

ESCUELA DE DOCTORADO
PROGRAMA DE DOCTORADO EN EDUCACIÓN



CAMBIOS CEREBRALES DEBIDOS A LOS EFECTOS MADURATIVOS Y
DE LA INSTRUCCIÓN MUSICAL

BRAIN CHANGES DUE TO MATURATIONAL EFFECTS AND MUSICAL
TRAINING

Tesis doctoral presentada por:

Gustau Olcina Sempere

Directores:

Dr. César Ávila Rivera

Dra. M^a Ángeles Palomar García

Castellón de la Plana, Febrero 2018



Programa de Doctorado en Educación

Código: 14113

Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume I

**CAMBIOS CEREBRALES DEBIDOS A LOS EFECTOS MADURATIVOS Y
DE LA INSTRUCCIÓN MUSICAL**

**BRAIN CHANGES DUE TO MATURATIONAL EFFECTS AND MUSICAL
TRAINING**

**Memoria presentada por Gustau Olcina Sempere para optar al grado
de doctor por la Universitat Jaume I**

Doctorando

Gustau Olcina Sempere

Directores

Dr. César Ávila Rivera / Dra. M^a Ángeles Palomar García

Castellón de la Plana, Febrero 2018

La presente tesis doctoral ha recibido financiación de la Universitat Jaume I de Castellón de la Plana para la realización de una estancia predoctoral en el Instituto Superior de Educação e Ciências (ISEC) en Lisboa (Portugal) necesaria para la obtención del doctorado internacional (E-2016-03).

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mis agradecimientos a todas las personas que estuvieron conmigo en la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, a los codirectores el Dr. César Ávila y la Dra. M^a Ángeles Palomar, por transmitirme su pasión por la investigación en el mundo de la neuroimagen, por su paciencia en enseñarme las técnicas de investigación en dicho campo y por ayudarme a potenciar mis capacidades. Además, ha sido un placer descubrir e investigar el impacto que la música tiene en el cerebro.

Asimismo, también me gustaría agradecer a Mireia Hernández, Noelia Ventura, Jesús Ventura, y Encarna Pucheta por toda la ayuda que me han prestado y todo el conocimiento que me han transmitido.

Además, me gustaría dar las gracias al Centro Eresa de Valencia y al Hospital General de Castellón de la Plana, por la inestimable colaboración y ayuda que me han prestado para la realización de las pruebas de neuroimagen, imprescindibles para esta investigación.

También quiero dar las gracias a Chelo y a mi hija Aitana por toda la ayuda y apoyo que me han prestado para poder realizar la tesis doctoral.

Asimismo, también quiero dar las gracias a mi familia por los ánimos y apoyos que me han dado para poder empezar y prosperar en esta investigación.

Finalmente, me gustaría dar las gracias al Instituto Superior de Educação e Ciências (ISEC) de Lisboa, (Portugal) por la oportunidad que me ofrecieron para poder realizar durante mi doctorado diversas estancias de investigación.

Muchísimas gracias a todos por vuestra valiosa ayuda.

Índice general

Índice de abreviaturas

ABSTRACT

RESUMEN

1. JUSTIFICACIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Técnicas de Neuroimagen.....	3
2.1.1. La Resonancia Magnética (RM).....	3
2.1.1.1. La Morfometría: La morfometría basada en voxel (VBM).....	3
2.1.2. La Resonancia Magnética funcional (RMf).....	4
2.1.2.1. Estado de reposo y conectividad funcional.....	6
2.2. Procesamiento modular de la música.....	7
2.3. Bases neurales del procesamiento de la Música.....	11
2.4. Bases neurales de la interpretación de la Música.....	15
2.5. Efectos del entrenamiento musical.....	17
2.5.1. Cambios cerebrales producidos por el entrenamiento musical.....	18
2.6. Efectos de la educación musical en los niños.....	22
2.6.1. Influencia de la educación musical en la adquisición del lenguaje.....	22
2.6.2. Cambios cerebrales producidos por la educación musical en los niños.....	24
2.6.3. El procesamiento musical y las etapas evolutivas del niño.....	28
2.6.4. Repercusión socioemocional de la música en los niños.....	30

2.6.5. Conclusiones.....	32
2.7. El lenguaje.....	32
2.7.1. Música y lenguaje.....	33
2.7.2. Modelo de Hickok y Poeppel.....	37
2.7.2.1. La vía dorsal.....	38
2.7.2.2. La vía ventral.....	40
2.8. Modelo del procesamiento auditivo.....	41
2.8.1. Conclusiones.....	44
2.9. Bases neurales de la lateralidad manual y la dominancia hemisférica.....	44
3. MARCO EXPERIMENTAL.....	48
3.1. Planteamiento de la investigación.....	48
3.2. Objetivos de la investigación.....	51
Estudio 1. Estudio de las bases anatómicas de la discriminación musical en una muestra de músicos y no músicos.....	52
Estudio 2. Estudio de las bases anatómicas de la discriminación musical en niños y capacidad predictiva sobre los cambios producidos por la instrucción musical.....	62
Estudio 3. Diferencias de activación cerebral del lenguaje entre músicos diestros y zurdos.....	84
4. DISCUSIÓN.....	102
5. CONCLUSIONS/CONCLUSIONES.....	109
6. BIBLIOGRAFÍA.....	112

Índice de abreviaturas

ANOVA	Análisis de la varianza
BOLD	Dependiente del Nivel de Oxigenación de la Sangre
CA	Córtex Auditivo
DE	Desviación estándar
DTI	Imagen del tensor de difusión
DBM	Morfometría Basada en Deformaciones
dHb	Desoxihemoglobina
EEG	Electroencefalograma
FA	Fascículo arqueado
Hb	Oxihemoglobina
IFG	Giro frontal inferior
IC	Intervalo de confianza
JMTDT	Jake Mandell Tone Deaf Test
LCR	Líquido cefalorraquídeo
MEG	Magnetoencefalografía
MBEA	Montreal Battery of Evaluation of Amusia
RMf	Resonancia Magnética funcional
RM	Resonancia magnética
ROIs	Regiones de interés
SG	Sustancia gris
SB	Sustancia blanca
STG	Giro temporal superior
VBM	Morfometria basada en vóxel

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study the cerebral effects of musical training and which of these effects are determined by maturational aspects. In order to study these aspects, three objectives or research questions have been proposed.

The first objective of our research would be to ask if there are cerebral differences in the neural correlates of musical discrimination. To carry out this investigation we used the technique of structural Magnetic Resonance. The images were acquired in a Philips Achieva 3-T scanner, and were pre-processed using the morphometric technique of VBM (Voxel Based Morphometry). The previous literature specialized in the subject compares musicians and non-musicians, and shows that musicians have a greater thickness of the auditory cortex, the corpus callosum, the premotor cortex and the cerebellum. In line with this previous evidence, our results suggest that, both in musicians and non-musicians, there is a positive correlation between the results obtained in our measurement of auditory discrimination (the Jake Mandell Tone Deaf Test, JMTDT) and the volume of gray matter in the bilateral Heschl gyrus, the right inferior right frontal gyrus, and the bilateral superior temporal gyrus. Furthermore, we figured out that in the group of non-musicians a positive correlation was found between the JMTDT and the regional volume of gray matter in the left superior temporal gyrus, while in the group of musicians a positive correlation was demonstrated among the JMTDT and the regional volume of gray matter in the right inferior frontal gyrus. This research has opened the door to a new field of a future study, which could analyze the influence of the study of music regarding to the increase of certain brain structures, and its impact on improving the skills of other disciplines such as language or mathematics.

The second objective of our research is to study the neurocognitive model of development by competencies of Seither-Preisler et al. (2014), from the study of the brain of

children who are beginning musical studies. By studying this model we want to establish the basal structural differences in musical skills, and their ability to predict improvements about them after the period of musical training, questioning whether brain morphometry is able to explain both effects. We used a 3-T Philips Achieva scanner to acquire the images and they were pre-processed by the morphometric technique of VBM (Voxel Based Morphometry). Our results are consistent with the idea that children who show better musical abilities show a greater gray matter at the basal level in brain areas related to music processing. In this way, we have found a correlation between the auditory discrimination measured with the JMTDT and greater volume of gray matter in the right superior temporal gyrus, and relationships between the right insula volume and rhythmic memory. Moreover, our results also reflect that brain morphometry predicts improvements in musical aptitude due to music training. Thus, the volume of the same brain areas responsible for musical processing such as the orbital inferior frontal gyrus, the Heschl gyrus, or the Supplementary motor area predict the effect of instruction on the improvement of musical skills. Likewise, this study has opened a new field to develop future lines of research where the effects of musical training on the acquisition of language in children with certain disorders of the Central Nervous System are investigated.

Finally, the third aim of this thesis is whether there would be differences in relation to the dominance of language between right-handed and left-handed musicians, and whether these differences are determined by musical training. Previous studies have shown that the atypical dominance of language is associated with a greater volume of gray matter in right audiomotor areas. To study this dominance, we use the functional Magnetic Resonance (RMf) technique with a verbal generation task. A Philips Achieva 3-T scanner has been used to obtain the images and the BrainVoyager program to process them. Our results reflect that there are changes of lateralization of language among left-handed musicians, in such a way that the percentage of this group with atypical dominance of language was much higher (44%)

than that of controls (15%). This study has opened a new field for future research where one could analyze the influence of the study of music in the improvement of skills for other areas of knowledge.

In summary, the studies of this work contribute to show that both maturational factors and those related to instruction can contribute to illustrate the relationship between brain and musical aptitudes.

Brain changes due to maturational effects and musical training

RESUMEN

La presente tesis doctoral tiene como objetivo estudiar cuáles son los efectos cerebrales del entrenamiento musical y cuáles de estos efectos están determinados por aspectos madurativos. Para poder estudiar dichos aspectos se han propuesto tres objetivos o preguntas de investigación.

En el primer objetivo de nuestra investigación nos planteamos si existirían diferencias cerebrales en los correlatos neurales de la discriminación musical. Para realizar dicha investigación utilizamos la técnica de la Resonancia Magnética estructural. Las imágenes fueron adquiridas en un escáner 3-T Philips Achieva, y fueron pre-procesadas mediante la técnica morfométrica de VBM (*Voxel Based Morphometry*). La literatura previa especializada en el tema compara músicos y no músicos, y pone de manifiesto que los músicos tienen un mayor espesor del córtex auditivo, el cuerpo calloso, el córtex premotor y el cerebelo. En línea con esta evidencia previa, nuestros resultados muestran que, tanto en músicos como no músicos, se da una correlación positiva entre los resultados obtenidos en nuestra medida de discriminación auditiva (el Jake Mandell Tone Deaf Test; JMTDT) y el volumen de sustancia gris en el giro de Heschl a nivel bilateral, el giro frontal inferior derecho, y en el giro temporal superior a nivel bilateral. Además, pudimos comprobar que en el grupo de no músicos se encontró una correlación positiva entre el JMTDT y el volumen regional de sustancia gris en el giro temporal superior izquierdo, mientras tanto en el grupo de músicos se demostró una correlación positiva entre el JMTDT y el volumen regional de sustancia gris en el giro frontal inferior derecho. Este estudio ha abierto un nuevo campo para futuras investigaciones, donde se podría analizar qué influencia tiene el estudio de la música con respecto al aumento de determinadas estructuras cerebrales, y su repercusión en la mejora de las aptitudes de otras disciplinas como el lenguaje o las matemáticas.

El segundo objetivo de nuestra investigación consiste en estudiar el Modelo neurocognitivo del desarrollo por competencias de Seither-Preisler y cols. (2014), a partir del estudio del cerebro de niños que están empezando los estudios musicales. Mediante el estudio de este modelo se desea establecer las diferencias estructurales basales en capacidades musicales, y su capacidad para predecir las mejoras en aptitudes musicales después de un periodo de entrenamiento musical, cuestionándose si la morfometría cerebral es capaz de explicarnos ambos efectos. Para la obtención de las imágenes utilizamos un escáner 3-T Philips Achieva, y fueron preprocesadas mediante la técnica morfométrica de VBM (*Voxel Based Morphometry*). Nuestros resultados son consistentes con la idea que los niños que muestran mejores aptitudes musicales muestran a nivel basal mayor volumen de sustancia gris en áreas cerebrales relacionadas con el procesamiento de la música. De esta manera, hemos encontrado una correlación entre la discriminación auditiva medida con el JMTDT y mayor volumen de sustancia gris en el giro temporal superior derecho, y relaciones entre el volumen de la ínsula derecha y la memoria rítmica. Además, nuestros resultados también reflejan que la morfometría cerebral predice las mejoras en aptitud musical debidas al entrenamiento musical. De esta manera, el volumen de las mismas áreas cerebrales encargadas del procesamiento musical como el giro frontal inferior orbital, el giro de Heschl, o el área motora suplementaria predicen el efecto de la instrucción sobre la mejora de las aptitudes musicales. Asimismo, este estudio ha abierto un nuevo campo para desarrollar futuras líneas de investigación donde se estudie qué efectos tiene el entrenamiento musical en la adquisición del lenguaje en los niños con determinados trastornos del Sistema Nervioso Central.

Finalmente, el tercer objetivo de esta tesis nos planteamos si existirían diferencias con relación a la dominancia del lenguaje entre músicos diestros y zurdos, y si estas diferencias están determinadas por la formación musical. En estudios previos se ha visto que la dominancia atípica del lenguaje se asocia a mayor volumen de sustancia gris en áreas audio-

motoras derechas. Para estudiar esta dominancia, utilizamos en este caso la técnica de la Resonancia Magnética funcional (RMf) con una tarea de generación verbal. Para la obtención de las imágenes se utilizó un escáner 3-T Philips Achieva, y fueron procesadas mediante el programa BrainVoyager. Nuestros resultados reflejan que existen cambios de lateralización de lenguaje entre músicos zurdos, de tal manera que el porcentaje de este grupo con dominancia atípica del lenguaje era muy superior (44%) al de controles (15%). Este estudio ha abierto un nuevo campo para futuras investigaciones donde se podría analizar qué influencia tiene el estudio de la música, en la mejora de las aptitudes para otras áreas de conocimiento.

En resumen, los estudios de este trabajo contribuyen a mostrar que tanto factores madurativos como los relacionados con la instrucción pueden contribuir a ilustrar la relación entre cerebro y las aptitudes musicales.

Brain changes due to maturational effects and musical training

1. JUSTIFICACIÓN

Investigaciones previas consideran la neuroeducación como una nueva disciplina que contribuye a la integración de las ciencias de la educación con aquellas que se centran en el desarrollo cognitivo de la especie humana (Battro y Cardinali, 1996). La neuroeducación trata principalmente de estudiar tanto el cerebro de las personas que adquieren los conocimientos, como también el de aquellas que transmiten dichos conocimientos, mediante los métodos que ofrecen las ciencias naturales y humanas, y por tanto, necesita de la confluencia entre las ciencias de la educación y las neurociencias. Además, la neuroeducación, que es una mezcla de muchos componentes y convierte a la escuela en el lugar privilegiado para desarrollar el diálogo entre el docente y sus alumnos, se encuentra todavía en una etapa muy primaria (Battro, 2012).

El estudio realizado por grandes neurocientíficos como Gazzaniga y cols. (2002) pone de manifiesto que escuchar música y tocar un instrumento produce un gran impacto sobre el cerebro, llegando a estimular determinadas zonas del mismo encargadas de la realización de las funciones cerebrales superiores. Asimismo, el arte estimula el desarrollo de las competencias humanas, contribuye al desarrollo de las capacidades emocionales y cognitivas, y a la potenciación de muchas habilidades y procesos mentales. Por todo ello, los docentes deben considerar que tanto la escucha y práctica de la música como las diferentes manifestaciones artísticas pueden suponer posibles prácticas pedagógicas que enriquezcan el día a día del aula. En este sentido, las pruebas científicas que se han realizado en el estudio del cerebro evidencian que el lenguaje y la música tienen representaciones corticales diferentes (Patel, 2003). Igualmente, los estudios que se han realizado sobre el procesamiento de la música revelan que ésta se procesa de manera modular, y por consiguiente, las áreas del cerebro encargadas de procesar los distintos elementos de la música como tonos, intervalos y acordes, implican la activación de

diferentes áreas del cerebro (Fodor, 1983; Peretz y Coltheart, 2003). Zatorre y cols. (2007) analizaron qué aspectos son necesarios para una adecuada interpretación de la música, poniendo de manifiesto la necesidad de adquirir una adecuada secuenciación y organización de los movimientos necesarios para producir los sonidos. En definitiva, la neuroeducación debe ser considerada como una herramienta que facilitará una mejor ordenación del proyecto curricular en todos los ámbitos educativos.

El estudio del cerebro ha evolucionado gracias a la aplicación de las nuevas técnicas de neuroimagen, especialmente las derivadas de la Resonancia Magnética. La aplicación de estas técnicas para conocer el cerebro ha permitido estudiar no sólo su estructura sino también su función. La principal finalidad de la utilización de esta técnica se centra en la obtención de información relevante para poder aprender a partir de los datos obtenidos.

El objetivo general de esta tesis es estudiar cuáles son los cambios cerebrales del entrenamiento musical y cuáles de estos cambios están determinados por factores madurativos. Si bien es cierto que los músicos muestran importantes diferencias cerebrales en relación a las personas sin formación musical, poco se conoce sobre si estos efectos se deben a una mejor capacidad musical previa al entrenamiento o a un efecto directo de la formación musical. Mediante diferentes estudios abordaremos este problema respondiendo a cuestiones concretas. En el primer estudio, investigaremos las bases neurales de las diferencias individuales en la capacidad de discriminación auditiva entre músicos y no músicos. En el segundo estudio, abordaremos los efectos madurativos y de instrucción de la música en una muestra de niños recién ingresados en el conservatorio. Por último, en el tercer estudio pretendemos conocer la relación entre el lenguaje y la música en una muestra de músicos zurdos y diestros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Técnicas de Neuroimagen

2.1.1. La Resonancia Magnética (RM)

La resonancia magnética (RM) es una técnica de neuroimagen que nos permite estudiar las estructuras cerebrales de manera no invasiva y en vivo, mediante la obtención de imágenes de resonancia magnética estructural [con estas imágenes podemos detectar los tejidos cerebrales de sustancia gris (SG), sustancia blanca (SB), y líquido cefalorraquídeo (LCR)] y funcional (con imágenes que miden online el aporte sanguíneo en las diversas zonas cerebrales). Una de las principales características de las imágenes estructurales es la resolución espacial condicionada por el tamaño de los vóxeles. El vóxel es la unidad de volumen con tres dimensiones (x, y, z), y el tamaño de los vóxeles en cada dimensión determinará la resolución espacial de nuestras imágenes de RM. En este apartado revisaremos algunas de las principales técnicas de neuroimagen que se utilizarán en nuestro estudio y/o que serán útiles para entender el marco teórico.

2.1.1.1. Morfometría basada en el vóxel (VBM)

La morfometría es una herramienta que se utiliza para realizar estudios anatómicos de las imágenes del cerebro. Aunque existen varios métodos para este fin, el más empleado hasta la fecha es la morfometría basada en el vóxel. Dicho método se encarga de especificar en cada vóxel la cantidad de sustancia gris y blanca, o cálculos de volumen.

En nuestra investigación hemos utilizado la morfometría basada en el vóxel en los estudios 1 y 2. Dicho método se creó para conocer las variaciones en volumen o densidad cortical (Ashburner y Friston, 2001) y poder determinar las diferencias de concentración de sustancia gris y blanca en las estructuras cerebrales, en las imágenes de resonancia

magnética. La morfometría basada en el vóxel puede detectar diferencias estructurales en todo el cerebro. Esencialmente, su función es comparar mapas de concentración de sustancia gris o sustancia blanca (Chung y cols., 2001).

En resumen, la morfometría basada en el vóxel nos ofrece la oportunidad de conocer la estructura y composición del cerebro, convirtiéndose en una excelente herramienta para conocer las diferencias en la densidad de sustancia gris de las estructuras cerebrales.

2.1.2. La Resonancia Magnética funcional (RMf)

La Resonancia Magnética funcional (RMf) es una técnica utilizada en los estudios de neuroimagen que permite conocer los cambios fisiológicos del funcionamiento cerebral, permitiendo la visualización de cambios dinámicos funcionales. En nuestro trabajo la hemos utilizado en el estudio 3.

En la actualidad, las investigaciones realizadas para conocer el funcionamiento del cerebro en las cuales se utiliza la RM incorpora como elemento esencial la resolución temporal. La resolución temporal nos permite conocer a qué velocidad pueden registrarse los cambios fisiológicos del funcionamiento cerebral, dependiendo de la tasa de muestreo. La tasa de muestreo se entiende como la frecuencia con la que una medida de la señal es realizada en el tiempo, siendo la tasa de muestreo en RMf entre 2 y 4 segundos, queriendo decir con ello, que la medición de los cambios fisiológicos se realizan cada 2 a 4 segundos, siendo en todo el proceso el mismo tiempo.

Mediante la RMf se registran los cambios fisiológicos relacionados con los cambios funcionales de una región cerebral. Los cambios fisiológicos que se miden con RMf son variaciones en la cantidad de desoxihemoglobina (hemoglobina sin oxígeno) en la sangre (Huettel y cols., 2004). En cambio, las variaciones funcionales miden la intensidad y

variación de los cambios de oxigenación de la sangre de una determinada región cerebral, relacionados con la respuesta neuronal en la realización de una función o tarea cognitiva, o sin realización de tarea, en la cual se obtienen las fluctuaciones espontáneas de baja frecuencia, conocida con el nombre de estado de reposo "Resting State". Así, se considera la implicación de una región cerebral en una determinada función cognitiva dependiendo del cambio de señal asociado a la concentración de desoxihemoglobina.

La señal que procede del cambio fisiológico está basada en las propiedades magnéticas de la hemoglobina, que puede estar o no ligada al oxígeno, denominándose oxihemoglobina (Hb) y desoxihemoglobina (dHb), respectivamente. La oxihemoglobina es diamagnética y la desoxihemoglobina paramagnética, y el cambio de una a otra se produce en los capilares sanguíneos. De modo que, las variaciones de concentración de dHb en relación con Hb son las generadoras del contraste recogido en término de señal en las secuencias de RMf, denominándose contraste BOLD Dependiente del Nivel de Oxigenación de la Sangre. La Hb genera una mayor señal de resonancia y la dHb una señal más reducida. Por lo tanto, la señal que obtenemos en la RMf es un contraste producido por la reducción de la señal en aquellas zonas en las cuales la concentración de dHd se ve incrementada, queriendo decir con ello que es un incremento en sentido negativo de la señal.

En conclusión, la Resonancia Magnética funcional (RMf) está proporcionando a la neurociencia cognitiva, y en nuestro caso a la música, herramientas para poder investigar cómo se procesa la música, así como también conocer cuáles son los cambios cerebrales que se producen debido a la formación musical.

2.1.2.1. Estado de reposo y conectividad funcional

Para conocer la actividad cerebral ha sido frecuente que los participantes realicen determinadas tareas para conocer qué áreas del cerebro están relacionadas con determinados procesos cognitivos, utilizando para ello la Resonancia Magnética funcional (RMf). En cambio, desde finales de los años 90 hasta la actualidad han proliferado los estudios de RMf que tienen como propósito analizar la actividad cerebral (señal BOLD) en estado de reposo (o Resting-State en inglés), es decir, sin la necesidad de realizar ninguna tarea y en consecuencia en ausencia de estímulos externos. Un estudio realizado por Biswal y cols. (1995) demostró que las señales que se generaban de manera espontánea, no eran causadas por señales relacionadas con el ruido, sino que se trataba de fluctuaciones espontáneas regulares de baja frecuencia, y propuso que la actividad cerebral en ausencia de estímulos externos generaba dichas fluctuaciones. Así mismo, otros estudios realizados posteriormente demostraron que la actividad cerebral que se generaba en ausencia de estímulos externos se encuentra organizada en determinadas redes cerebrales (Beckman y cols., 2005; Damoiseaux y cols., 2006; Shehzad y cols., 2009).

El cerebro humano está formado por una compleja red que posibilita que las diversas partes del cerebro puedan interconectarse tanto estructural como funcionalmente. Es probable que en los diferentes procesos cognitivos la conectividad funcional ocupe una función determinante, y facilite la asimilación y consolidación del conocimiento. Por esta razón, las investigaciones sobre la conectividad funcional han adquirido un gran interés. La conectividad funcional se define como una medida de sincronización de las series temporales que permiten la interconexión entre las distintas regiones cerebrales (Friston y cols., 1993; Friston, 1998). La conectividad funcional está asociada con la conectividad estructural (Castellanos y cols., 2008; Damoiseaux y Greicius, 2009), pudiendo también

existir dicha conectividad en regiones del cerebro que no estén conectadas por vías axonales (Damoiseaux y Greicius, 2009).

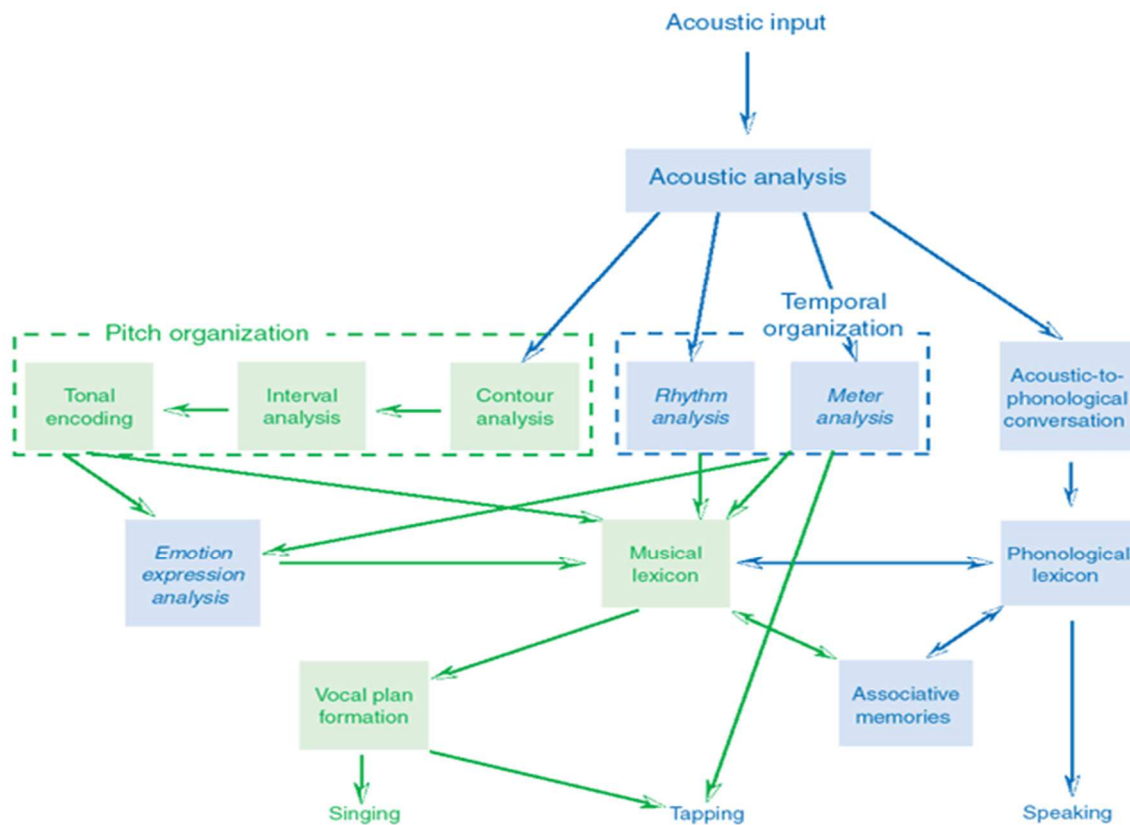
Por todo ello, se puede concluir que el conocimiento de la conectividad funcional mediante el estado de reposo facilita el conocimiento de la actividad neural, tanto entre regiones anatómicamente conectadas como entre regiones que no estén conectadas por vías axonales, y puede ayudar a proporcionar otros conocimientos que complementan las tareas que se realizan en RMf para conocer los cambios funcionales que genera el aprendizaje en el cerebro.

2.2. Procesamiento modular de la música

Tanto la música como el lenguaje son disciplinas que ofrecen amplios conocimientos sobre qué áreas cerebrales están implicadas en el procesamiento como en la producción de dichas disciplinas. Ambos tienen en común los inputs visual y sobre todo auditivo sobre el procesamiento, siendo los sistemas audio-motores los encargados principales de su procesamiento. Las investigaciones neurocientíficas se han interesado en conocer si el lenguaje y la música siguen procesos de aprendizaje parecidos, y recientemente, si existen módulos cerebrales conjuntos o aislados que median su aprendizaje y su posterior procesamiento. Es evidente que existen áreas comunes ya que la información auditiva llega a ambos giros auditivos primarios por igual. Sin embargo, al mismo tiempo se han propuesto modelos de procesamiento basados en sistemas relativamente independientes. Por ello, los modelos recientes propuestos se basan en describir el funcionamiento aislado de estas funciones como demuestran los modelos del lenguaje (Hickok y Poeppel, 2007) y de la música (Jáncke, 2009; Münte y cols., 2002; Peretz y Coltheart, 2003; Wan y cols., 2010; Zatorre, 2005).

Con respecto al procesamiento de la música los diferentes estudios que se han realizado para conocer como nuestro cerebro entiende o percibe la música, han demostrado que el procesamiento de la música se realiza de manera modular (Fodor, 1983; Peretz y Coltheart, 2003; ver figura 1).

Figura 1. Modelo de procesamiento modular de la música. Imagen obtenida de Peretz y Coltheart (2003).



El sistema modular implica la existencia de determinadas zonas cerebrales que ejercen funciones cognitivas de forma relativamente aislada e independiente, sin apenas recibir influencias de otras zonas. Estos módulos se derivaron de pacientes neuropsicológicos que debido a la existencia de lesiones cerebrales específicas, mostraron déficits selectivos en un proceso cognitivo. A partir de ese concepto entra en juego la necesidad de la doble disociación, es decir, diferenciar dos procesos cognitivos

relativamente relacionados asociándolos a lesiones en zonas cerebrales distintas. De esta forma, las lesiones cerebrales deben causar la alteración del proceso A mientras está preservado B, al mismo tiempo que debe existir una lesión en otra zona cerebral que altere el proceso B mientras A está preservado.

Debido a la necesidad de un modelo para procesar la música, el modelo de procesamiento modular de la música de Peretz y Coltheart (2003) nos permite poder diferenciar que elementos constituyen el procesamiento auditivo, y en consecuencia verificar con más detalle que áreas del cerebro están encargadas de procesar la melodía, el ritmo y el lenguaje. En este modelo se establecen tres módulos cerebrales, donde uno de ellos se encarga del procesamiento de lenguaje (módulo para transformar el sonido en fonología) y otros dos para la música (el módulo de percepción melódica y el de la percepción temporal y rítmica).

El **módulo de la percepción melódica** se basa en el análisis del contorno melódico y las distancias interválicas entre los sonidos necesarias para la codificación del tono (ver figura 1). Con respecto al **módulo de la percepción temporal y rítmica** se basa en analizar el ritmo, basado en los valores de los sonidos con independencia de la periodicidad de los acentos, del compás, y del análisis métrico, basado en la periodicidad de los acentos fuertes y débiles que constituyen el compás. La consecuencia de estos dos análisis nos conduce a lo que se conoce como léxico musical (ver figura 1).

En cuanto al **módulo del procesamiento del lenguaje** se encarga de analizar el lenguaje, como es el caso de las letras de las canciones. De modo que, los diversos sistemas modulares encargados de analizar tanto la música como la letra de las canciones se encargan de facilitar tanto la comprensión de la música como de sus emociones (ver figura 1). Estos módulos encargados de analizar la percepción de la música promueven

salidas hacia la expresión de las emociones, permitiendo reorganizar la experiencia de la emoción (Peretz, 2001).

De esta manera, el procesamiento modular de la música es diferente si escuchamos una pieza instrumental o si escuchamos una canción. Este sistema de procesamiento modular de la música establece que cuando escuchamos música instrumental, los módulos encargados de analizarla serán el módulo de percepción melódica, y el de la percepción temporal rítmica. En cambio, cuando se escucha una canción el módulo del procesamiento del lenguaje realizará un análisis de la letra de la canción, mientras que la música será analizada por el módulo de la percepción melódica y por el módulo de la percepción temporal rítmica. Para la interpretación musical se requieren diversas activaciones cerebrales dependiendo de cuál sea la finalidad cuando hacemos música. Así, si deseamos cantar una canción el léxico musical conectará con el léxico fonológico, y si queremos que esta canción nos haga recordar una determinada experiencia se activará la memoria asociativa.

El sistema modular del procesamiento de la música de Peretz y Coltheart (2003), está constituido de forma que las vías melódicas como temporales envían sus respectivas salidas al léxico musical o al componente de análisis de la expresión emocional. Por lo tanto, el léxico musical es un sistema representacional que contiene todas las representaciones de las frases musicales específicas a las cuales uno ha estado expuesto durante su vida. El mismo sistema modular también mantiene un registro de cualquier nueva entrada musical. En consecuencia, el reconocimiento exitoso de una melodía familiar depende de un procedimiento de selección que tiene lugar en el léxico musical.

En el modelo del procesamiento de la música se representan las diferentes vías a través de las cuales se distribuyen los diferentes elementos de la música como el ritmo, el compás, la melodía y los intervalos. En un determinado modelo de procesamiento de la

música existen unos módulos más pequeños para poder procesar la música. De modo que, en el caso de la música vocal, nuestro sistema de procesamiento musical se distribuirá en dos módulos, encargándose de la letra el sistema de procesamiento del lenguaje, y de la música dos subsistemas encargados uno de la percepción del ritmo y otro del tono (Peretz y Coltheart, 2003) (ver figura 1). Además, dichos sistemas modulares necesitan otros módulos más pequeños para poder percibir los diferentes elementos de la música como el tono, los intervalos, y el contorno melódico en el caso del aspecto sonoro; y el ritmo y el compás para el aspecto del tempo (Peretz y Coltheart, 2003).

Dicho procesamiento modular de la música se ha podido comprobar en pacientes con daño cerebral quienes perciben claramente el componente rítmico, pero no discriminan el componente sonoro, conociéndose dicha disfunción sonora con el nombre de Amusia. Esta anomalía neurológica en pacientes con daño cerebral eliminará este flujo de información que pasa a través de las diferentes vías por las cuales fluye la información musical (Peretz y cols., 1994; Steinke y cols., 2001).

Por lo tanto, el procesamiento de la música estará determinado por un sistema modular que se encargará de procesar por un lado la melodía y el ritmo, y por otro el lenguaje. Por otro lado, para la interpretación musical será necesario la conexión entre el léxico fonológico y el musical. Además, la capacidad de reconocer e interpretar la música estará condicionada por el conocimiento de la cultura musical.

2.3. Bases neurales del procesamiento de la música

En el procesamiento de la música es necesario un sistema nervioso capaz de codificar y producir variación de tono con una alta precisión. En este proceso se ve especialmente involucrado el hemisferio cerebral derecho, incluyendo las áreas que se

encargan de codificar el tono tanto en la percepción (Hyde y cols., 2008; Zatorre y Gandour, 2008; Zatorre y cols., 2002) como en la producción (Özdemir y cols., 2006). En cambio, el sistema homotópico izquierdo parece estar más especializado en los sonidos del habla, debido a que en este no se requiere una elevada precisión para el seguimiento del tono.

Además, Zatorre y Salimpoor (2013) también descubrieron que la corteza auditiva en el giro temporal superior que tiene una elevada actividad cuando se realiza el **procesamiento de la música**, muestra una destacada interacción con el núcleo accumbens cuando el valor de la recompensa que se obtiene por escuchar la melodía es alto. También, se pudo comprobar que cuando se está escuchando música muy relajante, se produce un aumento de conectividad entre la corteza frontal y el núcleo accumbens. Asimismo, el núcleo accumbens está también conectado con áreas límbicas subcorticales, las cuales están implicadas en las emociones, abarcando al hipocampo y la amígdala (Zatorre y Salimpoor, 2013). Igualmente, está también conectado con otras áreas del cerebro como la corteza cingulada anterior, la ínsula y el hipotálamo, implicadas en los procesos de escucha de la música y de la respuesta emocional generada por la música (Haber y Knutson, 2010).

Otros estudios de neuroimagen, demuestran que en el **procesamiento de la recompensa** se observa una interconexión entre el sistema mesolímbico y la corteza cerebral, concretamente en la corteza prefrontal (Cela-Conde y cols., 2004; Kawabata y Zeki, 2004; Vartanian y Goel, 2004). En un estudio realizado por Blood y Zatorre, (2001) para conocer qué áreas del cerebro estaban implicadas cuando se escuchaba música placentera, demostraron que se activa el estriado ventral, así como otras regiones las cuales están relacionadas con la emoción, poniendo de manifiesto que el sistema mesolímbico de recompensa está implicado en la escucha de la música. Brown y cols. (2004) pudieron demostrar que la escucha de música instrumental placentera en personas sin conocimientos

musicales producía activaciones en áreas límbicas y paralímbicas como en el giro cingulado, el giro anterior prefrontal, la corteza retrosplenial, el hipocampo, la ínsula anterior, y el núcleo acumbens. Además, también se produjeron activaciones en áreas auditivas y temporales primarias.

En la **escucha de la música también se activa la corteza motora y premotora** ya que al escuchar música es normal que ciertas partes del cuerpo se pongan en movimiento (Zatorre y cols., 2007). Por lo que se refiere a la relación de las diferentes áreas cerebrales, como son el sistema auditivo y motor, implicadas en la percepción y producción de patrones rítmicos, Chen y cols. (2008) demostraron que al realizar una escucha pasiva de la música, en que no había una correspondencia del patrón rítmico que se estaba escuchando con su correspondiente manifestación rítmica, observaron activaciones en el área motora suplementaria, y en el cerebelo. Mientras que, si realizaba una escucha activa, donde había una correspondencia del patrón rítmico que se estaba escuchando con su correspondiente manifestación rítmica, se activaba también la corteza premotora ventral. Además, se pudo observar que la percepción y sincronización en la ejecución de los patrones rítmicos mostraba también activación en el plano temporal derecho, encargándose de examinar los sonidos musicales y enviarlos a las diferentes regiones cerebrales para su procesamiento (Bangert y cols., 2006; Chen y cols., 2008; Sluming y cols., 2002). Así pues, concluyeron que en el procesamiento e interpretación musical implicaba regiones auditivas como el plano temporal y el giro de Heschl; y áreas motoras como la corteza premotora ventral, el área motora suplementaria y el cerebelo.

Diversos estudios realizados para conocer qué **áreas se ven involucradas en la percepción del sonido** revelan que la percepción de la música implica diversas áreas cerebrales auditivas tanto primarias como secundarias, que interaccionan con otras áreas frontales y temporales preferentemente del hemisferio derecho (Parson y cols., 2005;

Zatorre, 2005; Zatorre, 2003). Lógicamente, la corteza auditiva primaria o giro de Heschl supone la estructura clave para el procesamiento de la música. Esa zona, junto con las áreas auditivas circundantes, sirve para procesar el tamaño de los intervalos musicales (Klein y Zatorre, 2011) y el dibujo melódico de la música (Lee y cols., 2011). A nivel de lateralidad, los diversos estudios relacionados con el procesamiento de la música constatan que en este proceso se ven involucrados los dos hemisferios cerebrales, de modo que, para conocer cómo se procesan los diferentes elementos de la música, sabemos que el timbre se procesa en el hemisferio derecho, la melodía en ambos hemisferios y el ritmo se procesa en el hemisferio izquierdo (Platel y cols., 1997).

Estas diferencias nos hacen pensar que la **activación hemisférica en músicos y no músicos** no coincide, ya que en los músicos la diferenciación entre dos sonidos se identifica con más precisión que en los no músicos, siendo más característica dicha actividad del hemisferio izquierdo, mientras que los no músicos perciben el entorno melódico de manera más global, siendo más propio del hemisferio derecho, aunque en el procesamiento de la música no podemos otorgar únicamente la activación de un solo hemisferio en el proceso de escucha de la música (Peretz y Zatorre, 2005; Zatorre y cols., 2007).

En resumen, teniendo en consideración los estudios anteriores se puede entender que el procesamiento musical implica la interacción de diversas funciones neurales que se ponen en funcionamiento como consecuencia de la escucha de la música, y que requieren un alto grado de coordinación para que se pueda obtener el resultado esperado. De modo que, la activación o volumen de las áreas cerebrales que se implican cuando se escucha la música, no solo las corticales, sino también el cerebelo y los ganglios basales, depende de la cualidad musical que hayamos escuchado (tono, ritmo, melodía, música vocal o

instrumental), debido a que dependiendo del tipo de elemento musical y tipo de música que escuchemos implicará a unas regiones cerebrales o a otras.

2.4. Bases neurales de la interpretación de la música

En la interpretación musical, es relevante el nexo de unión entre el sistema auditivo y el sistema motor, llevado a cabo por la vía dorsal y encargado de realizar las transformaciones sensoriomotoras asociadas a la música (Zatorre y cols., 2007). Disciplinas como la interpretación mediante instrumentos, el canto o la danza, suponen un entrenamiento específico y singular de esta vía dorsal. Ahora bien, para llevar a cabo una correcta interpretación musical es necesario el control de tres aspectos fundamentales como son: la coordinación, la organización espacial del movimiento, y la secuenciación (Zatorre y cols., 2007). Por todo ello, en el proceso de la producción musical relacionado este con la planificación para desarrollar el acto motor, desempeña un papel importante el córtex parietal superior, ya que integra la información visual y auditiva (Sergent y cols., 1992). Al tocar un instrumento, se producen en nuestro cerebro interacciones audio-motoras, pudiendo ser de dos tipos: de **retroalimentación** y de **proalimentación** (Zatorre y cols., 2007). Las interacciones de retroalimentación hacen referencia a la adecuación de los actos motores para la mejora de la afinación, mientras que las de proalimentación se entienden como una función del sistema auditivo como predictivo en la práctica musical (Large y Palmer, 2002).

Todas estas interacciones se almacenan tras el entrenamiento en la vía dorsal y su control se ejerce desde el córtex premotor. La participación de esta zona clave en la interpretación musical implica adicionalmente la activación de diversas estructuras cerebrales organizadas en dos circuitos motores. El primero sirve para coordinar los

movimientos guiados externamente a través de órganos sensoriales e implica zonas parietales, áreas premotoras laterales y el cerebelo. **El córtex parietal** se encarga del control de los movimientos en la producción del sonido (Zatorre y cols., 2007), mientras que **el cortex premotor** lateral participa en tareas que requieren un conjunto de secuencias con un elevado grado de complejidad (Janata y Grafton, 2003; Schubotz y Cramon, 2003). Todas estas conductas aprendidas por entrenamiento en respuesta a estímulos externos se almacenan en el **cerebelo**, que está implicado en la realización de las trayectorias precisas de los movimientos mientras se toca un instrumento contribuyendo a la adquisición e integración sensorial de la información (Balasubramanian y cols., 2004; Loehr y Palmer, 2006).

El segundo circuito implica aprendizajes motores guiados internamente e implica aprendizaje de secuencias que no requieren guía sensorial. Las estructuras implicadas en este aprendizaje son los ganglios basales y el área motora suplementaria. **Los ganglios basales** están implicados en la sincronización de los movimientos especialmente relevantes en tareas que requieren la ejecución secuenciada de movimientos de los dedos con una determinada velocidad metronómica (Rao y cols., 1997; Rao y cols., 2001). **El área motora suplementaria** es el output principal de los circuitos motores originados en los ganglios basales, y se ha demostrado que participa en la organización de los movimientos más complejos guiados internamente (Kennerley y cols., 2004; Sakai y cols., 2004). En muchos casos, la interpretación musical es tan rápida que la guía sensorial no es suficiente para coordinar los movimientos y por tanto se requiere de una guía interna para anticipar el siguiente movimiento. Esta coordinación entre ambos circuitos premotores es por tanto clave en la interpretación musical.

Además de sus funciones de organización motora, el circuito ganglios basales-área motora suplementaria juega un papel adicional a nivel emocional/motivacional. Como

hemos visto en el apartado anterior, los ganglios basales juegan un papel esencial en la percepción placentera de la música. Con ello, este circuito parece suponer una estructura clave para aportar elementos emocionales y subjetivos a la interpretación musical.

2.5. Efectos del entrenamiento musical

Por lo que se refiere al descubrimiento de cómo funciona el cerebro diversos investigadores han utilizado la música como herramienta para conocer qué áreas del cerebro están relacionadas con el procesamiento y la interpretación musical. Además, se ha demostrado que los seres humanos estamos preparados genéticamente para poder entender y procesar la música, teniendo también una gran influencia en la asimilación como en la adquisición de los conocimientos musicales el contexto cultural de cada persona (Zatorre, 2005).

Con respecto a los efectos que ofrece la formación musical y su vinculación con la plasticidad cerebral ha generado un gran interés entre la comunidad científica así como también en el ámbito social. Las investigaciones que se han realizado para conocer los efectos de la enseñanza de la música demuestran que esta produce cambios en el sistema auditivo para la mejora de la percepción auditiva, principalmente para la correcta interpretación musical en los músicos, así como también para la mejora del procesamiento musical en el público en general. Boh y cols. (2011) realizaron un estudio entre músicos y no músicos para conocer qué diferencias de percepción existían con respecto al procesamiento de patrones rítmicos diferentes, y se pudo comprobar que los músicos tuvieron mucha más facilidad en percibir las diferencias rítmicas con respecto de los no músicos. Por lo tanto, la educación musical prepara al ser humano para la correcta percepción de los sonidos, modulando el cerebro y en consecuencia garantizando una mayor aptitud musical (Kraus y Chandrasekaran, 2010). Otros estudios han observado que

la práctica musical puede mejorar determinadas capacidades cognitivas propias de las funciones ejecutivas, de modo que, el control de estas funciones permite organizar y controlar aspectos relacionados con los retos académicos, aunque aún es necesario disponer de más estudios que corroboren estas evidencias. En un estudio realizado por Zuh y cols. (2014) demostró que comparando a músicos con no músicos en edad adulta, los músicos mostraron mejor rendimiento y plasticidad cognitiva en tareas de fluidez verbal así como en tareas relacionadas con la memoria de trabajo.

Algunos estudios han investigado la plasticidad cerebral y la música para conocer las áreas cerebrales que están implicadas en la música (Elbert y cols., 1995; Gaser y Schlaug, 2003; Hutchinson y cols., 2003; Justel y Abrahan, 2012; Pantev y cols., 1998; Palomar-García y cols., 2017; Soria-Urios y cols., 2011; Schneider y cols., 2002; Schlaug y cols., 1995) aunque existen todavía pocos estudios sobre la conectividad funcional en estado de reposo entre el sistema motor y multisensorial.

2.5.1. Cambios cerebrales producidos por el entrenamiento musical

A nivel estructural, diversos estudios afirman que el entrenamiento musical produce cambios en el cerebro a lo largo de toda la vía auditiva, que incluye desde el tronco cerebral (Kraus y Chandrasekaran, 2010; Strait y Kraus 2014) hasta la corteza auditiva primaria y las áreas próximas (Bermudez y cols., 2009; Elmer y cols., 2013; Gaser y Schlaug 2003; Schneider y cols., 2002), llegando también hacia otras áreas que participan en el procesamiento auditivo de alto nivel (James y cols., 2014; Lappe y cols., 2008; Loui y cols., 2012). Los estudios que se han realizado con la finalidad de conocer que efectos produce la práctica de tocar un instrumento musical en el cerebro ponen de manifiesto que aquellas personas que realizan un entrenamiento musical, no solo prolongado sino también en un espacio de tiempo de una semana, muestran cambios en el giro de Heschl, en el giro

temporal superior izquierdo, y en el giro supramarginal, revelándonos las posibilidades de plasticidad cerebral que tiene nuestro cerebro (Gaab y cols., 2006; Schlaug y cols., 1995; Schneider y cols., 2002). Además, los estudios realizados por Hutchinson y cols. (2003), Schlaug y cols. (1996) y Pantev y cols. (1998) ponen de manifiesto que como resultado del entrenamiento musical se observa un mayor volumen de sustancia gris en zonas cerebrales auditivas en aquellos que han realizado un mayor entrenamiento musical en comparación con aquellos que han practicado menos, siendo más significativas estas diferencias si la edad de comienzo a las enseñanzas musicales es más temprana y no dependiendo del instrumento que toquen.

Además, también se han encontrado diferencias en el lóbulo frontal (Bermudez y cols., 2009; Gaser y Schlaug 2003). Estudios de neuroimagen han demostrado diferencias de volumen de sustancia gris en la región premotora ventral derecha entre músicos dependiendo de la edad de inicio del entrenamiento musical, manifestando un mayor volumen en aquellos que habían empezado sus enseñanzas musicales en edades más tempranas (Bailey y cols, 2014; Palomar-García y cols., 2017). En consecuencia, esta región cerebral ha sido determinante para establecer e investigar la integración sensoriomotora (Chen y cols., 2009; Zatorre y cols., 2007). Asimismo, las diferencias estructurales también se han observado en estructuras subcorticales, como los ganglios basales, y el cerebelo (Amunts y cols., 1997; Banget y Schlaug, 2006; Bermudez y cols., 2009; Elbert y cols., 1995; Gaser y Schlaug, 2003; Hutchinson y cols., 2003). Este circuito neural ha sido relacionado con el control motor y la planificación de los movimientos de los dedos durante el aprendizaje motor (Schmidt y Lee, 2011).

Los efectos del entrenamiento musical también producen cambios importantes en los niveles de sustancia blanca, incluyendo el cuerpo calloso y el fascículo arqueado. Según Johansen-Berg y cols. (2007) la función del cuerpo calloso se encarga de conectar los dos

hemisferios cerebrales, y puede facilitar la coordinación manual en aquellos músicos que requieren la utilización de las dos manos para tocar un instrumento musical como los clarinetistas, saxofonistas y flautistas. Un estudio reciente realizado por Schlaug y cols. (2009) ha demostrado que el entrenamiento musical de entre 2 y 5 horas semanales y durante un periodo de tiempo prolongado produce un aumento de tamaño en el cuerpo calloso, y además dicho aumento se correlacionaba con el número de horas semanales, de modo que, a un mayor número de horas a la semana de práctica musical se producía un mayor aumento del cuerpo calloso.

Otros estudios pusieron de manifiesto que el fascículo arqueado se encarga de unir la región temporal con la frontal, descubriendo la participación de este en el procesamiento audio-motor del lenguaje y la música (Halwani y cols., 2011; Saur y cols., 2008; López-Barroso y cols., 2013). Halwani y cols. (2011) realizaron un estudio en que investigaron las adaptaciones cerebrales que se dan para consolidar tanto el aspecto vocal y musical en los cantantes, comparándolos con los músicos instrumentistas y los no músicos. Los resultados obtenidos demostraron un mayor volumen y valores más altos de anisotropía fraccional (propiedad del tejido cerebral normal que depende de la direccionalidad de las moléculas del agua y de la integridad de las fibras de sustancia blanca) en el fascículo arqueado (FA) en el grupo de cantantes y músicos, en comparación con los no músicos. De modo que, pudieron observar que en el grupo de los cantantes se manifestó un efecto a nivel bilateral relacionado con el aspecto musical así como el lingüístico, mientras que en el grupo de los músicos instrumentistas se observó un efecto lateralizado en el hemisferio derecho implicado en el aspecto musical.

Estos efectos del entrenamiento musical también se han investigado a nivel de conectividad funcional. Concretamente, en un estudio reciente Palomar-García y cols. (2017) han estudiado la conectividad funcional en estado de reposo tanto en músicos como

en no músicos con la intención de conocer los cambios de conectividad entre las regiones auditivas y motoras. Los resultados mostraron que los músicos con más años de entrenamiento musical tenían mayor conectividad funcional entre la corteza auditiva y la corteza premotora ventral derecha en comparación con los no músicos. Además, también demostraron que los músicos que habían empezado sus estudios musicales a una edad más temprana tenían un mayor volumen en el córtex auditivo derecho, estando dicho aspecto relacionado con una mayor conectividad funcional entre las áreas auditivas y motoras. Por lo tanto, este estudio revela que la conectividad funcional entre las regiones auditivas y motoras está condicionada por el entrenamiento musical.

Otro estudio dónde también se han investigado las diferencias en conectividad funcional en estado de reposo entre músicos y no músicos, ha demostrado que en los músicos se establece una mayor y efectiva conectividad funcional, es decir, una mayor plasticidad que en los no músicos, debido al periodo de formación musical que realizan en su formación, implicando la integración de las funciones multisensoriales y motoras (Luo y cols., 2012).

En resumen, las investigaciones previas que se han realizado para conocer los efectos que se producen a nivel cerebral debido al entrenamiento musical, ponen de manifiesto diferencias de volumen de sustancia gris en regiones auditivas (el giro de Heschl, el giro temporal superior, en el giro supramarginal) y también en áreas motoras (cortex frontal inferior, motor, premotor y cerebelo), siendo mayores los cambios en aquellos músicos que han empezado el entrenamiento musical a una edad más temprana. Asimismo, los efectos del entrenamiento musical producen cambios importantes también en los niveles de sustancia blanca, incluyendo el cuerpo calloso y el fascículo arqueado. Además, también se han observado diferencias en conectividad funcional en estado de reposo entre las regiones auditivas y motoras.

2.6. Efectos de la educación musical en los niños

Los estudios sobre los efectos que produce la educación musical ponen de manifiesto que la práctica de la música influye en el desarrollo de las funciones y estructuras cerebrales (Herholz y Zatorre, 2012; Levitin y Tirovolas, 2009; Patel, 2003, 2010; Schellenberg, 2004; Trainor y cols., 2009), principalmente en aspectos relacionados con el procesamiento del lenguaje (Besson y Schön, 2001; Koelsh y cols., 2002; Moreno y cols., 2011; Patel y Iversen, 2007; Schlaug y cols., 2009; Trollinger, 2003), la mejora de la memoria verbal (Ho y cols., 2003), el procesamiento fonológico (Thompson y cols., 2004), y en consecuencia, el desarrollo y perfeccionamiento de una mejor conciencia fonológica (Herrera y cols., 2011).

2.6.1. Influencia de la educación musical en la adquisición del lenguaje

Diversas investigaciones han demostrado que empezar las enseñanzas musicales a edades muy tempranas es determinante para una adecuada consolidación de las habilidades lingüísticas tanto en niños con dificultades como para niños con un desarrollo normalizado (Corriveau y Goswami, 2009; Franklin y cols., 2008; Jentschke y Koelsch, 2009; Legg, 2009; Perlovsky, 2010; Schellenberg, 2001; Vitoria, 2005; Wan y cols., 2010). Asimismo, diversos estudios manifiestan que la incorporación de canciones o de determinados elementos musicales produce ventajas y facilitan el aprendizaje de aspectos lingüísticos, sociolingüísticos, afectivos y memorísticos (Crookes y Schmidt, 1991; Falioni, 1993; Fonseca y García, 2010; Kraus y Chandrasekaran, 2010; Murphey, 1990; Schellenberg y cols., 2007; Thain, 2010). En un estudio realizado por Toscano-Fuentes y Fonseca-Mora (2013) pudieron comprobar que la aplicación de un programa musical para la enseñanza

del inglés en alumnos de 6º de primaria incrementó la comprensión y la producción oral, así como también la lectura.

Además, cabe la posibilidad de imaginar la hipótesis que la adquisición de los conocimientos musicales en los niños puede repercutir en mejorar la conciencia fonética, debido a que tanto el procesamiento de la música como el del lenguaje necesitan desarrollar la capacidad de fragmentar los estímulos sonoros en unidades perceptuales. También puede influir en la comprensión espacial, puesto que la escritura musical requiere de un contexto espacial para poder ser interpretada la música. Así mismo, el aprendizaje de la música puede contribuir a mejorar las habilidades matemáticas, debido a que en la lectura del lenguaje musical, como por ejemplo las notas musicales, se requiere la decodificación de las notas en valores medibles y proporcionales. Por ejemplo, el número 1 equivale a una redonda que tiene un valor de 4 pulsaciones de negra, el $1/2$ a una blanca que tiene el valor de 2 pulsaciones de negra, el $1/4$ a una negra que tienen el valor de una pulsación; y el $1/8$ a una corchea que es la mitad de una negra, y así sucesivamente hasta llegar a la semigarrapatea que equivale a $1/256$ y son $1/64$ pulsos de negra (Schlaug y cols., 2005).

La investigación realizada por Zhao y Kuhl (2016) puso de manifiesto que en los niños que reciben una educación musical durante el periodo de la primera infancia (entre 9 y 10 meses de edad), los estímulos sonoros influyen posteriormente en el procesamiento de los sonidos musicales, y en consecuencia contribuyen a facilitar también el procesamiento de los sonidos del lenguaje. El estudio se realizó durante 12 sesiones en niños entre 9 y 10 meses de edad coincidiendo este periodo con el aprendizaje de los sonidos del habla. La investigación consistió en ofrecer a un grupo de niños un ritmo musical, concretamente el ritmo del vals, el cual está formado por 3 pulsaciones con acentuación en la primera pulsación, y con la ayuda de los padres acompañaban con instrumentos de percusión y con

palmas el vals. En cambio, en el otro grupo también se les proporcionaron los instrumentos de percusión pero no escucharon ningún ritmo ni ninguna música. Ambos grupos fueron examinados mediante la técnica de Magnetoencefalografía (MEG) y tras escuchar el ritmo del vals de manera arrítmica, pudieron observar que el grupo que había escuchado e interpretado el ritmo del vals, mostraron una mayor actividad neural tanto en zonas cerebrales que regulan la audición como también en la corteza prefrontal, encargada de la atención y percepción de las motivs rítmicos, en comparación con el grupo de control. Así mismo, estudiaron si el aprendizaje de la música había influido en la mejora de la percepción de patrones lingüísticos, y demostraron que los niños que habían participado en la escucha y práctica musical mostraron una mayor activación en zonas encargadas de la audición y en la corteza prefrontal, determinando que la escucha de la música había influido en su competencia para percibir patrones de una lengua nueva.

La influencia de la música en las primeras etapas de la vida es determinante para configurar y consolidar un primer acercamiento a la música. En una investigación realizada por Jentschke y cols. (2014) han demostrado que los niños a los 30 meses de edad ya han interiorizado algunos aspectos melódicos los cuales son la base para la adquisición de nuevos conocimientos.

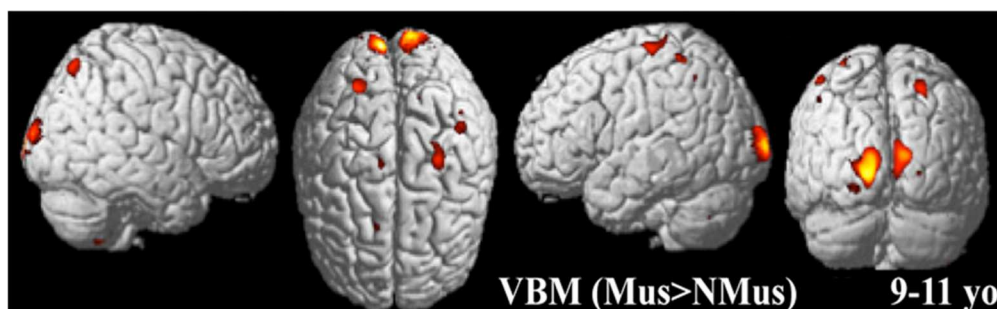
Así mismo, también se ha estudiado que la práctica de la música influye de manera eficaz en el desarrollo del niño, aunque aún no se ha podido determinar con exactitud a qué edad concreta se tiene que empezar en la adquisición de los conocimientos musicales, y si las diversas posibilidades de acceder al fenómeno sonoro influyen de manera diferente en el desarrollo del niño. Además, la vivencia y experimentación de la música durante un periodo de 6 meses, y a partir de los 6 meses de edad, contribuye a la adquisición de determinados conocimientos propios de su cultura musical influyendo en su futuro desarrollo social, así como comunicativo (Gerry y cols., 2012).

2.6.2. Cambios cerebrales producidos por la educación musical en los niños

En apartados anteriores, se ha revisado la relevancia de la formación musical sobre la estructura y función cerebral en la época adulta. Algunos estudios ya muestran la importancia de la dimensión temporal en estos cambios, ya que se ha comprobado que en algunos casos estos son más relevantes cuando antes se inicia la formación (Bailey y cols., 2014; Palomar-García y cols., 2017; Steele y cols., 2013). Por ello, y dada la importancia que el llamado periodo crítico tiene en el desarrollo de las funciones audio-motoras, parece conveniente estudiar los efectos de la formación musical en niños.

En un estudio realizado por Schlaug y cols. (2005) pudieron comprobar mediante un estudio morfométrico que los niños músicos que tenían entre nueve y doce años obtuvieron significativamente un mayor volumen de sustancia gris tanto en la corteza sensoriomotora como en el lóbulo occipital a nivel bilateral en comparación con los niños no músicos (ver figura 2).

Figura 2. Estudio morfométrico basado en vóxel que compara a niños músicos de nueve a once años con niños no músicos y muestra las regiones y la distribución del volumen de la materia gris. Imagen obtenida de Schlaug y cols. (2005).

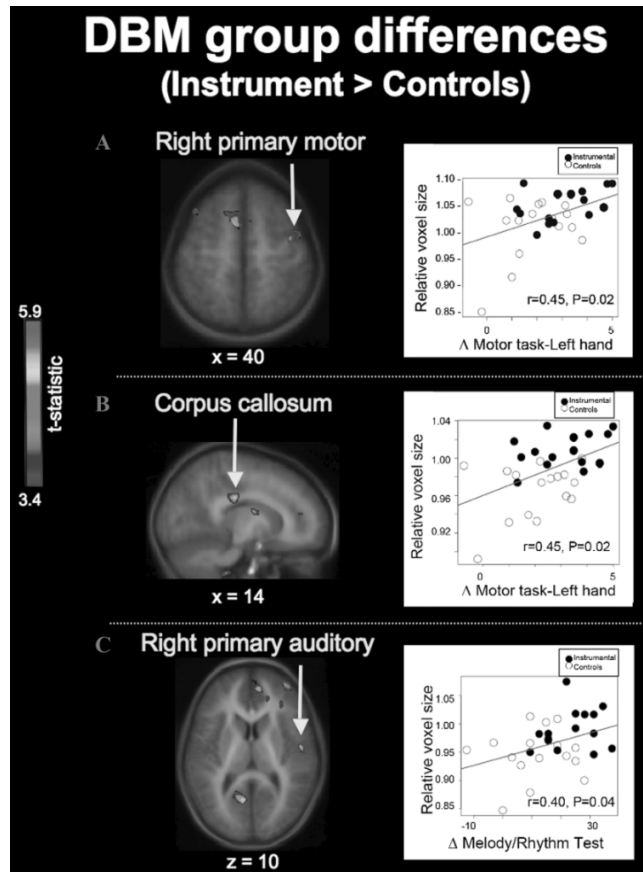


En otro estudio realizado en niños en la etapa de la primera infancia con una formación musical de 15 meses de duración, pone de manifiesto como diferentes cambios estructurales en el cerebro influyen en una mejora de las habilidades motoras y auditivas

(Hyde y cols., 2009). Concretamente, se encontraron diferencias significativas de deformación cerebral en el área motora primaria derecha (Fig. 3A), en el cuerpo calloso (Fig 3B), y además en el giro de Heschl derecho (Fig. 3C). Además, estos cambios se correlacionan con tareas motoras que implican el movimiento de los dedos de la mano izquierda (Fig 3A y AB), así como con tareas melódicas y rítmicas (Fig.3C).

Además, estas diferencias cerebrales demostradas en los niños después de un periodo de formación musical coinciden con otros estudios realizados con músicos y no músicos, observando en los músicos cambios en las estructuras cerebrales como el giro precentral (Gaser y Schlaug, 2003), en el cuerpo calloso (Lee y cols., 2003) así como en la corteza auditiva (Bermudez y Zatorre, 2005; Gaser y Schlaug, 2003; Schneider y cols. 2002).

Figura 3. Las imágenes cerebrales A) área motora primaria derecha B) cuerpo calloso C) área auditiva primaria derecha (giro de Heschl) muestran las áreas con diferencias significativas de deformación cerebral (DBM) a lo largo de 15 meses de formación musical en niños. Imagen obtenida de Hyde y cols. (2009).



Con respecto a los efectos que produce la enseñanza de la música en los niños, es determinante considerar no solo los efectos de la formación musical, sino que también se debe tener en cuenta los procesos de cambio que se dan en el desarrollo del niño, propios del desarrollo madurativo (Justel y Abraham, 2012). Teniendo en consideración estos dos aspectos, tanto la edad como las horas de entrenamiento musical, Ellis y cols. (2012) realizaron un estudio en el cual realizaron tareas de discriminación melódica y rítmica, y pudieron observar que las áreas cerebrales implicadas en los aspectos madurativos se correspondían con la corteza premotora ventral, la parte inferior del surco intraparietal, y la unión temporoparietal; las cuales participan en la percepción del ritmo y la integración sensoriomotora. Por otro lado, el área que estuvo relacionada con el entrenamiento musical

fue la parte posterior de la circunvolución temporal superior izquierda, estando esta área implicada en la percepción de patrones temporales y la transformación de patrones motores. Por lo tanto, este estudio demuestra que no solo se debe tener en cuenta la formación musical en la adquisición de los aspectos musicales, sino también el desarrollo madurativo del niño.

Por lo que refiere al efecto del entrenamiento musical en los niños se ha demostrado que los efectos de dicho entrenamiento en la infancia se mantienen posteriormente en la edad adulta. Estos cambios se manifiestan en una mejora en las respuestas en tareas de discriminación tonal percibiéndose en el tronco encefálico. Por lo tanto, estas evidencias indican que el entrenamiento musical en la infancia produce mejoras a nivel cerebral que se mantienen en la edad adulta (Skoe y Kraus, 2012). De modo que, estas investigaciones ofrecen nuevos conocimientos sobre la plasticidad cerebral y sería interesante tener en consideración estos estudios para la elaboración de programas basados en el entrenamiento musical, y principalmente desde el aspecto auditivo (Slabu y cols., 2012; Skoe y Kraus, 2012).

En resumen, y teniendo en consideración los estudios anteriormente mencionados se puede concluir que la educación musical en los niños produce cambios de volumen y función en determinadas áreas cerebrales desde edades muy tempranas, aunque se debe determinar qué parte de estos cambios viene determinada por aspectos madurativos.

2.6.3. El procesamiento musical y las etapas evolutivas del niño

Uno de los aspectos más destacados en los niños consiste en la notable habilidad de que disponen para discriminar desde edades bien tempranas las diferencias de tono y tiempo (Stalinski y Schellenberg, 2012). De esta manera, dichos aspectos perceptivos de

que disponen los niños condicionan los diversos procesos de composición musical en cada cultura, influyendo estos en la formación de escalas musicales, intervalos consonantes, y distancias de intervalos en la composición de canciones.

Asimismo, cabe señalar que existen determinados elementos de la música como armonía o la tonalidad que son de difícil comprensión y asimilación para los niños durante la primera infancia, centrandos más su atención en la melodía, el ritmo, y el timbre. Posiblemente, estas dificultades puedan deberse a determinados comportamientos centrados en el aspecto atencional. En cambio, los niños a partir de los 9 años de edad, pueden dirigir más su atención hacia aspectos más abstractos donde el aspecto atencional está más centrado en los diferentes estímulos en los cuales importa su aspecto global, de este modo, dicho aspecto más reflexivo es más difícil de percibir en los niños pequeños (Costa-Giomi, 2003). Sin embargo, Jentschke y cols. (2014) realizaron un estudio para conocer cómo se procesaba la música en niños de 30 meses de edad, pudieron comprobar que en este periodo de la etapa de la primera infancia los niños ya tenían adquiridos los conocimientos necesarios para poder interiorizar las cualidades armónicas de la música, siendo esta la base para poder interiorizar el conocimiento armónico y abstracto de la música.

En relación con la adquisición de las habilidades musicales en los niños se ha demostrado que dichas habilidades están en gran medida desarrolladas en niños, cuya edad abarca hasta los 7 años, no encontrándose diferencias significativas entre niños de 7 años y los adolescentes (Thompson y cols., 1999).

En cuanto a los efectos que produce la educación musical en los niños Pérez y Garaigordobil (2002) realizaron un estudio para conocer los efectos de la aplicación de un programa musical en niños de entre 6 y 7 años con la finalidad de conocer las habilidades

musicales, y pudieron comprobar que la aplicación del programa de educación artística mejoró en cuanto a la discriminación melódica y además mejoró el juicio estético musical.

En resumen, las capacidades musicales en niños vienen determinadas tanto por aspectos madurativos como educativos desconociéndose cuál de los factores son más relevantes en diversas medidas como la discriminación melódica o el ritmo.

2.6.4. Repercusión socioemocional de la música en los niños

Por lo que se refiere a los efectos del entrenamiento musical en la infancia un estudio realizado por Gerry y cols. (2012) demostraron que durante un periodo de entrenamiento musical de seis meses se incrementa la asimilación de aspectos propios de la cultura en que se desarrolla el niño, comparándolos con otros niños en que solo habían vivido una aproximación a la música de manera pasiva, y por tanto no habían experimentado de manera práctica la música. También, demostraron que los niños que habían participado en dicha experiencia musical presentaban niveles más bajos de estrés (ver figura 4A), una disminución del estrés como respuesta a la introducción de estímulos nuevos (ver figura 4B), estaban más tiempo durante las clases sonriendo (ver figura 4C) y presentaban un mayor progreso en aspectos relacionados con los hábitos de conducta social (ver figura 4D). Además, también se pudo observar una mayor asimilación y gesticulación de los aspectos comunicativos entre los padres y los niños (ver figura 5) en comparación con los niños que fueron expuestos a la música sin necesidad de realizar una participación activa.

Figura 4. Puntuaciones del cuestionario de comportamiento infantil (CCI) antes y después del entrenamiento musical. Imagen obtenida de Gerry y cols. (2012).

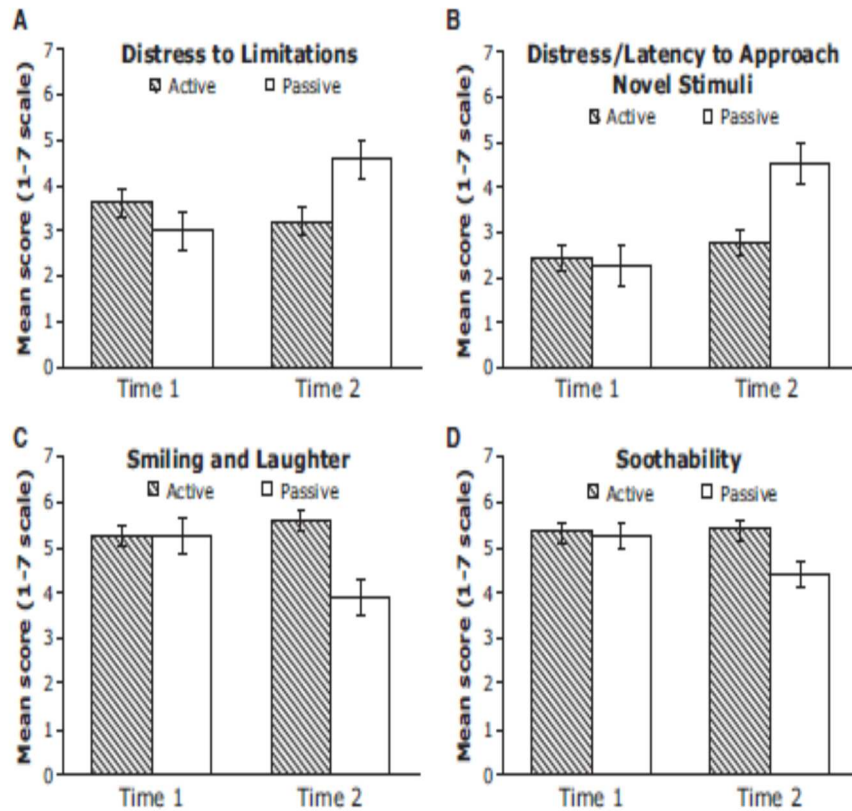
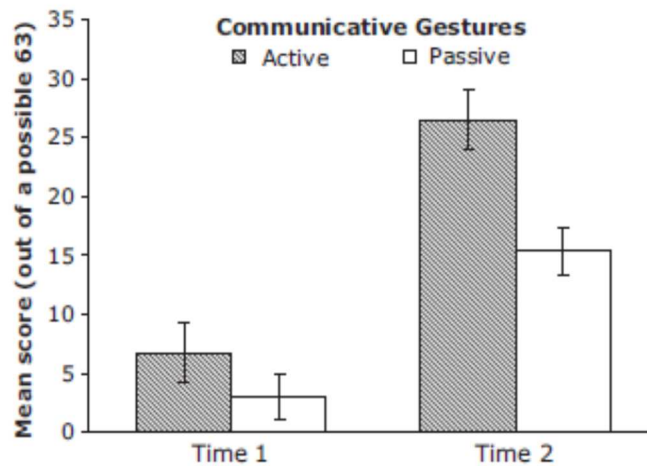


Figura 5. Puntuaciones de los gestos comunicativos antes y después del entrenamiento musical. Imagen obtenida de Gerry y cols. (2012).



Por otro lado, también se ha demostrado que las experiencias musicales, sobre todo a edades tempranas, influyen positivamente en el desarrollo emocional, social e intelectual de los niños, contribuyendo con ello también a un mayor progreso en los aspectos psicomotrices y cognitivos (Brown y cols., 1981). En la misma línea, dichas experiencias musicales también favorecen la adquisición de aspectos relacionados con el aprendizaje de la lectoescritura (Anvari y cols., 2002). Además, la aplicación de programas de intervención en los cuales se han utilizado actividades musicales, se ha observado que determinados aspectos psicológicos relacionados con la memoria y la atención han sido mejorados notablemente (Bermell, 2000).

2.6.5. Conclusiones

Finalmente, los estudios previos han demostrado que la enseñanza de la música en edades tempranas influye positivamente en el desarrollo cerebral del niño, facilitando la adquisición del lenguaje, y estableciendo la base musical necesaria para poder asimilar y consolidar nuevos aprendizajes musicales. Por otro lado, sería interesante conocer cómo influye la música en la adquisición de otras habilidades como las matemáticas y la lectura, debido a que la ausencia de resultados obtenidos no permiten afirmar con claridad que beneficios ofrece en los niños la enseñanza de música para el desarrollo de otras habilidades cognitivas diferentes a las propiamente musicales (Schellenberg, 2001).

2.7. El lenguaje

El lenguaje es un elemento indispensable en todo proceso comunicativo. Para desarrollar dicha función lingüística se requiere la asociación de sonidos y letras para explicar tanto nuestros razonamientos como el entorno social en el que vivimos. La

correcta adquisición del lenguaje requiere una adecuada relación entre la memoria y los sistemas audio-motor (Hickok y Poeppel, 2004, 2007; López-Barroso y cols., 2013; Rodríguez-Fornells y cols., 2009). Además, el adecuado desarrollo del lenguaje necesita combinar tres tipos de memoria, la fonológica (el reconocimiento de los sonidos de los fonemas), la ortográfica (deletreo de las palabras), y la semántica (los saberes adquiridos). De este modo, el sistema auditivo se encarga de interactuar con cada una de estas memorias mediante las diversas vías de procesamiento como la auditiva (para los sonidos del habla, la música, y del entorno) la visual (para percibir las palabras, objetos, personas) y la táctil (para la lectura del braille). Por otro lado, el sistema motor nos proporciona que podamos expresarnos mediante gestos, dibujos, y palabras, para responder tanto a estímulos generados por factores externos como también para poder expresar los propios pensamientos. Además, el lenguaje se entiende como una función compleja que necesita la coordinación de redes cerebrales que se distribuyen por la corteza cerebral así como por las áreas subcorticales (Rimrod y cols., 2010).

2.7.1. Música y lenguaje

Una de las características propias en los seres humanos consiste en que tanto el habla como la música surgen de manera temprana en el desarrollo humano. Por otro lado, también se ha demostrado que la música nace de manera paralela al lenguaje, y tiene representaciones corticales más lateralizadas en el hemisferio derecho mientras que el lenguaje las tiene mayoritariamente en el izquierdo. La investigación realizada por Zatorre y Salimpoor (2013) para conocer cómo se adquiere el lenguaje y la música, nos demuestra que los humanos al año de vida podemos distinguir y sensibilizarnos a las melodías musicales, hecho que sucede antes de la adquisición del lenguaje, lo cual podría indicar que la música tiene redes propias de procesamiento.

En los últimos años, el estudio de la música y el lenguaje ha sido una fuente de interés para la neurociencia, los profesionales de la música, los educadores y también para los terapeutas. Los estudios realizados revelan que los mecanismos encargados del procesamiento de la música y del lenguaje no son los mismos, pero debido a la semejanza que hay entre los aspectos lingüísticos y musicales desde el punto de vista neurológico podemos establecer la existencia de ciertos aspectos comunes (Gómez-Ariza y cols., 2000; Kunert y cols., 2015; Peretz, 2001).

La música se concibe como una actividad artística pero también como un lenguaje, el cual está pensado para transmitir y potenciar las emociones no solo individuales sino también colectivas (Gómez, 2007). Asimismo, el lenguaje y la música disponen de una organización claramente estructurada, ya que el primero utiliza palabras y oraciones, mientras que el segundo se basa en tonos, intervalos, y acordes (Soria-Urios y cols., 2011). En esta búsqueda por conocer y analizar cómo se procesa el lenguaje, se ha observado un progreso muy significativo debido a las características propias del mismo como herramienta de comunicación. En cambio, en la música es más difícil conocer cómo se realiza su procesamiento, porque para poder entender dicho proceso es necesario aislar los diferentes componentes que la forman tales como el tono, el timbre, el ritmo, o la melodía (Patev y cols., 2001; Schlaug, 2001).

Kunert y cols. (2015) evidencian que en el procesamiento tanto de la música como del lenguaje participa el área de Broca. Según Zatorre y Baum (2012), tanto al hablar como al hacer música se realizan cambios tonales, aunque en la música se establece una ordenación física y acústica que hace diferenciarla del habla. En el caso de la música, la utilización del tono se organiza en base a una serie harmónica o escalas, donde los cambios de un sonido a otro tienen una interválica o distancia específica para pasar de un sonido a otro, tal y como sucede en la gran mayoría de los instrumentos musicales. En cambio, en el

lenguaje esta diferencia de tono se realiza al comunicarnos, produciéndose dicho cambio tonal de manera más continuada. Así pues, podemos pensar que la música necesita de un sistema nervioso que pueda controlar los cambios que se realizan de un sonido a otro con un mayor control y afinación. Este papel lo ejecutarían áreas de control motor.

Asimismo, Zatorre (2013) afirma que tanto la música como el lenguaje son elementos indispensables del conocimiento humano y en consecuencia requieren un procesamiento sensorio-motor, en que la corteza auditiva y su conectividad con otras áreas cerebrales repercuten en la adquisición de conocimientos sensoriales y motores.

Por lo que se refiere al procesamiento del lenguaje y la música, Klein y Zatorre (2011) señalaron que la percepción del habla estaba asociada con el surco temporal superior izquierdo, mientras que los sonidos musicales estaban más asociados al surco temporal superior derecho, debido a que el procesamiento de la música requiere de áreas corticales especializadas en la percepción tonal para la adecuada percepción del tono (Hyde 2008; Zatorre y Gandour 2008; Zatorre y cols., 2002), así como también para la adecuada emisión del sonido por parte de los músicos (Özdemir, 2006). En cambio, el procesamiento y producción del lenguaje no requiere de este sistema cortical sumamente sofisticado como sucede en la música, más propio del hemisferio izquierdo.

Desde el punto de vista de las competencias, en el lenguaje es más sencilla la adquisición de las habilidades relacionadas con la comprensión y la expresión, sin la necesidad de llevar a cabo un proceso de instrucción a lo largo del tiempo. En cambio, para reconocer las melodías se requiere una correcta ejecución instrumental, siendo el resultado de un entrenamiento constante y continuado (Talero-Gutiérrez y cols., 2004). Además, la investigación realizada por Zatorre y cols. (2007) para conocer qué condiciones son necesarias en la interpretación musical pone de manifiesto que en los músicos es

imprescindible una adecuada secuenciación y organización de los movimientos para producir los sonidos.

Recientemente, un estudio realizado por Brandt y cols. (2012) para conocer la adquisición del lenguaje pone de manifiesto que la audición musical es un aspecto determinante para la consolidación del lenguaje, siendo necesaria la formación musical para el desarrollo integral del ser humano. En resumen, lenguaje y música son funciones cognitivas que comparten diversos aspectos neurales que permiten la potenciación mutua, pero a la vez estos procesos suponen diferencias que parecen requerir estructuras neurales específicas.

Por otro lado, algunas investigaciones que comparan músicos y no músicos ofrecen algunas ventajas sobre la influencia de la educación musical en la comprensión del lenguaje. Hemos repasado esa evidencia en el apartado anterior. A pesar de esa evidencia, la determinación de los posibles beneficios del entrenamiento musical en los niños requerirá llevar a cabo estudios longitudinales controlados, con la intención de conocer el tiempo que se necesita para que el entrenamiento musical produzca sus efectos (Slater y cols., 2015). Las dificultades en la adquisición del lenguaje como instrumento necesario en los diversos contextos comunicativos ha sido una fuente de estudio y de interés científico. En esa línea propuesta, un estudio reciente llevado a cabo por Kraus y cols. (2014) puso de manifiesto que la formación musical en niños de contextos desfavorecidos produjo beneficios en la percepción del lenguaje. Dichos cambios manifestaron una mejora en cuanto a la discriminación silábica, siendo necesario para ello una formación musical de 2 horas a la semana, distribuida en dos sesiones de una hora durante un periodo de dos años.

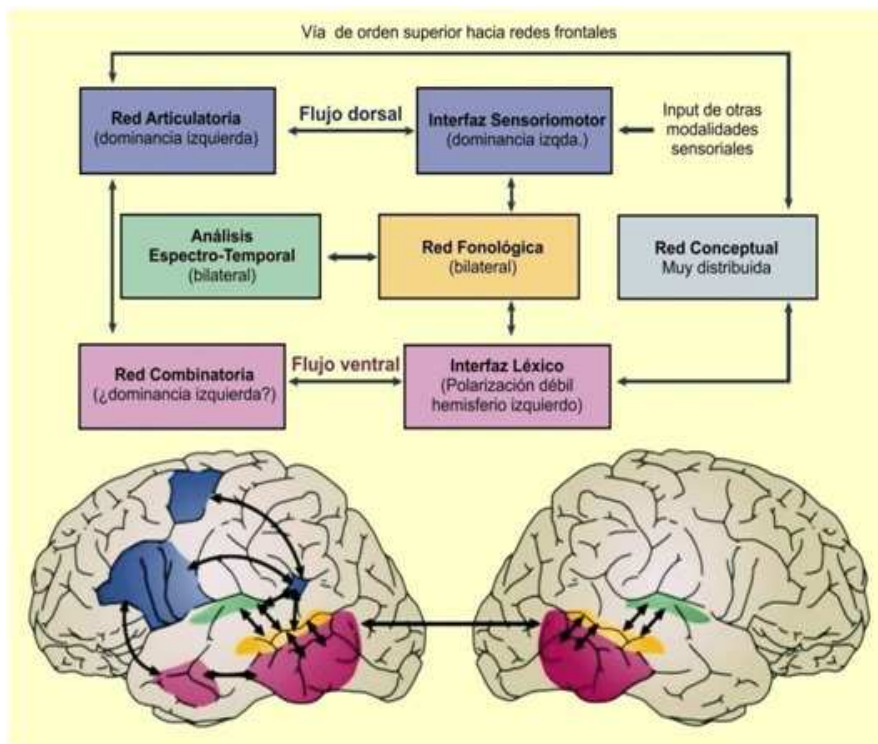
En resumen, los diversos estudios que se han realizado para estudiar el procesamiento del lenguaje y de la música han demostrado que el estudio de ambos ha permitido conocer que áreas del cerebro están implicadas en el procesamiento de ambas.

Falta conocer aún las posibles sinergias entre ambos procesos, así como determinar las diferencias en los sistemas. Para ello, vamos a repasar los modelos existentes.

2.7.2. Modelo de Hickok y Poeppel

Entre los diversos modelos de lenguaje que existen, uno de los más aceptados es el desarrollado por Hickok y Poeppel (2007) (ver figura 6). Ellos propusieron un modelo de procesamiento dual constituido por dos vías, una vía dorsal que se encarga de modificar los sonidos del lenguaje en sistemas motores que permiten la producción del lenguaje, y otra vía ventral que contribuye a asociar las representaciones acústicas del lenguaje con sus correspondientes representaciones conceptuales.

Figura 6. Modelo de procesamiento del lenguaje. Gráfico del modelo de procesamiento dual. Localizaciones anatómicas de los componentes del modelo dual. Imagen obtenida de Hickok y Poeppel (2007).



El modelo de procesamiento dual del lenguaje propuesto por Hickok y Poeppel (2007) pone de manifiesto que para el aprendizaje de una lengua es necesario que se desarrollen dos destrezas esenciales. En primer lugar, es necesario conocer cómo se pueden producir los sonidos mediante el aparato fonador, y en segundo lugar consiste en saber cómo transformar los sonidos de las palabras en significados. De modo que para poder aprender una lengua es necesario que el procesamiento se realice mediante dos vías, una vía auditivo-motora y otra vía auditivo-conceptual. En el modelo se propone que la primera tiene una representación lateralizada en el hemisferio izquierdo y claros paralelismos con la interpretación musical, mientras que la segunda se localiza bilateralmente más allá de las áreas clásicas de lenguaje y no guarda una relación tan evidente con el procesamiento musical.

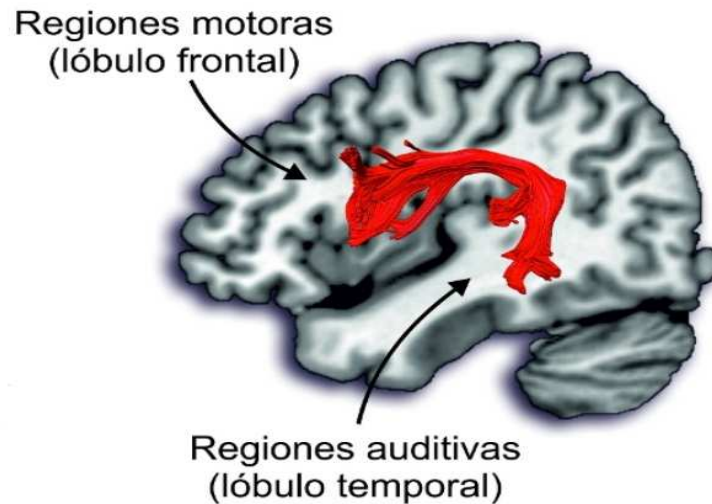
2.7.2.1. La vía dorsal

Las investigaciones recientes sobre la implicación de la vía dorsal ponen de manifiesto que esta vía se encarga de la integración audio-motora del habla. Por lo tanto, esta vía se encarga de transformar los sonidos del habla en actos motores para poder producir el lenguaje (Hickok y Poeppel, 2000, 2004, 2007; Rauschecker y Scott, 2009; Rauschecker, 2011; Scott y Wise, 2004). Esta vía dorsal implica regiones frontales incluyendo la parte dorsal del giro frontal inferior y la corteza premotora, así como regiones del temporal superior implicando áreas auditivas y la unión temporoparietal (ver figura 6).

Este proceso de integración audio-motor que se realiza en la vía dorsal, esta mediado por el fascículo arqueado. Este fascículo está formado por un conjunto de axones de sustancia blanca, y su función consiste en conectar las regiones del lóbulo temporal

implicadas en el procesamiento auditivo, con regiones del lóbulo frontal encargadas del procesamiento motor (ver figura 7) (López-Barroso y cols., 2013).

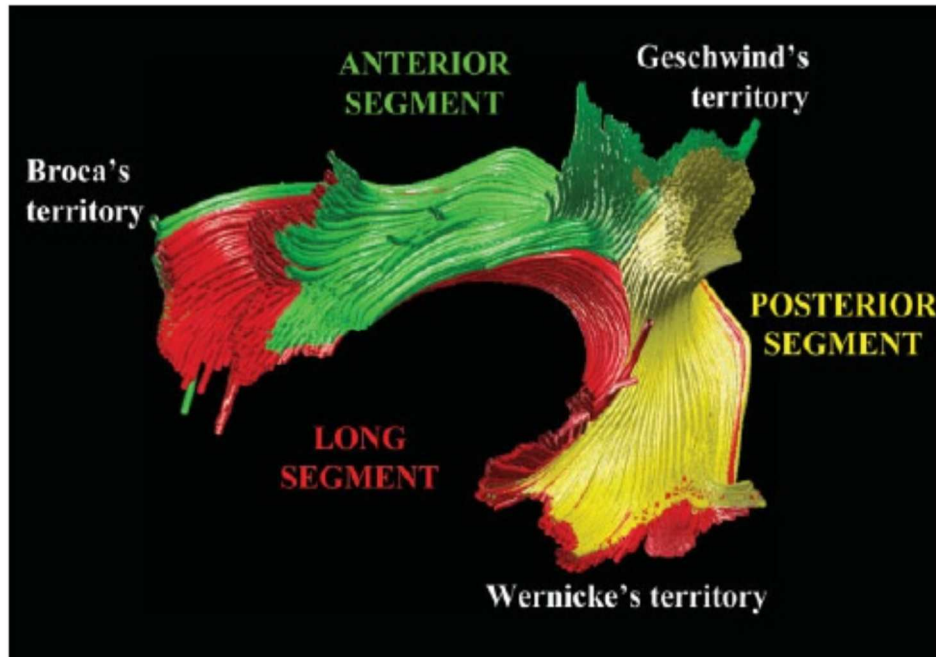
Figura 7. Fascículo arqueado. Imagen obtenida de López-Barroso y cols. (2013).



Algunos estudios han descrito un modelo de fascículo arqueado el cual propone que la comunicación entre las regiones temporales y frontales está determinada por dos vías paralelas.

- Vía directa compuesta por la parte larga del fascículo arqueado que conecta la parte posterior del giro temporal superior y medio (área de Wernicke), con el giro frontal inferior, el giro frontal medio, y la corteza premotora (área de Broca) (ver figura 8).
- Vía indirecta compuesta por la parte anterior, que conecta la región de Broca con la corteza parietal inferior (región de Geschwind) y la parte posterior que conecta la región de Geschwind con Wernicke (ver figura 8).

Figura 8. Reconstrucción tractográfica del fascículo arqueado. Imagen obtenida de Catani y cols., 2005.



Dicha vía dorsal se encuentra especialmente lateralizada en el hemisferio izquierdo, indicando este aspecto la relación entre las dificultades de percepción del lenguaje y su vinculación con las lesiones frontales y temporales dorsales (Hickok y Poeppel, 2004, 2007). Esta vía proporciona los procesos neuronales adecuados y básicos para que pueda desarrollarse la memoria fonológica a corto plazo (Buchsbaum y cols., 2005; Hickok y cols., 2003; Jacquemot y Scott, 2006). En definitiva, puede considerarse como la vía encargada de integrar las representaciones auditivas del habla para poder producir el lenguaje.

2.7.2.2. La vía ventral

Con respecto a la vía ventral se puede entender como un sistema auditivo que está pensado para transformar los sonidos del habla en sus significados correspondientes, y además también facilita el entendimiento de construcciones gramaticales superiores a una sola palabra como las oraciones o frases.

Según Hickok y Poeppel (2007) la vía ventral tiene dos elementos principales: el interfaz léxico y la red combinatoria. El interfaz léxico se encarga de conectarse con la red fonológica y se piensa que está localizado a nivel bilateral en la parte posterior de los giros temporales inferior y medio, siendo su función principal facilitar la vinculación entre las representaciones fonológicas con su correspondiente significado (Binder y cols., 2009; Humphries y cols., 2006; Risan y cols., 2003; Rodd y cols., 2005).

Con respecto a la red combinatoria, esta tiene conexiones con el interfaz léxico, implicando dicha red áreas cerebrales del hemisferio izquierdo y principalmente en la parte anterior del lóbulo temporal. Esta región se supone que es determinante para la adquisición del significado tanto de las frases como de las oraciones (Bemis y Pykkänen, 2011, 2013; Humphries y cols., 2001; Humphries y cols., 2006, 2005; Rogalsky y Hickok, 2009; Vanderberghe y cols., 2002). De modo que, se puede entender la vía ventral como la encargada de dar significado a las palabras, siendo necesario la combinación tanto de la interfaz léxico como de la red combinatoria (ver figura 6).

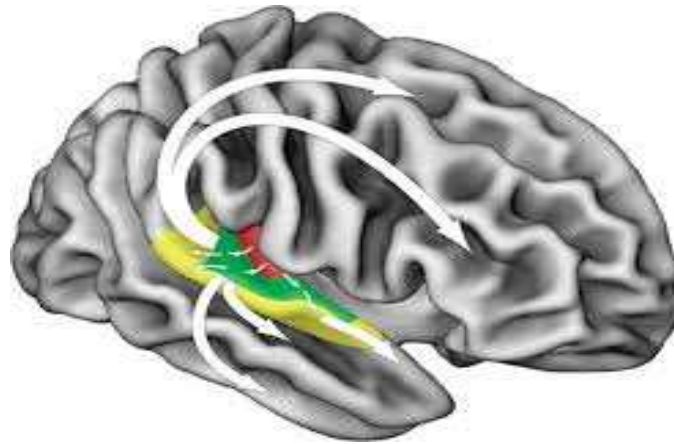
2.8. Modelo del procesamiento auditivo

El procesamiento auditivo se realiza mediante la corteza auditiva, y dependiendo de los estímulos sonoros que se escuchen se tiene constancia que existen como mínimo dos vías de procesamiento (Hackett y cols., 1998; Kass y Hackett, 2000). Los estudios realizados con monos para conocer el procesamiento auditivo ponen de manifiesto que dicho procesamiento empieza en la corteza auditiva primaria y también en determinadas regiones circundantes. Posteriormente, esta señal acústica viaja a una zona que rodea la corteza auditiva primaria, denominada cinturón y luego se desplaza hacia otras zonas auditivas de asociación denominadas peri-cinturón (Kass y Hackett, 1999; Rauschecker, 1997, 1998), de modo que se puede entender que el procesamiento de las señales acústicas

siguen una ordenación jerárquica, interviniendo en primer lugar la corteza auditiva primaria, posteriormente pasa por la región conocida como cinturón, hasta llegar a otras regiones cercanas conocida con el nombre de peri-cinturón (Wessinger y cols., 2001).

De forma paralela a como ocurre con los modelos de lenguaje, el procesamiento musical requiere la conectividad entre áreas auditivas y áreas frontales (Opitz y cols., 2002; Schönwiesner y cols., 2007). En este sentido, Zatorre y Salimpoor (2013) definen la existencia **de dos vías de procesamiento cerebral para la música** especialmente relevante en el hemisferio derecho. La primera vía transcurre ventralmente, progresando desde la zona auditiva por el surco temporal superior y el surco temporal inferior hasta la corteza frontal inferior. Esta vía se relaciona con el procesamiento musical, sobre todo con funciones de reconocimiento y procesamiento emocional. En relación a la vía ventral, un estudio de neuroimagen reciente ha mostrado la participación del giro temporal superior bilateral, junto con áreas auditivas secundarias (plano temporal) en el reconocimiento de melodías familiares (Zatorre y Salimpoor, 2013). La segunda vía transcurre dorsalmente y las proyecciones se dirigen hacia zonas temporo parietales y desde allí hacia distintos objetivos en las cortezas frontales inferior, premotora y dorsolateral. Esta segunda vía está más involucrada en la respuesta motora al estímulo musical, ya sea en forma de baile, ritmo o interpretación musical (ver figura 9).

Figura 9. Esquema de las trayectorias funcionales putativas para el procesamiento de la información auditiva en el cerebro humano. Imagen obtenida de Zatorre y Salimpoor (2013).



De esta manera, existe un procesamiento para el reconocimiento de la melodía y para las respuestas motoras asociadas. Según Opitz y cols. (2002) y Schönwiesner y cols. (2007) **para el reconocimiento de una melodía** influyen determinados aspectos que forman parte de la propia música como son los intervalos, las armonías y su carácter, implicando las cortezas frontales inferiores y las cortezas auditivas secundarias, empleando el trayecto anteroventral. Por otro lado, otro aspecto que influye en la identificación de una melodía se vincula en la manera en la que está organizada desde el punto de vista rítmico o métrico, pudiendo involucrar a la corteza auditiva, la corteza premotora así como las regiones frontales dorsolaterales (Zatorre y cols., 2007).

En relación con el procesamiento del fenómeno sonoro la vía dorsal a través del fascículo arqueado sugiere que la percepción del sonido puede contribuir a la realización de determinados movimientos, y en consecuencia transformar el fenómeno sonoro en acciones motoras (Warren y cols., 2005), equiparándose con la vía dorsal en modelo de Hickok y Poeppel (2000, 2004, 2007) para el procesamiento del lenguaje. Así pues, estudios recientes que han investigado el procesamiento de la música han destacado la importancia de la vía dorsal en las modificaciones audio-motoras (Zatorre y cols., 2007),

manifestándose por ejemplo en la realización inconsciente de movimientos o ritmos con los pies, manos, u otras partes del cuerpo al escuchar música.

2.8.1. Conclusiones

En definitiva, los trabajos previos han demostrado que las regiones temporales y frontales están conectadas por dos vías paralelas, dependiendo la adquisición del lenguaje de una adecuada conexión entre las regiones temporales y frontales. Por lo tanto, se puede considerar que para el procesamiento de lenguaje participan tanto la vía dorsal como la ventral. Este hecho nos da a conocer que el aprendizaje de una lengua nueva puede contribuir a conocer que conexiones audio-motoras se dan en el procesamiento de un idioma, así como ponen de manifiesto Hickok y Poeppel (2004, 2007). Con respecto al procesamiento de la música se puede considerar que el fascículo arqueado tiene una función determinante en el procesamiento audio-motor (Zatorre, 2013; Zatorre y cols., 2007). Por lo tanto, podemos pensar que tanto el procesamiento del lenguaje como el de la música, nos proponen un contexto propicio para conocer qué mecanismos se encuentran implicados en las interacciones audio-motoras.

2.9. Bases neurales de la lateralidad manual y la dominancia hemisférica

Según el diccionario de Psicología de Dorsch (1991), "la lateralidad es entendida como la dominancia y acentuación de la lateralidad en la estructura y función de los órganos duplicados, como por ejemplo en las manos, los ojos, los oídos, los brazos, las piernas y muchos órganos más". De modo que, la dominancia manual se atribuye al empleo o dominio de una mano sobre la otra para llevar a cabo actividades de la vida diaria. Dicha dominancia manual es lo que determina el ser diestro o zurdo, aunque existen

diversos tipos de combinaciones dependiendo de la preferencia de una parte del cuerpo u otra (Squadrone y cols., 1995).

Con respecto a la dominancia cerebral en los humanos es aproximadamente en el siglo XIX cuando se empieza a valorar la idea de la existencia de una cierta asimetría cerebral. El descubrimiento de la asimetría cerebral se atribuye a Broca (1861). Dicha asimetría se pone de manifiesto debido a la localización de un área en el lóbulo frontal del hemisferio izquierdo que sería la responsable del control del habla. Posteriormente, los estudios realizados por Wernicke (1874) amplían esta teoría reafirmando la predominancia del hemisferio izquierdo en los aspectos lingüísticos.

Además, otro aspecto que ha estado vinculado con la lateralidad ha sido la especialización de los hemisferios cerebrales en algunos procesos, como en el caso del lenguaje. La dominancia cerebral ha sido una de las investigaciones que más interés ha suscitado, demostrando en una gran variedad de estudios una acentuada predominancia del hemisferio izquierdo en el procesamiento del lenguaje, tanto en la integración semántica, sintáctica, y fonética, así como también en la producción de las palabras. Así mismo, también se conoce que la predominancia hemisférica del lenguaje en el hemisferio izquierdo se presenta en el 95% en los diestros, y entre el 60 y 80 % en los zurdos (Annett, 1985, 2006; Geschwind y Galaburda, 1985; Hellige, 1993).

Un estudio realizado por Binder y cols. (1996) en que utilizó la técnica de imágenes de resonancia magnética funcional (RMf) para conocer la lateralización hemisférica del lenguaje, demostró que las áreas activas que se vieron implicadas en las pruebas de procesamiento semántico están relacionadas con las áreas principales del lenguaje. Además, también pudo demostrar que en dichas tareas de procesamiento semántico se observó actividad en el córtex frontal lateral y en la corteza parieto-temporo-occipital.

Pujol y cols. (1999) demostraron mediante la utilización de las técnicas de neuroimagen, y concretamente mediante la utilización de la RMf, una comparación entre sus resultados y un estudio realizado por Binder y cols. (1996). Los resultados obtenidos les permitieron establecer una red cerebral implicada en las pruebas de generación de palabras, incluyendo la parte dorsal del área de Broca, la corteza premotora y la parte dorsolateral de la corteza prefrontal. Además, también se pudo demostrar que la condición de ser zurdo no implicaba necesariamente disponer de la lateralización del lenguaje en el hemisferio derecho, manifestando con respecto a los estudios anteriores sobre la lateralización del lenguaje en los zurdos, que no se puede afirmar con rotundidad que el hemisferio derecho sea el implicado en los procesos del procesamiento del lenguaje en los zurdos, revelando con ello que los aspectos de la lateralización del lenguaje depende más de factores más cambiantes que de categorías fijas o preestablecidas.

Por otro lado, otros estudios como el de Knecht y cols. (2000) han propuesto analizar la relación entre la lateralidad manual en función de la mano dominante y la dominancia hemisférica para el lenguaje, seleccionando para ello tanto participantes diestros, ambidiestros, y zurdos. En primer lugar, midieron el grado de dominancia manual mediante el Edinburgh Handedness Inventory, y después calcularon el índice de lateralidad, utilizando la Ecografía Doppler Transcraneal Funcional (fTCD) para realizar una tarea de generación de palabras. Los resultados obtenidos mostraron una correlación significativa entre el grado de dominancia manual y el índice de lateralidad, mostrando una dominancia del lenguaje en el hemisferio derecho entre el 4% de los diestros, el 15% de los ambidiestros, y el 27% de los zurdos. En resumen, este estudio demostró que entre los zurdos existe una mayor probabilidad de tener la dominancia del lenguaje en el hemisferio derecho, en comparación con los diestros y ambidiestros. Así mismo, un estudio realizado por Szaffarski y cols. (2002) ponen de manifiesto la correlación entre la lateralidad manual

y la dominancia hemisférica al igual que se demostró en el estudio de Knecht y cols. (2000).

Además, otros estudios más recientes como el de Somers y cols. (2015) también confirman los resultados obtenidos en los estudios realizados por Pujol y cols. (1999) y Knecht y cols. (2000). Somers y cols. (2015) demostraron que el grado de preferencia manual no estaba relacionado con la lateralización del lenguaje. Sin embargo, la prevalencia de la lateralización hemisférica derecha y bilateral del lenguaje es mayor si el grado de preferencia manual es zurda. Por lo tanto, el grado de preferencia manual no debe pronosticar el grado de lateralización del lenguaje, rechazando los modelos genéticos donde los aspectos relacionados con la preferencia manual definen en consecuencia la lateralización del lenguaje.

En resumen, podemos pensar que la función lingüística se lateraliza en el hemisferio izquierdo para la gran mayoría de la población diestra, aunque es importante señalar que ésta no suele ser una lateralización completa, y es común encontrar actividad en el hemisferio derecho durante las tareas del lenguaje. Sin embargo, se han encontrado más lateralizaciones atípicas del lenguaje en el hemisferio derecho en la población zurda.

3. MARCO EXPERIMENTAL

3.1. Planteamiento de la investigación

La revisión teórica realizada en el apartado anterior nos ha permitido describir las bases neurales del lenguaje y la música a partir sobre todo de las conexiones audio-motoras entre zonas del giro temporal superior y zonas premotoras y prefrontales. La idea subyacente es que aunque ambos procesos cognitivos tienen bases neurales propias lateralizadas en el hemisferio izquierdo para el lenguaje y en el derecho para la música, existe también un cierto grado de solapamiento derivado del hecho de que el input auditivo (sea musical o lingüístico) llega a ambos hemisferios. De forma relevante, ambos procesos se estructuran y funcionan de forma bastante paralela, existiendo una vía dorsal dependiente del fascículo arqueado y dedicada a aprender por repetición todos los aprendizajes audio-motores, y una vía ventral más dedicada al procesamiento, reconocimiento y discriminación de estímulos auditivos nuevos que transcurre a través del giro temporal superior. Estas dos vías suponen una disociación de funciones que nos permite predecir que los efectos del entrenamiento musical y lingüístico se producen más sobre el sistema dorsal que sobre el ventral, que queda más como un sistema relacionado con la improvisación y la novedad.

La bibliografía revisada también nos ha permitido asociar la formación musical a cambios cerebrales específicos. Cuando se comparan los cerebros de músicos y no músicos se observan diferencias estructurales y funcionales en las estructuras responsables del procesamiento musical. Estas diferencias no sólo se producen en córtex auditivo y zonas motoras, sino también a nivel de sustancia blanca en las conexiones audio-motoras. A pesar de estos datos, son varios los aspectos a considerar en estas diferencias que serán la base para plantear nuestros estudios. En primer lugar, no está claro que todas las diferencias estructurales encontradas sean debidas al entrenamiento musical. Por ejemplo,

las diferencias a nivel motor son mayoritariamente debidas al aprendizaje musical, pero esta afirmación no se puede aplicar claramente en las diferencias auditivas, en las que quizá aspectos madurativos sean también relevantes. Es decir, las diferencias auditivas podrían no ser consecuencia directa del entrenamiento musical sino que podrían situarse en la causa por la que determinada gente esté más predispuesta a querer recibir entrenamiento musical. De esta manera, aspectos madurativos serían los responsables de las diferencias entre músicos y no músicos a este nivel.

Un aspecto asociado sería el derivado de la lateralidad hemisférica de lenguaje y música. En este sentido es relevante el hecho de que las diferencias en el córtex auditivo entre músicos y no músicos se hayan observado en el hemisferio derecho pero también en el izquierdo. De alguna manera, la lateralidad hemisférica sería menos relevante a este nivel, lo que puede vincularse a la lateralización del lenguaje en el hemisferio izquierdo. Con algunas excepciones en población zurda y pacientes con lesiones cerebrales tempranas, la lateralización del lenguaje se produce en el hemisferio izquierdo. En cambio, en un porcentaje reducido de personas zurdas y pacientes con lesiones esta lateralización se produce de forma bilateral o en el hemisferio derecho. En zurdos se ha vinculado este efecto con la lateralización del córtex auditivo. Este aspecto hace pensar en una posible relación entre el tamaño de giro auditivo, la predisposición a la música y la lateralización atípica del lenguaje.

A partir de este análisis han surgido las cuestiones que se van a abordar en este trabajo. Con respecto a la primera pregunta de nuestra investigación nos planteamos si existirían diferencias cerebrales entre los músicos y no músicos, y si estas se pueden deber a diferencias en la capacidad para realizar tareas de discriminación musical. Los estudios previos que comparan músicos y no músicos, ponen de manifiesto, que los músicos tienen un mayor volumen de sustancia gris a nivel auditivo que los no músicos, manifestándose

tanto en la concentración de dicha sustancia como también su espesor (Schneider y cols, 2002; Foster y Zatorre, 2010). Por ello, vamos a estudiar si existen diferencias en el tamaño del córtex auditivo en función de la capacidad de discriminación auditiva.

La segunda pregunta de nuestra investigación fue investigar si el tamaño del córtex auditivo en niños que están empezando los estudios musicales va a predecir la aptitud musical, y en consecuencia determinar qué características cerebrales previas al aprendizaje de la música y propias de la predisposición genética influían en las aptitudes musicales de los niños. También, queríamos conocer que áreas cerebrales relacionadas con el procesamiento musical están implicadas en la enseñanza de la música. Diversas investigaciones muestran que la educación musical produce cambios en el cerebro, manifestándose en un mayor aumento de las estructuras cerebrales (Herholz y Zatorre, 2012; Levitin y Tirovolas, 2009; Patel, 2003, 2010; Schellenberg, 2004; Trainor y cols., 2009). Con respecto a los cambios que produce la música en el cerebro de los niños demuestran que la formación musical produce cambios a nivel cerebral, produciendo una mejora de las habilidades motoras y auditivas (Hyde y cols., 2009), de modo que algunos estudios como el de Jentschke y cols. (2014) defienden que es esencial enseñar a los niños música en las primeras etapas de vida, estableciendo con ello la base para adquirir nuevas enseñanzas musicales.

Finalmente, nuestra última pregunta fue estudiar si existen diferencias en relación a la dominancia del lenguaje entre músicos diestros y zurdos, y si estas diferencias están influenciadas por la formación musical. Actualmente, existen estudios en cuanto a la dominancia motora en los zurdos, los cuales ponen de manifiesto que el hemisferio izquierdo es el encargado de la secuenciación de las acciones motoras (Serrien y Sovijärvi, 2015), pudiendo estar determinada por factores neurobiológicos (Kopiez y cols., 2006). Así mismo, también se ha estudiado el papel que desarrollan las dos manos en las tareas de

bimanualidad en la práctica musical en los músicos zurdos, afirmando que los músicos que tocan instrumentos de viento y cuerda se requiere una integración temporal de las dos manos, diferente a la que se necesita para la práctica musical en los instrumentos de tecla (Christman, 1993).

3.2. Objetivos de la investigación

En general la tesis responde al hecho de que los cambios cerebrales no se producen únicamente por la formación musical en sí, sino también por las características del individuo. Es decir, nos planteamos si las diferencias encontradas en el cerebro de músicos y no músicos se deben a la formación musical o a las características previas al mismo. No esperando una respuesta de sí o no, lo que determinamos de alguna manera es que gran parte de las diferencias entre músicos y no músicos ya vienen establecidas por una predisposición genética. Con ello los objetivos son:

- 1.** Estudiar la relación existente entre las diferencias individuales en relación a la discriminación auditiva y el volumen de las estructuras cerebrales involucradas en el procesamiento musical. Esta pregunta se responderá tanto en adultos (Estudio 1) como en niños (Estudio2).
- 2.** Estudiar si el volumen de las estructuras cerebrales previas al entrenamiento musical se relaciona con la mejoría en las aptitudes musicales (Estudio 2).
- 3.** Analizar las diferencias cerebrales con respecto a la dominancia del lenguaje en función de la lateralidad manual y la formación musical (Estudio 3).

Por tanto nuestro objetivo es comprobar en qué medida la educación musical y las características madurativas del individuo determinan los cambios cerebrales asociados al hecho de ser músico.

ESTUDIO 1. Estudio de las bases anatómicas de la discriminación musical en una muestra de músicos y no músicos

INTRODUCCIÓN

La discriminación del tono es la capacidad de reconocer las modificaciones en el sonido basadas en las diferencias de frecuencia (Seashore, 1936). Esta habilidad se desarrolla muy temprano ya que los niños de 9 meses ya muestran un sesgo de procesamiento hacia escalas desiguales (Benasich y Tallal, 2002; Trehub y cols., 1999). Esta capacidad cognitiva manifiesta una preferencia por codificar las regularidades a lo largo de las escalas musicales y desarrolla una habilidad especial para percibir sonidos disonantes. Además, el entrenamiento musical a los 9 meses puede mejorar la capacidad de distinguir sonidos atonales (Zhao & Kuhl, 2016). Esta capacidad para distinguir los sonidos disonantes de los consonantes se desarrolla mucho tiempo antes de que se desarrolle el procesamiento de la música, y sugiere una posible influencia en otros procesos cognitivos como el procesamiento del habla o el desarrollo de la memoria de trabajo. De hecho, Benasich y Tallal (2002) encontraron que las habilidades de procesamiento auditivo a los 9 meses predijeron los resultados del lenguaje a los 2 años.

El desarrollo de la discriminación de tono continúa hasta aproximadamente los siete años, donde los niños pueden discriminar tonos complejos y breves que no son capaces de hacer a los 4 y 5 años (Thompson y cols., 1999). A pesar de esta uniformidad, investigaciones recientes han demostrado que la discriminación de tono no está igualmente desarrollada en todos los individuos. Estudios con pacientes con lesiones cerebrales demuestran que el procesamiento de la música se realiza de manera modular, ya que está comprobado que puede verse alterada la percepción de los diferentes elementos que constituyen la música y en cambio otros componentes pueden escucharse perfectamente (Fodor, 1983; Peretz y Coltheart 2003). Tal como hemos visto en la introducción general,

en el modelo de Peretz y Coltheart (2003) se distinguen módulos para la discriminación del tono, para el ritmo y la secuenciación temporal, y para la transformación de la fonología en lenguaje. Por tanto, el modelo indica la existencia de un módulo específico para la discriminación y reconocimiento auditivo de sonidos que se sitúa según la literatura previa en la vía ventral auditiva.

Además, los estudios en individuos sanos han observado un grupo reducido de individuos que eran amúsicos, es decir, que mostraban una sordera de tonos (Ayotte y cols., 2002; Peretz y cols., 2002; Tillmann y cols., 2016). Estos individuos presentaron severas dificultades en la detección de cambios de tono y en la producción de música en ausencia de otras complicaciones neurológicas u otros problemas cognitivos. Estos problemas se pueden detectar con el Montreal Battery of Evaluation of Amusia (MBEA), compuesta por una batería de pruebas diseñadas para detectar individuos con amusia congénita. En resumen, la amusia se puede definir como un patrón de déficits en las pruebas que miden la percepción de los cambios melódicos (presentando dos melodías consecutivas que pueden ser iguales o diferentes).

Diferentes estudios han investigado la amusia y han observado que el área implicada en la no identificación del tono está relacionada con lesiones (pacientes) o con leves alteraciones estructurales (controles) en el giro temporal superior (Peretz y cols., 1994; Piccirilli y cols., 2000). Mandell y cols. (2007) realizaron también un estudio que demostraron una correlación significativa entre el rendimiento del Montreal Battery of Evaluation of Amusia (MBEA) y las diferencias de sustancia gris en el giro temporal superior izquierdo y en el giro frontal inferior izquierdo.

Diversos estudios morfométricos en músicos han revelado un aumento del volumen de materia gris en el giro de Heschl derecho (Bermudez y Zatorre, 2005; Luders y cols., 2004; Palomar-Gracia y cols., 2017;) o izquierdo (Gaser y Schlaug, 2003), implicando

también las áreas circundantes (Bermudez y cols., 2009; Elmer y cols., 2013; Gaser y Schlaug, 2003; Schneider y cols., 2002). Asimismo, diversos estudios han encontrado una relación positiva entre las aptitudes musicales y el volumen del giro de Heschl (Schneider y cols., 2002, 2005). Sin embargo, otros estudios que han comparado músicos y no músicos no han observado diferencias de materia gris en el giro de Heschl (Schlaug y cols., 1995; Vaquero y cols., 2016). Otros estudios han demostrado que las diferencias en el giro de Heschl no estaban específicamente relacionadas con el entrenamiento musical sino con la mejor predisposición a percibir los sonidos musicales (Drayna y cols., 2001; Mosing y cols., 2014) así como también por un propicio ambiente familiar (Coon y Carey, 1989).

Asimismo, también se han encontrado diferencias de sustancia gris entre músicos y no músicos en regiones motoras, sensorimotoras, y áreas premotoras, implicando también a las estructuras subcorticales como los ganglios basales y el cerebelo (Amunts y cols., 1997; Bangert y Schlaug 2006; Bermudez y cols., 2009; Dohn y cols., 2013; Elbert y cols., 1995; Gaser y Schlaug 2003; Hutchinson y cols., 2003). Cabe destacar que las diferencias de sustancia gris en los músicos se han relacionado con la edad de inicio de las enseñanzas musicales, demostrando algunos estudios que aquellos músicos que empezaron las enseñanzas musicales antes de los 7 años tenían un mayor volumen de sustancia gris en la región premotora ventral derecha (Bailey y cols., 2014).

El objetivo de este estudio consiste en investigar si las diferencias anatómicas en las estructuras cerebrales encontradas en diversos estudios diseñados para conocer los efectos del entrenamiento musical en los músicos se observan también cuando se estudian los correlatos de la discriminación auditivo-musical en personas adultas sin conocimientos musicales. Así mismo, también se quiere conocer si las áreas cerebrales implicadas en los procesos de discriminación sonora son las mismas en los músicos y en los no músicos.

1. METODOLOGÍA

1.1. Participantes

La muestra estaba compuesta por 61 participantes. El grupo completo está formado por 34 mujeres y 27 hombres. La edad de los participantes varió entre 18 y 35 años, con condiciones y habilidades neuropsicológicas y psiquiátricas normales. Los participantes se clasificaron en dos grupos de acuerdo con su formación musical: 33 eran músicos con una formación en conservatorio de al menos 9 años (11 mujeres, $M_{\text{edad}} = 20.09$, $DE = 2.01$), mientras que el resto de los participantes formaban el grupo de no músicos y sólo habían recibido la formación musical escolar obligatoria (12 mujeres, $M_{\text{edad}} = 20.68$, $DE = 2.21$). Ambos grupos no difirieron significativamente en género y edad ($P > .10$). Todos los participantes dieron su consentimiento por escrito para participar en el estudio y recibieron una compensación económica por su participación.

1.2. Materiales

1.2.1. Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT)

El instrumento utilizado en esta investigación es el Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT), creado por Jacob Mandell (radiólogo en Brigham and Women's Hospital, Boston, EE. UU), en el laboratorio de música y neuroimagen en Beth Israel Deaconess Medical Center y Harvard Medical School. Esta prueba está diseñada para detectar y evaluar rápidamente la sordera de tono (amusia congénita) pero también se puede considerar una prueba de discriminación auditiva compleja (Palomar et al., sometido). Por ello, es una prueba difícil incluso para personas con conocimientos musicales, y capaz de medir las diferencias individuales de discriminación tonal, y poder contrastarlas con pruebas más fáciles de discriminación tonal.

El Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT) está compuesto por 36 melodías que se repiten dos veces, con el propósito de compararlas. Estas melodías podían ser iguales o diferentes, de modo que si eran iguales tenían que clicar sobre un botón verde, y si eran diferentes tenían que clicar sobre un botón rojo. Una vez realizado el test, se anotaba en una plantilla la puntuación final, así como los aciertos y errores de cada una de las 36 melodías. Las características musicales de las melodías están basadas en los siguientes aspectos: utilización de ritmos sincopados propios del jazz, combinación de valores cortos y largos, cambios de intensidad, acompañamiento con sonidos largos para las melodías, mezcla de sonidos sintetizados con sonidos casi naturales, melodías con diferentes alturas, utilización de sonoridades como el órgano, piano, la percusión, la cuerda e instrumentos de placa, melodías arpegiadas preferentemente por terceras en orden ascendente y descendente, uso de escalas mayores completas, así como el empleo de notas repetidas y de poca duración. Para la realización de este test se necesitan aproximadamente 7 minutos. De esta manera, tratamos de averiguar si los participantes pueden o no discriminar las melodías. Antes de realizar la prueba, las instrucciones fueron brevemente explicadas a los sujetos, que entrenaron con 4 ejemplos de dos melodías iguales y dos diferentes, y ajustaron el volumen de sus auriculares para escuchar claramente las melodías. Posteriormente, las 36 melodías se presentaron a todos los participantes en el mismo orden, la mitad de los pares de melodías eran diferentes, y la otra mitad eran iguales. Los 61 participantes realizaron el JMTDT accediendo a la página de internet (<http://jakemandell.com/tonedeaf/>). Cuando cada participante terminaba la prueba, la página web proporcionaba para cada uno su porcentaje de respuestas correctas, que oscila entre 0% y 100%, según la clasificación ofrecida de la siguiente manera: posible déficit tonal (por debajo del 55%), normal bajo (superior al 60%), normal (por encima de 70), muy bien (por encima de 80) y excepcional (superior a 90).

Según la información detallada en la página de internet donde se puede realizar la prueba (<http://jakemandell.com/tonedeaf/>), el JMTDT es útil para medir la capacidad media de percepción del tono, habiendo realizado para ello un análisis estadístico en el que han participado 61.036 personas.

1.3. Adquisición de las imágenes

Las imágenes fueron adquiridas en un escáner 3-T Philips Achieva. Se adquirió un volumen en 3D de alta resolución de todo el cerebro para cada participante utilizando una secuencia MPRAGE potenciada en T1 (TR / TE = 8,4 / 3,8 ms, matriz = 320 x 320 x 250, tamaño de vóxel = 0,75 x 0,75 x 0,8 mm).

1.4. Análisis conductuales: JMTDT

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el paquete de software SPSS (versión 22.0). Se calculó la media de las respuestas correctas y las desviaciones estándar del JMTDT para el grupo de músicos y no músicos. Se realizó un ANOVA y como variable dependiente utilizamos la puntuación del Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT). El género y el grupo fueron considerados como factores entre sujetos, y la edad como covariable.

1.5. Análisis de las imágenes

1.5.1. Preprocesado de las imágenes

Las imágenes fueron preprocesadas mediante la técnica morfométrica de VBM (*Voxel Based Morphometry*, por sus siglas en inglés), utilizando el programa SPM

(*Statistical Parametric Mapping 12*; Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, uk. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>). Esta técnica se llevó a cabo empleando la herramienta CAT 12 (*A Computational Anatomy Toolbox for SPM*, <http://www.neuro.uni-jena.de/cat/>) implementada en el programa SPM12. Para el preprocesado, las imágenes fueron segmentadas en sustancia gris, sustancia blanca y líquido cefalorraquídeo. Los análisis posteriores se realizaron únicamente con las imágenes de sustancia gris. La normalización a un espacio estándar se llevó a cabo utilizando transformaciones lineales (12 parámetros) y una normalización de alta dimensión mediante DARTEL. Seguidamente los valores de los vóxeles fueron modulados. Finalmente, las imágenes fueron suavizadas con un filtro Gaussiano de 8 mm. En el último paso se obtuvo el volumen intracraneal (TIV) de cada participante que se utilizó en el análisis estadístico posterior con el fin de eliminar las diferencias individuales debidas a este volumen.

1.5.2. Análisis estadístico

Basándonos en estudios previos, se seleccionaron diferentes áreas cerebrales como regiones de interés (ROIs) para ver la relación de estas áreas con las puntuaciones obtenidas en el JMTDT. Las ROIs fueron creadas mediante el atlas AAL (*Automatic Atlas Labeling*) con la herramienta WFU-PickAtlas (Maldjian y cols., 2003). Después, obtuvimos el volumen de sustancia gris (ml) para nuestras ROIs en el giro temporal superior, giro frontal inferior, y el giro de Heschl; que se introdujo en los análisis de correlación junto con el porcentaje de respuestas correctas del JMTDT. Estos análisis fueron realizados mediante el programa SPSS.

2. RESULTADOS

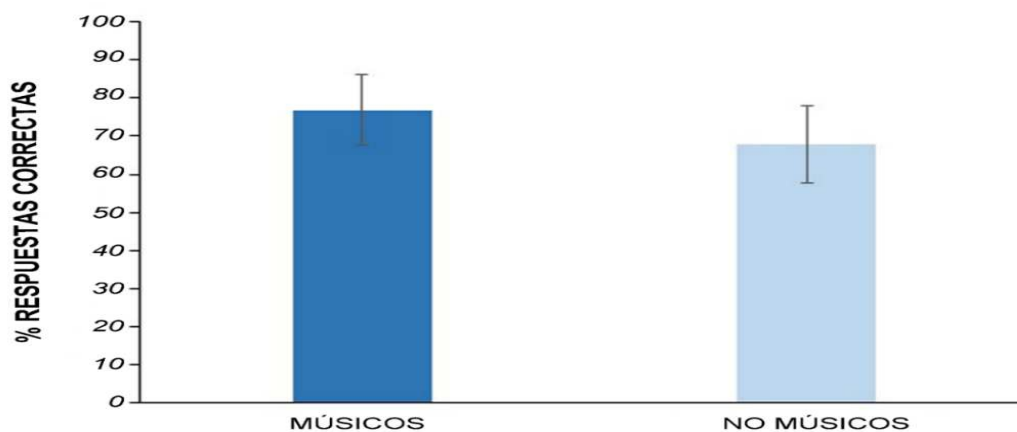
2.1. Resultados conductuales: JMTDT

El análisis de los datos conductuales (Tabla 1 y Figura 10) muestra la media y la desviación estándar para cada grupo. El análisis de varianza (ANOVA) realizado utilizando el JMTDT como variable dependiente, el género y grupo como factores entre sujetos, y la edad como covariable sólo produjo un efecto significativo para el grupo [$F(1, 36) = 12,68, P = 0,002, \eta^2 = 0,40$]. Como esperábamos, los músicos obtuvieron mejores puntuaciones que los participantes que no tenían formación musical. No hubo efectos principales de género ni edad ni interacciones significativas.

Tabla 1. Media de las respuestas correctas y desviaciones estándar en el JMTDT para el grupo de músicos y no músicos

Grupo	Participantes	Media	Desviación Estándar	Rango
NO MÚSICOS	28	67.85	10.43	42-86
MÚSICOS	33	76.84	9.43	50-97

Figura 10. Distribución de las puntuaciones obtenidas en el JMTDT para el grupo de músicos y no músicos



2.2. Resultados VBM

En la Tabla 2 ofrecemos los coeficientes de correlación entre el volumen de sustancia gris en las regiones de interés y los valores obtenidos en el JMTDT, así como la media de las respuestas correctas, las desviaciones estándar y el rango.

Cuando se seleccionan todos los participantes (músicos y no músicos), se encontraron correlaciones positivas entre el JMTDT y el volumen regional de sustancia gris en el giro temporal superior a nivel bilateral, el giro de Heschl a nivel bilateral, y el giro frontal inferior derecho (Tabla 2).

Dentro del grupo de músicos, solamente se encontró una correlación positiva entre el JMTDT y el volumen regional de sustancia gris en el giro frontal inferior derecho (Tabla 2).

Dentro del grupo de no músicos, se encontró una correlación positiva entre el JMTDT y el volumen regional de sustancia gris en el giro temporal superior izquierdo (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre las regiones de volumen de sustancia gris y los valores obtenidos en el JMTDT, así como la media de las respuestas correctas, las desviaciones estándar y el rango

MÚSICOS Y CONTROLES

	STG_R	Heschl_R	IFG_R	STG_L	Heschl_L	IFG_L	Media (DE)	Rango
Jake Mandell Test	.27*	.29*	.27*	.33*	.30*	.24	72.72 (10.8)	42-97

MÚSICOS

	STG_R	Heschl_R	IFG_R	STG_L	Heschl_L	IFG_L	Media (DE)	Rango
Jake Mandell Test	.25	.19	.39*	.21	.22	.33	76.84 (9.4)	50-97

CONTROLES

	STG_R	Heschl_R	IFG_R	STG_L	Heschl_L	IFG_L	Media (DE)	Rango
Jake Mandell Test	.34	.36	.20	.48*	.32	.20	67.85 (10.4)	42-86

STG_R = giro temporal superior derecho; Heschl_R = giro de Heschl; IFG_R = giro frontal inferior derecho. STG_L = giro temporal superior izquierdo; Heschl_L = giro de Heschl izquierdo; IFG_L = giro frontal inferior izquierdo.

**P <0.01; *P <0.05.

ESTUDIO 2. Estudio de las bases anatómicas de la discriminación musical en niños y capacidad predictiva sobre los cambios producidos por la instrucción musical

INTRODUCCIÓN

Diversos estudios ponen de manifiesto que el entrenamiento musical produce cambios en el cerebro, propiciando un mayor aumento de las estructuras cerebrales y principalmente en las estructuras corticales y subcorticales del sistema auditivo, así como en la corteza sensoriomotora, influyendo en dichos cambios la edad de inicio en las enseñanzas musicales (Herholz y Zatorre, 2012; Levitin y Tirovolas, 2009; Penhune, 2011; Patel, 2003, 2010; Schellenberg, 2004; Trainor y cols., 2009; Wong y cols., 2007). Los resultados obtenidos en el estudio 1 de la presente tesis doctoral ponen de manifiesto que el volumen de determinadas estructuras cerebrales como el córtex auditivo o el giro temporal superior correlaciona positivamente con las aptitudes musicales, y concretamente en las tareas de discriminación sonora tanto en músicos como en no músicos. Sin duda, el entrenamiento musical contribuye a esta correlación, pero la observación de que también se produce la correlación en no músicos plantea el interrogante acerca de hasta qué punto la percepción musical es una característica fundamentalmente determinada por las diferencias individuales en la maduración de las estructuras audio-motoras, o se da como consecuencia del aprendizaje de la música.

Con respecto a la adquisición de los conocimientos musicales en las primeras etapas del desarrollo del niño, Jentschke y cols. (2014) han demostrado que los niños a los 30 meses poseen determinadas habilidades musicales, principalmente desde el punto de vista auditivo y motor, siendo estos los cimientos para poder aprender nuevos aprendizajes musicales, considerándose esta etapa esencial para establecer las bases de la música. Con respecto a dichas habilidades musicales, la capacidad de discriminar determinados elementos que constituyen la música como el tempo y la altura repercute en la elaboración

de un material musical como escalas musicales y distancias de intervalos propias de cada cultura musical (Stalinski y Schellenberg, 2012). Sin embargo, existen otros elementos de la música como la tonalidad o la armonía que son más difíciles para la comprensión en las primeras etapas del desarrollo cognitivo del niño de 0 a 2 años, siendo más fácil la percepción del timbre y el ritmo. No obstante, a partir de los 7 años los niños son capaces de percibir y realizar una discriminación perceptiva adecuada (Thompson y cols., 1999).

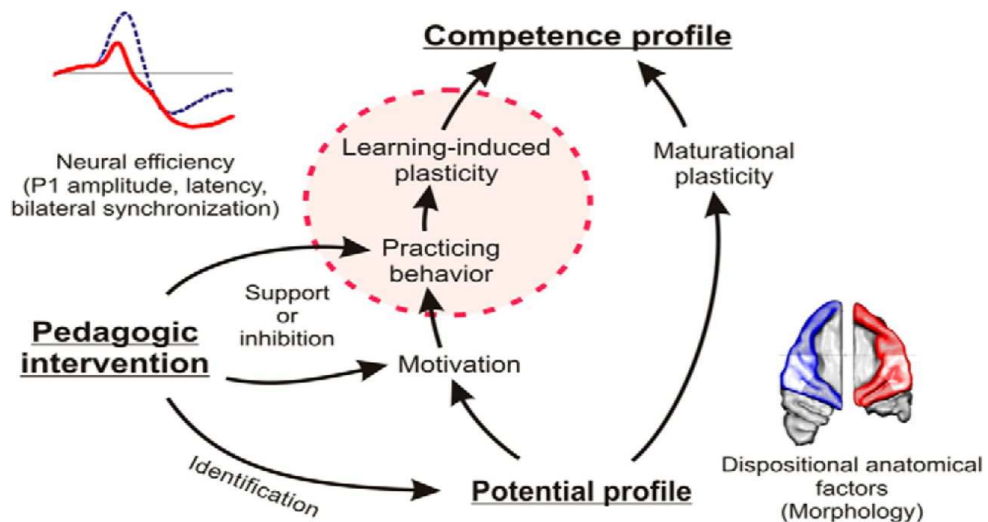
Los estudios que se han realizado con la intención de conocer los cambios que produce el entrenamiento musical en los niños, no permiten poder afirmar que únicamente es el entrenamiento musical el que produce dichos cambios cerebrales, pudiendo también influir determinadas habilidades innatas, así como el aprendizaje adquirido en las etapas del desarrollo temprano del niño (Merret y cols., 2013; Norton y cols., 2005). Sin embargo, diversas investigaciones demuestran que el entrenamiento musical realizado en la infancia puede producir cambios estructurales a nivel cerebral, no debiéndose estos cambios únicamente a aspectos genéticos ya existentes (Ellis y cols., 2012; Hyde y cols., 2009; Knudsen, 2004; Skoe y Kraus, 2012;).

Así mismo, los estudios realizados para conocer la plasticidad cerebral en los niños afirman que el entrenamiento musical influye en la mejora de su estructura y función cerebral durante la etapa de la primera infancia (Knudsen, 2004). En relación con los efectos del entrenamiento musical y su influencia en la plasticidad cerebral, Hyde y cols. (2009) realizaron un estudio con niños de entre 0 a 2 años de edad, proporcionándoles una formación musical durante 15 meses, y demostraron que dicho periodo formativo influyó en la mejora de las habilidades motoras y auditivas. Además, se ha podido demostrar que el acercamiento a la música en edades tempranas favorece el desarrollo intelectual, emocional, psicomotriz y social del niño (Brown y cols., 1981). No obstante, Schlaug y cols. (2005) demostraron que un periodo de entrenamiento musical en los niños durante

aproximadamente 14 meses no es suficiente para producir cambios significativos con relación al volumen de sustancia gris y blanca en el cerebro de los niños.

En un estudio reciente, Seither-Preisler y cols. (2014) mostraron que la morfología del córtex auditivo primario se estabilizaba a una edad temprana y que por tanto la formación musical reglada poca influencia podía tener sobre la estructura (Figura 11). Con ello, la variabilidad en el tamaño de esta estructura se podría asociar a posibles experiencias musicales tempranas, a un aprendizaje auditivo general o bien, a la influencia genética. A partir de ahí, y sin modificar la estructura, el tamaño de córtex auditivo puede modular la motivación por el aprendizaje musical y con ello, la práctica musical mediante un instrumento. Ello modificaría la respuesta neural en el córtex auditivo, pero no su estructura. Con ello, se podría establecer una retroalimentación entre aptitud musical y entrenamiento musical tal como aparece en el modelo.

Figura 11. Modelo neurocognitivo del desarrollo por competencias. En el caso del procesamiento de música, la morfología de CA (abajo a la derecha) y las formas de onda de origen de los campos evocados auditivos (arriba a la izquierda) representan factores de disposición y de inducción de entrenamiento, respectivamente. Imagen obtenida de Seither-Preisler y cols. (2014).



Teniendo en consideración la literatura previa sobre los cambios que produce el entrenamiento musical en los niños así como los factores genéticos que influyen en la modificación de las estructuras neurales, el objetivo principal de este estudio consiste en investigar si el volumen de sustancia gris obtenido en la sesión de resonancia magnética en niños que iban a empezar los estudios musicales correlaciona con los test que evalúan las aptitudes musicales. Se pretende con ello delimitar las diferencias estructurales basales en capacidades musicales, poniendo en cuestión si las características cerebrales de los niños con relación a las aptitudes musicales únicamente son desarrolladas por el entrenamiento musical, o si existen factores genéticos que pudieran determinar dicha aptitud musical. Un segundo objetivo sería delimitar si estas diferencias en anatomía cerebral son capaces de predecir la mejoría de las aptitudes musicales debido al entrenamiento musical en el conservatorio durante un año.

1. METODOLOGÍA

1.1. Participantes

Nuestra muestra está compuesta por 33 niños y niñas en edad escolar sin instrucción musical formal previa, pero interesados en acceder a estudios musicales reglados en el conservatorio. El grupo completo está formado por 15 niños y 18 niñas. La edad de los participantes oscila entre 6 y 12 años ($M = 8,47$; $DE = 1,50$), con condiciones y habilidades neuropsicológicas y psiquiátricas normales. Se analizan las variables género, edad, y años de educación musical. Todos los padres de los participantes dieron su consentimiento por escrito para que sus hijos participaran en este estudio y recibieron compensación económica por su participación.

1.2. Materiales

Los participantes completaron el Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT). Por otro lado, también realizaron un Test de Aptitud Musical, con la finalidad de evaluar estas cinco habilidades musicales: discriminación tonal, memoria rítmica, memoria tonal, imitación rítmica e imitación melódica.

1. La prueba de **Discriminación Tonal** requirió que los participantes escucharan diez compases con dos sonidos en cada compás. En 5 compases, el segundo sonido estaba colocado ascendentemente, mientras que, en los otros 5 compases, el segundo sonido estaba situado descendentemente. En esta tarea, el niño debía reconocer si la segunda nota era ascendente o descendente respecto a la primera. Así, las posibles respuestas eran: “A” (si la segunda nota había subido) y “B” (si la segunda nota había bajado). Se puntuó con un punto por cada intervalo acertado. La puntuación máxima del ejercicio era de 10 puntos.

2. La prueba de **Memoria Rítmica** consistió en 10 ritmos musicales de cuatro pulsaciones. Los participantes tuvieron que escuchar cada uno de los 10 ritmos musicales dos veces. En el 50% de los patrones rítmicos todas las pulsaciones fueron las mismas, mientras que en el otro 50% se modificó una pulsación. Por lo tanto, los participantes tenían que identificar si el segundo ritmo era el mismo o diferente al primero. Así, las posibles respuestas eran: “I” (si el ritmo era igual) y “D” (si el ritmo era diferente). Se puntuó con un punto por cada ejercicio acertado. La puntuación máxima del ejercicio era de 10 puntos.

3. La prueba de **Memoria Tonal** presentó 10 melodías musicales compuestas por cinco pulsaciones en valores de negra. Los participantes las escucharon dos veces. Los investigadores alteraron una nota en 5 de las 10 melodías, y al escuchar la segunda melodía debían indicar si era igual o diferente con respecto a la primera. Por lo tanto, los

participantes tenían que identificar si cada melodía era igual o diferente con respecto a la primera. Así, las posibles respuestas eran: "I" (si la repetición de la melodía era igual) o "D" (si la repetición de la melodía era diferente). Se puntuó con un punto por cada ejercicio acertado. La puntuación máxima del ejercicio era de 10 puntos.

4. La prueba de **Imitación Rítmica** consistió en imitar cinco patrones rítmicos que el investigador propuso mediante palmas. En primer lugar, el investigador explicó a los participantes que debían colocarse de espaldas a él para imitar los patrones rítmicos. A continuación, los participantes escucharon los 5 ritmos musicales que tenían que imitar con palmas. Posteriormente, se puntuó cada ritmo con 2 puntos si la imitación era exacta o 0, en caso contrario. La puntuación máxima del ejercicio era de 10 puntos.

5. La prueba de **Imitación Melódica** estaba compuesta de 5 frases musicales. El investigador cantó cada una de las 5 frases musicales con la sílaba "la" y los participantes tenían que cantar las melodías para evaluar si podían o no imitar al investigador. Se puntuó cada melodía con: 2 puntos si la imitación era exacta tanto en su interválica como en su tesitura; 1 punto si la imitación era exacta en interválica pero no en su tesitura; y 0 puntos si el niño/a no era capaz de imitar la melodía. La puntuación máxima del ejercicio era de 10 puntos.

6. Puntuación Total. Hemos calculado una puntuación global en habilidades musicales a partir de la media de todas las puntuaciones del Test de Aptitud Musical.

1.3. Procedimiento

Para realizar este estudio los participantes fueron evaluados dos veces. En la primera evaluación se les realizaba una RM (Resonancia Magnética) para conocer las características a nivel estructural del cerebro de los niños que estaban empezando la

enseñanza musical reglada. Tanto en la primera como en la segunda evaluación los participantes realizaron dos pruebas: el Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT) y un Test completo de Aptitud Musical con sus 5 pruebas.

Para la realización del JMTDT accedimos a la página web <http://jakemandell.com/tonedeaf>, donde los participantes escucharon cada melodía dos veces con el propósito de compararlas. Las melodías podían ser iguales o diferentes. El investigador disponía de una plantilla para registrar las respuestas correctas o incorrectas.

Por otro lado, para realizar el Test de Aptitud Musical escucharon diferentes patrones rítmicos y melódicos que el investigador grabó con una flauta dulce y las claves para realizar las pruebas de discriminación tonal, memoria tonal y memoria rítmica. Además, también interpretaron en el mismo momento de la realización del test diversos patrones rítmicos con las manos y melódicos con la voz para la realización de las pruebas de imitación rítmica e imitación melódica.

1.4. Adquisición de los datos anatómicos

Las imágenes fueron adquiridas en un escáner 1.5-T Siemens Avanto (Erlangen, Germany). Se adquirió un volumen en 3D de alta resolución de todo el cerebro para cada participante utilizando una secuencia MPRAGE potenciada en T1 (TR / TE = 2200 / 3,8 ms, matriz = 256 x 256 x 160, tamaño de vóxel = 1 x 1 x 1 mm).

1.5. Análisis conductuales

Para analizar los datos obtenidos en las pruebas de música se utilizó el programa estadístico SPSS "Statistical Package for the Social Sciences". En primer lugar, se calcularon los estadísticos descriptivos del Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT) y del

Test de Aptitud Musical, obteniendo la media, la desviación estándar, el máximo y el mínimo del JMTDT y de todas las partes que constituyen el Test de Aptitud Musical. Finalmente, se realizó una diferencia de medias entre el retest y el test para obtener la variable de aprendizaje.

Para obtener la puntuación ritmo se obtuvo la media entre la prueba de memoria rítmica y la de imitación rítmica. Por otro lado, la puntuación tono se obtuvo con la media de las pruebas de discriminación tonal, memoria tonal e imitación melódica. Finalmente, para obtener la puntuación total se hizo la media de todas las puntuaciones del Test de Aptitud Musical.

1.6. Análisis de las imágenes

1.6.1. Preprocesado de las imágenes

Las imágenes fueron preprocesadas mediante la técnica morfométrica de VBM (*Voxel Based Morphometry*, por sus siglas en inglés), utilizando el programa SPM (*Statistical Parametric Mapping 12; Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, uk. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>*). Esta técnica se llevó a cabo empleando la herramienta CAT12 (*A Computational Anatomy Toolbox for SPM, <http://www.neuro.uni-jena.de/cat/>*) implementada en el programa SPM12. Teniendo en cuenta que todos los *templates* (plantilla o cerebro de referencia) proporcionados por el SPM son de cerebros adultos, fue necesario realizar un template con las imágenes de nuestra muestra de niños/as antes del análisis de VBM. Para ello se realizaron los siguientes pasos: 1) Reorientación de las imágenes a la comisura anterior (CA)- comisura posterior (CP); 2) Segmentación de las imágenes en SG, SB y LCR, y en el tejido de intensidades no uniformes (*bias correction*) mediante los mapas de probabilidad de los tejidos (TPM) que proporciona el SPM; 3) las

imágenes segmentadas para cada participante se utilizaron para crear un *template* de toda la muestra de niños/as mediante la herramienta Template-O-Matic (TOM) (<https://irc.cchmc.org/software/tom.php>). La herramienta TOM utiliza el modelo lineal general para tener en cuenta las variables externas de interés en la estructura del cerebro, como son la edad y el género, permitiendo generar un *template* de alta calidad. De aquí obtendremos el TPM de nuestra propia muestra para el procesado del VBM. Una vez creado el *template* de nuestra muestra se utilizó la herramienta CAT12 para el análisis de VBM. Este preprocesado se basó en la segmentación de los tejidos cerebrales en SG, SB y LCR utilizando el TPM personalizado obtenido del TOM, a continuación, el volumen de SG fue normalizado utilizando el *template* Dartel y modulado mediante el escalado por la cantidad de cambios de volumen debidos al registro espacial, de manera que la cantidad total de volumen de SG de la imagen modulada-normalizada permanece igual que en la imagen original. Después, las imágenes fueron suavizadas con un filtro Gaussiano de 8 mm. En el último paso se obtuvo el volumen intracraneal (TIV) de cada participante que se utilizó en el análisis estadístico posterior con el fin de eliminar las diferencias individuales debidas a este volumen.

1.6.2. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos fueron realizados usando el programa SPM12. Los volúmenes de SG procesados en el análisis de VBM para cada participante, se utilizaron para el análisis estadístico de segundo nivel.

En primer lugar, para conocer qué áreas cerebrales estaban relacionadas con la puntuación de los test musicales se realizó un análisis de regresión múltiple. Este análisis estadístico fue covariado por TIV y edad, y calculado a nivel de todo el cerebro con un

umbral de $p < 0,001$ (sin corrección por múltiples comparaciones), junto con un umbral de extensión mínima (k) de 300 vóxeles.

Finalmente, basándonos en el Estudio 1, se seleccionaron diferentes áreas cerebrales como regiones de interés (ROIs) para ver la relación de estas áreas con las puntuaciones obtenidas en el JMTDT. Las ROIs fueron creadas mediante el atlas AAL (*Automatic Atlas Labeling*) con la herramienta WFU-PickAtlas (Maldjian y cols., 2003). Después, obtuvimos el volumen de sustancia gris (ml) para nuestras ROIs en el giro temporal superior, giro frontal inferior, y el giro de Heschl, que se introdujo en los análisis de correlación junto con el porcentaje de respuestas correctas del JMTDT. Estos análisis fueron realizados mediante el programa SPSS.

2. RESULTADOS

2.1. Resultados conductuales

En la Tabla 3 presentamos la media y desviación estándar del test y del retest del Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT) y del Test de Aptitud Musical, la diferencia de medias entre ambos y el valor del test estadístico t de la diferencia. Entre la realización del test y el retest ha transcurrido un año. En el test han participado 34 niños/as y en el retest 33 niños/as.

La media del retest de **JMTDT** es superior a la del test de JMTDT (diferencia= 4.80) y esta diferencia es estadísticamente significativa ($t = 2.675$, $p = .012$). Como se puede observar, los resultados revelan que la calificación, después de un año, mejoró ($M= 66.26$; $SD=9.72$) (ver **Tabla 3**).

También la media del retest de la **prueba de Discriminación Tonal** es superior a la del test de la prueba Discriminación Tonal (diferencia=0.37) y esta diferencia no es

estadísticamente significativa ($t= 1.459$, $p = .154$). Como podemos observar, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=8.70$; $SD=1.21$) (**ver Tabla 3**).

Así mismo, la media del retest de la **prueba de Memoria Rítmica** es superior a la del test de la prueba de Memoria Rítmica (diferencia=0.63) siendo esta diferencia estadísticamente significativa ($t = 2.514$, $p = .017$). Como podemos percibir, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=9.27$; $SD=0.87$) (**ver Tabla 3**).

También, la media del retest de la **prueba de Memoria Tonal** es superior a la del test de la prueba de Memoria Tonal (diferencia=0.66) y esta diferencia es estadísticamente significativa ($t = 2.766$, $p = .009$). Como se puede ver, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=9.39$; $SD=0.82$) (**ver Tabla 3**).

De igual manera, la media del retest de la **prueba de Imitación Rítmica** es superior a la del test de la prueba de Imitación Rítmica (diferencia=1.94) y esta diferencia es estadísticamente significativa ($t= 4.103$, $p < .001$). Como se puede percibir, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=8.36$; $SD=2.26$) (**ver Tabla 3**).

La media del retest de la **prueba de Imitación Melódica** es superior a la del test de la prueba de Imitación Melódica (diferencia=2.36) y esta diferencia es estadísticamente significativa ($t = 4.983$, $p < .001$). Como se puede observar, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=5.33$; $SD=2.80$) (**ver Tabla 3**).

Así mismo, la media del retest de la **Puntuación Ritmo** es superior a la del test de la Puntuación Ritmo (diferencia=1.28) siendo esta diferencia estadísticamente significativa (t

= 4.987, $p < .001$). Como podemos percibir, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=8.94$; $SD=1.05$) (ver **Tabla 3**).

De igual manera, la media del retest de la **Puntuación Tono** es superior a la del test de la Puntuación Tono (diferencia=1.08) siendo esta diferencia estadísticamente significativa ($t = 4.936$, $p < .001$). Como podemos percibir, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=7.93$; $SD=1.01$) (ver **Tabla 3**).

La media del retest **de la Puntuación Total** es superior a la del test de la Puntuación Total (diferencia=1.23) siendo esta diferencia estadísticamente significativa ($t = 6.786$, $p < .001$). Como podemos percibir, los resultados demuestran que la calificación, después de un año, mejoró ($M=8.41$; $SD=0.85$) (ver **Tabla 3**).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de los test y retest del JMTDT y del test de Aptitud Musical.

Diferencia de medias entre test y retest	Media del Test (DE)	Media del Retest (DE)	Aprendizaje (retest – test) (DE)	t
Jake Mandell Tone Deaf Test	61,45 (9,42)	66,26 (9,72)	4,80 (10,32)	2,675*
Discriminación Tonal	8,33 (1,72)	8,70 (1,21)	0,37 (1,43)	1,459
Memoria Rítmica	8,64 (1,38)	9,27 (0,87)	0,63 (1,45)	2,514*
Memoria Tonal	8,73 (1,20)	9,39 (0,82)	0,66 (1,38)	2,766**
Imitación Rítmica	6,42 (3,26)	8,36 (2,26)	1,94 (2,71)	4,103**
Imitación Melódica	2,97 (2,46)	5,33 (2,80)	2,36 (2,72)	4,983**
Puntuación Ritmo	7,66 (1,94)	8,94 (1,05)	1,28 (1,45)	4,987**
Puntuación Tono	6,85 (1,24)	7,93 (1,01)	1,08 (1,19)	4,936**
Puntuación Total	7,18 (1,26)	8,41 (0,85)	1,23 (1,04)	6,786**

Media y desviación estándar (DE) de los tests JMTDT y de Aptitud Musical (prueba discriminación tonal, prueba de memoria rítmica, prueba de memoria tonal, prueba de imitación rítmica y prueba de imitación melódica) y de sus respectivos retets. y aprendizaje. La prueba t para muestras relacionadas.

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$

2.2.-Resultados VBM:

2.2.1. Regresión múltiple

A) Efectos basales

En este apartado se estudiarán las correlaciones entre las pruebas musicales realizadas inicialmente y los resultados de Resonancia Magnética basales. Los resultados de morfometría obtenidos de los análisis de regresión múltiple con la variable **Prueba Imitación Melódica** mostraron una correlación positiva con el volumen regional en el Giro Angular derecho y en el Giro Temporal Superior derecho (Figura 12, Tabla 4). Con la variable **Puntuación Tono**, se encontró una correlación positiva con el volumen regional en el Giro Parietal Inferior izquierdo, el Giro Angular derecho, y en el Giro Fusiforme a nivel bilateral (Figura 12, Tabla 4).

Con respecto a las variables **Prueba Discriminación Tonal, Prueba Memoria Rítmica, Prueba Memoria Tonal, Prueba Imitación Rítmica, Puntuación Ritmo, Puntuación Tono, Puntuación Total** no se han encontrado correlaciones significativas.

Figura 12. Áreas cerebrales en las que se encuentran **correlaciones positivas** entre el volumen regional de sustancia gris y: A) la prueba de Imitación Melódica y B) la Puntuación Tono ($p < 0.001$ sin corregir, $K > 300$ vóxeles).

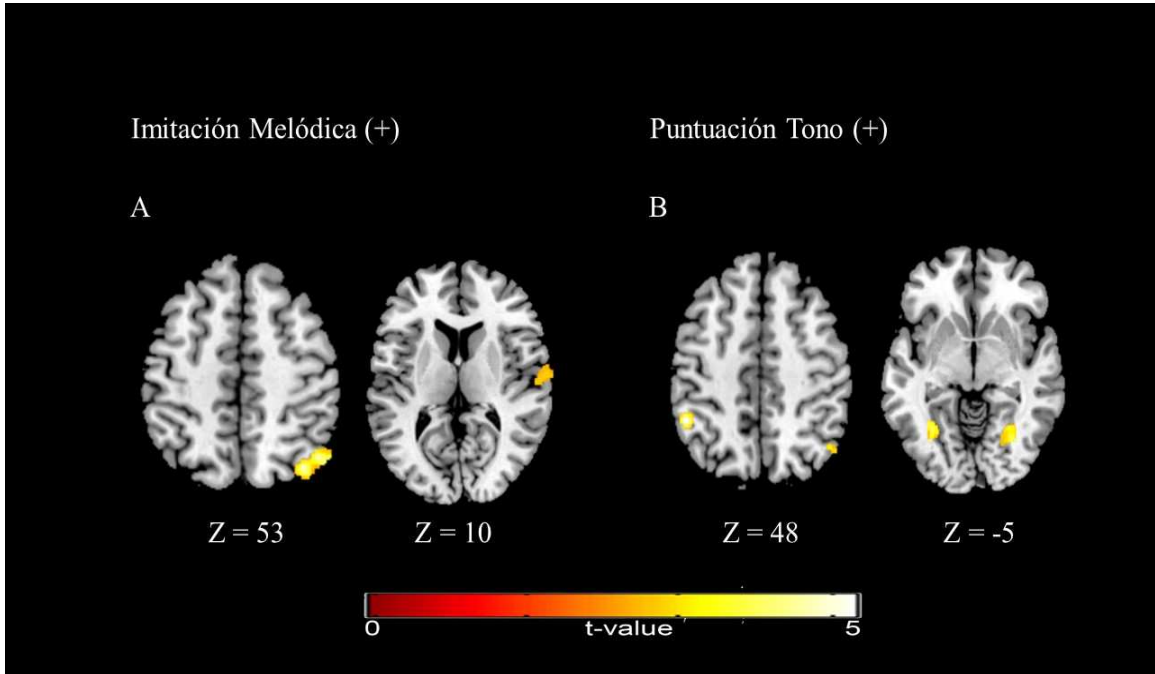


Tabla 4. Efectos basales

Muestra	Medida de correlación	Correlación	Tamaño de Clúster	Valor de Z	Coordenadas MNI	Área cerebral
34	Prueba Discriminación Tonal	---	---	---	---	---
34	Prueba Memoria Rítmica	---	---	---	---	---
34	Prueba Memoria Tonal	---	---	---	---	---
33	Prueba Imitación Rítmica	---	---	---	---	---
31	Prueba Imitación Melódica	Positiva	446	4.49	38 -71 53	Giro Angular D
			312	3.74	68 -18 15	Giro Temporal Superior D
33	Puntuación Ritmo	---	---	---	---	---
31	Puntuación Tono	Positiva	309	4.57	-50 -47 48	Giro Parietal Inferior Y Giro Supramarginal I
			398	4.23	48 -68 54	Giro Angular D
			322	3.98	-35 -65 -8	Giro Fusiforme I
			310	3.97	30 -66 -5	Giro Fusiforme D
31	Puntuación Total	---	---	---	---	---

D=derecho
I=izquierdo

B) Correlaciones en el restest

En este apartado se estudiará la capacidad predictiva de la RM inicial para predecir los resultados de las pruebas musicales realizadas al cabo de un año. Los resultados de morfometría de los análisis de regresión múltiple con la variable **Prueba Memoria Rítmica** mostraron una correlación positiva con el volumen regional de la ínsula derecha (Figura 13, Tabla 5). Con la variable **Puntuación Total** se obtuvo una correlación positiva con el volumen regional en el giro temporal superior derecho, abarcando el giro de Heschl (Figura 13, Tabla 5). Por otro lado, en cuanto a la variable de **Puntuación Ritmo** se obtuvo una correlación negativa con el volumen regional en el giro lingual izquierdo (Figura 13, Tabla 5).

Finalmente, por lo que se refiere a las variables **Prueba Discriminación Tonal**, **Prueba Memoria Tonal**, **Prueba Imitación Rítmica**, **Prueba Imitación Melódica**, y **Puntuación Tono**, no se han encontrado correlaciones significativas (Figura 13, Tabla 5).

Figura 13. Áreas cerebrales en las que se encuentran **correlaciones positivas** entre el volumen regional de sustancia gris y: A) la prueba de Memoria Rítmica y B) la Puntuación Total. C) **correlación negativa** con la Puntuación Ritmo ($p < 0.001$ sin corregir, $K > 300$ vóxeles).

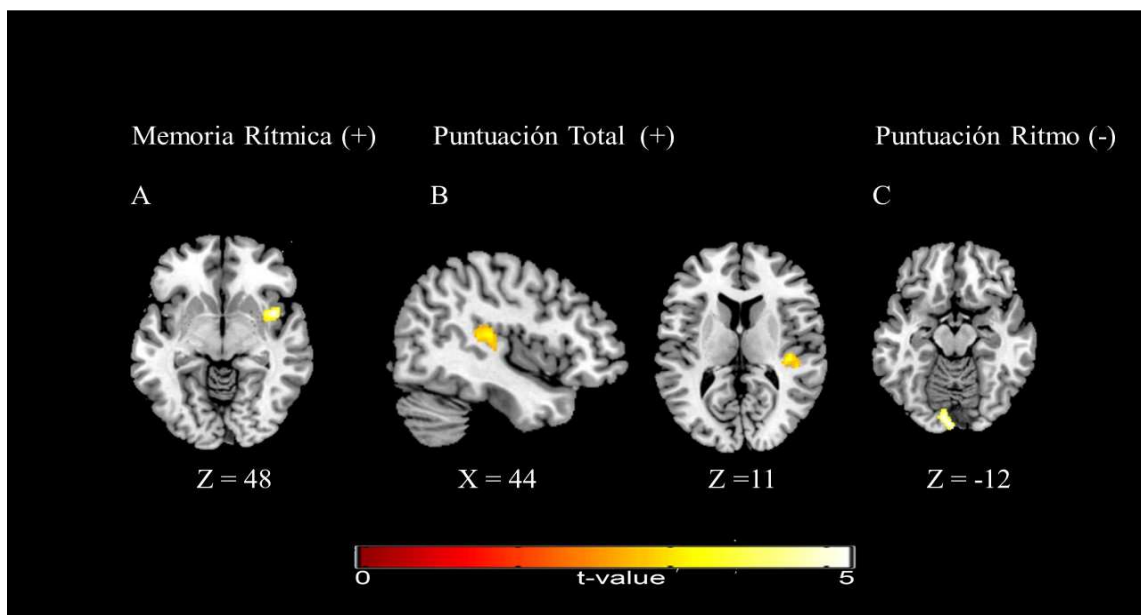


Tabla 5. Correlaciones en el retest

Muestra	Medida de correlación	Correlación	Tamaño de clúster	Valor de Z	Coordenadas MNI	Área cerebral
33	Prueba Discriminación Tonal	---	---	---	---	---
33	Prueba Memoria Rítmica	Positiva	520	4.19	41 6 -6	Insula D
33	Prueba Memoria Tonal	---	---	---	---	---
32	Prueba Imitación Rítmica	---	---	---	---	---
30	Prueba Imitación Melódica	---	---	---	---	---
32	Puntuación Ritmo	Negativa	308	4.05	-9 -86 -12	Giro Lingual I
30	Puntuación Tono	---	---	---	---	---
30	Puntuación Total	Positiva	486	3.84	41 -24 11	Giro de Heschl D y Giro Temporal Superior D

D=derecho
I=izquierdo

C) Efectos del aprendizaje

Por último, en este apartado se estudiará la capacidad predictiva de la RM estructural sobre el aprendizaje producido durante un año, es decir, sobre la diferencia entre el valor final y el inicial en las pruebas musicales realizadas (puntuación del retest menos la puntuación del test).

Los resultados de morfometría de los análisis de regresión múltiple con la variable **Prueba Memoria Tonal** mostraron una correlación positiva con el volumen regional en el giro rolandico opercular derecho (Figura 14, Tabla 6).

Con la variable **Prueba Imitación Melódica**, se obtuvo una correlación positiva con en el giro frontal inferior orbital a nivel bilateral, y el giro de Heschl derecho. Por otro lado, se obtuvo una correlación negativa en el giro temporal medio izquierdo. (Figura 14, Tabla 6).

Con la variable **Puntuación Tono**, se obtuvo una correlación positiva con un clúster que se prolonga desde la parte posterior del giro temporal superior a nivel bilateral (abarcando el giro de Heschl), y llegando hasta el giro supramarginal. Además, también se observó una correlación positiva con el giro frontal inferior orbital derecho y el área motora suplementaria derecha. (Figura 14, Tabla 6).

Finalmente, con las variables **Prueba Discriminación Tonal, Prueba Memoria Rítmica, Prueba Imitación Rítmica, Puntuación Ritmo, Puntuación Tono, Puntuación Total** no se han encontrado correlaciones significativas (Figura 14, Tabla 6).

Figura 14. Áreas cerebrales en las que se encuentra **correlaciones positivas** entre el volumen regional de sustancia gris y: A) la prueba de Imitación Melódica; C) la prueba de Memoria Tonal; y D) la Puntuación Tono. B) **correlación negativa** con la prueba de Imitación Melódica; ($p < 0.001$ sin corregir, $K > 300$ vóxeles).

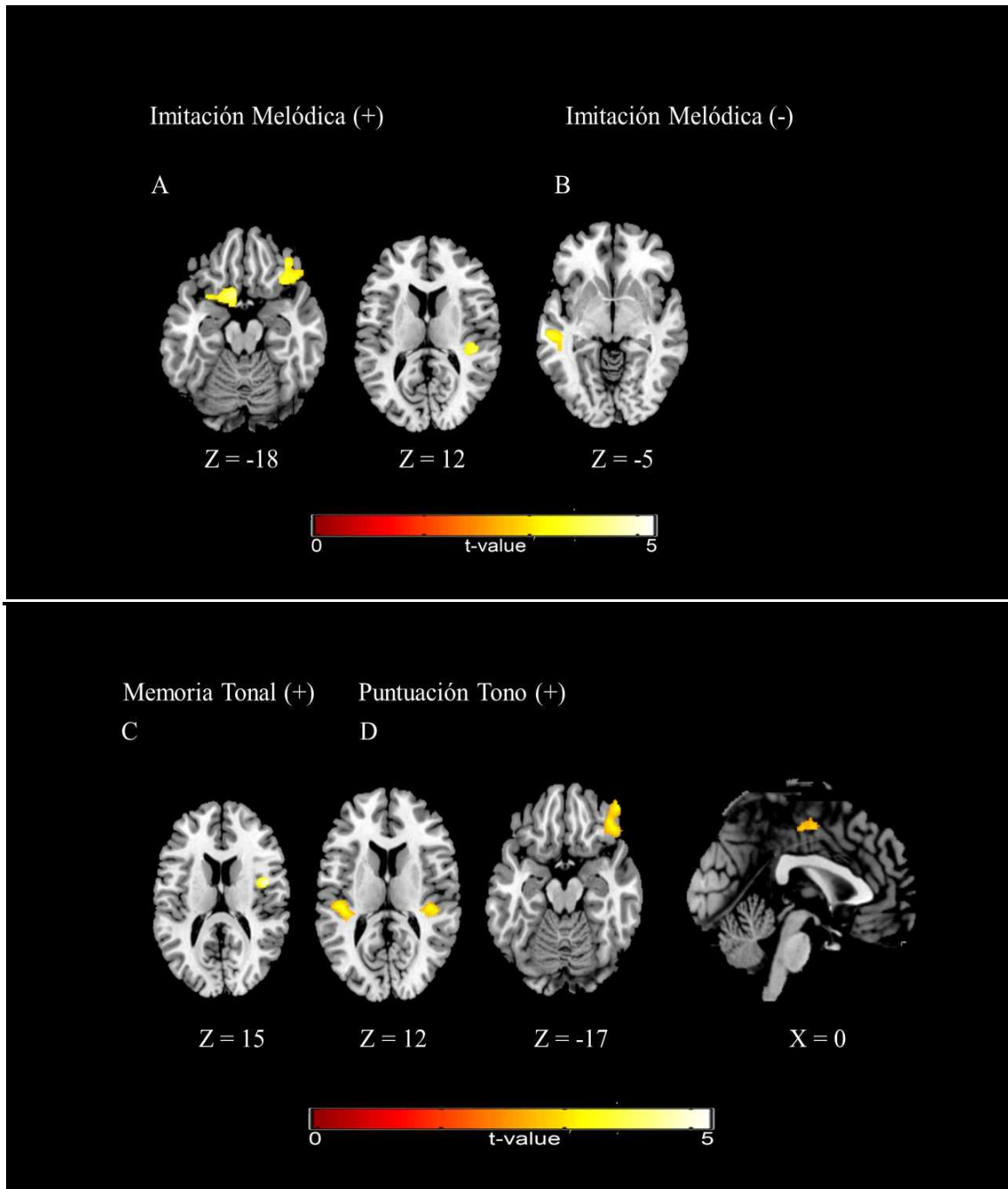


Tabla 6. Efectos del aprendizaje

Muestra	Medida de correlación	Correlación	Tamaño de clúster	Valor de Z	Coordenadas MNI	Área cerebral
33	Prueba Tono	---	---	---	---	---
33	Prueba Memoria Rítmica	---	---	---	---	---
33	Prueba Memoria Tonal	Positiva	303	4.14	45 0 15	Giro Rolándico Opercular D
32	Prueba Imitación Melódica	Positiva	786	4.14	-9 12 -21	Giro Frontal Inferior Orbital I
			841	4.05	33 23 -21	Giro Frontal Inferior Orbital D
			302	3.68	41-26 9	Giro de Heschl D
		Negativa	493	3.56	-57 -27 -5	Giro Temporal Medio I
32	Puntuación Ritmo	---	---	---	---	---
30	Puntuación Tono	Positiva	936	4.53	-45-23 5	Giro Temporal Superior y Giro de Heschl I
			764	4.18	45 47 -21	Giro Frontal Inferior Orbital D
			610	3.84	39 -27 9	Giro de Heschl, Giro Temporal Superior y Giro Supramarginal D
		351	3.74	8 -23 50	Área Motora Suplementaria D	
30	Puntuación Total	---	---	---	---	---

D=derecho
I=izquierdo

2.2.2. Regiones de interés (ROIs)

En la Tabla 8 presentamos los coeficientes de correlación entre el volumen de sustancia gris en las regiones de interés y las puntuaciones obtenidas en el Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT), así como la media de las respuestas correctas, las desviaciones estándar y el rango.

En primer lugar, así como indica la Tabla 8 en la primera aplicación del JMTDT, el rango de este test oscila entre 38 y 86, la media se sitúa en 61.36 y la desviación típica es de 9.3. Se aprecia que los coeficientes de correlación de todos los pares son positivos, pero solo se encuentra una correlación estadísticamente significativa con el giro temporal superior derecho (STG_R).

En segundo lugar, en la aplicación del JMTDT retest (un año después), el rango del retest oscila entre 50 y 86, la media se sitúa en 66.26 y la desviación típica es de 9.7. Por tanto, después de un año de formación musical, se aprecia que los coeficientes de correlación de todos los pares son positivos, pero ninguno de ellos es estadísticamente significativo (ver tabla 8).

Finalmente, podemos apreciar las puntuaciones obtenidas en el JMTDT como consecuencia del aprendizaje musical (la puntuación del retest menos la puntuación del test), oscilando el rango del test entre -19 y 25, la media en 4.81 y la desviación típica en 10.32. Se aprecia que los coeficientes de correlación son negativos para el giro temporal superior derecho (STG_R), el giro frontal inferior derecho (IFG_R), y el giro frontal inferior izquierdo (IFG_L); mientras que se observa una correlación positiva con el giro de Heschl a nivel bilateral y el giro temporal superior izquierdo (STG_L). Ahora bien, se puede observar que ninguno de estos pares es estadísticamente significativo (ver tabla 8).

Tabla 8. Coeficientes de correlación entre las regiones de volumen de materia gris y los valores obtenidos en el JMTDT, así como la media de las respuestas correctas, las desviaciones estándares y el rango

	STG_R	Heschl_R	IFG_R	STG_L	Heschl_L	IFG_L	Media (DE)	Rango
Jake Mandell Test	.35*	.11	.20	.08	.19	.29	61.36 (9.3)	38-86
Jake Mandell Retest	.20	.22	.09	.12	.18	.14	66.26 (9.7)	50-86
Jake Mandell Aprendizaje	-.14	.11	-.10	.05	.00	-.13	4.81 (10.32)	(-19)-25

STG_R = giro temporal superior derecho; Heschl_R = giro de Heschl; IFG_R = giro frontal inferior derecho. STG_L = giro temporal superior izquierdo; Heschl_L = giro de Heschl izquierdo; IFG_L = giro frontal inferior izquierdo.

**P <0.01; *P <0.05.

ESTUDIO 3. Diferencias de activación cerebral del lenguaje entre músicos diestros y zurdos

INTRODUCCIÓN

Tal como hemos visto en la introducción, los estudios de neuroimagen que se han realizado para conocer las diferencias cerebrales entre músicos y no músicos han mostrado importantes diferencias cerebrales entre ambos grupos. Estas investigaciones han puesto de manifiesto que los músicos presentan una mayor especialización cortical en el hemisferio derecho para la música que afecta especialmente al sistema audio-motor y a su conexión mediante el fascículo arqueado (Halwani y cols., 2011; Palomar-García y cols., 2017). Estos resultados han sido confirmados en los Estudios 1 y 2.

Por otro lado, también está constatada la especialización del hemisferio izquierdo para el lenguaje en las mismas zonas y conexiones audio-motoras (López-Barroso y cols., 2013; Palomar-García y cols., 2017). Este patrón se observa en la mayoría de la población con lateralidad manual derecha, pero se ha visto que en un considerable porcentaje (hasta el 20-30%) de la población con lateralidad manual zurda muestran una dominancia cerebral para el lenguaje más dependiente del hemisferio derecho (Knecht y cols., 2000; Pujol y cols., 1999; Somers y cols., 2015), aunque se desconocen los factores que contribuyen a ello.

Diversos estudios han investigado el uso de la mano derecha, izquierda o ambas en los músicos con la finalidad de descubrir las posibles diferencias a nivel cerebral (Byrne, 1974; Christman, 1993; Gates y Bradshaw, 1977; Götestam, 1990; Hassler y Birbaumer, 1988; Harris, 1991; Knecht y cols., 2000; Oldfield, 1969; Pujol y cols., 1999; Somers y cols., 2015). Dichos estudios utilizaron pruebas de preferencia manual para conocer las diferencias entre músicos diestros, zurdos o ambidiestros. Chistman (1993) demostró que

los músicos que utilizaban la mano izquierda o las dos para la práctica musical eran más numerosos en instrumentistas que precisan de una mayor coordinación para tocar un instrumento musical, requiriendo para ello un mayor control motor a nivel bilateral, sugiriendo con ello, que un mayor control bihemisférico para la actividad motora fina será beneficioso para conseguir un mayor rendimiento musical. Por otro lado, Oldfield (1969) no encontró diferencias significativas con respecto a la lateralidad manual entre músicos y no músicos, mientras que Byrne (1974), Hassler y Birbaumer (1988) y Götestam (1990) encontraron que entre un grupo de músicos había un número elevado que tenían una lateralidad manual zurda y ambidiestra, sin profundizar en las implicaciones de las habilidades musicales de los zurdos y ambidiestros y su relación con la dominancia cerebral.

En la misma línea, la investigación realizada por Peters (1985a,b) mediante una tarea bimanual de tapping demostró una menor asimetría en las manos de dos pianistas de entre un grupo de cinco. Además, se ha visto que dicha asimetría manual se mantiene tanto después de un periodo de práctica musical donde el entrenamiento musical se ha realizado durante varios años, como también después de un entrenamiento musical de pocos días de duración (Annett y cols., 1974; Annett, 1970; Peters, 1981).

Jäncke y cols. (1997) estudiaron la asimetría manual en músicos diestros y no músicos, y entre los ambidiestros y zurdos no músicos, mostrando los músicos diestros una mayor superioridad de la mano derecha y un menor grado de asimetría en las habilidades manuales en comparación con los diestros, ambidiestros y zurdos no músicos. Además, también demostraron que los músicos que tocaban instrumentos de teclado mostraron mejores resultados en las tareas de exactitud en la ejecución de la pulsación "tapping" en comparación con los músicos que tocaban instrumentos de cuerda, aunque no mostraron diferencias en relación a la asimetría en las habilidades manuales. Así mismo, se pudo

comprobar que el aumento de la asimetría en el tapping se relacionó con la edad de comienzo en las enseñanzas musicales y no con la duración del entrenamiento musical

En relación con las diferencias cerebrales entre músicos diestros, zurdos y controles han demostrado que en los músicos zurdos con dominancia del lenguaje en el hemisferio derecho tienen un menor grado de lateralización funcional, y por consiguiente un aumento de la bilateralidad relacionada con un mayor volumen del cuerpo calloso (Habid y cols., 1991; O'Kusky y cols., 1988; Witelson, 1989).

Así pues, las investigaciones sobre los cambios que produce la práctica de la música tanto a nivel estructural como funcional (Chen y cols., 2009; Halwani y cols., 2011), demuestran que se modifican las mismas estructuras cerebrales que se utilizan para expresar el lenguaje observándose principalmente dichos cambios en el hemisferio derecho. Teniendo en consideración los estudios anteriores se podría pensar que la red audio-motora encargada del procesamiento de la música (Chen y cols., 2009), y concretamente más lateralizada en el hemisferio derecho, podría tener una mayor implicación en las tareas de procesamiento del lenguaje en los músicos.

Teniendo en consideración la literatura previa sobre el impacto de la música en el cerebro, el objetivo principal de este estudio fue investigar si la predisposición a la música o el entrenamiento musical puede producir cambios en la dominancia hemisférica para el lenguaje. Las hipótesis que nos planteamos para este estudio fueron: a) los músicos diestros deberían tener el lenguaje más lateralizado en el hemisferio derecho y más bilateral que los controles diestros; b) los músicos zurdos deberían tener el lenguaje más lateralizado en el hemisferio derecho y más bilateral que los controles zurdos; y c) los músicos zurdos tendrán el lenguaje más lateralizado en el hemisferio derecho y más bilateral que los músicos diestros.

1. METODOLOGÍA

1.1. Participantes

Noventa y cuatro participantes colaboraron en este estudio, aunque debido a algunos contratiempos durante las sesiones de fMRI finalmente han participado en el estudio noventa y dos. Entre los cuales 34 son músicos zurdos, 18 músicos diestros, 20 zurdos no músicos, y 20 diestros no músicos. Mujeres son 34 y hombres 58, y la edad de los sujetos está entre 18 y 27 años, con unas condiciones y capacidades neuropsicológicas y psiquiátricas normales. Antes de la realización del experimento todos los participantes firmaron el consentimiento para la realización de las pruebas. La participación en este estudio fue monetariamente recompensada.

El requisito que utilizamos para considerar que fuesen músicos consistía en que habían de tener realizados estudios musicales durante al menos nueve años. Durante la realización del estudio el 96% de los participantes músicos estaban tocando, y todos habían realizado estudios musicales oficiales en el conservatorio con una media \pm desviación estándar, duración de $10 \pm 1,7$ años. Con respecto a los no músicos ninguno de ellos había tocado nunca un instrumento musical.

Para conocer la variable de la lateralidad cada participante manifestó su preferencia y fueron evaluados con el cuestionario de lateralidad de Edinburgh (Oldfield, 1971). El cuestionario de lateralidad de Edinburg sirve para cuantificar la dominancia manual basada en la preferencia de las manos para diferentes acciones. El inventario puede ser utilizado por el investigador que evalúa a la persona, o por una persona que se evalúe a sí misma.

Por otra parte, no se obtuvieron diferencias significativas entre grupos en cuanto al género ($\chi^2 = 1,494$; $P > 0,05$), y edad ($F = 0,771$, $p > 0,05$). Asimismo, las diferencias en lateralidad manual entre músicos y no músicos no fueron significativas (diestros: $t = -0,61$,

$p > 0,05$; zurdos: $t = -1,11$, $p > 0,05$). A continuación, en la Tabla 9 se incluye información adicional de los participantes.

Tabla 9. Información demográfica y clínica adicional de los participantes. Diferencias entre grupos en sexo, edad y la puntuación de Edimburgo (entre los diestros y entre los zurdos) fueron descartadas utilizando respectivamente una prueba χ^2 de Pearson, una ANOVA unidireccional y dos pruebas t.

Grupo	Participantes	Edad Media ± DE (rango)	Género	EdimburgoMedia ± DE (rango)
Controles diestros	n=20	21,2 ± 2,4 (18-25)	11 hombres, 9 mujeres	16,6 ± 3,3 (11-22)
Controles zurdos	n=20	21,2 ± 2,2 (18-27)	12 hombres, 8 mujeres	40,9 ± 6,7 (26-50)
Músicos diestros	n=18	20,4 ± 1,8 (18-23)	11 hombres, 7 mujeres	16,7 ± 4 (10-22)
Músicos zurdos	n=34	20,5 ± 2 (18-26)	24 hombres, 10 mujeres	42,7 ± 4,9 (30-50)
TOTAL	n=92	20,7 ± 2,1 (18-27)	58 hombres, 34 mujeres	31,6 ± 13,5 (10-50)

DE= Desviación Estandar

1.2. Materiales

1.2.1. Cuestionario de lateralidad de Edinburgh

El cuestionario de lateralidad de Edinburgh (Oldfield, 1971) es un cuestionario que mide la dominancia manual dependiendo de la preferencia en realizar determinadas acciones en el día a día. La puntuación puede oscilar entre 10 y 50, siendo la puntuación de 10 extremadamente diestro y la de 50 extremadamente zurdo.

1.2.2. Tarea

Los participantes realizaron durante la sesión de resonancia magnética una tarea de Generación Verbal. Esta tarea consiste en un diseño de bloques con dos condiciones: una de control (C) y otra de activación (A) (Sanjuán y cols., 2010). En la condición de control (C), se presentaron dos consonantes (por ejemplo ++X+T+) que los participantes

solamente tenían que leer las consonantes, presentando un estímulo cada 3 segundos y con una duración de 30 segundos en cada bloque. Durante la condición de activación (A) se presenta cada 3 segundos una palabra a la que tienen que asociarle un verbo, (por ejemplo, al visualizar la palabra "avión", pueden responder "volar"), con una duración de 30 segundos en cada bloque. La tarea se compone de un período de fijación de 6 segundos seguido por seis bloques de control y seis bloques de activación que se presentan alternativamente. Previamente a la entrada de la máquina de resonancia todos los participantes ensayaron la tarea a realizar, y se les indicó que intentaran realizar los mínimos movimientos posibles con la boca para evitar posibles artefactos causados por el movimiento.

1.3. Adquisición de las imágenes

Las imágenes se obtuvieron mediante un escáner Philips Achieva de 3-T. Se adquirió un volumen en 3D de alta resolución de todo el cerebro para cada participante utilizando una secuencia MPRAGE potenciada en T1 (TR / TE = 8,4 / 3,8 ms, matriz = 320 x 320 x 250, tamaño del vóxel = 0,75 x 0,75 x 0,8 mm). Para las imágenes funcionales, se adquirió una secuencia gradiente-eco T2* echo-planar de 150 volúmenes (TR / TE = 2500/80 ms, matriz = 80 x 80 y tamaño del vóxel = 3 x 3 x 4 mm). Se adquirieron treinta y un cortes axiales intercalados, paralelos a la comisura anterior y posterior (AC-PC) cubriendo todo el cerebro.

1.4. Procesamiento de imágenes

Utilizamos el programa BrainVoyager QX versión 2.8 (Goebel y cols., 2006; Goebel, 2014) para el procesamiento, manejo y análisis de los datos de neuroimagen.

Dicho programa no soporta solo datos anatómicos, sino también datos funcionales (fMRI, DTI, EEG y MEG). El uso de este software sobre otras opciones populares como SPM12 se debe a que el procesamiento y análisis de BrainVoyager es más adecuado en el nivel de un solo sujeto. El preprocesamiento incluyó los siguientes pasos: corrección lineal del tiempo; corrección de movimiento 3D trilineal; suavizado espacial con un filtro Gaussiano de 6 mm; filtro temporal de paso alto con base de Fourier conjunto de 2 ciclos. El procesamiento consistió en el corregistro automático y manual de la imagen T1 a la imagen funcional. Finalmente, se definió el modelo lineal general de la tarea de generación verbal y se visualizaron las imágenes de RMf para cada participante con los siguientes parámetros: señal BOLD positiva (mostrando incrementos de señal BOLD en condiciones de activación frente a condiciones de control), $k = 40$ (mostrando clusters de 40 o más vóxels) y $FDR = 0,01, 0,005$ y $0,001$ (tasa de descubrimiento falso, una corrección estadística para el problema de comparación múltiple que funciona de manera similar a la corrección de la tasa de error de tipo familiar de Bonferroni (Goebel y cols, 2006; Nichols, 2014). Un FDR adicional de 0,05 fue contemplado para los participantes en los que no se encontraba actividad cerebral con el anterior umbral (hemos utilizado este umbral solo para cuatro participantes).

1.5. Procedimiento

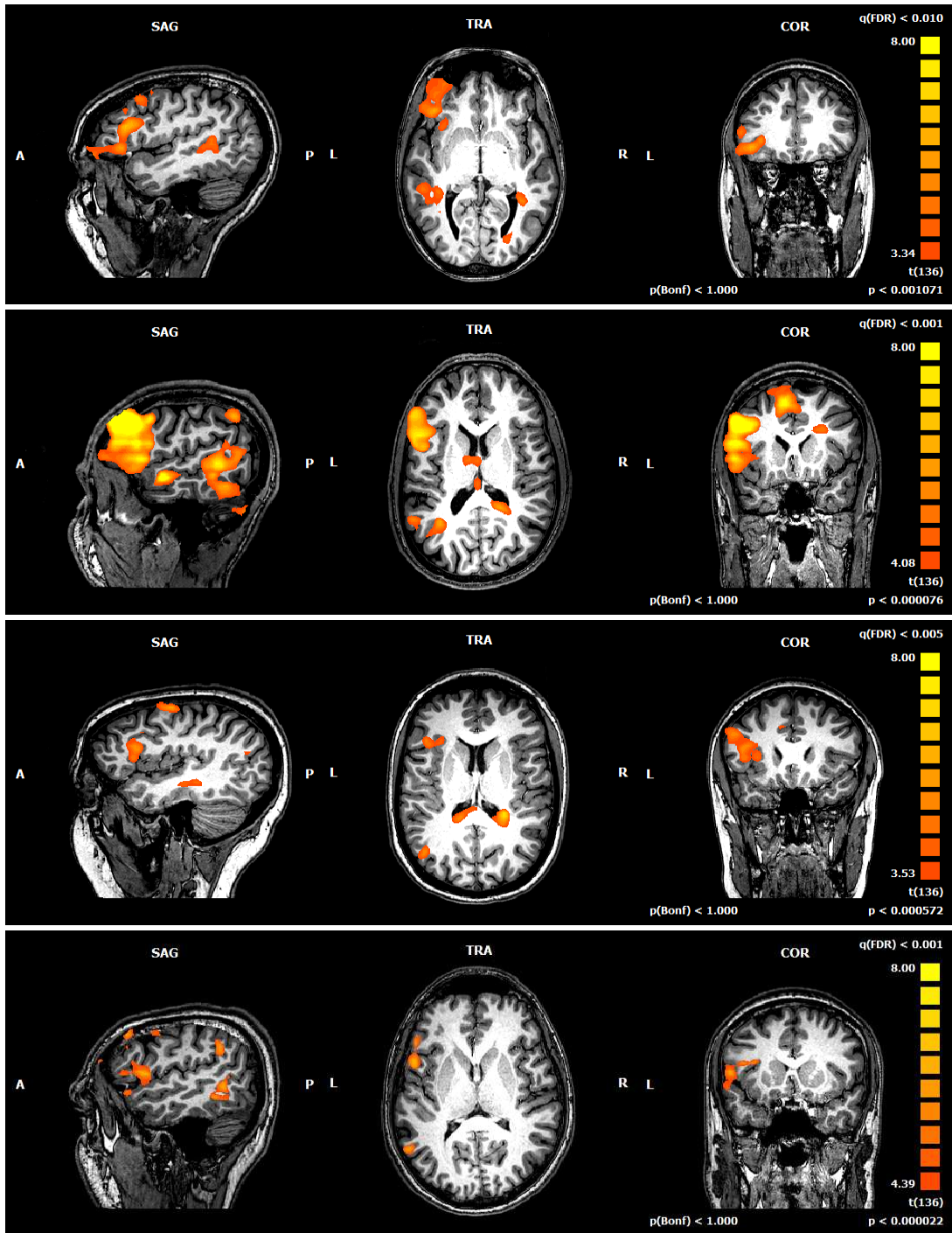
La estructura general de este estudio fue la siguiente: muestreo, obtención de datos mediante imágenes de RMf durante la tarea de generación verbal, procesamiento de los datos RMf, evaluación de la lateralización del lenguaje para cada participante y análisis de los resultados. Una vez se clasificaron todos los participantes de este estudio en uno de los cuatro grupos se procedió a obtener los datos de neuroimagen. Los participantes fueron citados uno por uno, y pasaron por una sesión de resonancia magnética donde se obtuvo

una imagen estructural 3D, junto con los datos de RMf durante la tarea de generación verbal. Los estímulos visuales fueron presentados dentro del escáner usando unas gafas compatibles con la resonancia (Resonance Technologies, EE.UU), y las respuestas verbales de los participantes fueron grabadas mediante un micrófono compatible que cancela el ruido del escáner (FOMRI, Optoacoustic, Israel). Después de procesar individualmente los datos de las imágenes de la tarea de generación verbal, pasamos a la tarea principal de este estudio que consistía en evaluar la lateralización hemisférica del lenguaje para cada participante en base a sus imágenes cerebrales. Para cada participante, se evaluó si su actividad cerebral observada era la de una lateralización del lenguaje en el hemisferio izquierdo, en el hemisferio derecho, en ambos hemisferios con tendencia a la izquierda, o en ambos hemisferios con tendencia a la derecha. Para ello, se realizaron tres juicios diferentes para cada participante (uno por cada umbral FDR) y el resultado más frecuente de los tres se concluyó como la lateralización hemisférica del lenguaje de ese participante. El criterio que se utilizó para evaluar la dominancia del lenguaje en cada juicio fue en qué hemisferio pudimos observar activaciones en el área de Broca (áreas de Brodmann 44 y 45), conocida dicha área como una región del cerebro involucrada en la producción y articulación del lenguaje, y por lo tanto, bastante activa durante la tarea de generación verbal (Sanjuán y cols., 2010). Así, los participantes con lateralización hemisférica izquierda del lenguaje mostrarían activación en el área de Broca izquierda, mientras que los participantes con lateralización hemisférica derecha mostrarían activación en el área de Broca derecha. En aquellos casos donde la actividad cerebral se podía ver en ambos hemisferios cerebrales (lenguaje bilateral), la definimos como "tendencia al hemisferio izquierdo" y "tendencia al hemisferio derecho" basada en cuál de las dos tenía más significación estadística (y presumiblemente, más activación). Los casos definidos como "nulos" fueron en los que no observamos ninguna activación en ninguna de las áreas

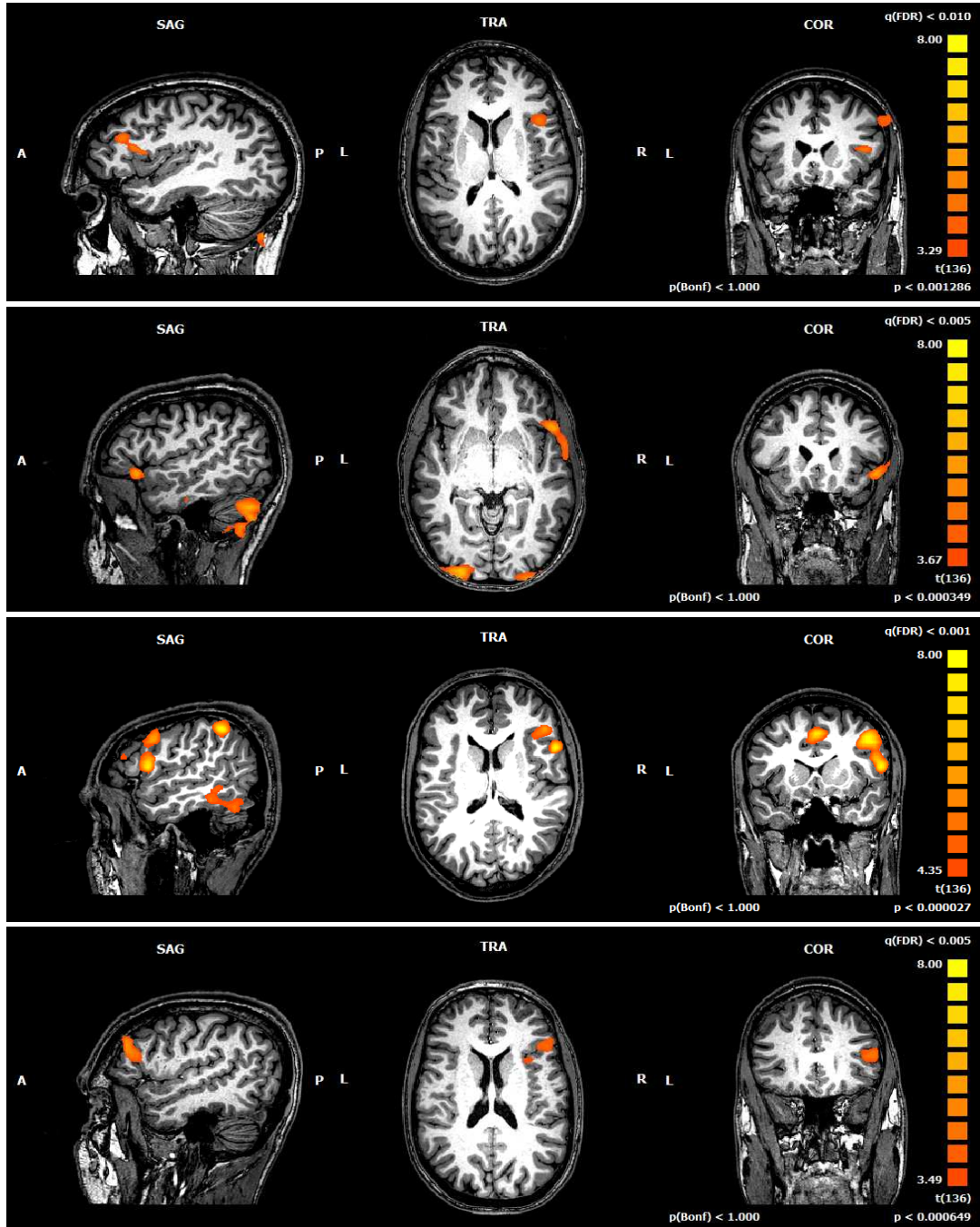
de Broca, y en la que fue necesario utilizar un umbral FDR adicional de 0,05. Todo este paso de juicio fue analizado por segunda vez por una persona diferente, por lo que podríamos medir la confiabilidad de nuestra evaluación. Utilizamos el coeficiente Kappa de Cohen, una estadística que evalúa la puntuación de acuerdo entre dos jueces en una variable categórica tomando en cuenta los acuerdos por casualidad. Nuestra evaluación alcanzó un Kappa de Cohen de (i) .85 en FDR = 0.001 ($p < 0.001$); (ii) .79 en FDR = 0,005 ($p < 0,001$); (iii) 0,83 en FDR = 0,01 ($p < 0,001$); Y (iv) 0,74 en FDR = 0,05 ($p < 0,05$). El Kappa de Cohen para la conclusión sacada de cada participante fue 0,82 ($p < 0,001$). Según McHugh (2012), todos nuestros juicios mostraron un fuerte nivel de acuerdo (0,80 - 0,90), excepto para los umbrales FDR de 0,005 y 0,05 que mostraron un nivel moderado de acuerdo (0,60 - 0,79).

Es importante señalar que, para evitar el sesgo por parte del observador, todo el procesamiento y análisis de los datos de neuroimagen, así como la evaluación de la lateralización del lenguaje, se hicieron de manera totalmente ciega, es decir, los evaluadores no sabían a qué grupo pertenecía cada participante. A continuación, se pueden encontrar algunos ejemplos de las imágenes funcionales donde se observan los diferentes criterios de evaluación de la dominancia del lenguaje.

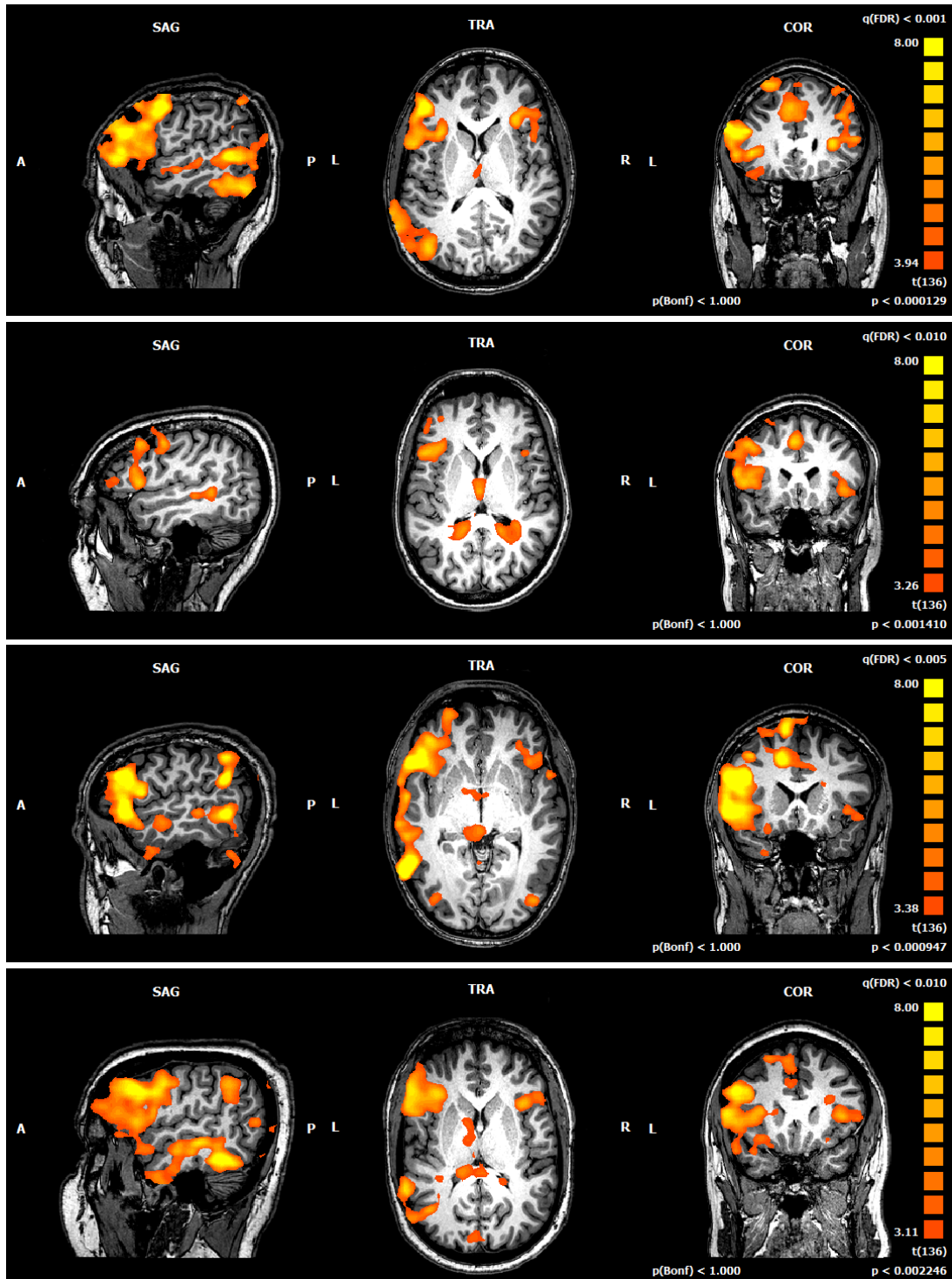
Ejemplo de cortes sagital, axial y coronal de cuatro participantes en función de lenguaje categorizada como izquierda. Imágenes adquiridas con Brain Voyager QX 2.8.



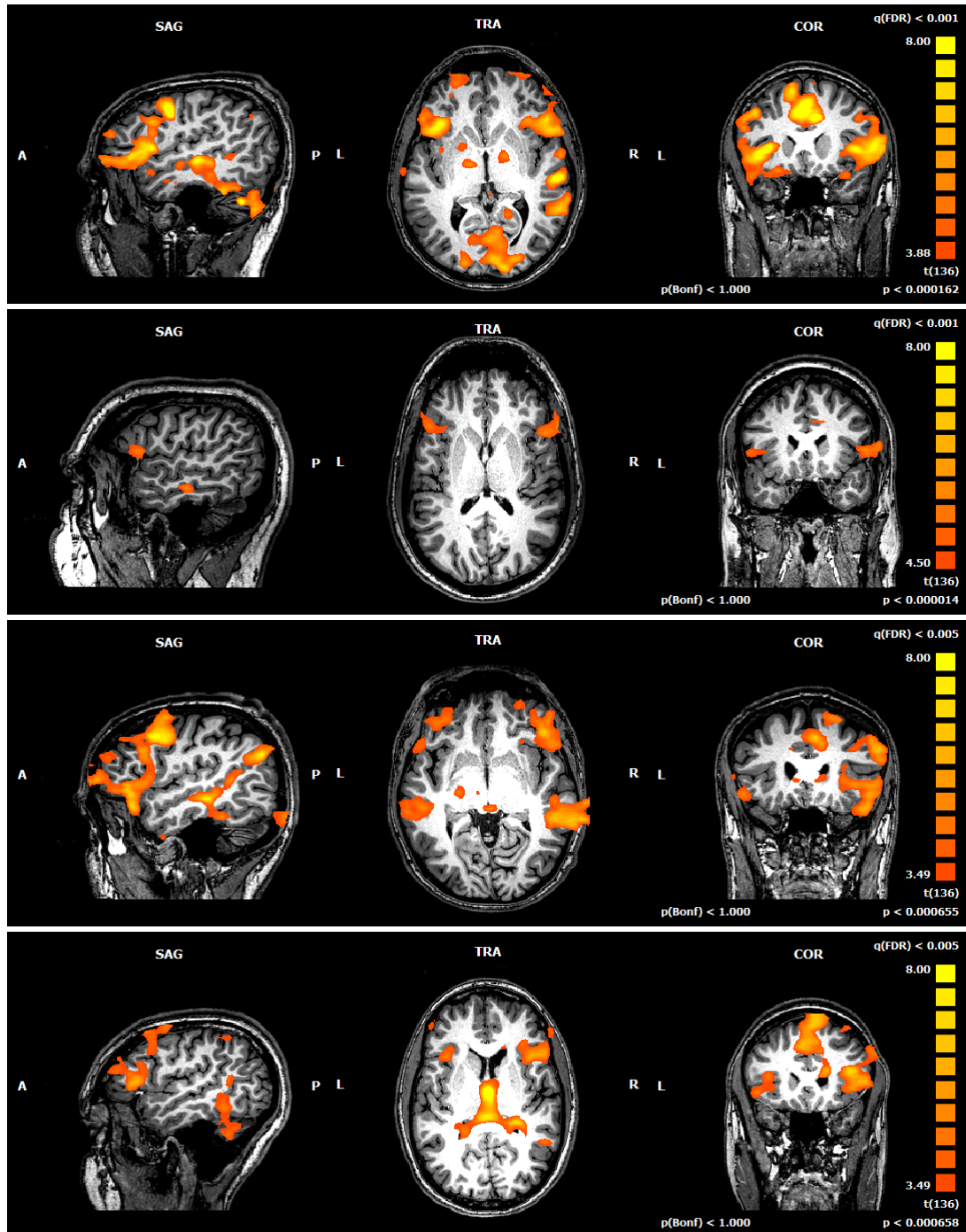
Ejemplo de cortes sagital, axial y coronal de cuatro participantes con función de lenguaje categorizada como derecha. Imágenes adquiridas con BrainVoyager QX 2.8.



Ejemplo de cortes sagitales, axiales y coronales de cuatro participantes con función lingüística categorizada como bilateral con tendencia a la izquierda. Imágenes adquiridas con BrainVoyager QX 2.8.



Ejemplo de cortes sagitales, axiales y coronales de cuatro participantes con función lingüística categorizada como bilateral con tendencia a la derecha. Imágenes adquiridas con BrainVoyager QX 2.8.



1.6. Análisis de los datos funcionales

En primer lugar, se realizó una prueba χ^2 de Pearson para ver si las tres variables (lateralización del lenguaje, entrenamiento musical y lateralidad manual) eran independientes. Durante todos los cálculos de las pruebas de χ^2 de Pearson, si el 20% o más de las frecuencias esperadas fueron inferiores a 5, se aplicó la prueba exacta de Fisher en lugar de la prueba χ^2 de Pearson.

Posteriormente, se analizó la distribución de la lateralización del lenguaje según la lateralización manual y la formación musical: (1) para evaluar si había lateralizaciones más atípicas en músicos diestros que en controles diestros, se utilizó una prueba exacta de Fisher; (2) para evaluar si había lateralizaciones más atípicas en músicos zurdos que en controles zurdos, se utilizó la prueba χ^2 de Pearson; (3) para evaluar si había más lateralizaciones atípicas en músicos zurdos que en músicos diestros, se utilizó también la prueba χ^2 de Pearson. Además, se calculó el índice de probabilidad como una medida del tamaño del efecto en los casos en que se rechazó la hipótesis nula (distribución homogénea).

Se realizaron análisis post-hoc (tres ANOVAs de un factor y una prueba exacta de Fisher), entre los cuatro grupos divididos por lateralización hemisférica del lenguaje (izquierda y derecha) para verificar si había diferencias en relación con: edad, sexo, o la puntuación de Edimburgo. Se realizaron análisis adicionales (tres ANOVAs de un factor y una prueba exacta de Fisher), entre todos los grupos de músicos, divididos además por lateralización hemisférica del lenguaje para comprobar si había diferencias en relación con: edad de inicio de la formación musical, total de años tocando un instrumento musical, número de horas de práctica con un instrumento musical durante su vida, y la digitación del instrumento principal pudiendo ser esta manual o bimanual.

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 20.

2. RESULTADOS

En relación a los resultados conductuales de la Tarea de Generación Verbal del conjunto de toda la muestra, revelan que los participantes han acertado el 95,71%, el 0.21% son errores, y el 4,08% representa el porcentaje de omisiones.

Los resultados de la evaluación de la lateralización hemisférica del lenguaje se pueden observar en las Tablas 10 y 11. Los resultados obtenidos en este estudio reflejan que todos los controles diestros presentaron la lateralización del lenguaje en el hemisferio izquierdo, pudiendo ser esta activación de manera total o bilateral. Así mismo, los músicos diestros obtuvieron resultados semejantes, exceptuando a dos participantes que manifestaron la activación del lenguaje en el hemisferio derecho. Por otro lado, la mayoría de los controles zurdos mostraron la dominancia del lenguaje en el hemisferio izquierdo, exceptuando a tres participantes que mostraron la activación del lenguaje bilateral con tendencia a la derecha. Finalmente, en cuanto a los músicos zurdos, mostraron las diferencias más notables con relación a la distribución del lenguaje, debido a que diecinueve participantes mostraron una activación del lenguaje total o bilateral en el hemisferio izquierdo, y en cambio los otros quince participantes presentaron una activación del lenguaje total o bilateral en el hemisferio derecho (ver tabla 11).

Tabla 10. Resultados de la evaluación de la lateralización hemisférica del lenguaje para todos los participantes, organizados por grupos.

Grupo Lateralidad	Grupo Músicos	n (grupo %)	n (grupo %)	n (grupo %)	n (grupo %)
		Lenguaje Izquierda	Lenguaje Predominio Izquierdo	Lenguaje Derecha	Lenguaje Predominio Derecho
Diestros	Controles	8 (40%)	12 (60%)	---	---
	Músicos	10 (55,6%)	6 (33,4%)	1 (5,5%)	1 (15%)
Zurdos	Controles	6 (30%)	11 (55%)	---	3 (15%)
	Músicos	12 (35,3%)	7 (20,6%)	6 (17,6%)	9 (26,5%)

En esta investigación, observamos que algunos participantes mostraron activación del lenguaje a nivel bilateral y se optó por englobar las categorías lingüísticas bilaterales en su correspondiente tendiente derecha o izquierda. A continuación, en la Tabla 11 podemos observar los resultados de la lateralización hemisférica del lenguaje una vez realizada la fusión. Posteriormente, los análisis estadísticos siguientes se realizarán en función a estas categorías.

Tabla 11. Resultados de la evaluación de la lateralización hemisférica del lenguaje para todos los participantes organizados por grupos. Obsérvese que las categorías de lateralización del lenguaje bilateral se han fusionado con sus categorías de tendencia.

Grupo Lateralidad	Grupo Músicos	n (grupo %)	n (grupo %)
		Lenguaje izquierda (fusionado)	Lenguaje derecha (fusionado)
Diestros	Controles	20 (100%)	---
	Músicos	16 (88,9%)	2 (11,1%)
Zurdos	Controles	17 (85%)	3 (15%)
	Músicos	19 (55,9%)	15 (44,1%)

Los resultados revelan que no hay independencia entre lateralidad manual, el entrenamiento musical y lateralización del lenguaje ($\chi^2 = 21,52$; $p < 0,001$). Además, la lateralización del lenguaje entre los músicos y controles diestros no pudo ser rechazada (Fisher exacto $p = 0,218$). En cambio, la distribución homogénea de la lateralización hemisférica entre los músicos y los controles zurdos fue rechazada (Pearson's $\chi^2 4,474$; $P < 0,05$), siendo mayores las lateralizaciones del lenguaje en el hemisferio derecho entre los músicos zurdos con un índice de probabilidad de 4,47 [IC del 95% = (1,1 - 18,17)]. Así mismo, se rechazó la distribución homogénea de la lateralización hemisférica del lenguaje entre músicos diestros y músicos zurdos (χ^2 de Pearson = 5,827; $p < 0,05$), siendo mayores las lateralizaciones del lenguaje en el hemisferio derecho entre músicos zurdos con un índice de probabilidad de 6,32 [IC del 95% = (1,25 - 31,86)].

Después, se llevaron a cabo los análisis entre los cuatro grupos distribuidos en función de la lateralización hemisférica del lenguaje (lateralizado en la derecha y lateralizado en la izquierda). Las variables que se estudiaron fueron la puntuación de Edinburgo, la edad y el sexo, no encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre ellas como podemos apreciar en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de los análisis adicionales de variables entre: controles diestros lateralizados izquierda, y controles zurdos lateralizados en la izquierda, controles zurdos lateralizados en la derecha, músicos diestros lateralizados en la derecha e izquierda, y músicos zurdos lateralizados en la izquierda y derecha.

Variabes	Valor estadístico	p value	significación (p < 0,05)
Edad	F = 1,185	0,322	No
Sexo	Valor exacto de Fisher	0,867	No
Puntuación Edinburg (diestros)	F = 0,643	0,532	No
Puntuación Edinburg (zurdos)	F = 1,291	0,288	No

Además, también exploramos si había diferencias entre todos los grupos de músicos, divididos según la lateralización hemisférica del lenguaje, analizando las siguientes variables: total de años tocando el instrumento, la edad de inicio en las enseñanzas musicales, el total de horas durante su vida tocando el instrumento, y la digitación manual o bimanual del instrumento principal. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas como podemos apreciar en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de los análisis adicionales de variables entre: músicos diestros con el lenguaje lateralizado a la izquierda y derecha, y músicos zurdos con el lenguaje lateralizado a la izquierda y derecha.

Variables	Valor estadístico	p value	significación (p < 0,05)
Edad de inicio en la formación musical	F = 0,055	0,983	No
Total de años tocando un instrumento musical	F = 1,389	0,257	No
Total de horas tocando el instrumento musical	F = 0,528	0,665	No
Digitación del instrumento principal	Valor exacto de Fisher	0,909	No

4. DISCUSIÓN

Los estudios que se han presentado en esta tesis doctoral pretenden contribuir a conocer cuál es el impacto de la música en el cerebro atendiendo tanto a los efectos madurativos como a los de la instrucción musical. Estos estudios se han llevado a cabo en muestras tanto de adultos con y sin formación musical (Estudios 1 y 3) como en niños que van a iniciar sus estudios de conservatorio (Estudio 2). Nuestros resultados nos han servido para encontrar las áreas cerebrales que están implicadas en la discriminación sonora, los cambios que produce la educación musical en músicos con diferente dominancia manual, y finalmente estudiar si el tamaño del córtex auditivo en los niños que empiezan las enseñanzas musicales puede predecir las aptitudes musicales, con la intención de ofrecer una visión general de los resultados obtenidos. Nos planteamos si las diferencias encontradas en el cerebro de músicos y no músicos se deben a la formación musical o a las características previas al mismo. Por tanto, nuestro objetivo es comprobar si es la educación musical o las características del individuo las que determinan los cambios cerebrales asociadas al hecho de ser músico, concluyendo que ambos, pero en mayor proporción los segundos, son los que determinan los efectos.

En el primer estudio investigamos si la relación entre los cambios cerebrales y la discriminación auditiva es coincidente con las alteraciones estructurales que se atribuyen a la formación musical. Pudimos observar que los músicos obtenían mejores puntuaciones en tareas de discriminación auditiva que los no músicos utilizando la prueba de discriminación de tonos de Jake Mandell. Para analizar los datos hemos utilizado la técnica de morfometría basada en el vóxel que nos ha permitido conocer las regiones cerebrales involucradas en la discriminación y la expresión musical. Los resultados han mostrado un patrón diferencial de respuesta en función del grupo estudiado. La morfometría basada en vóxel ha sido utilizada previamente en diversas investigaciones con la finalidad de conocer

los cambios cerebrales producidos por el entrenamiento musical (Foster y Zatorre, 2010; Palomar-García y cols., 2017; Schlaug y cols., 1995; Schneider y cols, 2002).

El resultado más novedoso entre los encontrados es que en el grupo control se observa una correlación positiva entre el volumen del giro temporal superior izquierdo y la capacidad de discriminación auditiva. Este resultado es relevante debido a que en un estudio realizado por Mandell y cols. (2007) con participantes no músicos, también observaron que el giro temporal superior izquierdo estaba implicado en las tareas de discriminación melódica. Por tanto, estos resultados podrían indicarnos que la formación musical no incide directamente en el tamaño del córtex auditivo. Este aspecto queda refrendado por el hecho de que esta relación no se produce en el grupo de músicos, ya que en los músicos los aspectos relacionados con la discriminación musical se correlacionan con el volumen de áreas frontales derechas involucradas en la ejecución. De modo que, el análisis de los grupos por separado parece mostrar que las diferencias en zonas auditivas se asocian en mayor medida a una mayor aptitud musical mientras que la instrucción musical ejerce su influencia en zonas frontales como consecuencia de los aprendizajes audio-motores. Este efecto explicaría por qué las diferencias auditivas entre músicos y no músicos se encuentran sólo en algunos estudios (Vaquero y cols. 2016) ya que las características del grupo control podrían predisponer hacia una mejor discriminación musical. De alguna manera, no todas las personas con una buena discriminación auditiva estudian música.

Este factor queda en parte corroborado cuando se estudia la muestra completa juntando la muestra de músicos y controles. Los resultados de este análisis mostraron una correlación significativa con un mayor aumento de sustancia gris en el giro temporal superior a nivel bilateral, en el giro frontal inferior derecho (IFG_R), y en el giro de Heschl a nivel bilateral, no correlacionándose con el giro frontal inferior izquierdo (IFG_L).

Dichas diferencias a nivel estructural también se mostraron en estudios previos donde se argumentaron las diferencias cerebrales entre los músicos y no músicos (Palomar-García y cols., 2017; Sussman y cols., 1998; Zatorre y cols., 2007; Zatorre y Peretz, 2005). En general, los músicos tienen mejores aptitudes musicales y mejor discriminación. Nuestros resultados muestran por ello una asociación entre el volumen en las zonas cerebrales que se relacionan con el procesamiento musical y mejor discriminación auditiva.

Las diversas investigaciones realizadas para conocer las bases neurales del procesamiento de la música, y concretamente las áreas cerebrales implicadas en los procesos de discriminación auditiva, ponen de manifiesto la importancia de la red audio-motora (Bangert y cols., 2006; Chen y cols., 2008; Parson y cols., 2005; Palomar y cols., 2017; Sluming y cols., 2002; Zatorre, 2003; Zatorre, 2005; Zatorre y cols., 2007). Además, los cambios observados en las áreas cerebrales implicadas en dicha red audio-motora como la corteza auditiva y la corteza premotora ventral tienen un mayor tamaño en los músicos manifestando dichas evidencias que los efectos madurativos como el entrenamiento musical producen cambios en el cerebro y principalmente en las áreas implicadas en esta red audio-motora. Asimismo, también pudimos corroborar en nuestra investigación que las áreas cerebrales como el giro temporal superior a nivel bilateral, el giro frontal inferior derecho (IFG_R), y el giro de Heschl a nivel bilateral están implicados en los procesos de procesamiento musical, reafirmando con ello la importancia de la red audio-motora en los procesos de procesamiento y percepción musical.

En el **segundo estudio** queríamos conocer si las modificaciones cerebrales encontradas en los niños que estaban empezando los estudios musicales son debidas a la maduración y/o al aprendizaje musical. Para ello, investigamos si las diferencias de volumen de sustancia gris se asocian a las diferencias individuales en la aptitud para la realización de estudios musicales en niños que están empezando estudios reglados de

música en el conservatorio y tras un año de aprendizaje. De modo que, utilizamos la RM estructural para conocer si el volumen de sustancia gris en niños que no habían recibido previamente ningún entrenamiento musical se correspondía con una mayor aptitud en la realización de una prueba de percepción auditiva denominada Jake Mandell Tone Deaf Test (JMTDT), y las diversas pruebas que conforman el denominado Test de Aptitud Musical que mide el nivel de aptitud musical para acceder a las enseñanzas elementales de música. Además, queríamos también conocer qué cambios produce el entrenamiento musical en niños que están realizando estudios musicales, y si las áreas encargadas del procesamiento de la música están ya preparadas para poder asimilar las enseñanzas musicales o se desarrollan debido a la práctica musical.

En primer lugar, se observó que un mayor volumen de sustancia gris en el **giro angular** y en el **giro temporal superior** derechos se asociaba a una mejor ejecución en la prueba de imitación melódica. Los resultados que hemos obtenido están en consonancia con los estudios que demuestran que el giro temporal superior está implicado en tareas de reconocimiento melódico e imitación melódica (Zatorre y cols., 1994; Zatorre y Salimpoor, 2013) En segundo lugar, se observó un mayor volumen de sustancia gris en el **giro parietal inferior izquierdo, giro angular derecho; y en el giro fusiforme a nivel bilateral** que se correlacionaba con una con una mayor puntuación en la variable tono (compuesta por la media entre las pruebas de la discriminación tonal, la memoria tonal y la imitación melódica), coincidiendo dichos resultados con datos previos donde también demostraron que el giro temporal superior derecho estaba implicado en tareas de discriminación melódica y rítmica (Schlaug y cols., 2005).

A continuación, en el restest se sumarían los efectos conjuntos de maduración y aprendizaje puestos de manifiesto después de un periodo de un año de enseñanzas regladas de música, y pudimos comprobar un mayor volumen de sustancia gris en la **ínsula derecha**

que estaba relacionado con una mejor ejecución en la realización de pruebas de memoria rítmica. Un estudio reciente ha relacionado específicamente las lesiones en la ínsula con la amusia (Sihvonen y cols., 2016). Además, también hemos observado un mayor volumen de sustancia gris **en el giro de Heschl/giro temporal superior derechos** que estaba relacionado con una mayor puntuación total del test musical. Dichas diferencias morfológicas que se han encontrado son consistentes con estudios previos donde se ha destacado la importancia de la **corteza auditiva primaria o giro de Heschl** para el procesamiento de la música, el tamaño de los intervalos musicales y el dibujo melódico de la música (Bermudez y cols., 2009; Gaser y Schlaug, 2003; Hyde y cols., 2009; Klein y Zatorre, 2011; Lee y cols., 2011; Palomar-García y cols., 2017; Schneider y cols., 2002).

Finalmente, con respecto a los efectos del aprendizaje musical pudimos comprobar que al cabo de un año de entrenamiento musical se encontró un mayor volumen de sustancia gris en **el giro rolándico opercular** derecho (área premotora) en la realización de pruebas de memoria tonal coincidiendo dichos resultados con los estudios previos donde se evidencia la implicación de esta área cerebral en la memorización de la música (Platel y cols., 1997; Watanabe y cols., 2008). Asimismo, también se demostró un mayor volumen de sustancia gris en **el giro de Heschl derecho** y en **el giro frontal inferior orbital** a nivel bilateral que se relacionaba con la mejor ejecución en la prueba de imitación melódica. Dichos resultados están en consonancia con estudios previos que destacan la implicación del giro de Heschl y el giro frontal inferior en tareas musicales relacionadas con la imitación melódica (Gaab y cols., 2003; Klein y Zatorre, 2011; Lee y cols., 2011; Peretz y Zatorre 2007; Tillmann y cols., 2003; Watanabe y cols., 2008; Zatorre y cols., 1994). Así mismo, se demostró un mayor volumen de sustancia gris en **el giro temporal superior a nivel bilateral (abarcando el giro de Heschl), y llegando hasta el giro supramarginal** que se relacionaba con una mayor puntuación en la variable

tono (compuesta por la media entre las pruebas de la discriminación tonal, la memoria tonal, y la imitación melódica). Estas evidencias están en consonancia con estudios previos que demuestran una relación de dichas áreas cerebrales en tareas de discriminación e imitación sonora (Klein y Zatorre, 2011; Lee y cols., 2011; Palomar-García y cols., 2017; Schlaug y cols., 2005; Schneider y cols., 2002; Zatorre y Salimpoor, 2013; Zhao y Kuhl, 2016). Además, se observó un mayor volumen de sustancia gris **en el giro frontal inferior orbital derecho**, coincidiendo estos resultados con estudios previos que implican a dicha área cerebral en la escucha y emisión musical (Lee y cols., 2011; Klein y Zatorre, 2011; Tillmann y cols., 2003; Watanabe y cols., 2008). Así pues, también se observó un mayor volumen de sustancia gris en **el área motora suplementaria derecha**, estando estos resultados en consonancia con investigaciones previas que demuestran la implicación de esta área motora en los procesos de escucha de la música (Chen y cols., 2008). Sin embargo, se demostró un menor volumen de sustancia **gris en el giro temporal medio izquierdo** en pruebas de imitación melódica. Estas evidencias están en consonancia con estudios previos como el de Seither-Preisler y cols. (2014), debido a que en nuestra investigación hemos considerado por separado los cambios neurales debidos a la predisposición genética implicando principalmente a zonas auditivas, de las variaciones neurales producidas por el aprendizaje musical viéndose involucradas tanto zonas auditivas como motoras.

En el tercer estudio nuestro propósito fue investigar si el entrenamiento musical podía influir en la lateralización del lenguaje. De modo que, utilizamos la RMf para conocer si existían diferencias con relación a la lateralización del lenguaje entre músicos diestros y zurdos. Nuestros resultados demostraron que la lateralización del lenguaje en el hemisferio derecho fue más numerosa en los músicos, principalmente se manifestó en los músicos zurdos, debido a que quince músicos zurdos de un total de treinta y cuatro

presentaron una activación total o bilateral del lenguaje en el hemisferio derecho, no encontrando dicha lateralización del lenguaje en el hemisferio derecho en los músicos diestros. Así pues, los resultados que obtuvimos en esta investigación nos hicieron pensar en que, estos cambios de lateralización del lenguaje en los músicos zurdos en el hemisferio derecho podrían estar relacionados con el entrenamiento musical, aunque consideramos necesario estudiar si realmente dichos cambios en la lateralización del lenguaje en los músicos zurdos son producidos por el efecto de la formación musical, o si la lateralización del lenguaje en los zurdos es previa a la formación musical, y si cabe considerar el entrenamiento musical como una herramienta para facilitar y mejorar el procesamiento y desarrollo del lenguaje, siendo por tanto necesaria una evaluación previa y posterior a la formación musical.

Dicho descubrimiento con relación a la lateralización del lenguaje en los músicos zurdos en el hemisferio derecho, es bastante coherente con los estudios que defienden la utilización de una red audio-motora para el procesamiento de la música, al igual que sucede en el procesamiento del lenguaje, debido a que se ven involucradas las mismas áreas cerebrales (Chen y cols., 2009; Halwani y cols., 2011; Palomar-García y cols., 2017). Esta funcionalidad de dicha red audio-motora derecha en la música (Chen y cols., 2009) y su probable influencia con la red audio-motora izquierda, encargada en gran medida del procesamiento del lenguaje en los diestros (Somers y cols., 2015), podría hacernos pensar, que un mayor desarrollo de esta red audio-motora derecha en los músicos, tendría una gran influencia en el procesamiento y desarrollo del lenguaje. Por lo tanto, si tenemos en consideración que el entrenamiento musical influye de forma significativa en la lateralización y desarrollo del lenguaje, podríamos entender que el entrenamiento musical puede ser una herramienta de gran utilidad para desarrollar las habilidades lingüísticas. Por lo tanto, proponemos que sería interesante llevar a cabo en futuras investigaciones un

estudio longitudinal donde se estudie la lateralización del lenguaje antes del entrenamiento y después de un largo periodo de entrenamiento musical, con la intención de conocer los efectos de dicho entrenamiento musical en el desarrollo de las habilidades lingüísticas.

De modo que, suponiendo que los efectos del entrenamiento musical influyen en la lateralización del lenguaje, sería razonable plantearse la posibilidad de utilizar la formación musical para la mejora del lenguaje principalmente en la población zurda. Estudios previos ya habían observado la mejora de las habilidades lingüísticas en los músicos, asociando la capacidad perceptiva en tareas de discriminación del ritmo con aspectos relacionados con la percepción del lenguaje en contextos ambientalmente ruidosos (Slater y Kraus, 2016).

5. CONCLUSIONS/CONCLUSIONES

The studies carried out in this thesis lead us to reach some conclusions:

1. The auditory discrimination of sounds is associated with a greater volume of gray matter in brain areas associated with the processing of music. This relationship is observed both in the population without musical training, in which a greater volume is associated in auditory areas, as well as in the population of musicians in which it is associated with a greater volume in motor areas. The overall results show that both maturation and learning contribute to these effects.

2. The relationship between better auditory discrimination and greater gray matter volume in auditory brain areas is also observed in children without musical training, which shows that this association depends more on maturational factors.

3. Our results also reflect the effects of music training on children who are beginning musical education, producing significant changes in the increase of volume of gray matter in certain brain regions such as the lower orbital frontal gyrus, the Heschl gyrus, and the supplementary motor area. The incidence of musical learning occurs in the structure of audio-motor zones related to musical processing.

4. Musical formation in the left-handed population is associated with a higher probability of atypical language dominance in the right hemisphere. This effect could be due both to maturational effects that predispose towards musical training and to the musical formation itself.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados en esta tesis nos llevan a presentar las conclusiones siguientes:

1. La discriminación auditiva de sonidos se asocia con un mayor volumen de sustancia gris en zonas cerebrales asociadas al procesamiento de la música. Esta relación se observa tanto en población sin formación musical, en la que se asocia un mayor volumen en zonas auditivas, como en población de músicos en la que se asocia con un mayor volumen en zonas motoras. Los resultados globales muestran que tanto la maduración como el aprendizaje contribuyen a estos efectos.

2. La relación entre mejor discriminación auditiva y mayor volumen de sustancia gris en zonas cerebrales auditivas también se observa en niños sin formación musical, lo que muestra que esta asociación depende más de factores madurativos.

3. Nuestros resultados también reflejan los efectos del entrenamiento musical en niños que están empezando las enseñanzas musicales, produciendo cambios significativos en cuanto al aumento de volumen de sustancia gris en determinadas regiones cerebrales como el giro frontal inferior orbital, el giro de Heschl, y el área motora suplementaria. La incidencia del aprendizaje musical se produce en la estructura de zonas audio-motoras relacionadas con el procesamiento musical.

4. La formación musical en población zurda se asocia a una mayor probabilidad de dominancia atípica del lenguaje en el hemisferio derecho. Este efecto podría deberse tanto a efectos madurativos que predisponen hacia la formación musical como a la propia formación musical.

6. BIBLIOGRAFÍA

A

- Annett, M. (1970). A classification of hand preference by association analysis. *British Journal of Psychology*, *61*, 303–321.
- Annett, M. (1985). *Left, right, hand and brain: The right shift theory*. London, England: 643 Erlbaum.
- Annett, M. (2006). The distribution of handedness in chimpanzees: Estimating right shift in Hopkins' sample. *Laterality*, *11*, 101-109.
- Annett, M., Hudson, W., & Turner, A. (1974). The reliability of differences between the hands in motor skill. *Neuropsychologia*, *12*, 527–531.
- Amunts, K., Schlaug, G., Jäncke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A., & Zilles, K. (1997). Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain. *Human Brain Mapping*, *5*, 206-215.
- Anvari, S., Trainor, L. J., Woodside, J., & Levy, B. A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *83*(2), 111-130.
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2001). Why voxel-based morphometry should be used. *Neuroimage*, *14*(6), 1238-1243.
- Ayotte, J., Peretz, I., & Hyde, K. (2002). Congenital amusia: a group study of adults afflicted with a music-specific disorder. *Brain*, *125*, 238-251

B

- Bangert, M., & Schalug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *European Journal of Neuroscience*, *24*, 1832–1834.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., Heinze, H. J., & Altenmüller, M. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage*, *30*, 917–926.
- Balasubramanian, R., Wing, A. M., & Daffertshofer, A. (2004). Keeping with the beat: movement trajectories contribute to movement timing. *Experimental Brain Research*, *159*, 129–134.
- Battro, A. (2012). Neuroeducación: el cerebro en la escuela. *La pizarra de Babel. Puentes entre neurociencia, psicología y educación*. Buenos Aires: El Zorzal.
- Battro, A. M., & Cardinali, D. P. (1996). Más cerebro en la educación. *La Nación*, *16*.
- Bailey, J. A., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2014). Early musical training is linked to gray matter structure in the ventral premotor cortex and auditory-motor rhythm synchronization performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(4), 755-767.
- Beckmann, C. F., Deluca, M., Devlin, J. T., & Smith, S. M. (2005). Investigations into resting-state connectivity using independent component analysis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Biological Sciences*, *360*, 1001-13.
- Bemis, D. K., & Pylkkänen, L. (2011). Simple composition: a magnetoencephalography investigation into the comprehension of minimal linguistic phrases. *The Journal of Neuroscience*, *31*(8), 2801-2814.
- Bemis, D. K., & Pylkkänen, L. (2013). Combination across domains: an MEG investigation into the relationship between mathematical, pictorial, and linguistic processing. *Frontiers in Psychology*, *3*, 1-20.

- Benasich, A. A., & Tallal, P. (2002). Infant discrimination of rapid auditory cues predicts later language impairment. *Behavioural Brain Research, 136*(1), 31-49.
- Bermell, M^a. A. (2000). Programa de Intervención a través de la Interacción de la Música y el Movimiento. *Música y Educación, 44*, pp. 33- 60. Madrid.
- Bermudez, P., Lerch, J. P., Evans, A. C., & Zatorre, R. J. (2009). Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-based morphometry. *Cerebral Cortex, 19*, 1583-1596.
- Bermudez, P., & Zatorre, R. J. (2005). Differences in gray matter between musicians and nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1060*, 395-9.
- Besson, M., & Schön, D. (2001). Comparison between language and music. *Annals of the New York Academy of Sciences, 930*, 232-258.
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex, 19*, 2767-2796.
- Binder, J. R., Swanson, S. J., Hammeke, T. A., Morris, G. L., Mueller, W. M., Fischer, M., Benbadis, S., Frost, J. A., Rao, S. M., & Houghton, V. M. (1996). Determination of language dominance using functional MRI: a comparison with the Wada test. *Neurology, 46*(4), 978-984.
- Boh, B., Herholz, S., Lappe, C., & Pantev, C. (2011). Processing of complex auditory patterns in musicians and nonmusicians. *Plos One, 6*, 1-10.
- Buchsbaum, B. R., Olsen, R. K., Koch, P., & Berman, K. F. (2005). Human dorsal and ventral auditory streams subserve rehearsal-based and echoic processes during verbal working memory. *Neuron, 48*, 687-697.

- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America*, 98(20), 11818–11823.
- Brandt, A., Gebrian, M., & Slevc, L. R. (2012). Music and early language acquisition. *Frontiers in Psychology*, 3.
- Broca, P. (1861). Remarques sur le siège de faculté de langage articulé suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*. pp. 330-357.
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2004). Passive music listening spontaneously engages limbic and paralimbic systems. *Neuroreport*, 15(13), 2033-2037.
- Brown, J., Sherril, C., & Gench, B. (1981). Stimulus set and response set. The alternation of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 16, 309-317.
- Byrne, B. (1974). Handedness and musical ability. *British Journal of Psychology*, 65, 279–281.

C

- Castellanos, F. X., Margulies, D. S., Kelly, C., Uddin, L. Q., Ghaffari, M., Kirsch, A., Shaw D., Shehzad, Z., Di Martino A., Biswal, B., Sonuga-Barke E. J., Rotrosen, J., Adler, L. A., & Milham, & M. P. (2008). Cingulate-precuneus interactions: a new locus of dysfunction in adult attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 63, 332-337.
- Catani, M., Jones, D. K., & Ffytche, D. H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. *Annals of Neurology*, 57, 8-16.

- Cela-Conde, C. J., Marty, G., Maestú, F., Ortiz, T., Munar, E., Fernández, A., Roca, M., Rosselló, J., & Quesney, F. (2004). Activation of the prefrontal cortex in the human visual aesthetic perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *101*(16), 6321-6325.
- Coon, H., & Carey, G. (1989). Genetic and environmental determinants of musical ability in twins. *Behavior Genetics*, *19*(2), 183-193.
- Costa-Giomi, E. (2003). Young children's harmonic perception. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *999*(1), 477-484.
- Corriveau, K. H., & Goswami, U. (2009). Rhythmic motor entrainment in children with speech and language impairments: Tapping to the beat. *Cortex*, *45*(1), 119-130.
- Crookes, G., & Schmidt, R. W. (1991). Motivation: Reopening the Research Agenda. *Language Learning*, *41*, 469-512.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20* (2), 226-239.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2009). The role of auditory and premotor cortex in sensorimotor transformations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1169*, 15-34.
- Christman, S. (1993). Handedness in musicians: Bimanual constraints on performance. *Brain and Cognition*, *22*(2), 266-272.
- Chung, M. K., Worsley, K. J., Paus, T., Cherif, C., Collins, D. L., Giedd, J. N., Rapoport, J. L., & Evans, A. C. (2001). A unified statistical approach to deformation-based morphometry. *Neuroimage*, *14*(3), 595-606.

D

Damoiseaux, J. S., & Greicius, M. D. (2009). Greater than the sum of its parts: a review of studies combining structural connectivity and resting-state functional connectivity. *Brain Structure and Function*, *213*, 525-33.

Damoiseaux, J. S., Rombouts, S. A. R. B., Barkhof, F., Scheltens, P., Stam, C. J., Smith, S. M., & Beckmann, C. F. (2006). Consistent resting-state networks across healthy subjects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *103*(37), 13848-13853.

Dohn, A., Garza-Villarreal, E. A., Chakravarty, M. M., Hansen, M., Lerch, J. P., & Vuust, P. (2013). Gray-and white-matter anatomy of absolute pitch possessors. *Cerebral cortex*, *25*(5), 1379-1388.

Dorsch, F. (1991). *Diccionario de Psicología*. Herder. Barcelona.

Drayna, D., Manichaikul, A., de Lange, M., Snieder, H., & Spector, T. (2001). Genetic correlates of musical pitch recognition in humans. *Science*, *291*(5510), 1969-1972.

E

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*, 305–307.

Elmer, S., Hänggi, J., Meyer, M., & Jäncke, L. (2013). Increased cortical surface area of the left planum temporale in musicians facilitates the categorization of phonetic 184 and temporal speech sounds. *Cortex*, *49*, 2812-21.

Ellis, R., Norton, A., Overy, O., Winner, E., Alsop, D., & Schlaug, G. (2012). Differentiating maturational and training influences on fMRI activation during music processing. *Neuroimage*, *60*, 1902–1912.

F

Falioni, J. W. (1993). Music as Means to Enhance Cultural Awareness and Literacy in the Foreign Language Classroom. *Mid-Atlantic Journal of Foreign Language Pedagogy*, 7, 97-108.

Fodor, J. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge: MIT Press.

Fonseca, C., & García, L. (2010). Aprender español en USA: los medios de comunicación como motivación social. *Comunicar*, 17(34) 145-153.

Foster, N. E., & Zatorre, R. J. (2010). Cortical structure predicts success in performing musical transformation judgments. *Neuroimage*, 53, 26–36.

Franklin, M., Moore, K., Yip, C., Jonides, J., Rattray, K., & Moher, J. (2008). The effects of musical training on verbal memory. *Psychology of Music*, 36(3), 353-365.

Friston, K. J. (1998). The disconnection hypothesis. *Schizophrenia Research*, 30, 115-125.

Friston, K. J., Frith, C. D., Liddle, P. F., & Frackowiak, R. S. J. (1993). Functional connectivity: the principal-component analysis of large (PET) data sets. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 13, 5-14.

G

Gaab, N., Gaser, C., Zaehle, T., Jancke, L., & Schlaug, G. (2003). Functional anatomy of pitch memory an fMRI study with sparse temporal sampling. *Neuroimage*, 19, 1417-1426.

Gaab, N., Gaser, C., & Schlaug, G. (2006). Improvement-related functional plasticity following pitch memory training. *Neuroimage*, 31, 255-263.

- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of Neuroscience*, *23*:9240–45.
- Gates, A., & Bradshaw, J. L. (1977). The role of the cerebral hemispheres in music. *Brain and Language*, *4*, 403–431.
- Gazzaniga, M., Ivry, R., & Mangun, G. (2002). *Cognitive Neuroscience: The Biology of the Mind*. Estados Unidos.
- Gerry, D., Unrau, A., & Trainor, L. J. (2012). Active music classes in infancy enhance musical, communicative and social development. *Developmental Science*, *15*(3), 398-407.
- Geschwind, N., & Galaburda, A. M. (1985). Cerebral lateralization *Archives of Neurology*, *42*, 428-458.
- Goebel, R., Esposito, F., & Formisano, E. (2006). Analysis of FIAC data with BrainVoyager QX: From single subject to cortically aligned group GLM analysis and self-organizing group ICA. *Human Brain Mapping*, *27*(5), 392–401.
- Goebel, R. (2014). *Brainvoyager QX User's Guide*.
- Gómez, M. A. (2007). Música y neurología. *Neurología*, *22*(1), 39-45.
- Gómez-Ariza, C. J., Bajo, M. T., Puerta-Melguizo, M. C., & Macizo, P. (2000). Cognición musical: relaciones entre música y lenguaje. *Cognitiva*, *12*(1), 63-87.
- Göttestam, K. O. (1990). Left-handedness among students of architecture and music. *Perceptual and Motor Skills*, *70*, 1323–1327.

H

- Haber, S. N., & Knutson, B. (2010). The reward circuit: Linking primate anatomy and human imaging. *Neuropsychopharmacology*, 35(1), 4–26.
- Hackett, T. A., Stepniewska, I., & Kaas, J. H. (1998). Subdivisions of auditory cortex and ipsilateral cortical connections of the parabelt auditory cortex in macaque monkeys. *The Journal of Comparative Neurology*, 394, 475-495.
- Halwani, G. F., Loui, P., Rüber, T., & Schlaug, G. (2011). Effects of practice and experience on the arcuate fasciculus: comparing singers, instrumentalists, and nonmusicians. *Frontiers in psychology*, 2, 1-9.
- Harris, L. J. (1991). Cerebral Control for Speech in Right-Handers and Left- Handers : An Analysis of the Views of Paul Broca , His Contemporaries , and His Successors. *Brain and Language*, (40), 1–50.
- Hassler, M., & Birbaumer, N. (1988). Handedness, musical abilities, and dihaptic and dichotic performance in adolescents: a longitudinal study. *Developmental Neuropsychology*, 4, 129-145.
- Habib, M., Gayraud, D., Oliva, A., Regis, J., Salamon, G., & Khalil, R. (1991). Effects of handedness and sex on the morphology of the corpus callosum: A study with brain magnetic resonance imaging. *Brain and cognition*, 16(1), 41-61.
- Halwani, G. F., Loui, P., Rüber, T., & Schlaug, G. (2011). Effects of practice and experience on the arcuate fasciculus: Comparing singers, instrumentalists, and non-musicians. *Frontiers in Psychology*, 2, 1-9.
- Hellige, J. B. (1993). Hemispheric Asymmetry: What's Right and What's Left. Harvard University Press, Cambridge.

- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity: Behavior, function and structure. *Neuron*, 76(3), 486-502.
- Herrera, L., Lorenzo, O., Defior, S., Fernández- Smith, G., & Costa-Giomi, E. (2011). Effects of phonological and musical training on the reading readiness of native and foreign Spanish-speaking children. *Psychology of Music*, 39(1), 68-82.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(4), 131-138.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92, 67-99.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 393-402.
- Hickok, G., Buchsbaum, B., Humphries, C., & Muftuler, T (2003). Auditory-motor interaction revealed by fMRI: speech, music, and working memory in area Spt. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 673–682.
- Ho, Y., Cheung, M., & Chan, A. S. (2003). Music training improves verbal but not visual memory: Cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17(3), 439-450.
- Hutchinson, S., Lee, L., Gaab, N., & Schlaug, G. (2003). Cerebelar volume of musicians. *Cerebral Cortex*, 13, 943-949.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging* (Vol. 1). Sunderland: Sinauer Associates.
- Humphries, C., Binder, J. R., Medler, D. A., & Liebenthal, E. (2006). Syntactic and semantic modulation of neural activity during auditory sentence comprehension. *Journal Cognitive Neuroscience*, 18(4), 665-679.

- Humphries, C., Love, T., Swinney, D., & Hickok, G. (2005). Response of anterior temporal cortex to syntactic and prosodic manipulations during sentence processing. *Human Brain Mapping, 26*, 128-138.
- Humphries, C., Willard, K., Buchsbaum, B., & Hickok, G. (2001). Role of anterior temporal cortex in auditory sentence comprehension: an fMRI study. *Neuroreport, 12*(8), 1749-52.
- Hyde, K. L., Peretz, I., & Zatorre, R. J. (2008). Evidence for the role of the right auditory cortex in fine pitch resolution. *Neuropsychologia, 46*(2), 632-639.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). The effects of musical training on structural brain development. A longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1169*, 182-186.

J

- Jacquemot, C., & Scott, S. K. (2006). What is the relationship between phonological short-term memory and speech processing? *Trends in Cognitive Sciences, 10*(11), 480-486.
- James, C. E., Oechslin, M. S., Van De Ville, D., Hauert, C. A., Descloux, C., & Lazeyras, F. (2014). Musical training intensity yields opposite effects on grey matter density in cognitive versus sensorimotor networks. *Brain Structure and Function, 219*(1), 353-366.
- Janata, P., & Grafton, S. T. (2003). Swinging in the brain: shared neural substrates for behaviors related to sequencing and music. *Nature Neuroscience, 6*, 682-687.
- Jäncke, L., Schlaug, G., & Steinmetz, H. (1997). Hand skill asymmetry in professional musicians. *Brain and cognition, 34*(3), 424-432.
- Jäncke, L. (2009). The plastic human brain. *Restorative Neurology and Neuroscience, 27*, 521-538.

Jentschke, S., & Koelsch, S. (2009). Musical training modulates the development of syntax processing in children. *Neuroimage*, *47*(2), 735-744.

Jentschke, S., Friederici, A. D., & Koelsch, S. (2014). Neural correlates of music-syntactic processing in two-year old children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *9*, 200-208.

Johansen-Berg, H., Della-Maggiore, V., Behrens, T. E. J., Smith, S. M., & Paus, T. (2007). Integrity of white matter in the corpus callosum correlates with bimanual coordination skills. *Neuroimage*, *36*, 16-21.

Justel, N., & Abrahan, V. D. (2012). Plasticidad cerebral: participación del entrenamiento musical. *Suma Psicológica*, *19* (2) 97-108.

K

Kaas, J. H., & Hackett, T. A. (1999). "What" and "where" processing in auditory cortex. *Nature Neuroscience*, *2*, 1045-47.

Kaas, J. H., & Hackett, T. A. (2000). Subdivisions of auditory cortex and processing streams in primates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(22), 11793-11799.

Kawabata, H., & Zeki, S. (2004). Neural correlates of beauty. *Journal of Neurophysiology*, *91*(4), 1699-1705.

Kennerley, S. W., Sakai, K., & Rushworth, M. F. S. (2004). Organization of action sequences and the role of the pre-SMA. *Journal of neurophysiology*, *91*(2), 978-993.

Koelsch, S., Gunter, T., Cramonet, D., Zysset, S., Lohman, G., & Friederici, A. (2002). Bach speaks: A cortical «language-network» serves the processing of music. *Neuroimage*, *17*(2), 956-966.

- Kopiez, R., Galley, N., & Lee, J. I. (2006). The advantage of a decreasing right-hand superiority: The influence of laterality on a selected musical skill (sight reading achievement). *Neuropsychologia*, *44*(7), 1079-1087.
- Klein, M. E., & Zatorre, R. (2011). A role for the right superior temporal sulcus in categorical perception of musical chords. *Neuropsychologia*, *49*(5), 878–887.
- Kunert, R., Willems, R. M., Casasanto, D., Patel, A. D., & Hagoort, P. (2015). Music and Language Syntax Interact in Broca’s Area: An fMRI Study. *Plos One*, *10* (11).
- Knecht, S., Drager, B., Deppe, M., Bobe, L., Lohmann, H., Floel, A., Ringelstein, E. B., & Henningsen, H. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, *123*(12), 2512–2518.
- Knudsen, E. I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(8), 1412–1425.
- Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(8), 599-605.
- Kraus, N., Slater, J., Thompson, E. C., Hornickel, J., Strait, D. L., Nicol, T., & White-Schwoch, T. (2014). Music enrichment programs improve the neural encoding of speech in at-risk children. *Journal of Neuroscience*, *34*(36), 11913-11918.

L

- Lappe, C., Herholz, S. C., Trainor, L. J., & Pantev, C. (2008). Cortical plasticity induced by short-term unimodal and multimodal musical training. *Journal of Neuroscience*, *28*(39), 9632-9639.
- Large, E. W., & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science*, *26*, 1–37.

- Lee, D. J., Chen, Y., & Schlaug, G. (2003). Corpus callosum: musician and gender effects. *Neuroreport*, *14*(2), 205-9.
- Lee, Y-S., Janata, P., Frost, C., Hanke, M., & Granger, R. (2011). Investigation of melodic contour processing in the brain using multivariate pattern-based fMRI. *Neuroimage*, *57*(1), 293–300.
- Legg, R. (2009). Using music to accelerate language learning: An experimental study. *Research in Education*, *82*(1), 1-12.
- Levitin, D. J., & Tirovolas, A. K. (2009). Current advances in the cognitive neuroscience of music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1156*, 211-231.
- López-Barroso, D., Catani, M., Ripollés, P., Dell’Acqua, F., Rodríguez-Fornells, A., & de Diego-Balaguer, R. (2013). Word learning is mediated by the left arcuate fasciculus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(32), 13168-73.
- Loehr, J. D., & Palmer, C. (2006). Cognitive and biomechanical influences in pianists’ finger tapping. *Experimental Brain Research*, *178*, 518–528.
- Loui, P., Zamm, A., & Schlaug, G. (2012). Enhanced functional networks in absolute pitch. *Neuroimage*, *63*(2), 632-640.
- Luders, E., Gaser, C., Jancke, L., & Schlaug, G. (2004). A voxel-based approach to gray matter asymmetries. *Neuroimage*, *22*, 656– 664.
- Luo, C., Guo, Z., Lai, Y., Liao, W., Liu, Q., Kendrick, K. M., Yao, D., & Li, H. (2012). Musical training induces functional plasticity in perceptual and motor networks: insights from resting-state fMRI. *PloS one*, *7*(5), e36568.

M

- Maldjian, J. A., Laurienti, P. J., Kraft, R. A., & Burdette, J. H. (2003). An automated method for neuroanatomic and cytoarchitectonic atlas-based interrogation of fMRI data sets. *Neuroimage*, *19*, 1233-1239.
- Mandell, J., Schulze, K., & Schlaug, G. (2007). Congenital amusia: An auditory-motor feedback disorder? *Restorative Neurology and Neuroscience*, *25*(3-4), 323–334.
- Merrett, D. L., Peretz, I., & Wilson, S. J. (2013). Moderating variables of music training-induced neuroplasticity: a review and discussion. *Frontiers in psychology*, *4*.
- Moreno, S., Bialystok, E., Barac, R., Schellenberg, E. G., Cepeda, N. J., & Chau, T. (2011). Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychological Science*, *22*(11), 1425-1433.
- Mosing, M. A., Madison, G., Pedersen, N. L., Kuja-Halkola, R., & Ullén, F. (2014). Practice does not make perfect: no causal effect of music practice on music ability. *Psychological science*, *25*(9), 1795-1803.
- Münte, T. F., Altenmüller, E., & Jäncke, L. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature reviews. Neuroscience*, *3*, 473-478.
- Murphey, T. (1990). The Song Stuck in my Head Phenomenon: a Melodic Din in the lad?. *System*, *18* (1), 53-64.
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, *22*(3), 276–282.

N

- Nichols, T. E. (2014). False Discovery Rate, 1–5.

Norton, A., Winner, E., Cronin, K., Overy, K., Lee, D. J., & Schlaug, G. (2005). Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability?. *Brain and cognition*, 59(2), 124-134.

O

O'Kusky, J., Strauss, E., Kosaka, B., Wada, J., Li, D., Druhan, M., & Petrie, J. (1988). The corpus callosum is larger with right-hemisphere cerebral speech dominance. *Annals of neurology*, 24(3), 379-383.

Oldfield, R. C. (1969). Handedness in musicians. *British Journal of Psychology*, 60, 91-99.

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.

Opitz, B., Rinne, T., Mecklinger, A., Von Cramon D, Y., & Schröger, E. (2002). Differential contribution of frontal and temporal cortices to auditory change detection: fMRI and ERP results. *Neuroimage*, 15(1), 167–174.

Özdemir, E., Norton, A., & Schlaug, G. (2006). Shared and distinct neural correlates of singing and speaking. *Neuroimage*, 33(2), 628-635.

P

Palomar-García, M. Á., Zatorre, R. J., Ventura-Campos, N., Bueichekú, E., & Ávila, C. (2017). Modulation of Functional Connectivity in Auditory–Motor Networks in Musicians Compared with Nonmusicians. *Cerebral Cortex*, 27(5), 2768-2778.

Pantev, C., Oostenveld R, Engelen A, Ross B, Roberts L, E, & Hoke M. (1998). Increased auditory cortical representations in musicians. *Nature*, 392: 811-4.

- Pantev, C., Engelien, A., Candia, V., & Elbert, T. (2001). Representational cortex in musicians. Plastic alterations in response to musical practice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 300-14.
- Parson, L., Sergent, J., Hodgesc, D., & Foxa, P. (2005). The brain basic of piano performance. *Neuropsychologia*, 43, 199–215.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, 6(7), 674-681.
- Patel, A. D. (2010). Music, biological evolution, and the brain. En M. Bailar (Ed.), *Emerging disciplines* (pp. 91-144). Houston, TX: Rice University Press.
- Patel, A. D., & Iversen, J. R. (2007). The linguistic benefits of musical abilities. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(9), 369-372.
- Penhune, V. B. (2011). Sensitive periods in human development: evidence from musical training. *Cortex*, 47(9), 1126-1137.
- Perlovsky, L. (2010). Musical emotions: Functions, origins, evolution. *Physics of Life Review*, 7(1), 2-27.
- Peretz, I., Ayotte, J., Zatorre, R. J., Mehler, J., Ahad, P., Penhune, V. B., & Jutras, B. (2002). Congenital amusia: a disorder of fine-grained pitch discrimination. *Neuron*, 33(2), 185-191.
- Peretz, I., Kolinsky, R., Tramo, M., Labrecque, R., Hublet, C., Demeurisse, G., & Belleville, S. (1994). Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. *Brain*, 117(6), 1283-1301.
- Peretz, I., & Zatorre, R. J. (2005). Brain organization for music processing. *Annual. Review of Psychology*, 56, 89-114.

- Peretz, I. (2001). Brain specialization for music: new evidence from congenital amusia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930: 153-65.
- Peretz I., & Coltheart, M. (2003). The modularity of music processing. *Nature Neuroscience*, 6: 68891.
- Pérez, J. I., & Garaigordobil, M. (2002). Educación artística y desarrollo musical en niños de 6–7 años. *Infancia y Aprendizaje*, 25(3), 299-313.
- Peters, M. (1981). Handedness: Effects of prolonged practice on between hand performance differences. *Neuropsychologia*, 19, 587–590.
- Peters, M. (1985a). Performance of a rubato-like task: When two things cannot be done at the same time. *Music Perception*, 2, 471–482.
- Peters, M. (1985b). Constraints in the performance of bimanual tasks and their expression in unskilled and skilled subjects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 37, 171–196.
- Piccirilli, M., Sciarra, T., & Luzzi, S. (2000). Modularity of music: evidence from a case of pure amusia. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 69, 541-545.
- Pujol, J., Deus, J., Losilla, J. M., & Capdevila, A. (1999). Cerebral lateralization of language in normal left-handed people studied by functional MRI. *Neurology*, 52(5), 1038–43.
- Platel H., Price, C., Baron J., Wise R., Lambert J., & Franckowik, R. S. J. (1997). The structural components of music perception, A functional anatomic study. *Brain*, 120: 229-43.

R

- Rao, S. M., Harrington, D. L., Haaland, K. Y., Bobholz, J. A., Cox, R. W., & Binder, J. R. (1997). Distributed neural systems underlying the timing of movements. *The Journal of Neuroscience*, *17*(14), 5528-5535.
- Rao, S. M., Mayer, A. R., & Harrington, D. L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature neuroscience*, *4*(3), 317-323.
- Rauschecker, J. P. (1997). Processing of complex sounds in the auditory cortex of cat, monkey, and man. *Acta Oto-Laryngologica. Supplementum*, *532*, 34-38.
- Rauschecker, J. P. (1998). Cortical processing of complex sounds. *Current Opinion in Neurobiology*, *8*, 516-521.
- Rauschecker, J. P. (2011). An expanded role for the dorsal auditory pathway in sensorimotor control and integration. *Hearing Research*, *271*, 16-25.
- Rauschecker, J. P., & Scott, S. K. (2009). Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nature Neuroscience*, *12*(6), 718-724.
- Rimrodt, S. L., Peterson, D. J., Denckla, M. B., Kaufmann, W. E., & Cutting, L. E. (2010). White matter microstructural differences linked to left perisylvian language network in children with dyslexia. *Cortex*, *46*(6), 739-749.
- Rissman, J., Eliassen, J. C., & Blumstein, S. E. (2003). An event-related fMRI investigation of implicit semantic priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(8), 1160-1175.
- Rodríguez-Fornells, A., Cunillera, T., Mestres-Missé, A., & de Diego Balaguer, R. (2009). Neurophysiological mechanisms involved in language learning in adults. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, *364*, 3711-35.

Rogalsky, C., & Hickok, G. (2009). Selective attention to semantic and syntactic features modulates sentence processing networks in anterior temporal cortex. *Cerebral Cortex*, *19*, 786-796.

Rodd, J. M., Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2005). The neural mechanisms of speech comprehension: fMRI studies of semantic ambiguity. *Cerebral Cortex*, *15*, 1261-1269.

S

Sakai, K., Hikosaka, O., & Nakamura, K. (2004). Emergence of rhythm during motor learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(12), 547-553.

Sanjuán, A., Bustamante, J. C., Forn, C., Ventura-Campos, N., Barrós-Loscertales, A., Martínez, J. C., Villanueva, V., & Ávila, C. (2010). Comparison of two fMRI tasks for the evaluation of the expressive language function. *Neuroradiology*, *52*(5), 407-415.

Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M. S., Umarova, R., Musso, M., Glauche, V., Abel, S., Huber W., Rijntes, M., & Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(46), 18035-40.

Seashore, C. E. (1936). The psychology of music. *Music Educators Journal*, *23*(2), 20-22.

Seither-Preisler, A., Parncutt, R., & Schneider, P. (2014). Size and synchronization of auditory cortex promotes musical, literacy, and attentional skills in children. *Journal of Neuroscience*, *34*(33), 10937-10949.

Sergent, J., Zuck, E., Terriah, S., & MacDonald, B. (1992). Distributed neural network underlying musical sight-reading and keyboard performance. *Science*, *257*, 106-109.

Serrien, D. J., & Sovijärvi-Spapé, M. M. (2015). Hemispheric asymmetries and the control of motor sequences. *Behavioural brain research*, *283*, 30-36.

- Sihvonen, A. J., Ripollés, P., Leo, V., Rodríguez-Fornells, A., Soinila, S., & Särkämö, T. (2016). Neural basis of acquired amusia and its recovery after stroke. *Journal of Neuroscience*, *36*(34), 8872-8881.
- Soria-Urios, G., Duque, P., & García-Moreno, J. (2011). Música y cerebro: fundamentos neurocientíficos y trastornos musicales. *Neurología*, *52*, 45-55.
- Somers, M., Aukes, M. F., Ophoff, R. A., Boks, M. P., Fleeer, W., de Visser, K. C., Kahn, R. S., & Sommer, I. E. (2015). On the relationship between degree of hand-preference and degree of language lateralization. *Brain and Language*, *144*, 10–15.
- Scott, S. K., & Wise, R. J. S. (2004). The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception. *Cognition*, *92*, 13-45.
- Schellenberg, E. G. (2001). Music and nonmusical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *930*, 355-371.
- Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, *15*(8), 511-514.
- Schellenberg, E. G.; Nakata, T.; Hunter, P. G., & Tamoto, S. (2007). Exposure to Music and Cognitive Performance: Tests of Children and Adults. *Psychology of Music*, *35*, 5-19.
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, G., Specht, H., & Gutschalk, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, *5*, 688-94.
- Schneider, P., Sluming, V., Roberts, N., Scherg, M., Goebel, R., Specht, H. J., Dosch, H. G., Bleeck, S., Stippich, C., & Rupp, A. (2005). Structural and functional asymmetry of lateral Heschl's gyrus reflects pitch perception preference. *Nature neuroscience*, *8*(9), 1241-1247.

- Schönwiesner, M., Novitski, N., Pakarinen, S., Carlson, S., Tervaniemi, M., & Näätänen, R. (2007). Heschl's gyrus, posterior superior temporal gyrus, and mid-ventrolateral prefrontal cortex have different roles in the detection of acoustic changes. *Journal of Neurophysiology*, *97*(3), 2075-2082.
- Schlaug, G. (2001). The brain of musicians, a model for functional and structural adaptation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *930*, 281-99.
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J., & Steinmetz, H. (1995). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, *33*, 1047-1055.
- Schlaug, G., Martin, B., Thangaraj, V., Edelman, R. R., & Warach, S. (1996). Functional anatomy of pitch perception and pitch memory in nonmusicians and musicians: an fMRI-behavioral study. *Neuroimage*, *3*(3), S318.
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K., & Winner, E. (2005). Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1060*(1), 219-230.
- Schlaug, G., Marchina, S., & Norton, A. (2009). Evidence for plasticity in white-matter tracts of patients with chronic Broca's Aphasia undergoing intense intonation-based speech therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1169*, 385-394.
- Shehzad, Z., Kelly, A. M. C., Reiss, P. T., Gee, D. G., Gotimer, K., Uddin, L. Q. & Milham, M. P. (2009). The resting brain: unconstrained yet reliable. *Cerebral Cortex*, *19*, 2209-2229.
- Skoe, E., & Kraus, N. (2012). A little goes a long way: how the adult brain is shaped by musical training in childhood. *Journal of Neuroscience*, *32*, 11507–11510.
- Schubotz, R. I. & Cramon, D. Y. (2003). Functional anatomical concepts of human premotor cortex: evidence from fMRI and PET studies. *Neuroimage*, *20*, Suppl. 1, S120–S131.

- Slabu, L., Grimm, S., & Escera, C. (2012). Novelty detection in the human auditory brainstem. *Journal of Neuroscience*, *32*(4), 1447-1452.
- Slater, J., & Kraus, N. (2016). The role of rhythm in perceiving speech in noise: a comparison of percussionists, vocalists and non-musicians. *Cognitive Processing*, *17*(1), 79–87.
- Slater, J., Skoe, E., Strait, D. L., O’Connell, S., Thompson, E., & Kraus, N. (2015). Music training improves speech-in-noise perception: Longitudinal evidence from a community-based music program. *Behavioural Brain Research*, *291*, 244-252.
- Sluming, V., Barrick, T., Howard, M., Cezayirli, E., Mayes, A. & Roberts, N. (2002). Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca’s area in male symphony orchestra musicians. *Neuroimage*, *17*, 1613–1622.
- Squadrone, R., Gallozzi, C., & Pasquini, G. L. (1995). Lateralit e bilateralit. *Rivista di Cultura Sportiva*, *14*, 36-41.
- Stalinski, S. M., & Schellenberg, E. G. (2012). Music cognition: a developmental perspective. *Topics in Cognitive Science*, *4*(4), 485-497.
- Steinke, W. R., Cuddy, L. L., & Jakobson, L. S. (2001). Dissociations among functional subsystems governing melody recognition after right-hemisphere damage. *Cognitive Neuropsychology*, *18*(5), 411-437.
- Sussman, E., Ritter, W., & Vaughan, H. G., Jr. (1998). Attention affects the organization of auditory input associated with the mismatch negativity system. *Brain Research*, *789*, 130–138.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). Augmented feedback. *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis, 5th ed. Champaign, IL: Human Kinetics*, 393-405.

Steele, C. J., Bailey, J. A., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2013). Early musical training and white-matter plasticity in the corpus callosum: evidence for a sensitive period. *The Journal of Neuroscience*, *33*(3), 1282-90.

Strait, D. L., & Kraus, N. (2014). Biological impact of auditory expertise across the life span: Musicians as a model of auditory learning. *Hearing Research*, *308*, 109-121.

Szaflarski, J. P., Binder, J. R., Possing, E. T., McKiernan, K. A, Ward, B. D., & Hammeke, T. A. (2002). Language lateralization in left-handed and ambidextrous people: fMRI data. *Neurology*, *59*(2), 238–244.

T

Talero-Gutiérrez, C., Zarruk-Serrano, J. G., & Espinosa-Bode, A. (2004). Percepción musical y funciones cognitivas. ¿Existe el efecto Mozart? *Revista de Neurología*, *39*(12), 1167-1173.

Tillmann, B., Janata, P., & Bharucha, J. J. (2003). Activation of the inferior frontal cortex in musical priming. *Cognitive Brain Research*, *16*(2), 145-161.

Tillmann, B., Lalitte, P., Albouy, P., Caclin, A., & Bigand, E. (2016). Discrimination of tonal and atonal music in congenital amusia: The advantage of implicit tasks. *Neuropsychologia*, *85*, 10-18.

Toscano-Fuentes, C. M., & Fonseca-Mora, M. C. (2013). La música como herramienta facilitadora del aprendizaje del inglés como lengua extranjera. *Revista Teoría de la Educación*, *24*, 2, pp. 197-213.

Thain, L. (2010). Rhythm, Music and young Learners: A Winning Combination, en Stoke, A. M. (ed.) *jalt 2009 Conference Proceedings*. Tokyo, 407-410.

Thompson, N. C., Cranford, J. L., & Hoyer, E. (1999). Brief-tone frequency discrimination by children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *42*, 1061–1068.

- Thompson, W. F., Schellenberg, G., & Husain, G. (2004). Decoding speech prosody: Do music lessons help?. *Emotion, 4*(1), 46-64.
- Trainor, L. B., Shahin, A. J., & Roberts, L. E. (2009). Understanding the benefits of musical training: Effects on oscillatory brain activity. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1169*, 133-142.
- Trehub, S. E., Schellenberg, E. G., & Kamenetsky, S. B. (1999). Infants' and adults' perception of scale structure. *Journal of experimental psychology: Human Perception and Performance, 25*(4), 965.
- Trollinger, V. (2003). Relationships between pitch-matching accuracy, speech fundamental frequency, speech range, age, and gender in American English-speaking preschool children. *Journal of Research in Music Education, 51*(1), 78-94.

V

- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., Càmarà E., van Vugt F. T., Mohammadi, B., Samii, A., Münte, T. F., Rodríguez-Fornells, A., & Altenmüller, E. (2016). Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of musical training onset. *Neuroimage, 126*, 106-119.
- Vandenberghe, R., Nobre, A. C., & Price, C. J. (2002). The response of left temporal cortex to sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(4), 550-560.
- Vartanian, O., & Goel, V. (2004). Neuroanatomical correlates of aesthetic preference for paintings. *Neuroreport, 15*(5), 893–897.
- Vitoria, J. R. (2005). Educación musical y desarrollo psicolingüístico de personas con necesidades educativas especiales. *Revista de Psicodidáctica, 10*(2), 17-26.

W

Wan, C., Demaine, K., Zipse, L., Norton, A., & Schlaug, G. (2010). From music making to speaking: Engaging the mirror neuron system in autism. *Brain Research Bulletin*, 82(3-4), 101-108.

Watanabe, T., Yagishita, S., & Kikyo, H. (2008). Memory of music: Roles of right hippocampus and left inferior frontal gyrus. *Neuroimage*, 39(1), 483–491.

Warren, J. E., Wise, R. J. S., & Warren, J. D. (2005). Sounds do-able: auditory-motor transformations and the posterior temporal plane. *Trends in Neurosciences*, 28(12), 636-643.

Wernicke, C. (1874). Boston studies in the philosophy of science. En R. . Cohen & M. Wartofsky (Eds.), *Boston Studies in the Philosophy of Science*, pp. 34-97.

Wessinger, C. M., VanMeter, J., Tian, B., Van Lare, J., Pekar, J., & Rauschecker, J. P. (2001). Hierarchical organization of the human auditory cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *Journal Cognitive Neuroscience*, 13(1), 1-7.

Witelson, S. F. (1989). Hand and sex differences in the isthmus and genu of the human corpus callosum: a postmortem morphological study. *Brain*, 112(3), 799-835.

Wong, P. C., Skoe, E., Russo, N. M., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature neuroscience*, 10(4), 420.

Z

Zatorre, R. J. (2003). Absolute pitch: a model for understanding the influence of genes and development on neural and cognitive function. *Nature Neuroscience*, 6, 692–695.

Zatorre, R. J. (2005). Music, the food of neuroscience? *Nature*, 434, 312–315.

- Zatorre, R. J. (2013). Predispositions and plasticity in music and speech learning: neural correlates and implications. *Science*, *342*, 585-589.
- Zatorre, R. J., & Baum, S. R. (2012). Musical melody and speech intonation: Singing a different tune. *Plos Biology*, *10*(7).
- Zatorre, R. J., Belin, P., & Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*(1), 37-46.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: Auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Review Neuroscience*, *8* (7), 547–558.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., & Meyer, E. (1994). Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *Journal of Neuroscience*, *14*(4), 1908-1919.
- Zatorre, R. J., & Gandour, J. T. (2008). Neural specializations for speech and pitch: moving beyond the dichotomies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, *363*(1493), 1087-1104.
- Zatorre, R. J., & Salimpoor, V. N. (2013). From perception to pleasure: Music and its neural substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110* (Suppl2), 10430–10437.
- Zhao, T. C., & Kuhl, P. K. (2016). Musical intervention enhances infants' neural processing of temporal structure in music and speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(19), 5212-5217.
- Zhu, X., Wang, F., Hu, H., Sun, X., Kilgard, M. P., Merzenich, M. M., & Zhou, X. (2014). Environmental acoustic enrichment promotes recovery from developmentally degraded auditory cortical processing. *Journal of Neuroscience*, *34*, 5406–5415.