronales. Los PREs exógenos, pueden ser sensoriales y motores, dependiendo exclusivamente de factores externos como las características físicas del estímulo. Es muy probable que estos provengan de las vías sensoriales cuyas aferencias se extienden desde los órganos receptores hasta las cortezas primarias, o bien las vías eferentes motoras que desde la corteza motora inervan los músculos. Los PREs endógenos, también conocidos como potenciales relacionados a eventos cognitivos (PREc), son generados por neuronas del cerebro humano al ejecutar paradigmas cognitivos. Los anteriores se originan aproximadamente 100 mseg después de la presentación del estímulo, aunque la latencia puede variar en relación a la modalidad sensorial, porque se originan después de que los estímulos hayan alcanzado las cortezas primarias. La electrofisiología cerebral cognitiva analiza sustratos neurofisiológicos en diferentes etapas de procesamiento de información. No es posible la medición directa del procesamiento cognitivo, sin embargo la medición simultánea de respuestas conductuales y la exploración funcional de la distribución temporo-espacial de la actividad eléctrica cerebral permiten hacer inferencias sobre los posibles generadores corticales involucrados en la actividad cognitiva al realizar una tarea específica.

Los PREs constituyen respuestas psicofisiológicas complejas que cuentan con diversos componentes, los cuales de manera individual, reflejan diferentes aspectos de las consecuencias que el estímulo que se percibe o el procesamiento cognitivo tienen sobre el Sistema Nervioso Central. Los diferentes componentes electrofisiológicos de los PREs se

distinguen por los picos y valles de sus ondas, sus latencias, sus polaridades (signo eléctrico: P o N) y por su distribución topográfica craneana. Un sistema de nomenclatura es en función de la polaridad y latencia del componente (Ej. N400). Otro sistema es parecido pero en lugar de latencia, indica el orden del componente (Ej. P1, P2, P3, etc.). Algunos componentes tienen nombres específicos cuando reflejan una función determinada o si su latencia es variable (Ej. potencial de disparidad). Por último, otra clasificación utilizada con frecuencia se basa en la latencia del componente (latencia corta, media y larga). No hay un único componente sino que existen “familias” extensas de ondas de latencias, polaridades, duraciones, etc., que aproximadamente corresponden a las etiquetas (González Garrido & Gumá Díaz, 2001).

A continuación, una descripción general de los tipos de PREs cognitivos más estudiados:

Variación negativa contingente (CNV; *Contingent Negative Variation*).

Componente pre-evento relacionado con la preparación y anticipación de respuestas motoras o juicios cognitivos. Fue observada por primera vez por Walter y colaboradores (1964) durante los intervalos interestímulo en paradigmas en que el estímulo diana es precedido por un estímulo de aviso (E1-E2). Esta onda negativa está compuesta de dos ondas, una temprana con origen prefrontal y máxima amplitud en zonas frontales, y una onda tardía con máxima amplitud centro-parietal. La primera parece estar claramente relacionada con la atención/expectativa del sujeto (Carretié, 2001). La segunda podría ser un potencial motor de preparación.

Negatividad de procesamiento. Componente negativo con máxima amplitud fronto-central que se presenta cerca de los 150 mseg en tareas de audición dicótica con atención preferencial de un canal. Esta onda negativa está relacionada al proceso de atención discriminativa.

Potencial de disparidad (MMN; *Mismatch Negativity*). Onda negativa de corta duración que se origina en la corteza auditiva primaria ante tareas de escucha dicótica con tonos blanco presentados al oído no atendido. Observándose entre los 100 y 200 mseg post-estímulo, este componente refleja procesos automáticos de atención que se “disparan” únicamente con un no pareamiento (mismatch) perceptual auditivo. Su mayor amplitud ante estímulos infrecuentes en los paradigmas tipo *odd ball* auditivos, fue descrita por primera vez por Näätänen y colaboradores en 1978.

Componente N400. Componente originado en el giro fusiforme anterior (en la corteza visual secundaria), típico de tareas lingüísticas de incongruencia semántica descubierto por Kutas y Hillyard (1980). Los procesos cognitivos relacionados con esta negatividad centro-parietal son la búsqueda en lexicón semántico, violaciones contextuales e interacciones de memoria.

Componente P300. Este componente fue descubierto por Sutton y colaboradores hace más de 40 años y es sin duda el más estudiado de todos los PREs (Carretié, 2001). Su amplitud aumenta significativamente ante la presentación de un estímulo infrecuente, por lo tanto es una onda positiva claramente observable en los paradigmas tipo *odd ball*,

ya sean clásicos o variaciones del mismo. El paradigma tipo *odd ball* clásico de 2 estímulos consiste básicamente en presentar dos grupos de estímulos, estímulos frecuentes e infrecuentes en sucesión de manera azarosa, ya sea en una proporción 20:80 o 30:70. Se aplica a todas las modalidades sensoriales, siendo la auditiva y visual las más comunes. Se mide en términos de amplitud y latencia y topográficamente aumenta la amplitud de zonas frontales a parietales. Comúnmente se habla de una latencia de 300 mseg pero puede variar entre 250-500 mseg dependiendo de la modalidad del estímulo, las condiciones de la tarea, edad del sujeto, etc.. Puede variar la latencia en proporción al tiempo de evaluación del estímulo, las demandas cognitivas de la tarea y las diferencias individuales de capacidad cognitiva. Las tareas de compatibilidad semántica producen una mayor latencia en P300, que tareas de compatibilidad espacial (Polich, 2007).

Un modelo teórico postula que el componente P300 está relacionado con un proceso de actualización contextual. Donchin, Miller & Farwell (1986) sugieren que su amplitud refleja la actividad cerebral requerida para el sostenimiento en memoria de trabajo cuando el modelo mental del contexto de un estímulo está siendo actualizado. Según la perspectiva teórica del proceso de actualización, posterior al procesamiento sensorial de un estímulo, se realiza una comparación en memoria del estímulo presentado con el anterior. Si el estímulo es el mismo, se mantiene el modelo neural del contexto del estímulo. En cambio, si el estímulo presentado es diferente al anterior, se reclutan recursos atencionales para actualizar la representación neural del contexto del estímulo. El componente P300 está compuesto por dos subcomponentes, P3a y P3b, cada uno con características particulares. Kok (2001) propuso que en el proceso de actualización de

contexto, el marcado procesamiento inicial de un estímulo blanco está más relacionado con la P3a y que este subcomponente disminuye conforme se repiten los estímulos blancos produciendo la P3b.

La **P3a**, también conocida como “**P300 de novedad**” o “**P3 frontal**”, tiene una distribución fundamentalmente frontal y alcanza máxima amplitud en zonas fronto-centrales. Se puede producir con estímulos infrecuentes auditivos, visuales (Polich & Comerchero, 2003) y somatosensoriales (Yamaguchi & Knight, 1991b) de manera *pasiva*, sin la necesidad de realizar una tarea además de ser de rápida habituación (Courchesne et al., 1975; Knight, 1984). De acuerdo con estudios de pacientes con daño del lóbulo frontal, es necesaria la integridad del lóbulo frontal para la generación del P3a (Knight, 1984; Knight et al., 1995).

El subcomponente **P3b** presenta una distribución centro-parietal y aparece típicamente en el paradigma *odd ball* activo. Esto último es lo que lo distingue de la P3a, porque la P3b es un potencial que se genera ante tareas de procesamiento activo de estímulos (Snyder & Hillyard, 1976; Squires et al., 1975 en Polich, 2007). Estudios de la formación hipocámpal en humanos sugieren que por lo menos una parte del P3b es generada en lóbulo temporal medial (Halgren et al., 1980; McCarthy et al., 1989).

Estos subcomponentes tomados en conjunto, determinan el establecimiento del modelo cognitivo de la actividad P300 que sugiere la interacción de la función del lóbulo frontal con la función temporo-parietal/hipocámpal. Cada uno es representativo de una vía paralela de procesamiento cognitivo. La discriminación del estímulo infrecuente inicia con la activación del lóbulo frontal que refleja una focalización de atención (Pardo et al., 1991; Posner, 1992) que destina recursos para la actualización del estímulo en

memoria de trabajo (P3a). El subcomponente P3b refleja la operación de guardar en memoria la información del estímulo actualizado.

6.2. Estudios con Potenciales Relacionados con Eventos (PREs)

Helen Neville ha sido la pionera en estudios electrofisiológicos con Potenciales Relacionados a Eventos que investigan la plasticidad cortical en sujetos con deficiencias en una modalidad sensorial (Neville et al., 1983, 1987b). En 1983, Neville, Smith y Kutas realizaron un estudio de la distribución cortical de potenciales visuales evocados en sujetos sordos. Se realizó una comparación del procesamiento de movimiento (vía dorsal) y el procesamiento de color (vía ventral) presentando tanto estímulos en el centro del campo visual como en la periferia. Los resultados sugirieron una alteración específica de aspectos del procesamiento visual mediado por la vía dorsal, como resultado de la privación auditiva. Este estudio fue una demostración clara de plasticidad intermodal, la habilidad de una área cortical normalmente destinada o especificada para un tipo de procesamiento sensorial (auditivo) que asume algunas funciones de otro sistema sensorial (visual). Los resultados tienen dos implicaciones interesantes, primeramente, la localización cortical de algunas funciones no está completamente determinada genéticamente, y segunda, hay competencia por la representación cortical y la interconectividad neural (Huttenlocher, 2002). En décadas posteriores, la línea de investigación de Neville se enfocó en el estudio del desarrollo del lenguaje en sordos (Neville et al., 1997, 1998) y continuó con el uso combinado de PREs e IRMf.

A diferencia de los estudios electrofisiológicos que se han realizado con sordos congénitos, Chlubnová y colaboradores (2005) realizaron una investigación de

plasticidad intermodal analizando el procesamiento visual del lenguaje de señas a través del componente P300, un PRE cognitivo observable en diferentes tareas de discriminación. En general, no observaron diferencias en las latencias del P300 entre el grupo de sordos y los controles normo-oyentes, sin embargo, encontraron una reducción significativa de las amplitudes de los componentes cognitivos visuales en derivaciones colocadas sobre el área occipital. Los autores interpretaron estos resultados como evidencia de una reorganización funcional en la corteza visual y en áreas corticales de procesos cognitivos en los sujetos sordos.

7. Planteamiento del Problema

La privación de la audición desde la etapa prelingüística implica no sólo una deficiencia sensorial específica, sino la incapacidad para adquirir el lenguaje oral de modo habitual, teniendo importantes repercusiones sobre el neurodesarrollo del individuo y afectando subsecuentemente el desarrollo de las habilidades cognitivas. El método de sustitución sensorial, que consiste en la discriminación vibro-táctil de ondas sonoras, es uno de los diversos métodos de asistencia que se han implementado para facilitar la adquisición del lenguaje oral en pacientes con sordera bilateral profunda. A diferencia de otros métodos ampliamente utilizados para la oralización, la sustitución sensorial no busca aprovechar las capacidades auditivas residuales de los individuos, sino sustituirlas por la vía somatosensorial como medio de codificación de los estímulos auditivos.

La sustitución sensorial parece representar una alternativa viable en esta búsqueda de un acercamiento del sordo al mundo de los sonidos. No obstante, las posibilidades reales de aplicación no han sido establecidas claramente: en términos de la eficiencia con que se trasmite la información; de las posibilidades de aprender a decodificar señales sonoras a través del tacto cuando es posible disponer de un amplio rango de estimulación somestésica; y sobre todo, la potencial generación de cambios plásticos y de reorganización cerebral, que podrían expresarse como cambios electrofisiológicos asociados con el entrenamiento en este método. Varios autores han observado cambios plásticos en componentes electrofisiológicos relacionados a un tipo de entrenamiento debidos a que la repetición y la práctica son aspectos claves del aprendizaje y la automatización de procesos.

En resumen, nos proponemos estudiar la manera en que los individuos sordos pueden llegar a percibir y reconocer estímulos auditivos a través del tacto, y cómo el aprendizaje en esta decodificación puede modificar el procesamiento electrofisiológico.

El presente proyecto de investigación tratará de dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación:

.- Ante la ausencia de estimulación auditiva, ¿desarrollan los sordos habilidades distintas a los sujetos normo-oyentes en las modalidades sensoriales no afectadas, como en el sentido del tacto?

.- ¿El entrenamiento en la decodificación de estímulos vibro-táctiles genera cambios electrofisiológicos significativamente distintos en sordos y normo-oyentes ante la percepción vibro-táctil transducida de tonos puros de diferente frecuencia o duración?

8. Objetivos e Hipótesis

8.1. Objetivo General

Identificar el efecto del entrenamiento en la decodificación de estímulos somatosensoriales provenientes de ondas acústicas en la discriminación perceptual de estímulos vibro-táctiles, así como los cambios en la actividad eléctrica cerebral en sordos y normo-oyentes.

8.2. Objetivos específicos

1. Determinar si existen diferencias conductuales (respuestas correctas, tiempos de reacción, omisiones y comisiones) y/o electrofisiológicas (amplitud, latencia y/o distribución topográfica del componente P300) antes y después de un periodo de entrenamiento en sordos y normo-oyentes, en el proceso de discriminación de estímulos somatosensoriales transducidos a partir de ondas acústicas (tarea experimental).
2. Determinar si existen diferencias conductuales (respuestas correctas, tiempos de reacción, omisiones y comisiones) y/o electrofisiológicas (amplitud, latencia y/o distribución topográfica del componente P300) entre sordos y normo-oyentes, en el proceso de categorización visual de estímulos no verbales (tarea de control).

8.3. Hipótesis general

Los sordos desarrollan habilidades significativamente distintas a los normo-oyentes en modalidades sensoriales no afectadas y son capaces de alcanzar, -con instrucción sistemática-, una decodificación vibro-táctil de los sonidos más eficiente.

8.4. Hipótesis específicas

1. Habrá cambios significativos en el tipo de respuesta conductual (un incremento en el número de respuestas correctas y decremento en el tiempo de reacción, el número de omisiones y el número de comisiones) en ambos grupos relacionados con el entrenamiento en la decodificación de estímulos vibro-táctiles.
2. El cambio en la magnitud y latencia del componente P300 generado por el proceso de aprendizaje de la decodificación de estímulos somatosensoriales, será más significativo en los sordos (habrá un mayor incremento de voltaje y reducción de latencia) que en los normo-oyentes.
3. No existirán diferencias significativas conductuales ni electrofisiológicas (P300) pre y post entrenamiento, entre sordos y normo-oyentes en el proceso de discriminación de estímulos visuales.

9. Método

9.1 Participantes

Participaron de manera voluntaria 10 personas con sordera bilateral profunda (M=3; H=7) con edades comprendidas entre los 13 y 28 años (M=19.65; DE=5.04), que cumplieron con los criterios de inclusión establecidos. Además se seleccionaron 10 normo-oyentes que conformaron el grupo control emparejado por sexo y edad (M=3; H=7) con una edad promedio de 22 años (M=20.88; DE=3.52). Los participantes normo-oyentes también cumplieron con los criterios de inclusión, con la excepción de las características que son específicas para los sordos. Todos asistieron a las instalaciones del Instituto de Neurociencias a un total de ocho a nueve sesiones (12 horas aproximadamente) en las cuales completaron las evaluaciones iniciales, dos registros electrofisiológicos (uno antes del entrenamiento y otro posterior) y cinco sesiones de entrenamiento en la discriminación vibro-táctil de los sonidos.

En la tabla 9.1 se resumen las características generales de los individuos sordos que conformaron la muestra. Como ya se ha mencionado, la población con sordera es sumamente heterogénea por naturaleza. La etiología en algunos de los casos es difícil de determinar aún después de realizar la entrevista, el cuestionario neurológico e inclusive obtener copias de estudios del expediente médico del sujeto. En estos casos el individuo, sus padres y su médico saben el tipo de sordera que padece (basándose en su historial clínico, audiometría y timpanometría), más no la causa de la sordera con certeza. La mayoría de los sujetos sordos que componen la muestra tienen padres normo-oyentes,

siendo una de las características principales descritas para la población con sordera en general por Campbell y MacSweeney (2004).

Tabla 9.1. Características generales de los sordos evaluados.

Edad	Sexo	Tipo de sordera	Etiología	Método de comunicación primario	Padres	Escolaridad
16	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Malformación Coclear	Oral	Normo-oyentes	Cursando 3ero de secundaria
15	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Congénita	Bilingüe (oral+manual)	Sordos	Cursando 3ero de secundaria
16	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Congénita	Oral	Normo-oyentes	Cursando preparatoria
26	F	Bilateral Profunda Neurosensorial	Adquirida (pre-lingual)	Oral	Normo-oyentes	Cursando licenciatura
20	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Adquirida (pre-lingual)	Manual	Normo-oyentes	Cursando preparatoria
16	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Adquirida (pre-lingual)	Manual	Normo-oyentes	Cursando secundaria
25	F	Bilateral Profunda Neurosensorial	Adquirida (Meningitis perinatal)	Manual	Normo-oyentes	Preparatoria
26	F	Bilateral Profunda Neurosensorial	Congénita	Manual	Normo-oyentes	Secundaria
13	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Adquirida (sufrimiento fetal)	Manual	Normo-oyentes	Primaria
20	M	Bilateral Profunda Neurosensorial	Adquirida (hipoxia neonatal)	Manual	Normo-oyentes	Primaria

* La pérdida auditiva prelingual en este estudio se definió como pérdida auditiva antes del primer año de vida.

9.2. Criterios de inclusión:

1. Participación voluntaria. Firma de consentimiento informado.
2. Edad entre los 14 y 35 años.
3. Sordera bilateral profunda prelingual (PTA < 80 dB SPL).
4. Nivel mínimo de escolaridad: primaria y tener la habilidad de seguir y comprender instrucciones (en LSM o escritas).

9.3 Criterios de no inclusión:

1. Deficiencias o limitaciones sensoriales o motoras no corregidas (distintas de la sordera).
2. Antecedentes de trastornos orgánicos del desarrollo, enfermedades neurológicas, psiquiátricas o intervenciones neuroquirúrgicas.
3. Sordera central.

9.4 Criterios de exclusión:

1. Abandono voluntario del estudio.
2. Registro de EEG en el que no sea posible obtener un número mínimo de 15 ventanas sin artefactos, para la promediación de los Potenciales Relacionados a Eventos.

9.5 Variables

- **Variables independientes:**
 - Grupo: sordos profundos y normo-oyentes.
 - Modalidad sensorial de los estímulos: somatosensorial o visual.
 - Tipo de estímulo: frecuente o infrecuente.
 - Entrenamiento en la discriminación vibro-táctil de los sonidos (5 sesiones de 1 hora de duración).
- **Variables dependientes:**
 - Nivel conductual: Número de respuestas correctas, tiempo de reacción de respuestas correctas, número de omisiones y número de comisiones.
 - Nivel electrofisiológico: Voltaje y latencia del componente P300.

9.6 Material, instrumentos y equipo

- Cuestionario de antecedentes neurológicos, psiquiátricos o neuroquirúrgicos y entrevista semi-estructurada de historia personal (Anexo I).
- Audiómetro portátil Maico modelo MA41.
- Video-grabaciones de traducción a LSM de instrucciones y documentos.
- Material del entrenamiento: 168 pistas de audio y tarjetones (9 cm x 9 cm).
- Dispositivo de aislamiento acústico parcial, tapones y audífonos protectores de sonido.
- Software: SIADAVACO, Audacity 1.3.3., Quick Time Player y Mind Tracer 2.0.
- Polígrafo MEDICID-4 de Neuronic y gorro ElectroCap de 32 canales.
- El dispositivo de estimulación vibro-táctil (SEVITAC-D ® Campos, 2002).

9.7 Tareas Experimentales

En la presente investigación se clasifican las tareas experimentales de manera general en dos grupos según la modalidad sensorial en la que se les presentan los estímulos: dos tareas experimentales somatosensoriales y una tarea experimental visual (tarea control).

Previa la sesión de registro se le mostró al participante sordo un video en lenguaje de señas mexicano (LSM) explicando el procedimiento desde el propósito de realizar un estudio de EEG, la preparación y colocación del gorro y los electrodos, así como los puntos clave en su comportamiento para obtener un buen registro, el mantenerse quieto y relajado, parpadear lo mínimo posible y no de manera sincronizada con la respuesta motora y el realizar un movimiento suave al presionar la tecla, todo para controlar al máximo variables de ruido e interferencia. Esta información se le volvió a presentar de manera escrita en un manual de instrucciones durante la preparación.

Presentación de estímulos

Todos los estímulos (visuales y “auditivos”) fueron presentados por medio del software MindTracer-2.0 de Neuronics frente a un monitor de 19” con una resolución de 1280 x 960 pixeles. El mismo programa obtuvo automáticamente la respuesta conductual del participante y los tiempos de reacción. Todos los participantes se colocaron el dedal del dispositivo de estimulación vibro-táctil en el dedo índice derecho y realizaron las tareas con la luz encendida. El dispositivo vibro-táctil fue conectado a la salida de audio de la computadora de tal manera que, los estímulos auditivos fueron presentados en forma aleatoria y las vibraciones del sonido fueron percibidas directamente en el dedal. El

participante realizó las tareas frente a un monitor dirigiendo su mirada al centro de la pantalla.

Los participantes normo-oyentes se colocaron tapones de oídos atenuantes de sonido (hasta 30 dB) y cubrieron sus oídos con unos audífonos protectores de sonido. Adicionalmente los controles introdujeron la mano derecha, en la cual portaban el dedal, dentro de una caja aislante de sonido con el objetivo de eliminar cualquier interferencia que podría generarse si el sujeto escuchara los tonos puros y la estimulación recibida no fuese únicamente vibro-táctil. En el cuarto de registro se tocó una pista con ruido blanco (70 dB).

9.7.1 TAREAS EXPERIMENTALES SOMATOSENSORIALES

Paradigma tipo *odd-ball* de tonos puros de diferente frecuencia.

La tarea experimental consistió en realizar una discriminación vibro-táctil de tonos puros de diferentes frecuencias. Los participantes realizaron la tarea frente a un monitor dirigiendo su mirada a un punto de fijación en el centro de la pantalla. Se presentaron un total de 150 tonos de 200 msec de duración con un intervalo interestímulo de 1500 msec. La relación entre los estímulos frecuentes e infrecuentes es de 80:20. Se presentaron en forma aleatoria 120 tonos de 900 Hz (estímulo frecuente) y 30 tonos de 700 Hz (estímulo infrecuente). Se seleccionaron estímulos perceptibles por encima del umbral vibro-táctil de los participantes, dentro del rango de frecuencias importantes para la percepción del habla. Las vibraciones del sonido fueron percibidas directamente en el dedal. El sujeto debía presionar la tecla CTL izquierda con el índice izquierdo ante la detección del tono infrecuente (700 Hz).

Paradigma tipo *odd-ball* de tonos puros de diferente duración.

La tarea consiste en la discriminación de la duración de 2 tonos puros. Se presentaron un total de 150 tonos de 700 Hz con un intervalo interestímulo de 1500 mseg. El participante realizó la tarea frente a un monitor dirigiendo su mirada a un punto de fijación en el centro de la pantalla. La relación entre los estímulos frecuentes e infrecuentes es 80:20. Se presentaron en forma aleatoria 120 tonos de 700 Hz con 250 mseg de duración (estímulo frecuente) y 30 tonos de 700 Hz de 500 mseg de duración (estímulo infrecuente). Se seleccionaron estímulos perceptibles por encima del umbral vibro-táctil de los participantes, dentro del rango de frecuencias del habla y se determinó con el piloto la duración de los estímulos. Al participante se le instruyó presionar la tecla CTL izquierda con el índice izquierdo ante la detección del la detección del tono de mayor duración (500 mseg).

9.7.2 TAREA EXPERIMENTAL VISUAL

Paradigma tipo *odd-ball* de estímulos visuales (tarea control).

En esta tarea se presentaron un total de 150 círculos: 120 círculos azules (estímulo frecuente) y 30 círculos amarillos (estímulo infrecuente). Los estímulos consisten de círculos azules y amarillos de 5 cm de diámetro y fueron presentados en el centro de la pantalla sobre un fondo negro por 500 mseg con un intervalo interestímulo de 1500 mseg. Se les instruyó a los participantes presionar con el dedo índice izquierdo la tecla CTL izquierda lo más rápido posible, ante la presencia del estímulo infrecuente (círculo amarillo).

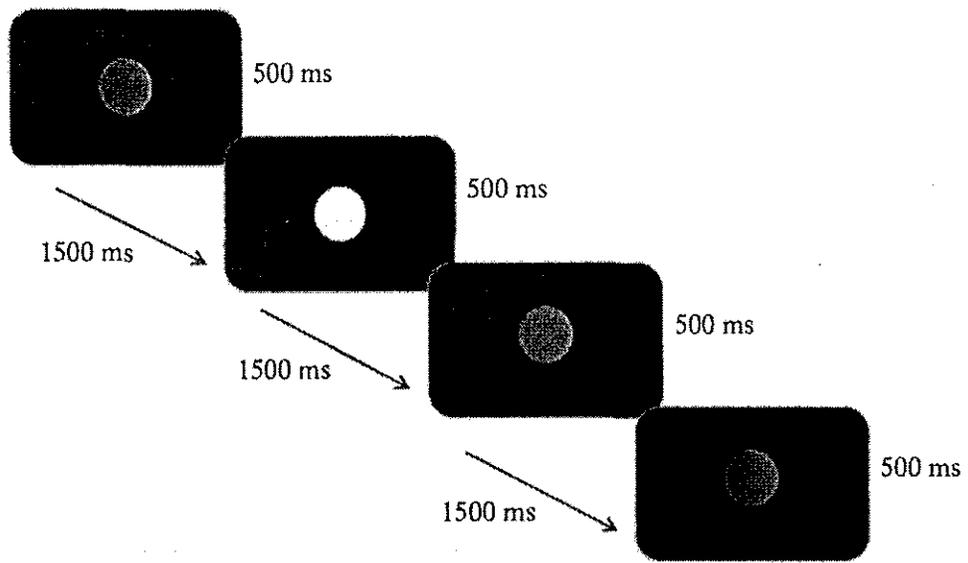


Figura 9.1. Paradigma experimental de la tarea de discriminación visual.

9.8. Procedimiento

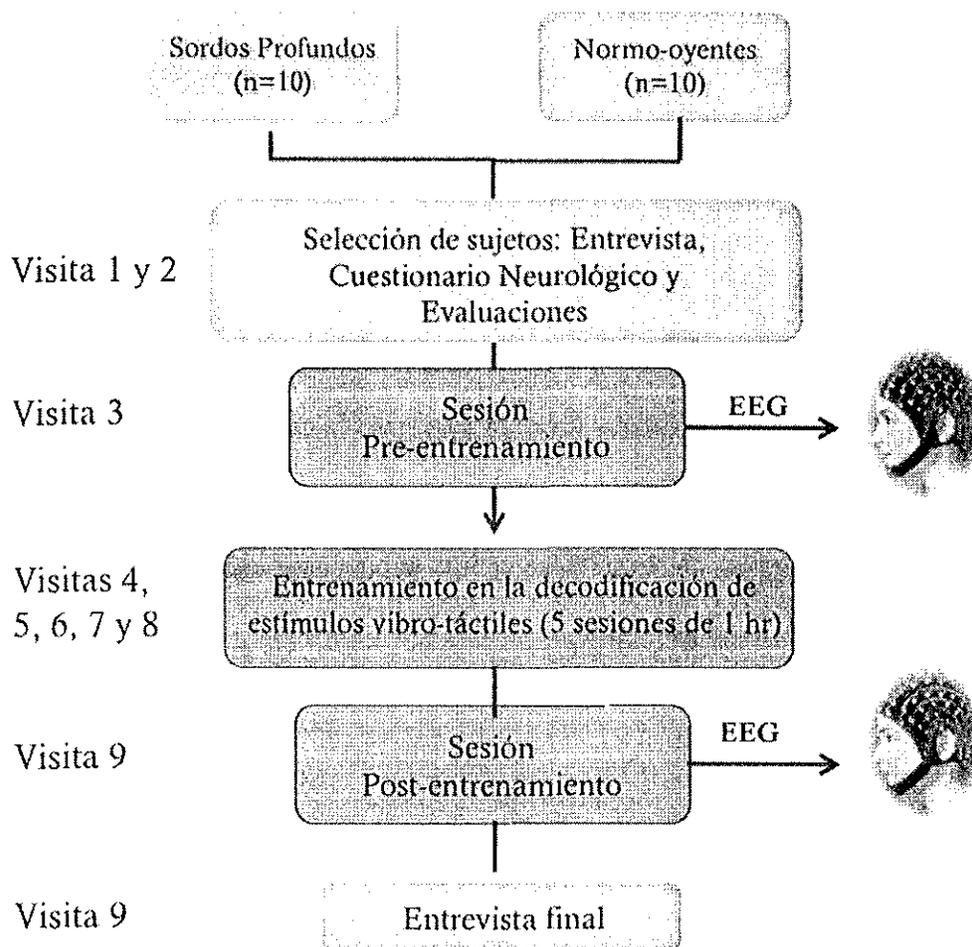


Figura 9.2. Esquema del procedimiento experimental.

Selección de la muestra (Visita 1 y Visita 2)

El propósito de las primeras dos visitas al Instituto de Neurociencias fue seleccionar la muestra de acuerdo a los criterios de inclusión establecidos. Previo a comenzar el estudio, se entrevistó a los participantes sordos con ayuda de un familiar con el fin de obtener su historial médico y antecedentes neurológicos, psiquiátricos y

neuroquirúrgicos de importancia (Cuestionario Neurológico Anexo 1). La entrevista inicial también fue un complemento para conocer su historia familiar y personal, así como su experiencia cotidiana interactuando en un mundo de oyentes, sin audición. Se solicitó a los participantes trajeran su audiometría y valoración médica más reciente para anexar a su expediente, principalmente para corroborar el diagnóstico de hipoacusia bilateral profunda con etiología neurosensorial o conductiva, ya que la hipoacusia central o cortical sería un impedimento para participar en el proyecto de investigación. De los 20 sordos que fueron valorados para participar en el estudio, se seleccionaron aquellos que presentaban sordera bilateral profunda con escolaridad mínima de primaria y una alta funcionalidad personal, laboral/académica y social. Dado que no existen pruebas neuropsicológicas estandarizadas para la población sorda en estudio, se realizó un juicio clínico de la capacidad intelectual del sujeto en base a su habilidad de comprender y seguir instrucciones escritas o en lenguaje de señas mexicano (LSM). Para finalizar la evaluación inicial, se realizó una prueba audiométrica de conducción de aire de tonos puros.

Una vez cumplidos todos los criterios de inclusión, los participantes formalizaron su participación voluntaria en el estudio con la firma del consentimiento informado (Anexo 2 y 3). A aquellos sordos cuya forma primaria de comunicación era el LSM se les mostró una video grabación de un intérprete que brindaba una descripción general del estudio con el objetivo general y los procedimientos. También se proporcionó una traducción a LSM del consentimiento informado. Los menores de edad firmaron este documento junto con uno de sus padres.

Sesión Experimental 1: Registro EEG Pre-entrenamiento (Visita 3)

Antes de comenzar el primer registro EEG, se familiarizó al participante con la técnica y las tareas que ejecutaría simultáneas al registro. Se les mostró un video detallado en LSM de la preparación previa al registro (colocación del gorro, gel conductor y electrodos de referencia y extraoculares) y las indicaciones a seguir durante el registro, tales como el no moverse, sentarse cómodo y relajados frente al monitor y parpadear lo menos posible al responder. Para los controles normo-oyentes y los sordos oralizados esta parte de preparación fue verbal. Finalmente se repasó un manual de instrucciones, con poco texto e ilustraciones, de las cuatro tareas experimentales que tendría que realizar. Se corroboró la comprensión de instrucciones con un ensayo de cada una de las tareas.

Previo a las tareas se realizó un electroencefalograma (EEG) basal, dos minutos de registro con ojos cerrados y dos minutos con ojos abiertos. Una vez finalizado el registro del EEG basal, procedió el participante a completar las tareas experimentales en el siguiente orden:

1. Paradigma tipo *odd-ball* de discriminación de frecuencia de estímulos somatosensoriales transducidos a partir de ondas sonoras de tonos puros.
2. Paradigma tipo *odd-ball* de estímulos visuales (tarea control).
3. Paradigma tipo *odd-ball* de discriminación de duración de estímulos somatosensoriales transducidos a partir de ondas sonoras de tonos puros.

Posteriormente los participantes completaron una serie de cinco sesiones de entrenamiento usando el dispositivo vibro-táctil para lograr la discriminación

de estímulos de esta naturaleza (resultantes de la transducción de estímulos auditivos). Todos se sometieron a un periodo de entrenamiento similarmente estructurado (número de sesiones, duración de sesiones, contenido, etc.). Una vez completado el entrenamiento en la decodificación de estímulos vibro-táctiles, los participantes realizaron las mismas tareas experimentales que en la primera sesión experimental en un segundo registro de EEG. El procedimiento fue exactamente el mismo. Para concluir el estudio se realizó una breve entrevista como evaluación subjetiva y personal del funcionamiento del dispositivo vibro-táctil y de la experiencia de la percepción vibro-táctil del sonido, únicamente a aquellos sordos oralizados cuyo método de comunicación primario fuese el lenguaje oral. La participación de los normo-oyentes fue de ocho visitas porque no se les hace la entrevista inicial relacionada con la valoración de los criterios del tipo de sordera y la evaluación de la habilidad de comprender y seguir instrucciones escritas y en LSM.

9.8.1 Entrenamiento

El entrenamiento en la discriminación vibro-táctil de los sonidos fue diseñado con la asesoría de un profesional con experiencia previa en este tipo de entrenamiento en la población de pacientes hipoacúsicos. Se tomó como base un modelo clínico, el cual se estandarizó en un procedimiento estructurado para ser utilizado con propósitos de investigación clínica. El programa final fue definido de acuerdo a los resultados de un estudio piloto que fue realizado en el Instituto de Neurociencias en 2010. Este estudio nos

permitió seleccionar el tipo de estímulos, la dificultad de los estímulos, la duración de las sesiones y el número total de sesiones del entrenamiento.

Todos los participantes se sometieron a un entrenamiento individual de cinco sesiones de una hora, distribuidas a lo largo de un periodo de dos a tres semanas, con una frecuencia de dos a tres veces por semana según la disponibilidad de horario del participante. Entre el primer registro de EEG y la primera sesión de entrenamiento no debían transcurrir más de dos semanas y entre la última sesión de entrenamiento y el segundo registro el intervalo máximo de tiempo era de una semana.

Las sesiones fueron video-documentadas y también se llevó una bitácora de observaciones de cada sesión. El programa de entrenamiento consistió de un juego de discriminación táctil de texturas, actividades de discriminación de frecuencia y duración de tonos puros, y actividades de identificación de sonidos naturales de animales y objetos. Esta última actividad en la que los estímulos provenían de sonidos complejos, en lugar de tonos puros, no está directamente relacionada con las tareas experimentales, sin embargo fue incluida como factor motivacional por la relevancia que este ejercicio tenía sobre el participante hipoacúsico. En la tabla 9.2, se presenta el programa de actividades que fueron realizadas en cada una de las cinco sesiones de entrenamiento.

Sesión	Programa de Actividades	Tiempo (min.)
1	Juego de discriminación de texturas	20
	Distinguir tono alto del bajo	10
	Secuencias de tonos de diferente frecuencia (Bloque 1 y Bloque 2)	5
	Distinguir tono corto del largo	10
	Secuencias de tonos de diferente duración (Bloque 1 y Bloque 2)	5
	Discriminación de sonidos naturales de animales	5
	Discriminación de sonidos naturales de objetos	5
2	Distinguir tono corto del largo	10
	Secuencias de tonos de diferente duración (Bloque 1 y Bloque 2)	10
	Distinguir tono alto del bajo	10
	Secuencias de tonos de diferente frecuencia (Bloque 1 y Bloque 2)	10
	Discriminación de sonidos naturales de objetos	10
	Discriminación de sonidos naturales de animales	10
3	Discriminación de sonidos de animales	15
	Discriminación de sonidos naturales de objetos	15
	Distinguir tono alto del bajo	5
	Secuencias de tonos de diferente frecuencia (Bloque 3 y Bloque 4)	10
	Distinguir tono corto del largo	5
	Secuencias de tonos de diferente duración (Bloque 3 y Bloque 4)	10
4	Discriminación de sonidos naturales de objetos	15
	Discriminación de sonidos naturales de animales	15
	Distinguir tono corto del largo	5
	Secuencias de tonos de diferente duración (Bloque 3 y Bloque 4)	10
	Distinguir tono alto del bajo	5
	Secuencias de tonos de diferente frecuencia (Bloque 3 y Bloque 4)	10
5	EVALUACIÓN:	
	Secuencias de tonos de diferente frecuencia (Bloque 1,2,3 y 4)	15
	Secuencias de tonos de diferente duración (Bloque 1,2,3 y 4)	15
	Discriminación de sonidos naturales de 6 animales	15
	Discriminación de sonidos naturales de 6 objetos	15

Tabla 9.2. Programa de actividades de cada sesión del entrenamiento en la discriminación de estímulos vibro-táctiles provenientes de ondas acústicas.

En cada actividad a lo largo de las cinco sesiones, conforme el sujeto aprendía a discriminar entre los diferentes sonidos y las secuencias se incrementaba gradualmente el nivel de dificultad de las tareas. En la quinta y última sesión se realizó una evaluación del progreso logrado a lo largo de este periodo de aprendizaje. Las actividades del programa de entrenamiento están descritas a continuación.

1. Un juego de discriminación táctil de texturas.

Descripción: El juego contiene un total de 30 laminillas (5 cm x 5 cm) de doble cara. Hay cinco texturas con diferentes rugosidades que abarcan desde una superficie arenosa hasta

una textura suave. El juego se dividió en cinco bloques. Todas las laminillas que pertenecen a un bloque comparten la misma textura en una de las caras (con excepción de dos que tienen la misma textura en ambas caras). Los bloques se organizan en términos de rugosidad, de mayor a menor rugosidad. Para cada bloque se crearon seis laminillas de doble cara, dos laminillas con ambas caras iguales y cuatro laminillas con caras desiguales (una misma textura de un lado combinada con las cuatro texturas restantes). Por lo tanto, cada bloque tiene laminillas con cinco posibles combinaciones de texturas y una copia adicional de la laminilla con caras iguales.

Procedimiento: Se le vendaron los ojos al participante y se colocó en el lado izquierdo de la mesa la laminilla con la misma textura en ambos lados y del otro lado cualquiera de las cinco combinaciones de manera aleatoria una a la vez. El participante debía encontrar el par de la laminilla que tiene ambas caras iguales. No había reglas, se podía emplear una o dos manos y se podía sentir cada laminilla las veces que se creyera necesario. Fue el mismo procedimiento para los cinco bloques.

2. Discriminación de secuencias con tonos puros de diferente frecuencia y duración.

Material y Diseño

La primera parte del entrenamiento se enfocó en el aprendizaje de la discriminación de diferentes secuencias de tonos. Todas las secuencias tenían tres tonos consecutivos. Se crearon 40 diferentes secuencias con Audacity 1.3.3 y Quick Time Player; ocho secuencias diferentes para cada nivel de dificultad (son cinco niveles) para cada tipo de discriminación (altura y duración).

La representación visual que correspondía a cada una de las secuencias consistía de un recuadro (9 cm x 9 cm) con barras en blanco y negro que representaban los tonos. El diseño de este material que representaba gráficamente los sonidos con distintas cualidades se basó en las representaciones visuales de las secuencias auditivas utilizadas en la prueba TOT (*Test audiolgique d'Ordre Temporel*, Mlaiki, 2008). En las secuencias de tonos de diferente frecuencia, el tono de alta frecuencia estaba representado con un pequeño rectángulo negro (0.75 cm x 1.75 cm) en la parte superior del recuadro y el rectángulo correspondiente al tono de baja frecuencia se encontraba en la parte inferior. En las secuencias de tonos de diferente duración, el tono corto estaba representado con un rectángulo negro corto (1.5 cm x 1 cm) y el tono largo estaba representado con un rectángulo del doble de longitud (3 cm x 1 cm). Los rectángulos de las secuencias de tonos de diferente duración estaban colocados al mismo nivel porque eran tonos de la misma frecuencia.

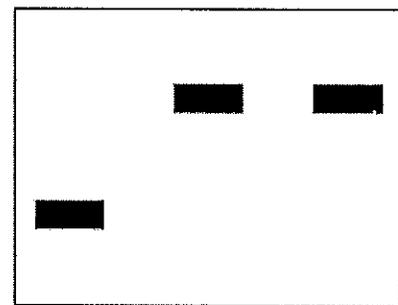
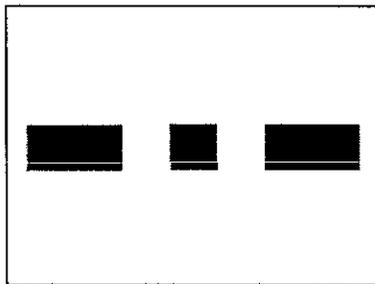


Figura 9.3. Izquierda: Representación visual de una secuencia de 3 tonos de diferente duración (LCL).

Figura 9.4. Derecha: Representación visual de una secuencia de 3 tonos de diferente frecuencia (BAA).

Procedimiento

En general la dinámica consistía en que al sentir con el dedal las vibraciones de un tono o de una secuencia de tonos, el participante debía decodificar el patrón vibrotáctil y emparejar el estímulo señalando una representación visual de este estímulo en un tarjetón. Un procedimiento similar al empleado en el TOT (*Test audiolgique d'Ordre Temporel*, Mlaiki, 2008), en el cual en el modo táctil de respuesta el participante toca en la pantalla de la computadora una representación visual que corresponde a la secuencia auditiva que escuchó. En la actividad de discriminación de tonos de diferentes frecuencias, el participante primero aprendía a diferenciar el tono alto (900 Hz) del tono bajo (700 Hz). Se le presentaba de manera individual tres veces cada uno de los tonos y nuevamente tres veces alternados. Después se le presentaba el tono alto y el bajo en un orden aleatorio, tres veces cada uno. Si el participante lograba hacer correctamente este ejercicio, se procedía a trabajar con la discriminación de secuencias. De lo contrario, se seguía trabajando en la discriminación de los dos tonos.

Las secuencias se presentaban en bloques de cuatro. Había un total de cuatro bloques de secuencias con combinaciones diferentes de las ocho secuencias que había en total. Los bloques estaban representados visualmente en un tarjetón blanco tamaño carta (21.5 cm x 28 cm) que contenía cuatro recuadros. En las primeras dos sesiones se utilizaron el bloque 1 y 2, y en la sesión tres y cuatro, los bloques 3 y 4. En la quinta y última sesión se utilizaron todos los bloques. Se les presentaron las secuencias de manera individual y posteriormente aleatorizadas, tres veces cada una. El procedimiento para el entrenamiento en la discriminación de secuencias de tonos de diferente duración fue el

mismo. Lo que varió entre estas dos actividades fueron los diferentes niveles de dificultad.

En secuencias de tonos altos y bajos hay cinco niveles de dificultad. Todos los participantes empezaron el entrenamiento en el nivel más fácil y conforme dominaban el 85% de las secuencias en ese nivel progresaban al siguiente nivel. La dificultad de los distintos niveles dependía de la diferencia que había entre las frecuencias y el intervalo entre cada tono en la secuencia. En secuencias con tonos cortos y largos había sólo dos niveles de dificultad según la duración del tono largo y el intervalo entre cada tono.

Niveles de Dificultad

De acuerdo con la diferencia de frecuencia entre el tono alto y el tono bajo había cinco niveles de dificultad y dentro de cada nivel tres sub-niveles (A, B y C) con diferentes intervalos interestímulo entre los tonos de la secuencia. Todos los participantes empezaban el entrenamiento en el Nivel IA y subían de nivel conforme dominaban el 85% de las secuencias en ese nivel de dificultad.

Los niveles y sub-niveles de dificultad en la actividad de identificación de secuencias de tonos de diferente frecuencia estaban organizados de la siguiente manera:

NIVEL 1

El tono de frecuencia baja es de 630 Hz y el tono de frecuencia alta de 1122 Hz.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 mseg. (A), 750 mseg. (B) y 500 mseg. (C).

NIVEL 2

El tono de frecuencia baja es de 730 Hz y el tono de frecuencia alta de 1122 Hz.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 msec. (A), 750 msec. (B) y 500 msec. (C).

NIVEL 3

El tono de frecuencia baja es de 780 Hz y el tono de frecuencia alta de 1122 Hz.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 msec. (A), 750 msec. (B) y 500 msec. (C).

NIVEL 4

El tono de frecuencia baja es de 830 Hz y el tono de frecuencia alta de 1122 Hz.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 msec. (A), 750 msec. (B) y 500 msec. (C).

NIVEL 5

El tono de frecuencia baja es de 880 Hz y el tono de frecuencia alta de 1122 Hz.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 msec. (A), 750 msec. (B) y 500 msec. (C).

Niveles de Dificultad en secuencias con tonos de diferentes duraciones.

De acuerdo con la diferencia de duración entre el tono corto (250 msec) y el tono largo (500 msec) había dos niveles de dificultad y dentro de cada nivel tres subniveles

(A, B y C) con diferentes intervalos interestímulo entre los tonos de la secuencia. Todos los participantes empezaban el entrenamiento en el Nivel 1A y subían de nivel conforme dominaban el 85% de las secuencias en ese nivel de dificultad.

Los niveles y sub-niveles de dificultad en la actividad de identificación de secuencias de tonos de diferente duración estaban organizados de la siguiente manera:

NIVEL 1

Tonos de 800 Hz, el tono de larga duración siendo de 650 msec. y el de corta duración de 250 msec.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 msec. (A), 750 msec. (B) y 500 msec. (C).

NIVEL 2

Tonos de 800 Hz, el tono de larga duración siendo de 500 msec. Y el de corta duración de 250 msec.

- Las secuencias con intervalo interestímulo 1000 msec. (A), 750 msec. (B) y 500 msec. (C).

3. Identificación de sonidos naturales de animales y objetos.

Materiales

Se editaron pistas de audio grabadas de los sonidos reales de diferentes animales y objetos utilizando Quick Time Player. Se seleccionaron seis pistas de animales (5 segundos de duración) y seis pistas de objetos (9 segundos de duración). Estas fueron seleccionadas cuidadosamente ya que en cada categoría hay cuatro sonidos vibro-

táctilmente muy distintos y fáciles de diferenciar y dos sonidos que se pueden confundir con algún otro. También se diseñaron tarjetas (9 cm x 9cm) con fotos a color de los animales y de los objetos.

Procedimiento

Para la discriminación de sonidos de animales se comenzó con la diferenciación del sonido del perro del sonido del cordero y después se incorporó a la vaca y al caballo. Se trabajaba con estos cuatro estímulos hasta lograr la discriminación correcta el 90% de las veces. Posteriormente se añadía el burro y por último el elefante.

Para la discriminación de sonidos de objetos se comenzó con la diferenciación del sonido del reloj del sonido de la campana. Después del reloj del martillo y de la campana del piano. Se trabajaba con estos cuatro estímulos hasta lograr la discriminación correcta el 90% de las veces. Posteriormente se añadía el teléfono y por último la ambulancia.

9.8.2. Registro electrofisiológico

El registro de la actividad eléctrica cerebral se realizó con un polígrafo MEDICID-4 de Neuronic, por medio de un gorro ElectroCap de 32 canales de acuerdo con el Sistema Internacional 10/20, usando como referencia ambas orejas cortocircuitadas. La impedancia para todos los electrodos fue menor a 5 k Ω . La señal de EEG fue capturada por un convertidor analógico/digital de 32 bits incluido en el equipo, usando un periodo de muestreo de 5ms (200 Hz) y filtraje analógico entre 0.5 y 30 Hz. El registro capturado se almacenó en medios magnéticos para su análisis fuera de línea. Se seleccionaron

ventanas de 1100 milisegundos (100 milisegundos previos a la presentación del estímulo) mediante inspección visual de segmentos sin artefacto.

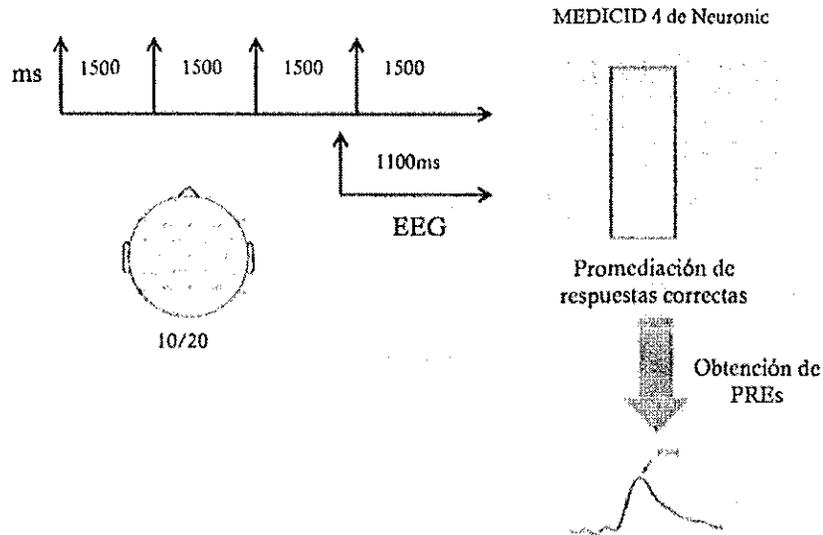


Figura 9.5. Representación esquemática del procedimiento del registro electrofisiológico y la obtención de PREs.

Posteriormente se obtuvieron los promedios individuales por condición (frecuente e infrecuente) y los promedios grupales para visualizar los PREs (en particular P300). A partir de los PREs grupales se definieron los principales componentes obtenidos y las derivaciones en las que se observan los principales cambios para hacer el análisis estadístico de voltaje y latencia en las tres tareas experimentales.

10. Resultados

10.1. Resultados conductuales

Se presentan los resultados conductuales para la muestra de un grupo de sordos profundos (n=10) y su grupo control de normo-oyentes (n=10). Esta muestra se obtuvo de un total de 13 sordos que aceptaron participar, de los cuales se excluyeron tres: el primero porque en el registro electrofisiológico no cumplió con el criterio de alcanzar un mínimo de 15 ventanas sin artefacto para la promediación de los PREs; otro sujeto al que no le fue posible completar todas las sesiones del estudio; y un tercero que, a pesar de completar el estudio, no se incluyó en la muestra porque su tipo de hipoacusia severa era de inicio postlingual.

RESPUESTAS CORRECTAS	CONTROL		SORDOS	
	PRE	POST	PRE	POST
Altura	17.4 (8.21)	19.1 (4.56)	17.4 (8.63)	22.3 (7.45)
Duración	20.1 (8.13)	20.8 (3.16)	19.4 (7.59)	25 (3.71)
Visual Color	29.9 (0.32)	29.1 (1.29)	29.8 (0.42)	29.4 (0.84)
TIEMPO DE REACCIÓN				
Altura	586.62 (72.59)	587.22 (112.24)	693.25 (186.32)	597.75 (153.37)
Duración	794.76 (123.64)	827.13 (47.14)	848.64 (151.55)	800.39 (95.86)
Visual Color	416.26 (56.58)	416.31(42.85)	405.77 (56.96)	426.25 (113.62)
OMISIONES				
Altura	12.6 (8.21)	10.9 (4.56)	12.6 (8.63)	7.7 (7.45)
Duración	9.9 (8.13)	9.2 (3.16)	10.6 (7.59)	4.9 (3.79)
Visual Color	0.1 (0.32)	0.9 (1.29)	0.2 (0.42)	0.6 (0.84)
COMISIONES				
Altura	9.1 (9.63)	3.3 (3.89)	4.1 (4.41)	1.8 (1.62)
Duración	5.8 (10.5)	1.5 (2.22)	2.0 (2.58)	0.8 (1.23)
Visual Color	0.2 (0.42)	0.1 (0.32)	0.1 (0.32)	1.4 (4.43)

Tabla 10.1. Medias y desviaciones estándar de cuatro variables de la ejecución conductual (respuestas correctas, tiempo de reacción, omisiones y comisiones) en el pre y post-entrenamiento para los dos grupos estudiados (grupo: sordos n=10; controles n=10).

Nuestro objetivo fue analizar el efecto del entrenamiento, el efecto por grupo y el efecto entrenamiento x grupo. En el rendimiento conductual se realizó un Análisis de Varianza de medidas repetidas de dos factores (Entrenamiento: pre y post; Grupo: sordos y controles normo-oyentes) para cada una de las tres tareas, utilizando las respuestas correctas, los tiempos de reacción, las omisiones y las comisiones como variables dependientes. En la tarea de discriminación de duración se encontró un efecto del entrenamiento en el aumento de la cantidad de respuestas correctas ($F_{(1,8)} = 4.507$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.200$) sin interacción de grupo.

Al parecer este efecto se debe principalmente a los cambios conductuales observados en el grupo de sordos, sin embargo esta tendencia de diferencias grupales no resultó significativa, por lo cual se decidió también analizar las variables conductuales de manera intragrupal con un Análisis de Varianza de Medidas Repetidas (Entrenamiento: 2, pre y post), en el que el grupo de sordos se analiza por separado del grupo normo-oyente, y cada uno es su propio control (pre y post entrenamiento). En el grupo de sordos encontramos diferencias significativas en la ejecución de ambas tareas de discriminación vibro-táctil antes y después del entrenamiento. Se observó un incremento de respuestas correctas en el desempeño de la discriminación de "altura" de dos tonos de diferentes frecuencias pre y post-entrenamiento ($F_{(1,8)} = 7.75$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.463$) y respectivamente se observó un decremento significativo en el número de omisiones. De igual manera en este grupo, se encontraron diferencias significativas en la tarea de discriminación de dos tonos de diferente duración, en cuanto al número de respuestas correctas ($F_{(1,8)} = 8.54$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.487$) y el número de omisiones. Ambos grupos parecen reflejar una mejoría en rendimiento, mas únicamente en el grupo de sordos es donde se pudo encontrar un

efecto significativo del entrenamiento sobre la habilidad de discriminación vibro-táctil de tonos con diferentes cualidades. Véase Gráfica 10.1 y 10.3.

Se realizó otro análisis intergrupar de las variables conductuales comparando el pre-entrenamiento y el post-entrenamiento entre los grupos con un Análisis de Varianza de medidas repetidas de un factor (Grupo: 2, sordos y controles normo-oyentes). Antes del entrenamiento no se observan diferencias significativas entre los grupos en ninguna de las variables para las tres tareas evaluadas. En general, se observa un incremento en el número de respuestas correctas y reducción en el tiempo de reacción en ambos grupos, pero sólo el grupo de sordos logra un incremento significativo en el número de respuestas correctas en la discriminación de duración como resultado del entrenamiento ($F_{(1,18)}=7.43$, $p < 0.05$, $\eta^2= 0.292$), así como en la cantidad de omisiones. Véase Gráfica 10.1 y 10.3.

En la tarea visual de discriminación de color (tarea control) no se encontraron resultados significativos en ninguno de los tres análisis. Se observa claramente un efecto de techo ya que esta tarea es muy sencilla para los dos grupos, independientemente del tiempo de registro en el que ésta se realice porque el entrenamiento no tienen efecto sobre el desempeño en esta modalidad sensorial que no fue entrenada.

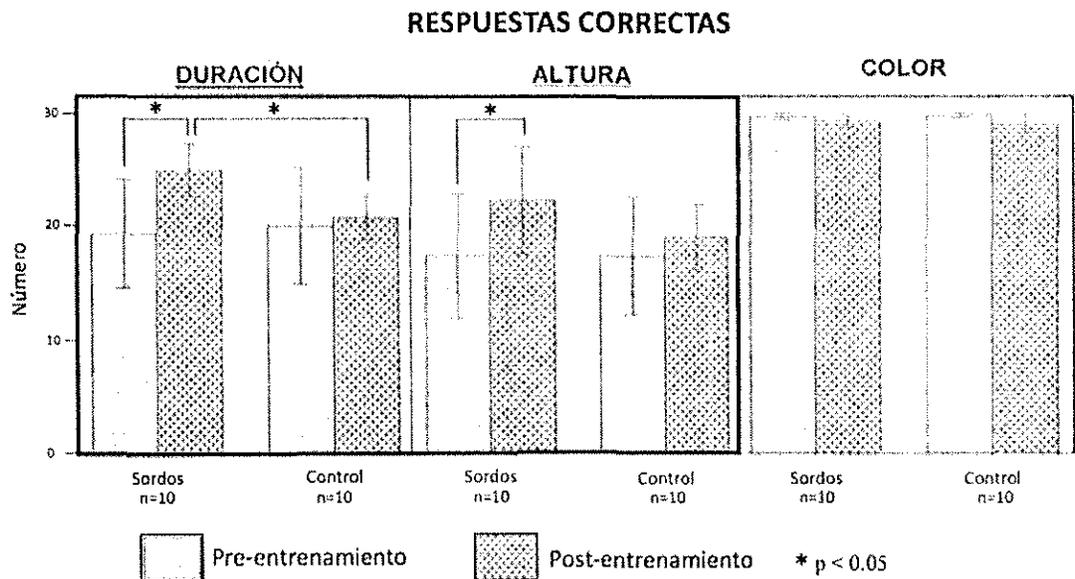


Figura 10.1. Respuestas correctas promedio de los 2 grupos (sordos n=10; controles n=10) antes y después del entrenamiento en la tarea de discriminación vibro-táctil de duración de dos tonos (250 msec; 500 msec, a la izquierda), la tarea de discriminación vibro-táctil de altura de dos tonos (900 Hz; 700 Hz, en el centro); y la tarea control de discriminación visual de color (círculo azul; círculo amarillo, a la derecha). (Media +/- 2 ESM)

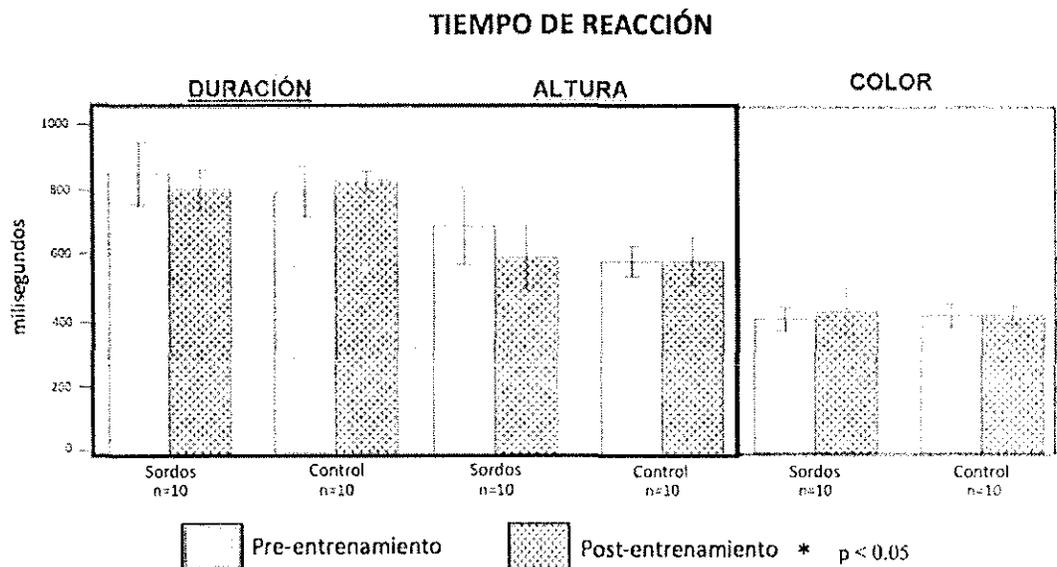


Figura 10.2. Tiempo de reacción promedio de respuestas correctas de los 2 grupos (sordos n=10; controles n=10) antes y después del entrenamiento en la tarea de discriminación vibro-táctil de duración de dos tonos (250 msec; 500 msec, a la izquierda), la tarea de discriminación vibro-táctil de altura de dos tonos (900 Hz; 700 Hz, a la derecha). (Media +/- 2 ESM)

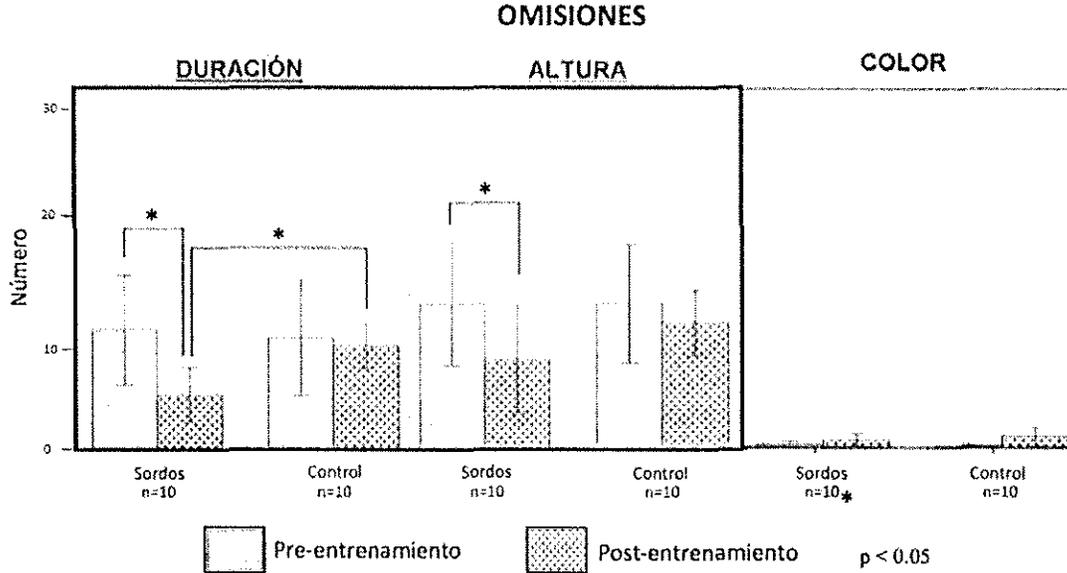


Figura 10.3. Omisiones promedio de los 2 grupos (sordos n=10; controles n=10) antes y después del entrenamiento en la tarea de discriminación vibro-táctil de duración de dos tonos (250 mseg; 500 mseg, a la izquierda), la tarea de discriminación vibro-táctil de altura de dos tonos (900 Hz; 700 Hz, en el centro); y la tarea control de discriminación visual de color (círculo azul; círculo amarillo, a la derecha). (Media +/- 2 ESM)

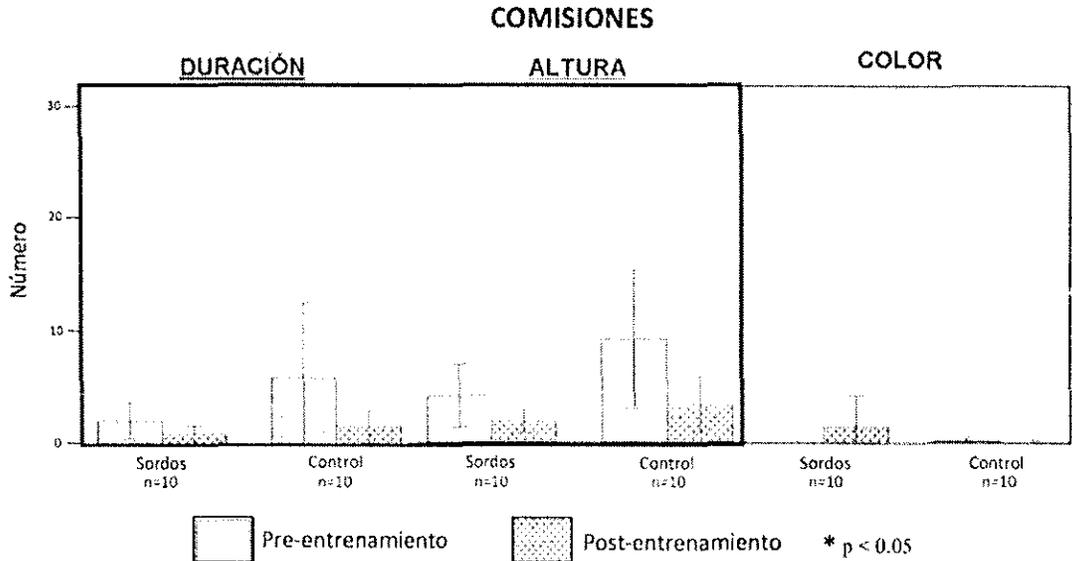


Figura 10.4. Comisiones promedio de los 2 grupos (sordos n=10; controles n=10) antes y después del entrenamiento en la tarea de discriminación vibro-táctil de duración de dos tonos (250 mseg; 500 mseg, a la izquierda), la tarea de discriminación vibro-táctil de altura de dos tonos (900 Hz; 700 Hz, en el centro); y la tarea control de discriminación visual de color (círculo azul; círculo amarillo, a la derecha). (Media +/- 2 ESM)

10.2. Resultados electrofisiológicos

El interés principal del estudio radica en tratar de demostrar una potencial diferencia entre los grupos respecto a los cambios ocasionados por el entrenamiento en discriminación vibro-táctil. El análisis visual de los PREs resultantes en cada tarea confirmó los supuestos de distribución topográfica parietal del componente P300, que típicamente resulta de la ejecución de paradigmas tipo odd-ball en distintas modalidades sensoriales. Por esta razón se decidió realizar el análisis de los cambios en los PREs sobre una región topográfica determinada donde se observaban mayores voltajes, con el objeto de maximizar la amplitud de las respuestas electrofisiológicas obtenidas y minimizar el efecto de la variabilidad individual, máxime considerando que la cantidad de sujetos en cada grupo resulta pequeña para otro tipo de examen estadístico.

En esta línea de pensamiento y tratando de facilitar el análisis electrofisiológico se obtuvieron los PREs-diferencia individuales para cada condición y tarea, a través de la resta sistemática de los valores de promedio de voltaje en cada derivación de la condición infrecuente respecto a la frecuente (ej, PRE promedio individual de los ensayos infrecuentes en la tarea discriminación de frecuencia tonal – PRE promedio individual de los ensayos frecuentes en la tarea discriminación de frecuencia tonal). Con los PREs-diferencia individuales se obtuvieron, por promediación, los PREs diferencia grupales para el pre y post entrenamiento en cada tarea.

Descripción de PREs

En las figuras de los PREs que se mostrarán y describirán a continuación, se presenta graficado el componente P300 en las tres derivaciones de la línea media (Fz, Cz y Pz) y seis derivaciones circundantes (F3, C3, P3, F4, C4, P4) para cada uno de los grupos en las dos condiciones de registro en las que se realizaron las tareas experimentales, antes y después del entrenamiento en la discriminación vibro-táctil de los sonidos. La curva roja corresponde a la condición infrecuente, la curva negra a la condición frecuente y la curva verde al PRE diferencia (PRE promedio grupal de los ensayos infrecuentes - PRE promedio grupal de los ensayos frecuentes). Hay dos figuras para cada tarea experimental (discriminación de frecuencia, de duración o de color). En una figura se pueden observar los PREs de los dos grupo para uno de los tiempos de registro, el pre o post entrenamiento. Estas gráficas permiten ver diferencias comparables entre los grupos. Los mapas permiten una amplia visualización de la distribución topográfica fronto-centro-parietal del componente P300. En los mapas topográficos de cada grupo para cada condición de entrenamiento está representada la distribución y magnitud de los voltajes ante los estímulos frecuentes e infrecuentes y la diferencia entre los anteriores.

En las **Figuras 10.5 y 10.6** se presentan los componentes correspondientes a la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente frecuencia o “altura” (700 Hz y 900 Hz) para los registros PRE y POST-entrenamiento para el grupo de sujetos de sordos profundos (n=9) y para el grupo de sujetos normo-oyentes (n=9), así como los mapas de distribución topográfica. El componente P300 para la condición pre-entrenamiento generado ante el estímulo infrecuente (tono de 700 Hz) tiene una distribución fronto-

centro-parietal con una latencia similar para ambos grupos de sujetos, alcanzando su voltaje máximo en la derivación Pz. Para la condición post-entrenamiento, en ambos grupos se observa como el componente incrementa su amplitud notablemente de frontales a parietales, alcanzando su voltaje máximo en zonas parietales a los 410 mseg en el grupo de sordos profundos y a los 450 mseg en el grupo de normo-oyentes. En los mapas topográficos de ambos grupos se observan cambios del pre al post entrenamiento, un incremento de los voltajes y una más amplia distribución del componente. Cabe resaltar que en el grupo de sordos, estos cambios son más robustos y que es evidente una lateralización derecha en zonas parietales.

Los componentes correspondientes a la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente duración (tonos de 700 Hz con una duración de 250 mseg y 500 mseg) realizada antes y después de un periodo de entrenamiento para el grupo de sordos profundos (n=10) y para el grupo de sujetos normo-oyentes (n=10) se presentan en las **Figuras 10.7 y 10.8**. Las áreas sombreadas indican la latencia de cada uno de los estímulos. El gris oscuro señala los 100 mseg antes de la presentación del estímulo y los primeros 250 mseg de duración del tono corto y el gris claro los 250 mseg adicionales que dura el tono largo completando la duración total de 500 mseg. Todo esto con el objetivo de demostrar que el componente P300 está desplazado en el tiempo por las características de los estímulos y por ende las latencias de pico máximo son alrededor de los 700 mseg. Esta tarea parece representar un mayor nivel de dificultad sobre todo para los normo-oyentes. Esto podría ser un factor que influya en la falta de definición del componente P300 en este grupo en el registro pre-entrenamiento; ya que en comparación, el componente P300 está presente claramente en el grupo de sujetos sordos en los dos

tiempos de registro. En la condición post-entrenamiento, en el grupo de los sordos el componente alcanza un voltaje máximo a los 700 mseg en zonas centrales. En los controles normo-oyentes, el componente P300 tiene una latencia un poco mayor, pero sobre todo se observa un menor voltaje. Desde el inicio, antes del periodo de aprendizaje, la activación en el grupo de los sordos es de mayor magnitud pero sobretodo tiene una amplia distribución que se mantiene después del entrenamiento.

Por último, en las **Figuras 10.9 y 10.10** se presentan los componentes correspondientes a la tarea de discriminación visual de círculos de diferente color (círculo azul y círculo amarillo) para los registros PRE y POST-entrenamiento para el grupo de sujetos de sordos profundos (n=10) y para el grupo de sujetos normo-oyentes (n=10). No hay diferencias observables en estos componentes ni inter ni intra-grupales. El componente P300 generado ante el estímulo infrecuente (círculo amarillo) tiene una amplia distribución fronto-centro-parietal con voltajes de pico máximo y latencia muy similares. No se observan cambios significativos en el componente antes y después del entrenamiento en los dos grupos.

DISCRIMINACIÓN DE ALTURA PRE-ENTRENAMIENTO

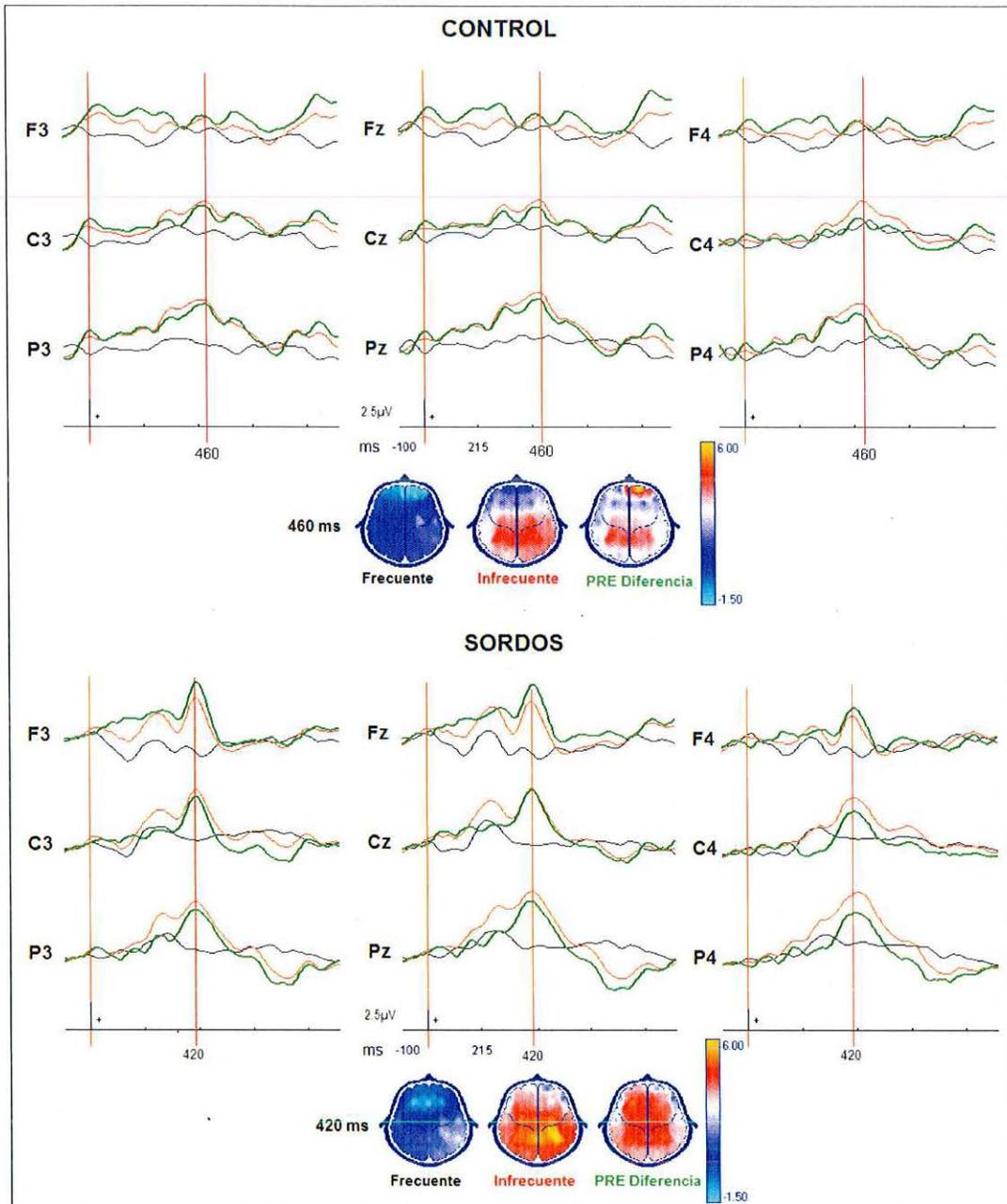


Figura 10.5. PREs promedios grupales de los 2 subestados (frecuente e infrecuente) y PREs diferencia grupales (infrecuente-frecuente) de 9 sordos y 9 controles en la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente altura obtenidos pre-entrenamiento en las derivaciones (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes.

DISCRIMINACIÓN DE ALTIMA POST-ENTRENAMIENTO

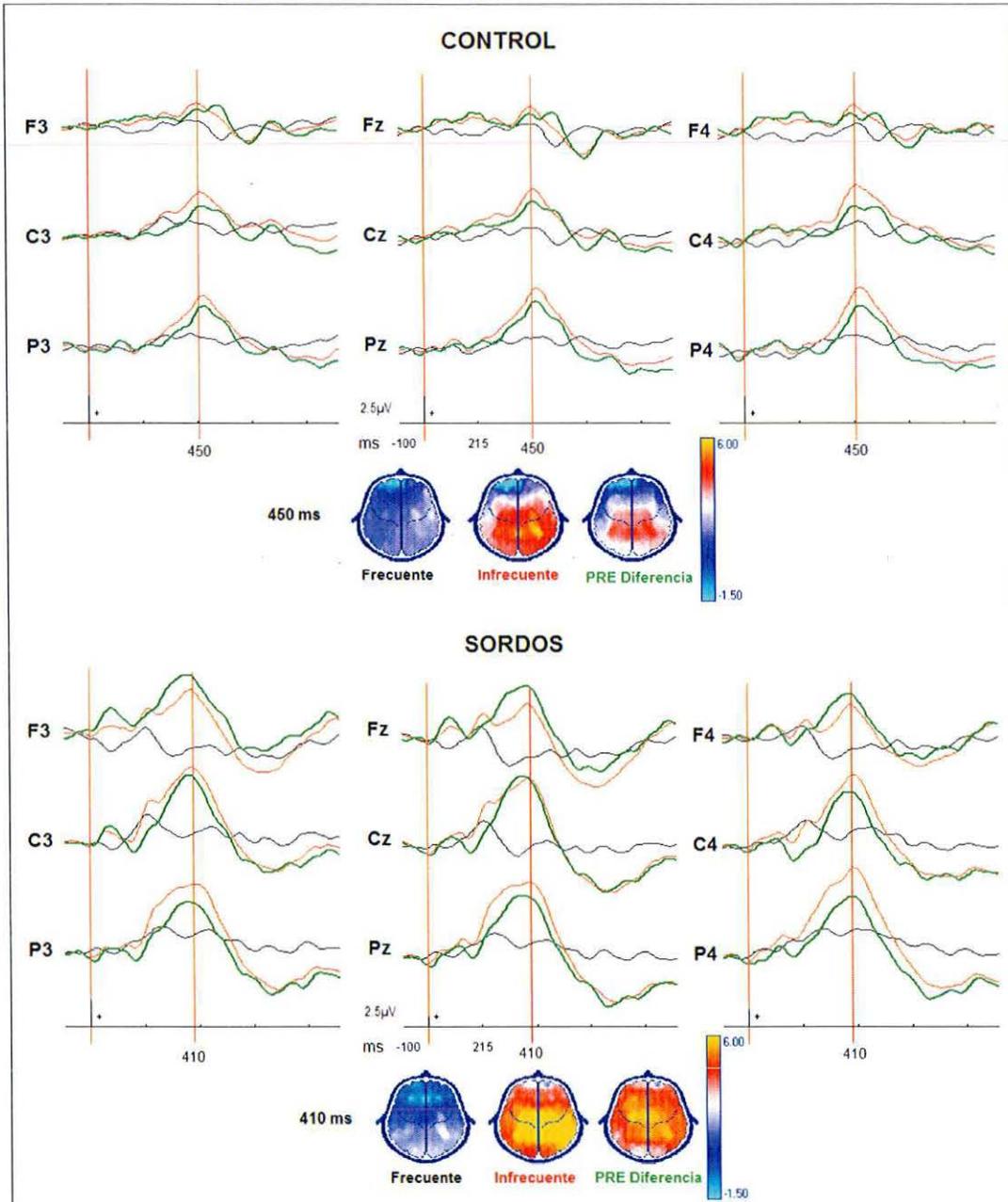


Figura 10.6. PREs promedio grupales de los 2 subestados (frecuente e infrecuente) y PREs diferencia grupales (infrecuente-frecuente) de 9 sordos y 9 controles en la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente altura obtenidos post-entrenamiento en las derivaciones (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes.

DISCRIMINACIÓN DE DURACIÓN PRE-ENTRENAMIENTO

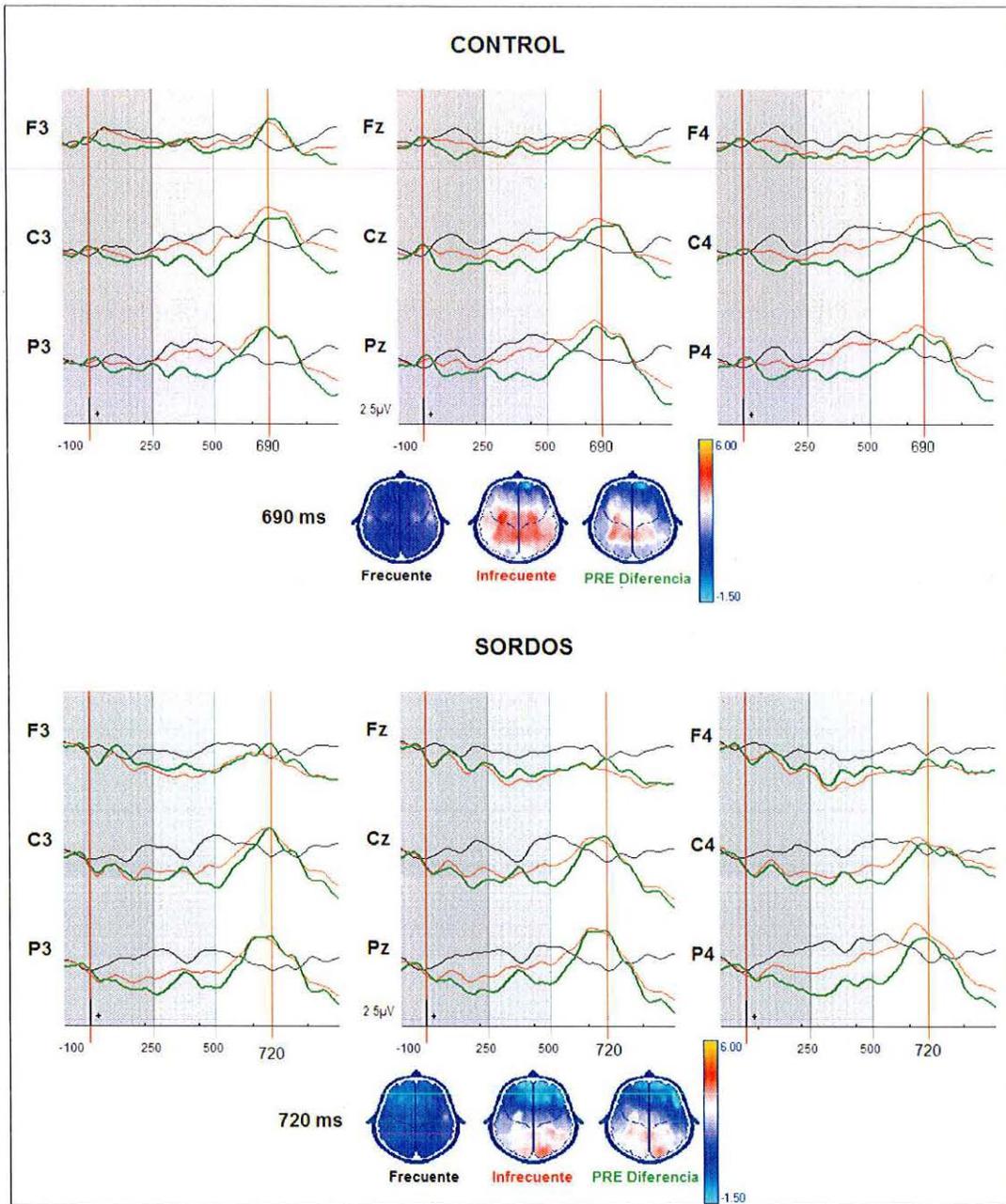


Figura 10.7. PREs promedios grupales de los 2 subestados (frecuente e infrecuente) y PREs diferencia grupales (infrecuente-frecuente) de 10 sordos y 10 controles en la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente duración obtenidos pre-entrenamiento en las derivaciones (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes. El área sombreada gris oscuro señala los 100 mseg antes de la presentación del estímulo y los primeros 250 mseg de duración del tono corto y el gris claro los 250 mseg adicionales que dura el tono largo completando la duración total de 500 mseg.

DISCRIMINACIÓN DE DURACIÓN POST-ENTRENAMIENTO

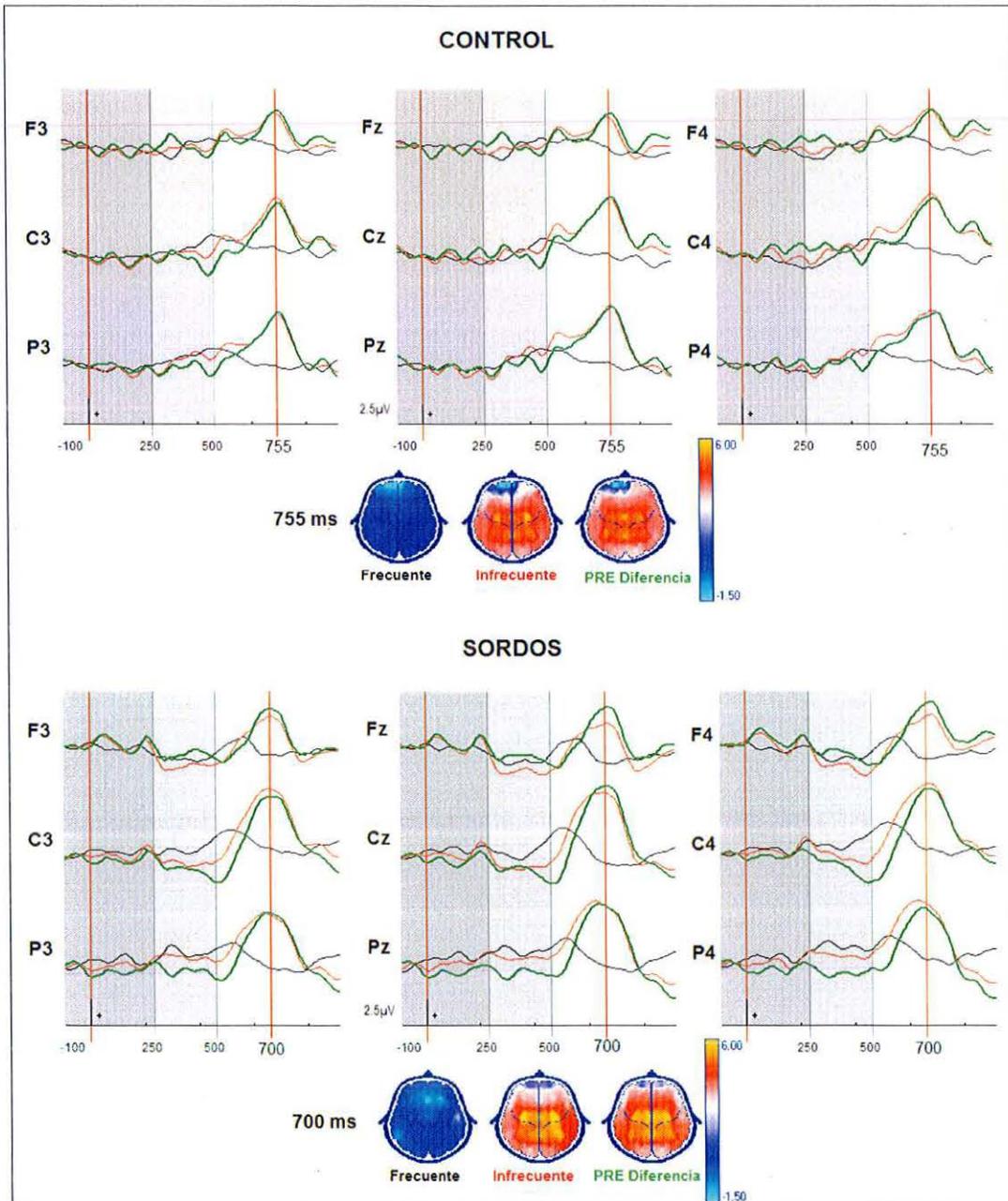


Figura 10.8. PREs promedio grupales de los 2 subestados (frecuente e infrecuente) y PREs diferencia grupales (infrecuente-frecuente) de 10 sordos y 10 controles en la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente duración obtenidos post-entrenamiento en las derivaciones (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes. El área sombreada gris oscuro señala los 100 mseg antes de la presentación del estímulo y los primeros 250 mseg de duración del tono corto y el gris claro los 250 mseg adicionales que dura el tono largo completando la duración total de 500 mseg.

DISCRIMINACIÓN DE COLOR PRE-ENTRENAMIENTO

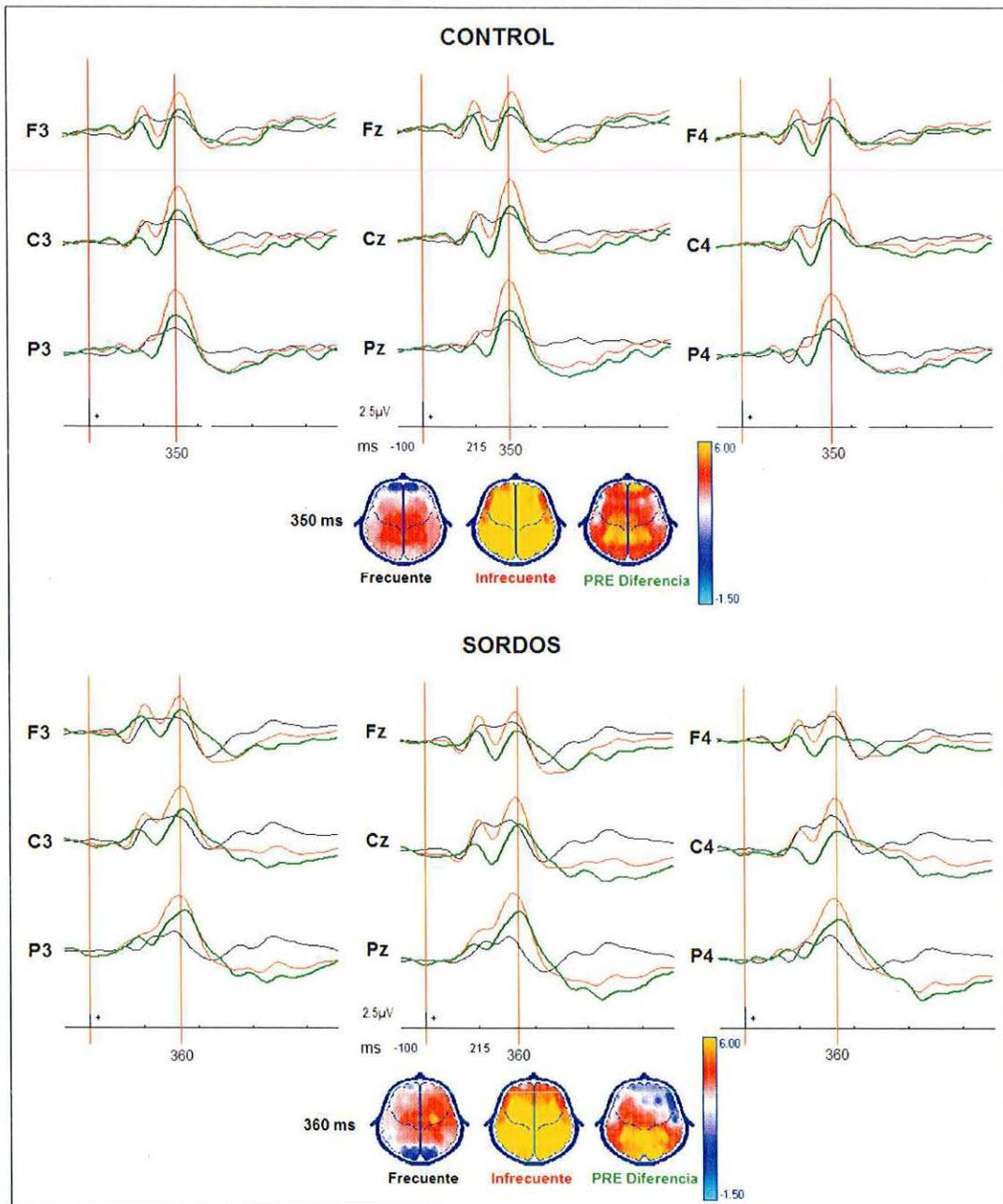


Figura 10.9. PREs promedios grupales de los 2 subestados (frecuente e infrecuente) y PREs diferencia grupales (infrecuente-frecuente) de 10 sordos y 10 controles en la tarea de discriminación visual de círculos de diferente color obtenidos pre-entrenamiento en las derivaciones (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes.

DISCRIMINACIÓN DE COLOR POST-ENTRENAMIENTO

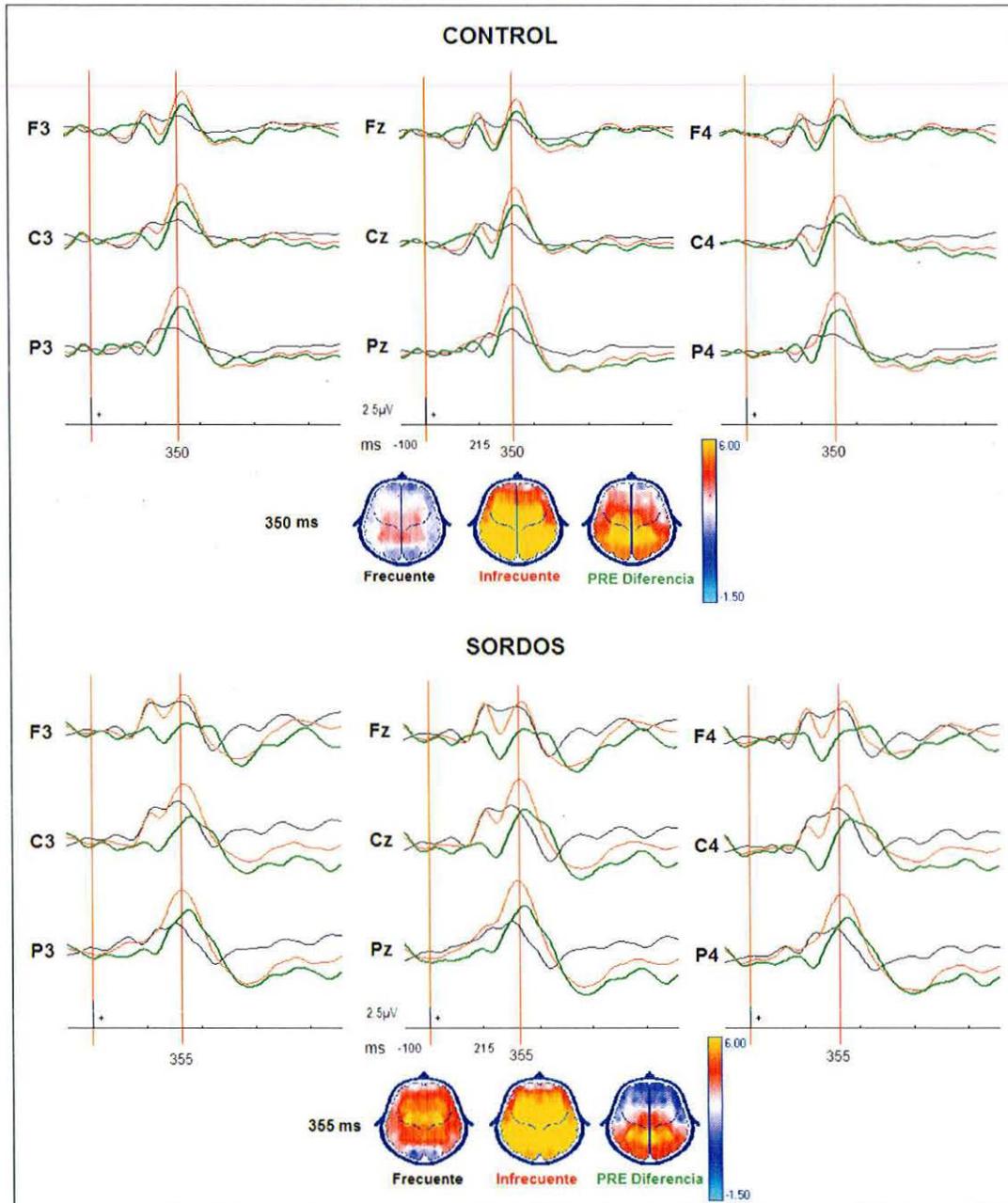


Figura 10.10. PREs promedios grupales de los 2 subestados (frecuente e infrecuente) y PREs diferencia grupales (infrecuente-frecuente) de 10 sordos y 10 controles en la tarea de discriminación visual de círculos de diferente color obtenidos post-entrenamiento en las derivaciones (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4) y sus mapas de distribución topográfica correspondientes.

Análisis estadístico de variables electrofisiológicas: magnitud y latencia

Se realizó un Análisis de Varianza de medidas repetidas de dos factores (Entrenamiento: pre y post; Derivación: 3 diferentes para cada tarea) y de tres factores (Entrenamiento: pre y post; Derivación: 3 diferentes para cada tarea; y Grupo: sordos y controles normo-oyentes) de los voltajes del componente P300 en una latencia determinada con el objetivo de analizar el efecto del entrenamiento sobre la magnitud de este PRE. En todos los casos cuando fue necesario se hicieron correcciones de Greenhouse-Geisser. La muestra de cada grupo fue de 10 sujetos, con excepción de la tarea de discriminación de tonos de diferente frecuencia tonal. Únicamente para el análisis estadístico de esta tarea se eliminó a un sujeto de la muestra porque sus datos electrofisiológicos estaban alterados por artefacto y se conservó una $n=9$ para ambos grupos. No se encontraron cambios significativos en el voltaje para la tarea de discriminación visual de color. Así mismo, en ninguna de las tareas experimentales se encontraron diferencias significativas en cuanto a los cambios en la latencia del componente.

En la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente altura las tres derivaciones seleccionadas para el análisis de datos de acuerdo a la distribución topográfica parietal del componente P300 fueron: P3, P4 y Pz. Se encontró un efecto debido al entrenamiento, expresado como un significativo incremento de voltaje o de la positividad en el registro post-entrenamiento en comparación con el pre-entrenamiento para ambos grupos [$F_{(1,16)}= 4.743$, $p<0.05$, $\eta^2_p = .229$], aunque este resultó mucho mayor en el caso de los sordos. También se encontró un efecto de la derivación [$F_{(1,6, 26.9)}= 6.453$, $p<0.01$, $\eta^2_p = .287$] con significativo mayor voltaje en parietal derecho (P4) que

en izquierdo (P3) en el caso de los sordos, así como una interacción significativa entrenamiento x derivación [$F_{(2, 15)} = 4.376$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = .215$] y entrenamiento x derivación x grupo [$F_{(2, 15)} = 3.952$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = .345$]. Los análisis post hoc confirmaron que el cambio resultó mayor en la región parietal derecha en los sordos mientras que en los controles no se observó una diferencia significativa entre ambas regiones parietales. Por otro lado, en la tarea de discriminación vibro-táctil de tonos de diferente duración las tres derivaciones seleccionadas para el análisis de datos se situaron alrededor del vértex, debido a que en esta tarea el componente alcanzó voltajes máximos en la región central: C3, C4 y Cz. Se encontró un efecto relevante debido al entrenamiento, con un significativo incremento de la positividad del componente en el registro post-entrenamiento en comparación con el pre-entrenamiento ($F_{1,16} = 8.535$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = .348$), en general para los dos grupos. No se encontraron diferencias significativas entre grupos, ni interacción entre los factores evaluados.

Respecto a las latencias del componente P300 se realizó un Análisis de Varianza del promedio de las diferencias de las latencias grupales sobre las derivaciones de la línea media (Fz, Cz y Pz) con el objetivo de analizar el efecto del entrenamiento. El análisis mostró únicamente diferencias significativas entre los grupos en cuanto a la latencia del componente P300 en Cz ($F_{(1,8)} = 6.255$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.258$) en la tarea de discriminación de tonos de diferente duración. El componente se presentaba de manera significativamente más temprana en el grupo de sordos en el registro realizado post-entrenamiento, más no se observó una disminución significativa en latencia entre el pre y post entrenamiento para ninguno de los dos grupos.

11. Discusión General

La sordera profunda pre-lingual constituye un importantísimo problema de salud, tanto por su incidencia poblacional, como por lo difícil de su diagnóstico temprano, la cuantiosa cantidad de recursos que deben ser destinados al diagnóstico y tratamiento de esta entidad, pero sobre todo, por el déficit que representa para el neurodesarrollo normal, la instauración de lenguaje y la adecuada inserción socio-económica de los pacientes afectados.

Tal y como se ha subrayado en los antecedentes de este trabajo, la población afectada por esta discapacidad tiende a ser muy heterogénea, no solo por las variadas etiologías que sustentan una pérdida sensorial de este tipo, sino por las condiciones en que se generan, las diferencias genéticas, la asociación o no a otras entidades que limitan el neurodesarrollo y el entorno familiar, entre otras muchas causas. Es por ello que resulta extraordinariamente difícil agrupar una muestra significativa de estos sujetos y que sea, además, lo suficientemente homogénea como para poder dilucidar claramente los resultados de cualquier tipo de intervención en los mismos. A pesar de estas limitaciones, el hecho de que una importante cantidad de sordos profundos prelinguales tengan intacta la corteza cerebral auditiva desde el inicio de su desarrollo y que el estado funcional de la misma en los años posteriores exhiba el impacto particular de la carencia de estimulación física, le confieren a este tipo de pacientes la calidad de interesante modelo clínico del neurodesarrollo, llave para el conocimiento de la dinámica del desarrollo neurofuncional cerebral y sus determinantes genéticas y ambientales.

En este contexto, el presente estudio se inscribe como el esfuerzo inicial de un grupo multidisciplinario de trabajo por conocer más a la población con sordera profunda, sus características en nuestro medio, iniciar el estudio de los cambios anatómo-funcionales asociados a la solución de tareas cognitivas novedosas para este grupo de pacientes, así como evaluar el efecto del entrenamiento de habilidades alternativas de discriminación sensorial en los mismos, a través de la evaluación de los cambios en la actividad eléctrica cerebral (PREs) con relación a un grupo de sujetos controles sanos.

Resultados conductuales

En primera instancia y previo al entrenamiento en la discriminación vibro-táctil, la ejecución conductual de las tareas experimentales no mostró diferencias significativas entre los grupos para ninguno de los parámetros evaluados (tiempos de reacción y respuestas correctas) ni en la tarea de discriminación visual, ni en las propias de discriminación vibro-táctil. Esto representa un resultado llamativo, dado que nuestra noción inicial consistía en que los sordos, dada la integridad de su estructura cortical cerebral y la dependencia del análisis sensorial sobre vías distintas a la auditiva, habrían desarrollado capacidades superiores para la discriminación vibro-táctil respecto a los controles normo-oyentes (Kujala et al., 2005; Levänen et al., 1998, Levänen & Hamdorf , 2001).

Varios estudios realizados en sujetos con alguna privación sensorial argumentan sólidamente a favor de esta noción de “hipersensibilidad” de algún otro sentido no afectado. Hay evidencia de que cuando no hay aferencias en una modalidad sensorial, los otros sentidos se vuelven hipersensibles. Hamilton y Pascual-Leone (1998), al igual que

Wan y Schlaug (2010), lo observaron en la habilidad táctil agudizada de ciegos congénitos, quienes demostraron tener un umbral somestésico más bajo en comparación con sujetos videntes, probablemente desarrollado con la lectura de Braille. De manera más específica en relación a la población en estudio y con tareas de discriminación similares a las nuestras, Levänen y Hamdorf (2001) observaron que el desempeño conductual de los sordos congénitos detectando cambios aleatorios de frecuencia (estímulos infrecuentes) en un tren monótono de estímulos vibro-táctiles fue significativamente mejor que el de los controles normo-oyentes. De acuerdo con estos autores, los resultados obtenidos implican que los sordos tienen una sensibilidad vibro-táctil exagerada o superior.

Nosotros no pudimos replicar resultados que indican una mayor sensibilidad previa al entrenamiento en el grupo de sordos profundos, al igual que Bernstein y colaboradores en un experimento realizado en 1986. Estos autores no encontraron diferencias psicofísicas en la percepción de estímulos vibro-táctiles entre niños sordos y normo-oyentes. Nuestros resultados conductuales, sin embargo, no descartan los fundamentos teóricos de los mecanismos cerebrales de neuroplasticidad compensatoria y la reorganización intermodal que pudieran explicar diferencias pre-entrenamiento en cuanto al procesamiento cerebral de estos dos grupos. Los resultados electrofisiológicos discutidos más adelante son interpretados en relación a esta perspectiva.

Podríamos atribuir nuestros hallazgos a que el tipo de tareas exploradas en nuestro estudio no corresponde a estímulos que el individuo explora por vía táctil en un ámbito natural de manera habitual (ej. la vibración de un tono puro de duración determinada) y tal vez esta sea la causa de que los resultados obtenidos pre-

entrenamiento no indicaran alguna hipersensibilidad táctil en el grupo de sordos. En la entrevista inicial nuestros sujetos refirieron típicamente emplear el tacto en la vida cotidiana para percibir estímulos tales como, por ejemplo, la vibración de la música en una bocina, aunque en este caso, la melodía representa un estímulo complejo de distinta naturaleza a los estímulos experimentales presentados en nuestras tareas.

Otro factor determinante en el desempeño conductual en el grupo de sordos pre-entrenamiento es la heterogeneidad de experiencia previa en la oralización, ya que el utilizar el tacto como sentido complementario para el desarrollo del lenguaje y la comunicación influye de manera importante en el desarrollo de una mejor discriminación somatosensorial de las vibraciones. Independientemente del método de comunicación primario del sujeto, todos en la muestra han recibido terapias de oralización o tuvieron algún tipo de entrenamiento discriminando la vibración percibida en un interlocutor y en ellos mismos para distinguir una vocal y/o consonante de otra. Sin embargo, no todos tuvieron este entrenamiento en la misma etapa del desarrollo, con la misma duración y frecuencia e incluso hasta con las mismas técnicas de enseñanza, lo cual pudiera explicar las diferencias individuales entre los sujetos que conforman el mismo grupo. No consideramos otras variables como la edad de inicio de empleo de un audífono de sordera y el tiempo de uso del mismo, que de acuerdo con algunos autores son clave para determinar la capacidad del procesamiento vibro-táctil del sonido y específicamente del habla (Bolanowski et al., 1988; Bernstein et al, 1991; Bernstein et al, 1998). Esto se debe a que los audífonos de sordera en sujetos con hipoacusia severa operan a altos niveles de intensidad siendo esta vibración mecánica perceptible vía somestésica, por lo que hipotéticamente, la estimulación sensorial constante y prolongada podría determinar la

aparición de cambios en el desarrollo cortical y por ende facilitar el empleo de las vías somestésicas en el procesamiento del sonido.

Resumiendo lo anterior, es posible que nuestros estímulos y la discriminación que implica la ejecución de las tareas presentadas esté muy limitada a un escenario de laboratorio y aunque las tareas parezcan simples, no sean comparables a la experiencia que en cuanto a discriminación tienen estos sujetos en la vida real y por lo tanto su ejecución no refleje una mayor sensibilidad en el procesamiento de estímulos vibrotáctiles. Cabe mencionar que en las sesiones de entrenamiento, el grupo de los sordos realizaba los ejercicios con mayor facilidad que los normo-oyentes y progresaban de manera más rápida en los diferentes niveles de dificultad.

Por otra parte y acorde con otra de nuestras hipótesis, el entrenamiento sí modificó la habilidad de los sujetos de ambos grupos para ejecutar las tareas de discriminación vibrotáctil, mismo efecto observado en estudios de entrenamiento en discriminación vibrotáctil del lenguaje en los que tanto sordos como normo-oyentes se benefician de un entrenamiento y ambos mejoran su desempeño conductual (Reed et al., 1982; Risberg & Lubker, 1978; Plant & Risberg, 1983; Rothberg & Molitor, 1979). En el presente estudio ambos grupos mostraron una tendencia hacia mayor número de aciertos y menor número de omisiones en el rendimiento conductual, obteniendo sólo en el grupo de sordos un número significativamente más alto de respuestas correctas en la tarea de discriminación de la duración de dos tonos realizada después del entrenamiento. También en el grupo de sordos hubo una disminución significativa en las omisiones. Es importante señalar el cambio en omisiones a diferencia de comisiones, porque este tipo de error indica que antes del entrenamiento el sordo en la tarea odd-ball espera la aparición del

estímulo infrecuente más es capaz de distinguirlo sólo algunas de las veces que se presenta. Si el caso fuera distinto, un alto número de comisiones indicaría que el sujeto en la sesión pre-entrenamiento no distingue entre los dos tipos de estímulos vibro-táctiles presentados y que responde de manera aleatoria o incluso que no hubo una buena comprensión de las instrucciones de la tarea.

En los ejercicios de entrenamiento en la discriminación de tonos de distintas frecuencias se observó un desempeño similar a lo largo de las sesiones entre los dos grupos. En general ambos describían esta tarea como muy sencilla ya que dependía principalmente de detectar la intensidad del estímulo [que tan fuerte (700 Hz) o suave (900 Hz) se sintiese la vibración en el dedo índice]. En el grupo de normo-oyentes la media de respuestas correctas cambia muy poco, sin embargo como lo indica la desviación estándar, se redujo bastante la variabilidad entre los sujetos. Esto podría ser interpretado como que el entrenamiento determinó un desempeño más consistente entre los diferentes sujetos normo-oyentes. En cambio los sordos, aunque inician con una ejecución promedio similar en cuanto a las respuestas correctas respecto al grupo control, logran aumentar significativamente el número de respuestas correctas con el entrenamiento.

En la tarea de discriminación de duración de tonos el grupo de sordos también mejora significativamente su desempeño conductual posterior al entrenamiento, y además aprende a ser mucho más eficiente, en términos de respuestas correctas, que los controles. Nosotros creemos que esta era una tarea de mayor demanda cognitiva, la cual implica una toma de decisión basada en una diferencia de 250 milisegundos en el curso temporal del estímulo, y por lo tanto hay mayor oportunidad de mejoría en el desempeño con la

repetida exposición a los estímulos y la práctica en discriminación que se lleva a cabo en las sesiones de entrenamiento. La diferencia en ejecución del grupo de sordos antes y después del periodo de entrenamiento refleja el aprendizaje en este tipo de procesamiento.

El efecto del entrenamiento sobre la mejoría en la ejecución conductual no solo ha sido ampliamente reportado en la literatura sino que constituye la vía usual de desarrollo de procesos específicos y conductas, abarcando áreas tan amplias como la propia educación regular. En el caso del entrenamiento específico de la discriminación perceptual, hay consenso general en que un entrenamiento adecuado mejora los procesos perceptuales subyacentes, mientras modifica los sustratos neurales involucrados (ver Ahissar, 2001; Byrne, 2009; y Fahle, 2005, para revisión extensa). Los resultados de nuestro estudio señalan una asimetría en los efectos del entrenamiento, donde los sordos parecen beneficiarse más del mismo, en particular, para resolver la tarea más difícil de aquellas en las que fueron entrenados (discriminación de duración). Tal vez esto se deba al desarrollo de una nueva estrategia para resolver la tarea (Castro & Wasserman, 2012), al efecto de desarrollar una adaptación perceptual específica (Li and Fu, 2007), o simplemente al hecho de que los sujetos sordos disponen de áreas suplementarias de activación en corteza auditiva que podrían amplificar el efecto conductual del entrenamiento al aportar recursos supernumerarios al procesamiento perceptual (Auer et al., 2007).

Finalmente, la ausencia de diferencias significativas intergrupales pre y/o post-entrenamiento para la ejecución de tareas visuales, coincide con la hipótesis de que ante tareas de discriminación perceptual poco demandantes y realizadas a través de la

estimulación de vías anátomo-funcionalmente conservadas no deben existir diferencias entre sordos y normo-oyentes, además de considerar que el entrenamiento se administró vía vibro-táctil y en pocas sesiones, evitando un efecto de aprendizaje transmodal (McGovern, Webb, & Peirce, 2012).

Resultados electrofisiológicos

Los objetivos esenciales de esta investigación eran los de establecer si el proceso de aprendizaje en la decodificación de estímulos sonoros presentados vía vibro-táctil a sujetos sordos se reflejaba en cambios sustanciales en la magnitud, la latencia y la distribución de los PREs, particularmente en el componente P300. Se diseñaron las tareas experimentales de tipo odd-ball para la modalidad somatosensorial y visual ya que está bien establecido que este tipo de paradigma genera una clara positividad alrededor de los 300 milisegundos fácil de observar y comparar en distintas modalidades. En los escasos estudios electrofisiológicos reportados en sujetos sordos, la mayoría de las tareas implican la interpretación de PREs sensoriales visuales aunque un estudio si describió un componente P300 en un grupo de sordos congénitos en comparación a normo-oyentes (Chlubová et al., 2005). Como primera aproximación al procesamiento electrofisiológico de estímulos en esta población nos pareció acertado enfocarnos únicamente en este componente y realizar el análisis de los voltajes en las derivaciones circundantes a la línea media. Otra ventaja es que el componente P300 sirve como indicador del procesamiento temporal en procesos que implican memoria y atención.

Las tareas requerían una discriminación somestésica perceptual para la toma de decisiones, un procesamiento que implica un mínimo de cuatro operaciones neurales o

pasos cognitivos (Mountcastle, 1990): el primero, la codificación de cada uno de los dos estímulos diferentes; el segundo, mantener el primer estímulo en memoria de trabajo; el tercero, comparar el segundo estímulo con la huella de memoria del primero; y por último, ejecutar una respuesta motora indicando que se hizo una discriminación. Justo el procesamiento que refleja una P300 de acuerdo con el marco teórico de actualización contextual (Donchin et al., 1986). Según esta perspectiva teórica del proceso de actualización, cada estímulo, una vez procesado sensorialmente, representa un "esquema estable" para el sistema de tal modo que cuando se presenta una serie de estímulos sucesivos en el tiempo y de manera consecutiva, el sistema procede a comparar el "esquema actualmente en memoria" (correspondiente al estímulo recién procesado) con el generado por el estímulo que le sucede en el tiempo. Si el estímulo es el mismo, se mantiene el modelo neural del contexto del estímulo. En cambio, si el estímulo presentado es diferente al anterior, se reclutan recursos atencionales para actualizar la representación neural del contexto del estímulo y se genera el componente P300.

La repetición y la práctica son aspectos claves del aprendizaje y la automatización de procesos. Varios autores han observado cambios plásticos en componentes electrofisiológicos relacionados a un tipo de entrenamiento (Tremblay, Kraus, McGee, Ponton & Otis, 2001; Schneider & Schiffri, 1977; Schiffri & Schneider, 1984). De acuerdo con estos estudios, la práctica extensa reduce demandas atencionales en procesos de búsqueda visual y memoria visual. El estudio de Schiffrin & Schneider (1984) demostró que cuando se desarrolla una detección automática de un estímulo en una tarea visual de mapeo consistente, es decir, una tarea en la cual los estímulos blancos y no blancos permanecen estables entre ensayos, la práctica reduce las demandas de este

procesamiento controlado en tareas de búsqueda visual. Adicionalmente se reportó que componentes P300 de mayor amplitud son evocadas por estímulos en condiciones de menor carga de memoria. Concluyeron los autores que es posible que el desarrollo de procesos automáticos, reduzca las demandas cognitivas resultando en un incremento en la amplitud de P3. De manera semejante, en nuestro estudio se encontró un efecto debido a las cinco sesiones de entrenamiento en la discriminación de estímulos vibro-táctiles al que se sometieron todos los participantes. Este efecto se reflejó en cambios electrofisiológicos específicamente en un incremento en la magnitud del componente P300 del pre al post-entrenamiento de manera general en los dos grupos en ambas tareas de discriminación vibro-táctil.

Particularmente en la tarea de discriminación de altura de dos tonos puros, el cambio sustancial en el voltaje de P300 en el grupo de sordos en la región parietal derecha concuerda con resultados convincentes publicados por Kramer, Schneider, Fisk y Donchin (1986) y Van Dellen, Brookhuis, Mulder y Mulder (1985), quienes reportaron un incremento en la amplitud de P300 en función de la práctica. Kramer y colaboradores (1986) confirmaron este hallazgo después de un largo entrenamiento (12 sesiones experimentales con 1920 ensayos en cada sesión) en tareas de búsqueda visual de mapeo visual consistente y variable con diferentes cargas de memoria. En relación a nuestro estudio, los cambios en el voltaje reflejan cambios en la actividad eléctrica cerebral inducidos por el entrenamiento en la discriminación vibro-táctil de los sonidos que coinciden además con una mejora en la percepción y distinción de los estímulos de acuerdo con el desempeño conductual.

Este hallazgo confirma nuestra hipótesis en relación a los resultados esperados en nuestras variables electrofisiológicas, ya que el proceso de aprendizaje de la decodificación de estímulos somatosensoriales sí generó un cambio significativo en el grupo de sordos en términos del incremento en voltaje, más sin embargo no de latencia, y únicamente se observaron en una de las dos tareas vibro-táctiles. Estos resultados pueden ser interpretados de acuerdo a los diversos factores determinantes de la amplitud del componente P300. Cabe mencionar que las propuestas con las que pretendemos explicar nuestros hallazgos electrofisiológicos están a reserva de ciertas limitaciones metodológicas que ya han sido descritas al inicio de esta discusión.

De manera muy general, la amplitud de P3 es interpretada como un índice de intensidad de procesamiento que se ve afectada por demandas de capacidad cognitiva. Existen diversas teorías de procesamiento las cuales integran aspectos de percepción central, atención y memoria de trabajo. Las tres determinantes principales de la amplitud de este componente descritas en la extensa revisión de Kok (2001) son la relevancia de la tarea y la probabilidad de presentación del estímulo; el significado del estímulo; y la dificultad de la tarea. Es probable que para los sujetos sordos las tareas de discriminación vibro-táctil de los sonidos hayan tenido mayor relevancia en combinación con un incentivo motivacional importante, por lo cual estos sujetos destinaron una mayor cantidad de recursos atentos a la detección del estímulo blanco. Aquellos estímulos blancos con mayor significado (por su valor emocional o informativo) y aquellos a los que se les destina más atención usualmente generan una P300 de mayor magnitud (Picton, 1992; Pritchard, 1981). Otro factor a considerar no es únicamente el control subjetivo de la atención destinada a la realización de una tarea, sino además los factores

externos que influyen de manera involuntaria en la atención. Es decir, que los sordos en comparación de los normo-oyentes tienen menos distractores ambientales, ya que no perciben los sonidos del entorno. Aún cuando esto se controló en el experimento colocando a los controles audífonos atenuantes de sonido y una pista de ruido blanco de fondo sería bueno descartar el efecto distractor del sentido de la audición y la manera en que esto puede interferir con procesamiento cerebral.

No es sorprendente que los cambios se hayan presentado en la tarea de discriminación de frecuencia, la cual la mayoría de los sujetos describían como muy sencilla y de menor dificultad en comparación a la de discriminación de duración, dado el efecto que la dificultad de una tarea puede tener sobre el voltaje de la P3, es que a mayor dificultad, mayor movilización de recursos y esfuerzo cognitivo y menor es la amplitud del componente (Kok, 1986, 1997).

Por otro lado, es muy interesante lo que se observa en los mapas topográficos de voltaje que aunque no se analizaron todos los electrodos nos da idea de la activación y el procesamiento conjunto cerebral. No únicamente se observa la activación diferente de inicio sino también después del entrenamiento. Hubo cambios en ambos grupos pero más pronunciados para el grupo de sordos profundos y específicamente en la derivación P4 para la tarea de discriminación de altura. Lo cual nos llevaría a un último punto importante de discusión: ¿Tal vez los sordos tengan una mayor disponibilidad de recursos neurales para procesar estímulos presentados por la vía somatosensorial dado que tienen una organización cerebral distinta a los normo-oyentes?

Levanen y Hamdorf (2001) sugieren que la habilidad superior de los sordos congénitos en la detección de cambios vibro-táctiles es parcialmente el reflejo de

plasticidad intermodal en áreas corticales supratemporales a la corteza auditiva. Esta habilidad táctil superior en detectar cambios repentinos en estímulos vibro-táctiles es probablemente un mecanismo compensatorio ante la falta de la audición que señale eventos posiblemente peligrosos en el medio ambiente exterior. Estos resultados podrían estar relacionados con la plasticidad intermodal que se ha observado en la corteza auditiva supratemporal de sordos congénitos (Levanen et al., 1998) o la reorganización intramodal que se ha demostrado ocurren en ciertas áreas corticales de un cerebro maduro (Elbert, Pantev, Weinbruch, Rockstroh & Taub, 1995; Kass, 1995; Pantev et al., 1998). Por ejemplo, Elbert y colaboradores (1995) demostraron con un estudio de neuroimagen que la representación cortical de los dedos de la mano izquierda de músicos que tocan instrumentos de cuerdas es mayor que en los controles sugiriendo que la representación somatotópica en la corteza somatosensorial primaria es plástica y se adapta a las necesidades y experiencias del individuo.

En conclusión, la reorganización funcional y mecanismos de compensación tras la pérdida temprana de una modalidad sensorial determinan que las modalidades restantes desarrollen capacidades que exceden las de sistemas funcionales normales. También se ha observado que la lectura Braille y tareas de discriminación táctil y auditiva activan la corteza occipital lo cual sugiere una remodelación en las áreas funcionales a través de la plasticidad intermodal (Sadato et al., 1996; Kujala et al., 1995).

En resumen, los principales hallazgos tanto de resultados conductuales como electrofisiológicos son que primero, ambos grupos de sujetos se benefician de un periodo corto de entrenamiento en el aprendizaje de discriminación vibro-táctil siendo más robustos los cambios electrofisiológicos relacionados al proceso de aprendizaje, en

particular voltaje del componente P300 en el grupo de sordos. Segundo, aunque por medio de nuestro experimento no fue posible probar que los sujetos sordos desde antes del entrenamiento una mayor eficiencia en el procesamiento de estímulos somatosensoriales no se descarta este fenómeno que se ha descrito en la literatura. Tercero, el entrenamiento perceptual vibro-táctil no produce diferencias en la amplitud de voltaje o la latencia del componente P300 en ninguno de los grupos, ni entre ellos, al ejecutar la tarea de discriminación visual.

Perspectivas

Estos hallazgos sugieren que el método de sustitución sensorial podría representar una alternativa viable para que las personas con sordera bilateral profunda accedan al mundo de los sonidos que los rodean, lo cual podría generar la posibilidad de procesar el lenguaje hablado por esta vía. Sin embargo, sería imprescindible conocer *a priori* la existencia de una distribución funcional cortical que propicie este desarrollo vía entrenamiento y sobretodo, qué cambios específicos se producen con la adquisición de experticia en el reconocimiento de estímulos vibro-táctiles y en particular, con el hecho de asociarlos con una asignación semántica determinada.

Referencias Bibliográficas

Ahissar, M. (2001). Perceptual training: a tool for both modifying the brain and exploring it. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 98(21), 11842-3.

Allman, B.L., Keniston, L.P., & Mercdith, M.A. (2009) Adult deafness induces somatosensory conversion of ferret auditory cortex. *PNAS Early Edition*.

American Speech-Language-Hearing Association (ASHA). *Prevalence of hearing impairments*, 2011. <http://www.asha.org/>

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), 645-648.

Bavelier, D., Levi, D. M., Li, R. W., Dan, Y., & Hensch, T. K. (2010). Removing brakes on adult brain plasticity: from molecular to behavioral interventions. *The Journal of Neuroscience*, 30(45), 14964-14971.

Bavelier, D., & Neville, H. J. (2002). Cross-modal plasticity: where and how? *Nature Reviews Neuroscience*, 3(6), 443-452.

Bavelier, D., Tomann, A., Hutton, C., Mitchell, T., Corina, D., Liu, G., & Neville, H. (2000). Visual attention to the periphery is enhanced in congenitally deaf individuals. *Journal of Neuroscience*, 20(17), 1-6.

Bernstein, L. E., Demorest, M. E., Coulter, D. C., & O'Connell, M. P. (1991). Lipreading sentences with vibrotactile vocoders: Performance of normal-hearing and hearing-impaired subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90, 2971.

VIDEO>>>Bernstein, L. E., & Eberhardt, S. P. (1986). Johns Hopkins Lipreading: Corpus I-II: Disc 1 and Corpus III-IV: Disc 2. *Baltimore, MD*.

- Bernstein, L. E., Eberhardt, S. P., & Demorest, M. E. (1989). Single-channel vibrotactile supplements to visual perception of intonation and stress. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85, 397.
- Bernstein, L.E., Tucker, P.E., & Auer, Jr., E.T. (1998) Potential perceptual bases for successful use of a vibrotactile speech perception aid. *Scandinavian Journal of Psychology*, 39, 181-186.
- Bolanowski, S. J. (1996). Information processing channels in the sense of touch. In *Somesthesia and the Neurobiology of the Somatosensory Cortex* (pp. 49-58). Birkhäuser Basel.
- Bolanowski Jr, S. J., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., & Checkosky, C. M. (1988). Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical society of America*, 84, 1680.
- Brisben, A. J., Hsiao, S. S., & Johnson, K. O. (1999). Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand. *Journal of Neurophysiology*, 81(4), 1548-1558.
- Byrne, M.W. (2009). Sensory processing disorder: any of a nurse practitioner's business? *Journal of American Academy of Nurse Practitioners*, 21(6), 314-21.
- Campbell, R., & MacSweeney, M. (2004) Neuroimaging studies of crossmodal plasticity and language processing in deaf people. In G. Calvert, C. Spence, & B.E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 773-784). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Carretié, A. (2001). *Psicofisiología*. Madrid, España. Ediciones Pirámide.
- Castro, L., & Wasserman, E.A. (2012). Humans deploy diverse strategies in learning same-different discrimination tasks. *Behavioural processes*, pii: S0376-6357(12)00204-5. doi: 10.1016/j.beproc.2012.09.015.

Chlubnová, J., Kremlacek, J., Kubová, Z., & Kuba, M. (2005). Visual evoked potentials and event related potentials in congenitally deaf subjects. *Physiological research*, 54(6), 577.

Chomsky, C. (1986) Analytic Study of the Tadoma Method: Language abilities of three deaf-blind subjects. *Journal of Speech and Hearing Research*, 29, 332-347.

Donchin, E., Miller, G. A., & Farwell, L. A. (1986). The endogenous components of the event-related potential—a diagnostic tool. *Progress in brain research*, 70, 87-102.

Doucet, M.E., Bergeron, F., Lassonde, M., Ferron, P. & Lepore, F. (2006) Cross-modal reorganization and speech perception in cochlear implant users. *Brain*, 129, 3376-3383.

Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270(5234), 305-307.

Elbert, T., Sterr, A., Rockstroh, B., Pantev, C., Müller, M. M., & Taub, E. (2002). Expansion of the tonotopic area in the auditory cortex of the blind. *The Journal of neuroscience*, 22(22), 9941-9944.

Fahle, M. (2005). Perceptual learning: specificity versus generalization. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 154-60.

Finney, E.M., Clementz, B.A., Hickok, G., & Hopkins, K.R. (2003) Visual stimuli: activate auditory cortex in deaf subjects: evidence from MEG. *NeuroReport*, 14 (11). doi: 10.1097/01.wnr.0000079894.11980.6a

- Foxe, J.J., Morocz, I.A., Murray, M.M., Higgins, B.A., Javitt, D.C., & Schroeder, C.E. (2000) Multisensory auditory-somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Cognitive Brain Research*, 10, 77-83.
- Foxe, J. J., & Schroeder, C. E. (2005) The case of feedforward multisensory convergence during early cortical processing. *Neuroreport*, 16, 419-423.
- Foxe, J. J., Wylie, G. R., Martinez, A., Schroeder, C. E., Javitt, D. C., Guilfoyle, D., ... & Murray, M. M. (2002). Auditory-somatosensory multisensory processing in auditory association cortex: an fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 88(1), 540-543.
- Friedman, D. P., Murray, E. A., O'Neill, J. B., & Mishkin, M. (1986). Cortical connections of the somatosensory fields of the lateral sulcus of macaques: evidence for a corticolimbic pathway for touch. *Journal of Comparative Neurology*, 252(3), 323-347.
- Frost, D. O. (1990). Sensory Processing by Novel, Experimentally Induced Cross-Modal Circuits. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 608(1), 92-112.
- Gardner, Esther P (May 2010) Touch. In: Encyclopedia of Life Sciences (ELS). John Wiley & Sons, Ltd: Chichester.
- Gardner, E. P., Martin, J. H., & Jessell, T. M. (2000). The bodily senses. *Principles of neural science*, 4, 430-450.
- Gault, R. (1926) Touch as a substitute for hearing in the interpretation and control of speech. *Archives of Otolaryngology, Head & Neck Surgery*, 3(2), 121-135.
- Gazzaniga, M. S. (Ed.). (2004). *The cognitive neurosciences III*. The MIT Press.
- Gumá-Díaz, E., & González-Garrido, A. A. (2001). Los potenciales relacionados a eventos cognitivos. *VM Alcaraz Romero y E. Gumá Díaz.(Comps) Texto de Neurociencias Cognitivas. México, Manual Moderno, Cap, 15, 413-442.*

- Hamilton, R. H., & Pascual-Leone, A. (1998). Cortical plasticity associated with Braille learning. *Trends in cognitive sciences*, 2(5), 168-174.
- Hickok, G., Poeppel, D., Clark, K., Buxton, R.B., Rowley, H.A., & Roberts, T.P.L. (1997) Sensory Mapping in a Congenitally Deaf Subject: MEG and fMRI Studies of Cross-Modal Non-Plasticity. *Human Brain Mapping*, 5, 437-444.
- Hofman, M. A., Boer, G. J., Holtmaat, A. J. G. D., Van Someren, E. J. W., Verhaagen, J., & Swaab, D. F. (2002). Human brain plasticity: evidence from sensory deprivation and altered language experience. *Plasticity in the Adult Brain: From Genes to Neurotherapy: From Genes to Neurotherapy*, 138, 177.
- Huttenlocher, P. (2002). *Neural Plasticity. The Effects of Environment on the Development of the Cerebral Cortex*. Cambridge, Massachussets: Harvard University Press.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2010). XIII Censo General de. Población y Vivienda. México: INEGI.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. (1979). Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of physiology*, 286(1), 283-300.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. (1983). Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neurosciences*, 6, 27-32.
- Jones, E. G., & Friedman, D. P. (1982). Projection pattern of functional components of thalamic ventrobasal complex on monkey somatosensory cortex. *Journal of Neurophysiology*, 48(2), 521-544.

- Jordan, N. C., Huttenlocher, J., & Levine, S. C. (1992). Differential calculation abilities in young children from middle-and low-income families. *Developmental Psychology*, 28(4), 644.
- Jousmäki, V., & Hari, R. (1998). Parchment-skin illusion: sound-biased touch. *Current Biology*, 8(6), 190.
- Kaczmarek, K. A., Webster, J. G., Bach-y-Rita, P., & Tompkins, W. J. (1991). Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 38(1), 1-16.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (Eds.). (2000). *Principles of neural science* (Vol. 4, pp. 1227-1246). New York: McGraw-Hill.
- Kass, R. E., & Wasserman, L. (1995). A reference Bayesian test for nested hypotheses and its relationship to the Schwarz criterion. *Journal of the American Statistical Association*, 90(431), 928-934.
- Kayser, C., Petkov, C., Augath, M., & Logothetis, N. (2005) Integration of touch and sound in the auditory cortex. *Neuron*, 48 (2), 373-384.
- Kok, A. (1986). Effects of degradation of visual stimuli on components of the event-related potential (ERP) in go/nogo reaction tasks. *Biological psychology*, 23(1), 21-38
- Kok, A. (1997). Event-related-potential (ERP) reflections of mental resources: a review and synthesis. *Biological psychology*, 45(1), 19-56.
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 38(3), 557-577.

- Kujala, T., Huotilainen, M., Sinkkonen, J., Ahonen, A. I., Alho, K., Ilmoniemi, R. J., ... & Näätänen, R. (1995). Visual cortex activation in blind humans during sound discrimination. *Neuroscience letters*, *183*(1), 143-146.
- Kujala, T., Palva, M. J., Salonen, O., Alku, P., Huotilainen, M., Järvinen, A., & Näätänen, R. (2005). The role of blind humans' visual cortex in auditory change detection. *Neuroscience letters*, *379*(2), 127-131.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Event-related brain potentials to semantically inappropriate and surprisingly large words. *Biological psychology*, *11*(2), 99-116.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading between the lines: Event-related brain potentials during natural sentence processing. *Brain and Language*, *11*(2), 354-373.
- Kramer, A., Schneider, W., Fisk, A., & Donchin, E. (1986). The Effects of Practice and Task Structure on Components of the Event-Related Brain Potential. *Psychophysiology*, *23*(1), 33-47.
- Levänen, S., & Hamdorf, D. (2001). Feeling vibrations: enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans. *Neuroscience letters*, *301*(1), 75-77.
- Levänen, S., Jousmaki, V., & Hari, R. (1998) Vibration-induced auditory-cortex activation in a congenitally deaf adult. *Current Biology*, *8*, 869-872.
- Li, T., Fu, Q.J. (2007). Perceptual adaptation to spectrally shifted vowels: training with nonlexical labels. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, *8*(1), 32-41.
- Marchesi, A. (1998). *El desarrollo cognitivo y lingüístico de los niños sordos: perspectivas educativas*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Marschark, M., & Hauser P.C. (Eds.) 2008. *Deaf Cognition, Foundations and Outcomes*. Oxford, England: Oxford University Press.

- McGovern, D.P., Webb, B.S., & Peirce, J.W. (2012). Transfer of perceptual learning between different visual tasks. *Journal of Vision*, 12(11). doi:pii: 4. 10.1167/12.11.4.
- Mlaiki, R. (2008). *Système de test audiolinguistique d'ordre temporel (TOT)*. Université du Québec à Montréal.
- Mountcastle, V. B., Steinmetz, M. A., & Romo, R. (1990). Frequency discrimination in the sense of flutter: psychophysical measurements correlated with postcentral events in behaving monkeys. *The Journal of Neuroscience*, 10(9), 3032-3044.
- Näätänen, R., Gaillard, A. W., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica*, 42(4), 313-329.
- National Institution of Deafness and other Communication Disorders (2012)
- Neville, H. J., & Bavelier, D. (1998). Neural organization and plasticity of language. *Current Opinion in Neurobiology*, 8(2), 254-258.
- Neville, H. J., Coffey, S. A., Lawson, D. S., Fischer, A., Emmorey, K., & Bellugi, U. (1997). Neural systems mediating American Sign Language: Effects of sensory experience and age of acquisition. *Brain and language*, 57(3), 285-308.
- 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.
- Neville, H. J., Schmidt, A., & Kutas, M. (1983). Altered visual-evoked potentials in congenitally deaf adults. *Brain Research*, 266(1), 127-132.
- Ozcan, M., Baumgartner, U., Vucurevic, G., Stoeter, P. & Treede, R. (2005) Spatial resolution of fMRI in the human parasyllvian cortex: Comparison of somatosensory and auditory activation. *NeuroImage*, 25(3), 877- 887.

- Pantev, C., Ross, B., Berg, P., Elbert, T., & Rockstroh, B. (1998). Study of the human auditory cortices using a whole-head magnetometer: left vs. right hemisphere and ipsilateral vs. contralateral stimulation. *Audiology and Neurotology*, 3(2-3), 183-190.
- Paul, P.V. (4th Ed., 2009). *Language and Deafness*. Boston, Massachusetts: Jones and Barlett publishers.
- Pinel, J. P. (2004). *Biopsychology*. Boston: Allyn & Bacon A Pearson Education Company.
- Plant, G., & Risberg, A. (1983) The transmission of fundamental frequency variations via a single channel vibrotactile aid. *Speech Transmission Laboratory Quarterly*, 24 (2-3), 61-84.
- Polich, J. (1996). Meta-analysis of P300 normative aging studies. *Psychophysiology*, 33(4), 334-353.
- Polich, J. (1997). On the relationship between EEG and P300: individual differences, aging, and ultradian rhythms. *International journal of psychophysiology*, 26(1-3), 299-317.
- Polich, J. (Ed.) 2001. *Detection of Change: Event-Related Potential and fMRI Findings*. Kluwer Academic Publishers.
- Polich, J. (2007) Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148.
- Polich, J., & Comerchero, M.D. (2003) P3a from visual stimuli: typicality, task, and topography. *Brain Topography*, 15(3), 141-151.

- Pons, T. P., Garraghty, P. E., & Mishkin, M. (1992). Serial and parallel processing of tactual information in somatosensory cortex of rhesus monkeys. *Journal of neurophysiology*, 68(2), 518-527.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., Lamantia, A. S., McNamara, J. O., & Williams, S. M. (2004). *Neuroscience*. Boston: Sinauer Associates, Inc.
- Reed, C.M. (1996) The implications of the Tadoma method of speech reading for spoken language processing. *Spoken Language*, 3, 1489-1492.
- Reed, C. M., Doherty, M. J., Braida, L. D., & Durlach, N. I. (1982). Analytic study of the Tadoma method: Further experiments with inexperienced observers. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 25(2), 216.
- Risberg, A., & Lubker, J. (1978) Prosody and speechreading. *Speech Transmission Laboratory Quarterly*, 19 (4), 1-16.
- Robinson, C. J., & Burton, H. (1980). Organization of somatosensory receptive fields in cortical areas 7b, retroinsula, postauditory and granular insula of M. fascicularis. *Journal of Comparative Neurology*, 192(1), 69-92.
- Rothenberg, M., & Molitor, R.D. (1979) Encoding Fundamental Frequency into Vibrotactile Frequency. *J. Acoust. Soc. Am.*, 66(4), 1029-1038.
- Sadato, N., Campbell, G., Ibanez, V., Deiber, M., & Hallett, M. (1996). Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements. *The Journal of neuroscience*, 16(8), 2691-2700.
- Schürmann, M., Caetano, G., Hlushchuk, Y., Jousmaki, V., & Hari, R. (2006) Touch activates human auditory cortex. *NeuroImage*, 30, 1325-1331.

Segura Malpica, L. (2005). La educación de los sordos en México: controversia entre los métodos educativos 1867-1902. In *La infancia en la historia: espacios y representaciones* (pp. 860-870). Erein.

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological review*, *84*(2), 127-190.

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1984). Automatic and controlled processing revisited.

Sterr, A., Müller, M. M., Elbert, T., Rockstroh, B., Pantev, C., & Taub, E. (1998). Perceptual correlates of changes in cortical representation of fingers in blind multifinger Braille readers. *The journal of neuroscience*, *18*(11), 4417-4423.

Sur, M., Nelson, R. J., & Kaas, J. H. (1980). Representation of the body surface in somatic koniocortex in the prosimian Galago. *Journal of Comparative Neurology*, *189*(2), 381-402.

Sur, M., Pallas, S. L., & Roe, A. W. (1990). Cross-modal plasticity in cortical development: differentiation and specification of sensory neocortex. *Trends in Neurosciences*, *13*(6), 227-233.

Suter, S. (1982). Differences Between Deaf and Hearing Adults in Task-Related EEG Asymmetries. *Psychophysiology*, *19*(2), 124-128.

Talbot, Darian-Smith, Kornhuber & Mountcastle (1968). The Sense of Flutter-Vibration: Comparison of the Human Capacity With Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents From the Monkey Hand I.

- Touge, T., Gonzalez, D., Sasaki, I., Tsukaguchi, M., Deguchi, K., Kuriyama, S., & Wu, J.L. (2005) The interaction of somatosensory and auditory stimuli on event-related potentials. *International Congress*, series 1278, 149-152.
- Tremblay, K., Kraus, N., McGee, T., Ponton, C., & Otis, B. (2001). Central auditory plasticity: changes in the N1-P2 complex after speech-sound training. *Ear and hearing*, 22(2), 79-90.
- Vallbo, Å. B., & Johansson, R. S. (1984). Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human neurobiology*, 3(1), 3-14.
- Van Dellen, H. J., Brookhuis, K. A. Mulder, G., Okita, T., & Mulder, L. J. M. 1985!. Evoked potential correlates of practice in a visual search task. In D. Papakostopoulos, S. Butler, & I. Martin ~Eds.!, *Clinical and experimental neurophysiology* ~pp. 132–155!. Beckenham, England: Croom Helm.
- Von Melchner, L., Pallas, S. L., & Sur, M. (2000). Visual behaviour mediated by retinal projections directed to the auditory pathway. *Nature*, 404(6780), 871-876.
- Walter, W., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203, 380-384.
- Wan, C. Y., & Schlaug, G. (2010). Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *The Neuroscientist*, 16(5), 566-577.
- Yamaguchi, S., & Knight, R.T. (1991) Anterior and Posterior Association Cortex Contributions to the Somatosensory P300. *The Journal of Neuroscience*, 11(7), 2039-2054.

Anexos

Anexo 1

CUESTIONARIO NEUROLÓGICO
LABORATORIO DE NEUROFISIOLOGÍA CLÍNICA, INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS

NOMBRE: _____ CÓDIGO: _____

FECHA DE NACIMIENTO: _____ EDAD: _____

ESCOLARIDAD: _____ MANUALIDAD: _____

TELÉFONOS: _____

CORREO: _____ FECHA: _____

➤ **HISTORIA CLÍNICA:**

Tipo de sordera: Conductiva Neurosensorial Mixta

Edad de sordera: _____ Desde nacimiento

Causa: _____

Grado de sordera: Leve Moderada Profunda

¿Tienes algún familiar sordo? _____ ¿Quién? _____

Has recibido tratamiento de:

Terapeuta de aprendizaje Motivo: _____

Terapeuta de lenguaje Motivo: _____

Psicólogo Motivo: _____

Neurólogo Motivo: _____

Neurocirujano Motivo: _____

➤ **COMUNICACIÓN Y EDUCACIÓN:**

1. ¿Cuál es la manera principal como te comunicas?

Lenguaje de señas mexicano

Lenguaje hablado (oral)

Otro: _____

2. ¿Sabes lenguaje de señas? Sí No

3. ¿Sabes leer labios? Sí No

4. ¿Fuiste a la escuela de sordos? Sí No

5. ¿Cuántos años asististe a la escuela y qué grado alcanzaste? _____

6. En la escuela aprendiste: Lenguaje de señas mexicano

Lenguaje hablado (oral)

Otro: _____

7. ¿Sabes leer? _____

¿Te gusta leer? _____

¿Qué tipo de cosas lees? _____

8. Actualmente:

Estudias

¿Qué? _____

¿Dónde? _____

Trabajas

¿Dónde? _____

¿Qué tipo de trabajo realizas? _____

Ama de casa

Otra actividad: _____

➤ ANTECEDENTES PATOLÓGICOS

1. ¿Al momento de nacer presentó hipoxia (falta de oxígeno)? Sí No

2. Has tenido:

¿Golpes fuertes en la cabeza? Sí No

¿Qué edad tenías al momento del evento? _____

¿Pérdida de conciencia? Sí No

Duración: _____ Secuelas: _____

¿Dolor de cabeza (cefalea)? Sí No

Frecuencia: _____

¿Crisis convulsivas? Sí No

Frecuencia: _____ Tipo: _____

3. Actualmente tomas medicamento Sí No

¿Qué medicamento(s)? _____

Diagnóstico: _____

Tiempo de tratamiento: _____

4. ¿Necesitas lentes o tienes alguna dificultad para mover o usar alguno de tus brazos o piernas? _____

5. ¿Tienes algún familiar directo que presentó en su infancia dificultades para aprender o problemas de atención? _____

Anexo 2

Consentimiento para participar en el proyecto de investigación:

Cambios electrofisiológicos asociados al entrenamiento en la decodificación de estímulos vibrotáctiles en sujetos sordos.

Guadalajara, Jalisco a _____ de _____ de 201____.

Por medio de la presente manifiesto que mi participación en el proyecto denominado "Cambios electrofisiológicos asociados al entrenamiento en la decodificación de estímulos vibrotáctiles en sujetos sordos" es voluntaria. Dicho proyecto fue aprobado por el Comité de Ética del Instituto de Neurociencias de la Universidad de Guadalajara y su objetivo general es estudiar los cambios en los Potenciales Relacionados con Eventos producto del entrenamiento en la decodificación de estímulos auditivos a través de la estimulación vibrotáctil.

Se me ha explicado a través de un traductor en lenguaje de señas que mi participación consistirá en asistir a una sesión de evaluación inicial y otra final en el laboratorio de Neurofisiología Clínica del Instituto de Neurociencias en la que se aplicarán varias pruebas psicológicas y se adaptará el estimulador vibrotáctil a mi dedo índice derecho para el registro de la actividad eléctrica cerebral durante la ejecución de tareas simples de discriminación. Entre estas dos evaluaciones recibiré entrenamiento en el uso del estimulador vibrotáctil de entre 5 y 10 sesiones de 30 minutos de duración. Se me ha informado que el uso de este dispositivo, así como el registro de la actividad eléctrica cerebral no ocasionan ningún daño a mi salud física o emocional, así mismo he sido informado que no se me administrará ningún medicamento y la información resultado de mi participación será utilizada sólo con fines de docencia e investigación. En caso de que, como resultado de la evaluación, sea detectado algún problema en cualquiera de las pruebas que se apliquen seré informado de manera verbal sobre el mismo y el Instituto de Neurociencias y los investigadores del proyecto no asumen ninguna responsabilidad en el tratamiento que pudiera requerirse.

Así mismo consiento de manera voluntaria para que las sesiones de evaluación y entrenamiento sean videograbadas y utilizadas exclusivamente con fines de docencia e investigación, guardando bajo estricta confidencialidad tanto mi nombre como el resto de la información que yo proporcione. Este consentimiento no libera a los investigadores o a la institución de su responsabilidad ética con mi persona.

La presente información me fue proporcionada por la Dra. Fabiola R. Gómez Velázquez.

Nombre y firma

Anexo 3. Evaluación del entrenamiento.

EVALUACIÓN DE ENTRENAMIENTO (Sesión 5)

FREC.	
INTER.	

#1	#2				
ABA	BBB	BAA	ABB		
AAB	BAA	BBB	ABB		
AAA	BAB	ABA	BAB		
ABB	BBB	DBA	ABA		
ABB	BAB	DBA	BBB		
ABA	BBB	AAA	AAB		
AAA	BAA	AAB	BAA		
AAA	DBA	EAB	DBA		
AAB	BAB	ABB	BBB		
AAB	DBA	BAB	AAB		
ABA	BBA	BAA	AAA		
ABD	BAA	ABA	AAA		

FREC.	
DUR.	
INTER.	

#1	#2				
CIC	LCL	CCL	CCC		
LIC	LLL	LCL	CIC		
CIC	CCC	LCC	CCC		
LIC	CLL	LCL	LIC		
CCL	LLL	CCL	LLL		
LCC	LCL	LCC	CCL		
LCC	CLL	CLL	LCC		
LIC	CLL	CLL	LLL		
CCL	LCL	LCL	CLL		
CCL	CCC	LCC	LIC		
CIC	CCC	LLL	LLL		
LCC	LLL	CLL	LIC		

EVALUACIÓN DE ENTRENAMIENTO (Sesión 5)

Animales			
burro	caballo		
pájaro	pájaro		
cerdero	vaca		
vaca	caballo		
perro	elefante		
elefante	vaca		
perro	burro		
caballo	cerdero		
cerdero	elefante		
burro	pájaro		
perro			

MIX			
reloj	vaca		
perro	cerdero		
campana	perro		
caballo	burro		
piano	martillo		
martillo	teléfono		
pájaro	pájaro		
teléfono	campana		
burro	piano		
vaca	elefante		
ambulancia	reloj		
cerdero	ambulancia		
elefante	caballo		

Objetos			
reloj	martillo		
martillo	campana		
ambulancia	reloj		
piano	campana		
teléfono	piano		
ambulancia	martillo		
teléfono	ambulancia		
reloj	teléfono		
piano	campana		

Puntaje	Errores	Aciertos	%
Animales			
Objetos			
Mix			
Altura			
Duración			
TOTAL			

OB 1			
OB 2			

Anexo 4. Dictamen del Comité de Ética



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS
BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS

COMITÉ DE ÉTICA

DICTAMEN DEL COMITÉ DE ÉTICA AL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Cambios electrofisiológicos asociados al entrenamiento en la decodificación de estímulos vibrotáctiles en sujetos sordos.

CON NÚMERO DE REGISTRO ET062010-88.

RESPONSABLE _____ Dr. Andrés A. González Garrido. _____

NOMBRE DEL ALUMNO _____ Vanessa Doreen Ruiz Stovel _____

APROBADO SIN MODIFICACIONES

RECHAZADO

SUGERENCIAS:

RECHAZADO DEBIDO A:

En caso de haber sido evaluado con sugerencias, se requiere someter a re-evaluación el proyecto de investigación, en primera instancia, al comité tutelar y posteriormente al Comité de Ética en un lapso máximo de 2 semanas a partir de esta fecha.

Se emite el presente DICTAMEN el día 7 de diciembre de 2010, firmando los integrantes del Comité de Ética del Instituto de Neurociencias.

Presidente

Dr. Alfredo Ferrín Velasco

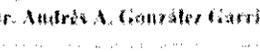
Secretaría

Dra. Maricela Hernández González

Vocales:

Dr. Jacinto Bañuelos Pineda


Dr. Luis Francisco Cerdán Sánchez


Dr. Andrés A. González Garrido


Dr. Jorge Juárez González


Cep, Comité Tutelar correspondiente.