



REVISITANDO LAS VARIABLES QUE CONDICIONAN LA NEUROPLASTICIDAD ASOCIADA A LA INTERPRETACIÓN MUSICAL

Revisiting the conditioning variables of neuroplasticity induced by music training

MIRIAM ALBUSAC-JORGE
Universidad de Granada, España

KEYWORDS

Brain
Conditioning variables
Neuroplasticity
Music
Musicians
Musical performance
Training

ABSTRACT

Music training changes the brain both anatomically and functionally, where some variables conditioning the neuroplasticity. Here is a review of them, which include recent research in the neuroscience of music field. These variables are individual differences, sex, laterality, absolute pitch, instrument family, type of musical training received by the performer, training details –such as the intensity or age of onset, for example–, in addition to other environmental and genetic factors.

PALABRAS CLAVE

Cerebro
Entrenamiento
Interpretación musical
Música
Músicos
Neuroplasticidad
Variables mediadoras

RESUMEN

El entrenamiento musical reiterado puede modificar el cerebro tanto anatómicamente como en su función, pero existen una serie de variables que condicionan la neuroplasticidad. Este texto realiza una revisión actualizada sobre ellas, revisitándolas incluyendo las últimas investigaciones en el campo de la neurociencia de la música. Entre las variables de interés, se encuentran las diferencias individuales, el sexo, la lateralidad manual, la habilidad de oído absoluto, el instrumento que se interpreta, el tipo de formación musical que recibe el intérprete, las particularidades del entrenamiento –como la intensidad del mismo o la edad de inicio, por ejemplo–, además de otros factores ambientales y genéticos.

Recibido: 14/ 07 / 2022

Aceptado: 18/ 09 / 2022

1. Introducción

La experiencia y entrenamiento reiterado en un dominio específico puede modificar tanto la funcionalidad del cerebro como su estructura (Berlucchi & Buchtel, 2009; Kolb, 2018). Estos cambios reorganizativos del sistema nervioso –asociados a estímulos– se designan, en sus diversas denominaciones, plasticidad cerebral, neuroplasticidad o plasticidad neural (Mateos-Aparicio & Rodríguez-Moreno, 2019). En concreto, las transformaciones encefálicas asociadas al entrenamiento musical han sido objeto de estudio de la investigación en neurociencia cognitiva (ejemplos en: Albusac-Jorge, 2022; Altenmüller & Furuya, 2016; Bianco et al., 2022; Habib & Besson, 2009; Herholz & Zatorre, 2012; Jäncke, 2009; Johansson, 2006; Penhune, 2019; Schlaug, 2008; Zatorre, 2013; Zhu, 2018). En este sentido, la “naturaleza multimodal” de la interpretación musical (Herholz & Zatorre, 2012, p. 486), que se caracteriza por ser un entrenamiento de alta complejidad que implica múltiples circuitos neuronales vinculados con “procesos perceptivos, cognitivos, motores y sensoriomotores” (Dalla Bella, 2016, p. 325), ha propiciado estas investigaciones. Incluso los músicos han llegado a considerarse como un modelo para examinar la plasticidad cerebral (Schlaug, 2015; Wan & Schlaug, 2010).

Hace tres décadas, algunos autores exponían la idea de que las personas se convertían en músicos expertos principalmente por el número de horas que dedicaban a la interpretación musical, relegando a un segundo plano otras variables como el talento innato (Ericsson *et al.*, 1993). Sin embargo, años más tarde los estudios han señalado que “tan sólo entre el 20 y el 30% de la pericia musical puede explicarse por la práctica interpretativa” (Rose *et al.*, 2019, p. 207), sosteniendo así la influencia de muchas otras variables, lo que indica que la competencia musical aparece como resultado de la interacción de factores múltiples (Swaminathan & Schellenberg, 2018). En analogía a esta situación, la literatura científica ha puesto de manifiesto que también existen una serie de variables condicionantes que parecen estar mediando entre el enteramiento musical y las modificaciones cerebrales o plasticidad cerebral asociada a este (Merrett & Wilson, 2012; Merrett *et al.*, 2013). Estas variables, que estarían mediando en la forma en la que la interpretación musical moldea el encéfalo, fueron revisadas y discutidas por Merret, Peretz & Wilson hace casi una década (2013), en un texto muy esclarecedor. Sin embargo, en los últimos diez años se ha aportado un considerable volumen de evidencia científica que matiza la influencia de las citadas variables. El objetivo de esta investigación es realizar una revisión sistemática sobre todas ellas, ofreciendo una perspectiva actualizada de las mismas en concordancia con las últimas investigaciones en neurociencia de la música.

2. Método

La metodología empleada para la consecución de este objetivo examina la información sobre esta temática contenida en dos bases de datos multidisciplinares e internacionales como son *Web of Science* y *Scopus*, además de en conjuntos de datos específicos del ámbito de la medicina, como MEDLINE –empleando el motor de búsqueda *PubMed*–, o de la esfera musical, como RILM –Repertorio Internacional de Literatura Musical–, entre otras, que sirven como instrumentos de investigación.

La búsqueda se centró en textos en inglés, alemán, francés y español en el periodo comprendido entre el año 2000 y el mes de junio del año 2022. Asimismo, tomando como punto de partida la información contenida en el texto de Merret, Peretz & Wilson (2013), se seleccionaron diversos términos o palabras clave a fin de utilizarlos en las distintas búsquedas, entre los que se encontraban: *absolute pitch*, *age*, *age of onset*, *brain plasticity*, *instrument*, *music**, *music training*, *moderating variables*, *neuroimaging*, *neuroplasticity*, *neuroscience*, *sensitive period*, *sex*, *training age* o *training type*.

Tras la pertinente discriminación y selección de acuerdo con el objeto de estudio, se recopilaron un total de 120 documentos, la mayor parte de ellos en lengua inglesa, de los que el 65% habían sido publicados en la última década. Además, se incorporaron once textos más, fuera del periodo temporal indicado, para fundamentar algunos conceptos y/o argumentaciones.

Por último, cabe destacar que la presente revisión no está basada en acciones de tipo cuantitativo, sino que analiza el contenido de los textos para comprender cómo la plasticidad cerebral puede ser modulada por distintos factores.

3. Resultados

Antes de esbozar los resultados de esta investigación, resulta conveniente resaltar que, al igual que en otras áreas de estudio de la neurociencia, múltiples elementos relacionados con el sexo, la lateralidad manual, la predisposición genética, el contexto ambiental, el consumo de drogas o los antecedentes neurológicos, pueden actuar como condicionantes de los efectos del entrenamiento musical a nivel cerebral.

3.1. Diferencias individuales

En general, el cerebro tanto sano como patológico, muestra diferencias en su configuración atribuidas al sexo (Voskuhl & Klein, 2019). A este respecto, resulta de importancia señalar que, en ocasiones, sexo y género se han

empleado como sinónimos en una parte considerable de los estudios, aunque no lo son. El término sexo hace referencia a la característica biológica, mientras que género está vinculado con preferencias, roles y conductas. En este sentido, según *The Institute of Medicine (IOM)*, el sexo –determinado por los cromosomas XX o XY– es una variable biológica importante que debe ser considerada en las investigaciones y en los análisis que de ellas se derivan (Wizemann & Pardue, 2001). Además, aunque la literatura científica indica que existen multitud de similitudes entre sexos (Cosgrove *et al.*, 2007), los estudios revelan también diferencias estructurales y funcionales a nivel cerebral (Choleris *et al.*, 2018; Kurth *et al.*, 2018; Luders *et al.*, 2009; Ramos-Loyo *et al.*, 2022; Ritchie *et al.*, 2018; Ruigrok *et al.*, 2014; Kanaan *et al.*, 2014) y exponen la presencia de ciertos patrones de actividad neuronal característicos según el sexo, como respuesta a los mismos estímulos (Gegenhuber & Tollkuhn, 2020). Por lo tanto, el sexo es una variable biológica que no debe obviarse en las investigaciones y diseños experimentales (Lee, 2018) y que podría mediar de algún modo en la plasticidad cerebral asociada a la música.

En este sentido, se han indicado diferencias cerebrales inducidas por el entrenamiento musical e influidas de alguna forma por el sexo en la microestructura de la materia blanca de diversas regiones cerebrales (Mehrabinejad *et al.*, 2021); por ejemplo, se han observado diferencias significativas en el cuerpo calloso entre sexos (Mehrabinejad *et al.*, 2021). Cabe señalar que estudios previos ya habían reportado que la porción anterior del cuerpo calloso era significativamente mayor en músicos varones al compararla con personas sin formación (Lee *et al.*, 2003). Sin embargo, “este cambio estructural no se observó en grupos equivalentes de hembras” (Mehrabinejad *et al.*, 2021, p. 8). Parece evidente que, aunque se han mostrado también diferencias entre machos y hembras, por ejemplo, en el cerebelo (Hutchinson *et al.*, 2003), entre otras, resultan necesarios más estudios en este ámbito, que puedan arrojar luz en los resultados discordantes. Además, la combinación de investigaciones puramente neurocientíficas en conjunción con otras de corte más cognitivo, sería de gran interés, ya que igualmente se han observado diferencias sexuales en diversos dominios cognitivos, incluida la música, indicando, por ejemplo, que las hembras son mejores en el reconocimiento de melodías familiares, demostrando así ventajas asociadas al sexo (Miles *et al.*, 2016).

Respecto a la lateralidad, los estudios en neuroimagen se desarrollan bajo la premisa de que zurdos, ambidiestros y diestros poseen una configuración o funcionamiento cerebral distinto (Guadalupe *et al.*, 2014; Hammond, 2002; Jäncke *et al.*, 1998; Kertesz *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1993; Pool *et al.*, 2014). Por este motivo, es habitual que ser zurdo o ambidiestro se considere como un criterio de exclusión en los estudios, incluyendo así en muchos casos únicamente diestros como parte de las muestras de las investigaciones en neurociencia de la música (Baer *et al.*, 2015; Bailey *et al.*, 2014; Bianco *et al.*, 2022; Foster *et al.*, 2013; Gärtner *et al.*, 2013; Moore *et al.*, 2017; van Vugt *et al.*, 2021; Vaquero *et al.*, 2016; Vaquero *et al.*, 2020; Zarate & Zatorre, 2008), de manera que los potenciales resultados no estén “contaminados” por la preferencia manual.

Por último, la genética también puede influir en la forma en la que se produce la plasticidad cerebral (Brans *et al.*, 2010). Por ello, habilidades musicales concretas relacionadas con los genes, como el oído absoluto –que se abordará en el epígrafe posterior– (Tan *et al.*, 2014), trastornos específicos como la amusia congénita o el Síndrome de Williams –que están también vinculados con factores genéticos–, además de otras predisposiciones genéticas, podrían estar mediando, junto con la experiencia, en la neuroplasticidad asociada a la interpretación musical (Penhune, 2020). En este sentido, las investigaciones más recientes asumen la existencia de un marco multidimensional donde intervienen tanto los genes, como la maduración del sistema nervioso y, por supuesto, el entorno (Penhune, 2020). En este conglomerado, los genes son los responsables de guiar la maduración y, al mismo tiempo, la variabilidad genética produce diferencias de habilidad musical entre los distintos sujetos (Penhune, 2020). Así, cuando entra en juego el ambiente y el entrenamiento musical, este interactúa con los procesos anteriores, produciendo cambios cerebrales: el “cerebro musical” sería por tanto “un producto tanto de la neurodiversidad humana natural como del entrenamiento” (Olszewska *et al.*, 2021, p. 1).

3.2. Oído absoluto

La capacidad de oído absoluto, es decir, de identificar correctamente y de forma unívoca una altura de sonido independientemente del timbre u otras cualidades (Bachem, 1937; Ward & Burns, 1982), o de cantar un sonido determinado sin un tono de referencia externa (Dohn *et al.*, 2014), se ha vinculado con diferencias neuroanatómicas y funcionales (Bermudez, 2008; Burkhard *et al.*, 2020; Dohn *et al.*, 2015; Hirata *et al.*, 1999; Hou *et al.*, 2017; Itoh *et al.*, 2005; Levitin & Rogers, 2005; Loui *et al.*, 2011; Schulze *et al.*, 2009; Zatorre, 2003; Zatorre *et al.*, 1998). No obstante, los mecanismos neuronales que subyacen al oído absoluto aún no se comprenden completamente y siguen siendo un tema de debate.

Esta aptitud tiene una escasa prevalencia entre la población general. A este respecto, desde mediados del siglo XX, se viene indicando que esta característica se da en 1 de cada 10000 personas (Bachem, 1955). No obstante, en la actualidad la evidencia parece indicar que su incidencia es mayor, sobre todo en músicos. Además, aunque es probable que exista una predisposición biológica, todo apunta a que el entrenamiento y exposición musical temprana son factores significativos en su aparición (Moulton, 2014): “en torno al 40% de los individuos que inician su formación musical antes de los cuatro años, lo desarrollan” (Bermudez, 2008, p. 1). Sin embargo,

algunos autores han propuesto que, la estabilidad en el oído absoluto se obtiene, más que por la experiencia temprana, por las normas culturales musicales en las que nos vemos envueltos (Hedger *et al.*, 2013) y que puede ser entrenadas en población adulta (Hedger *et al.*, 2015). Entre los músicos, un porcentaje menor al 20% posee esta habilidad, si bien en músicos invidentes la prevalencia es bastante mayor (Hamilton *et al.*, 2004). Además, algunos autores han considerado incluso la posibilidad de que esta habilidad esté presente universalmente al nacer, tratándose de una característica que puede desarrollarse con el habla (Deutsch *et al.*, 2004).

Tradicionalmente se ha considerado como una habilidad ventajosa para los músicos tener oído absoluto. De hecho, grandes figuras de la música occidental como “Bach, Mozart o Beethoven” lo poseían (Deutsch *et al.*, 2004, p. 340). No obstante, no se trata de una capacidad necesariamente beneficiosa, ya que puede privar del disfrute de una obra musical a sus poseedores, más concentrados en las distintas alturas de sonido que en el conjunto de la pieza en sí. Además, para la interpretación musical de instrumentos no afinados en Do –como, por ejemplo, un clarinete en Si bemol o un saxofón alto en Mi bemol–, supone una incongruencia continua entre lo que se ejecuta y los sonidos que realmente suenan. Por último, en afinaciones diferentes a los 440 Hercios del estándar moderno, como ocurre en la música barroca, tener oído absoluto podría llegar a ser incluso una desventaja (Kim & Knösche, 2017a).

Las investigaciones han informado acerca de diferencias cerebrales concretas en músicos con oído absoluto, principalmente en regiones auditivas. Las regiones perisilvianas han sido muy estudiadas, describiéndose un incremento de la conectividad local en ellas, al tiempo que tiene lugar una disminución global de la interconectividad (Jäncke *et al.*, 2012). Entre estas áreas circundantes a la cisura de Silvio, el plano temporal ha tenido gran protagonismo: los estudios han observado asimetrías más acusadas en el plano temporal en los músicos con oído absoluto, al compararlos con personas que no son músicos o con músicos sin esta capacidad (Burkhard *et al.*, 2020; Keenan *et al.*, 2001; Wilson *et al.*, 2009). Además, parece que, anatómicamente, los músicos con oído absoluto tienen un volumen significativamente mayor en las regiones primaria, rostral y rostral-temporal de la corteza auditiva (McKetton *et al.*, 2019), incluyendo la circunvolución Heschl de la corteza auditiva derecha (Wengenroth *et al.*, 2014), advirtiendo incluso algunos estudios de un grosor cortical aumentado en las circunvoluciones temporal superior –bilateral–, frontal inferior –izquierda– y supramarginal –derecha– (Dohn *et al.*, 2015).

Del mismo modo, la literatura científica ha informado acerca de patrones conectividad atípicos en personas con oído absoluto (Loui *et al.*, 2011; Oechslin *et al.*, 2010) como, por ejemplo, valores aumentados de anisotropía fraccional en el fascículo fronto-occipital inferior, el fascículo uncinado y el fascículo longitudinal inferior (Dohn *et al.*, 2015). Además, se ha indicado una mielinización intracortical mejorada en el plano polar derecho, así como una mayor conectividad funcional en estado de reposo entre el plano polar derecho y la corteza auditiva anteroventral bilateral (Kim & Knösche, 2016; 2017b). Inclusive se han encontrado características neuronales compartidas entre ciertos rasgos autistas y el oído absoluto (Brown *et al.*, 2003; Wenhart *et al.*, 2019).

Tomando en consideración esta información, algunos autores han argumentado que es probable que, en las muestras de las investigaciones sobre plasticidad cerebral asociada al entrenamiento musical, haya sujetos con oído absoluto; si esta circunstancia no se ha tenido en consideración, su presencia quizás pueda estar contaminando los resultados finales o confundiendo la medición de la neuroplasticidad, además de la posibilidad de que esté interactuando otras variables (Merrett *et al.*, 2013). Sin embargo, estudios recientes han demostrado una fuerte impronta del entrenamiento musical, no ya en regiones específicas, sino en la conectividad inter e intrahemisférica, tanto en redes estructurales como funcionales distribuidas por todo el cerebro, donde no se ha encontrado evidencia de un efecto particular debido a la habilidad del oído absoluto (Leipold *et al.*, 2021).

3.3. El periodo sensible o crítico

La morfología del cerebro cambia con la edad (Kodiweera *et al.*, 2016); de hecho, a medida que envejecemos, el volumen de la corteza cerebral y de estructuras subcorticales, así como los tractos de materia blanca, sufren modificaciones paulatinas (Kodiweera *et al.*, 2016; Walhovd *et al.*, 2005), que pueden describirse como generalizadas y consistentes (Walhovd *et al.*, 2011). Por ello, una de las variables más examinadas en su vínculo con la neuroplasticidad es la edad de inicio de la experiencia musical. A pesar de que la neuroplasticidad puede ocurrir a cualquier edad y etapa vital, diversos autores han indicado la existencia de un periodo sensible o crítico, entendido como una etapa de desarrollo “donde la maduración y la experiencia específica interactúan para producir efectos diferenciales a largo plazo en el cerebro y el comportamiento” (Penhune & Villers-Sidani, 2014, p. 1; revisión en Penhune, 2021), o lo que es lo mismo, en el que el entrenamiento musical podría ser más influyente (Steele *et al.*, 2013).

La formación musical temprana interviene sobre los circuitos motores, auditivos y sensoriales en general, a la par que en otros sistemas. En este sentido, las investigaciones demuestran que el entrenamiento antes de los siete años de edad tiene efectos duraderos en el cerebro (Penhune, 2011) y resulta probable que la interpretación musical pueda mediar más prominentemente en la integración sensoriomotora durante ese periodo (Penhune, 2011). En otras palabras, el aprendizaje motor vinculado a toda ejecución instrumental, interactúa acusadamente

y de forma más duradera en esta fase, influyendo en etapas posteriores de la vida (Watanabe *et al.*, 2007). Así, por ejemplo, los análisis de materia gris en la corteza premotora derecha relevan diferencias –en el sentido de poseer más materia gris en esta región–, en músicos que han disfrutado del entrenamiento temprano (Baley *et al.*, 2014). No obstante, también estructuras encefálicas como el cerebelo (Baer *et al.*, 2015) o el cuerpo calloso (Steele *et al.*, 2013), entre otras regiones (van Vugt *et al.*, 2021; Vaquero *et al.*, 2016; Vaquero *et al.*, 2020), son sensibles al entrenamiento musical temprano, configurando sus cambios en base a la edad de inicio del mismo. De este modo, el aprendizaje temprano supone mayores cambios a largo plazo tanto en el comportamiento como en la estructura del cerebro, en contraposición con el tardío. Como prueba de ello, en poblaciones de edad avanzada, en las que es evidente una disminución generalizada de las funciones del sistema nervioso, se han confirmado interacciones positivas debidas al entrenamiento musical temprano, incluso cuarenta años después de que la enseñanza cesara. Concretamente, se aprecia una sincronización neural más rápida en respuesta al habla, aún cuando ésta es una de las funciones nerviosas que se retrasa y deteriora con la edad (White-Schwoch *et al.*, 2013). De hecho, en términos generales, “el entrenamiento puede ralentizar el deterioro cognitivo en los ancianos” (Wan & Schlaug, 2010, p. 572).

Tomando en consideración esta información podría afirmarse que un aprendizaje temprano, aunque de corta duración en el tiempo, podía dejar una significativa impronta cerebral: “la experiencia relevante tiene mayores efectos a largo plazo durante los períodos de máximo cambio madurativo” (Shenker *et al.*, 2022). Por esta razón, gran parte de los estudios centrados en la plasticidad cerebral inducida por la música en los que se comparan un grupo experimental de músicos frente a un grupo control de personas sin formación, asumen como criterio de exclusión para el grupo control el hecho de haber tenido cualquier contacto previo con la interpretación musical. Sin embargo, cabe señalar la existencia también de investigaciones que son más permisivas a este respecto, consintiendo enrolarse en los grupos controles a personas que han tocado unos meses, un año (Halwani *et al.*, 2011; Seppänen *et al.*, 2012) e incluso hasta tres años (Doelling & Poeppel, 2015), lo que debe tenerse en cuenta en la interpretación de resultados.

Además, el aprendizaje temprano no sólo se refleja en las modificaciones cerebrales, sino que también contribuye a la mejora de habilidades musicales específicas en la propia infancia, como la discriminación melódica o la sincronización rítmica (Ireland *et al.*, 2019).

Por último, es importante indicar que, aunque el entrenamiento o exposición temprana a la música produce modificaciones más acusadas y duraderas, se trata de una cuestión en la que, evidentemente y como ya se ha adelantado, la carga genética también está mediando: tienen lugar “interacciones entre genes y medio ambiente, donde las predisposiciones genéticas influyen y son moduladas por la experiencia” (Penhune, 2020, p. 13).

3.4. Años de trayectoria e intensidad del entrenamiento

La duración de la actividad a lo largo de los años es otro de los condicionantes de la neuroplasticidad. Éste, a su vez, se encuentra estrechamente relacionado con (1) la intensidad del entrenamiento –horas dedicadas– y (2) el factor de continuidad del mismo: si ha sido incesante o, por el contrario, ha sufrido lapsos temporales; si se mantiene en la actualidad, o lo reciente del mismo en el caso de que haya cesado.

La literatura expone cómo los años de entrenamiento e intensidad del mismo correlacionan positivamente con las modificaciones encefálicas (Bianco *et al.*, 2022; Doelling & Poeppel, 2015; Groussard *et al.*, 2014). Por ello, en base a esta variable, gran parte de las investigaciones sobre plasticidad cerebral establecen como criterio de inclusión un mínimo de diez años ininterrumpidos de entrenamiento musical (Bermudez *et al.*, 2009; Bermudez & Zatorre, 2005; Herholz *et al.*, 2011) o la necesidad de que los sujetos participantes estén activos en la interpretación musical, sin olvidar el control de la variable de intensidad en el entrenamiento, que normalmente se contabiliza en horas semanales.

3.5. Familia instrumental

Otro de los elementos condicionantes de las modificaciones cerebrales es la tipología instrumental que se interpreta, ya que es probable que las demandas y exigencias de los distintos instrumentos determinen diferencias en la plasticidad neural (Merrett *et al.*, 2013). En este sentido, muchas de las investigaciones, en tanto pretenden proporcionar resultados generalizables y globales, independientemente de la especialidad instrumental, no limitan los criterios de inclusión a una sola familia de instrumentos. No obstante, en ocasiones las muestran conformadas sólo por pianistas (Bengtsson *et al.*, 2005; Hund-Georgiadis & von Cramon, 1999; Ragert *et al.*, 2004; Vaquero *et al.*, 2016), por intérpretes de cuerda frotada o pulsada (Elbert *et al.*, 1995), o por instrumentistas de viento (Choi *et al.*, 2015), pudiendo así subrayar las particulares de cada tipo de aprendizaje y entrenamiento.

En relación a esta variable, se puede afirmar que existe especialización cerebral dependiendo del instrumento concreto que se ejecute y, según algunos autores, estas diferencias permitirían incluso distinguir a diversos intérpretes, como violinistas y pianistas, en base a sus señales cerebrales (Coro *et al.*, 2019). Por tanto, las características particulares de cada entrenamiento podrían verse reflejadas en la estructura y función del cerebro. Así, se han hallado, por ejemplo, diferencias anatómicas en una región perteneciente a la corteza motora,

la circunvolución precentral, entre pianistas y violinistas (Bangert & Schlaug, 2006). En otras palabras, se han observado cambios en regiones vinculadas con la actividad motora que son específicos del instrumento. En consonancia, en instrumentistas de viento –en este caso al compararlos con sujetos que no son músicos en lugar de con músicos de otras especialidades– se han mencionado diferencias en el grosor cortical de áreas cerebrales relacionadas con los labios y la lengua (Choi *et al.*, 2015), lo que permite ver que el ejercicio motor en sí importa. Incluso, dentro de una misma especialidad instrumental como el violín, si se estudian las representaciones corticales en la corteza motora, se aprecian representaciones más grandes de los dedos de la mano izquierda *versus* la derecha (Elbert *et al.*, 1995).

Pero las diferencias plásticas cerebrales entre intérpretes de distintos instrumentos no sólo se circunscriben al ámbito motor, sino que pueden visualizarse también en regiones auditivas, áreas de integración auditivo-motora o áreas de asociación (Margulis *et al.*, 2009, citado en Dalla Bella, 2016). En concordancia con esta última idea, se ha aludido también a respuestas cerebrales específicas, en términos de función, para un timbre concreto –el del instrumento interpretado– (Margulis *et al.*, 2009; Pantev *et al.*, 2001; Shahin *et al.*, 2003; Shahin *et al.*, 2004; Shahin *et al.*, 2008). Incluso algunos estudios han investigado sobre la habilidad de “oído absoluto específico al instrumento”, dada la gran pericia que algunos músicos tienen para identificar las alturas de los sonidos cuando el timbre que suena es el de su instrumento (Hansen & Reymore, 2021).

Sin embargo, a pesar de la información recogida en este epígrafe, en la realización y ejecución conductual de algunas tareas musicales al uso como, por ejemplo, tareas rítmicas, se ha indicado que no hay diferencias significativas entre grupos de músicos de distintas especialidades instrumentales, como pueden ser pianistas, cantantes, instrumentistas de cuerda o bateristas (Matthews *et al.*, 2016).

3.6. Tipo de formación, género musical y estrategias en la interpretación

El tipo de formación –clásica, autodidacta, etcétera– o el género musical que se interpreta, es igualmente un factor influyente. Estudios previos han sugerido que músicos con formación de base distinta muestran un perfil de reactividad cortical auditiva altamente específico: “los músicos involucrados en diferentes géneros musicales pueden mostrar perfiles auditivos muy diferenciados de acuerdo con las demandas establecidas por su género” (Tervaniemi *et al.*, 2016, p. 1). Así, músicos clásicos, intérpretes de rock o personas más afines a la interpretación jazzística, es decir, con diferente historial de entrenamiento, “tienen una reactividad cortical altamente especializada a los sonidos” (Tervaniemi *et al.*, 2016, p. 1). En otras palabras, el género musical al que se adhiere un músico influye tanto en sus habilidades perceptivas como en el procesamiento cerebral que hace del hecho musical (Danielsen *et al.*, 2022; Kliuchko *et al.*, 2019; Vuust *et al.*, 2012a; Vuust *et al.*, 2012b), incluyendo estrategias cognitivas específicas (Bianco *et al.*, 2018). Por todo ello, podría sugerirse la existencia de “diferentes marcadores impresos en el cerebro cuando un músico practica uno u otro estilo” (Bianco *et al.*, 2018, p. 383). Por ejemplo, los músicos que improvisan constantemente, como puede ser el caso de los músicos de jazz, movilizan redes del estado de reposo como la red por defecto o la red de control ejecutivo, mostrando además una mayor conectividad entre ellas (Belden *et al.*, 2020).

En la mayor parte de las investigaciones tradicionales sobre plasticidad cerebral y música, los participantes han sido músicos de formación clásica, con estudios reglados, quizás por el similar contexto formativo para todos los integrantes de la muestra que este tipo de estudios otorga, y con el objetivo de controlar algunas variables extrañas, difíciles de abordar cuando se trata de músicos formados fuera del sistema. En la enseñanza no reglada, la diversidad de procesos de aprendizaje, exigencias y niveles de formación alcanzados, provocan que la trayectoria de dos personas pueda ser totalmente variable. Así, los estudios reglados ofrecen un contexto musical similar para todos los estudiantes, en el que en cada curso académico se deben cumplir los objetivos musicales prefijados por el repertorio obligatorio y delimitados en el plan de estudios. Además, todo el alumnado cursa asignaturas comunes, proporcionando así un marco equivalente, algo difícil de conseguir en músicos sin formación reglamentada. Quizás por ello, son minoritarios los estudios en los que se implican músicos, por ejemplo, de flamenco o *country*, por citar algunos géneros.

Por último, íntimamente ligado al género que se interprete, se encuentran las estrategias para la interpretación o, dicho de otro modo, la forma en que esa interpretación se produce –si el entrenamiento musical parte de la improvisación o, por el contrario, está unido profundamente a la partitura, por ejemplo–. Al igual que ocurre con el género, los estudios exponen que las respuestas cerebrales de los músicos que están sujetos a la partitura y, por ende, a la notación musical, difiere (Tervaniemi *et al.*, 2001; Seppänen *et al.*, 2007). De hecho, los músicos que prefieren utilizar estrategias de estudio de corte más auditivo como puede ser improvisar, tocar de oído o realizar sus interpretaciones empleando como ayuda grabaciones de audio para tocar de forma simultánea, tienen un procesamiento musical diferencial, en comparación con los intérpretes que emplean y muestran preferencia por otro tipo de estrategias (Seppänen *et al.*, 2007). Más aún, incluso los efectos de transferencia asociados al entrenamiento musical podrían estar también condicionados por la forma en la que se aprende, por ejemplo, incluyendo o no improvisación (Norgaard *et al.*, 2019).

4. Discusión

Resulta habitual que, cuando los padres y madres deciden que su hijo/a reciba clases de interpretación musical, pregunten a los futuros profesores/as o a músicos del entorno cercano sobre diversas cuestiones. Entre ellas, suelen aparecer con frecuencia a qué edad pueden iniciar las clases, si resultaría más favorable iniciarse a través de escuelas de música o talleres musicales concretos o, por el contrario, sería más apropiado comenzar en un entorno de enseñanzas regladas; o si le recomiendan algún instrumento en particular, que quizás pueda resultar más beneficioso para sus habilidades cognitivas.

Sin embargo, en diversas ubicaciones geográficas, para acceder a las Enseñanzas Elementales oficiales de música es requisito indispensable tener una edad mínima de ocho años de edad o, en todo caso, cumplirlos en el año natural en el que de comienzo el curso escolar. Esta circunstancia contrasta sobremedida con los estudios realizados desde el campo de la neurociencia de la música, que indican que el entrenamiento temprano, antes de los siete años de edad, supone una mayor impronta en el cerebro respecto al tardío, considerando así que el periodo sensible o crítico en el que la plasticidad asociada a la música es más acusada se produce antes de esa edad (Penhune, 2011). Si bien es cierto que muchos centros de enseñanza ofrecen iniciación musical y un acercamiento a la música y el movimiento y a talleres instrumentales a partir de los cuatro años de edad, el entrenamiento instrumental en sí mismo se pospone en muchos casos hasta los citados ocho años, dejando en un segundo plano el potencial que el entrenamiento musical puede suponer para el cerebro antes de este octavo año de vida, donde desarrollo madurativo y experiencia interactúan y convergen para producir modificaciones diferenciales y duraderas. Además, aunque este artículo de revisión ha centrado su foco de interés en las variables que de algún modo pueden estar condicionando la neuroplasticidad, el inicio temprano de la formación musical influye también positivamente en muchas otras esferas que serán determinantes para el cerebro adulto, como la sociabilidad (Kawase *et al.*, 2018). Por ello, la elaboración de los planes de estudio de las Enseñanzas Artísticas, e incluso los currículos de etapas como la Educación Infantil, deberían planificarse teniendo en cuenta estas informaciones, ya que el entrenamiento musical temprano deja una huella duradera en circuitos tanto motores como auditivos y sensoriales.

En cuanto al instrumento, cualquier entrenamiento bimanual musical va a tener potencial para moldear el cerebro anatómicamente y funcionalmente, sin menoscabo de las particularidades que a nivel encefálico produce cada familia instrumental, debido a la propia ejecución.

Respecto al tipo de formación recibida, al género musical al que más frecuentemente se adhiere el intérprete y a las estrategias que se emplean en la interpretación, parece evidente que quizás no resulta apropiado restringir el rango de estas variables. En otras palabras, realizar ejercicios improvisatorios desde el inicio de la formación musical, en paralelo a la lectura de notación musical, al mismo tiempo que se interpretan diferentes géneros y estilos musicales, tocando tanto en solitario como de forma grupal, quizás podría conducir a modificaciones cerebrales más extendidas, sin olvidar la práctica diaria ininterrumpida a lo largo de los años.

Por último, cabe resaltar el factor de reserva cognitiva que el entrenamiento musical supone para el cerebro, pudiendo ralentizar el deterioro cognitivo en etapas posteriores de la vida.

5. Conclusiones

Una vez realizada la revisión bibliográfica objeto de esta investigación, puede concluirse que existen una serie de variables que condicionan y modulan la plasticidad cerebral asociada a la interpretación musical. Entre ellas se encuentran el sexo, la preferencia manual, la capacidad de oído absoluto, el tipo de instrumento y familia instrumental que se ejecuta o la formación musical que adquiere el intérprete. Además, la intensidad del entrenamiento musical es también un factor condicionante, tanto en lo referente a las horas dedicadas al mismo, como en su continuidad a lo largo del tiempo, siendo más duraderas las modificaciones cerebrales cuando éste perdura en el tiempo y se ejercita un considerable número de horas a la semana. Por su parte, la edad de inicio también ha mostrado ser una variable clave en la huella que la música deja en el encéfalo, debido a la maleabilidad del cerebro en desarrollo cuando el aprendizaje es temprano.

Así, de acuerdo con las últimas investigaciones en neurociencia de la música, existen diferencias estructurales y funcionales entre sexos a nivel cerebral –incluyendo patrones de actividad neuronal característicos– y entre zurdos, ambidiestros y diestros, por lo que tanto la preferencia manual como el sexo son variables que podrían condicionar la plasticidad cerebral asociada a la música. Igualmente, los estudios más recientes aluden a la presencia de un marco multidimensional donde genes, maduración del sistema nervioso y contexto ambiental interactúan, de manera que la neuroplasticidad vinculada con el entrenamiento musical estaría mediada también por la genética. Del mismo modo, aunque un gran número de investigaciones han informado acerca de diferencias cerebrales concretas en músicos con oído absoluto, principalmente en regiones auditivas, algunos hallazgos recientes no han encontrado evidencia de un efecto particular del oído absoluto en conectividad inter e intrahemisférica por lo que, aunque esta capacidad podría estar mediando en la forma en la que se produce la plasticidad a nivel local, es necesaria más investigación sobre lo que ocurre en las redes a gran escala cerebrales. Además, existe un periodo crítico, antes de los siete años de edad, en el que el entrenamiento musical produciría efectos más acusados a largo

plazo tanto en el cerebro como el comportamiento, incluyendo la mejora de habilidades musicales específicas, por tratarse de una etapa de grandes cambios madurativos. Del mismo modo, la duración de la actividad en el tiempo, la intensidad del entrenamiento y la continuidad del mismo, correlacionan positivamente con el grado de plasticidad y actúan como variables condicionantes. Igualmente, los datos más recientes subrayan que existe especialización estructural y funcional del cerebro dependiente del instrumento, de forma que se podría llegar a distinguir al tipo de intérprete tan sólo analizando sus señales cerebrales; esta especialización se reflejaría también en lo que recientemente se ha denominado “oído absoluto específico al instrumento”. En último término, la neuroplasticidad se ve condicionada por los géneros musicales interpretados y el historial de entrenamiento, suponiendo marcadores diferenciales impresos en el cerebro.

Para finalizar, destacar que, en base a los datos aportados, resulta de gran importancia tomar en consideración el papel de estas variables en las diversas investigaciones que desde la neurociencia de la música y la psicología analizan el efecto plástico del entrenamiento musical sobre el cerebro, controlando su influencia o posible interacción.

UNDER INVESTIGATION

Referencias

- Albusac-Jorge, M. (2022). Música, aprendizaje, experiencia y plasticidad cerebral. En A. Gregorio Cano, J. Sánchez Santamaría & B. Miguélez Juan (Coords.). *Campos de investigación de vanguardia*, Pirámide.
- Altenmüller, E., & Furuya, S. (2016). Brain Plasticity and the Concept of Metaplasticity in Skilled Musicians. En J. Laczko, & M. Latash, (Eds.). *Progress in Motor Control: Theories and Translations. Advances in Experimental Medicine and Biology*, 957 (pp. 197-208). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47313-0_11
- Bachem, A. (1937). Various types of absolute pitch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 9, 146-151. <https://doi.org/10.1121/1.1915919>
- Bachem, A. (1955). Absolute pitch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 27, 1180-1185. <https://doi.org/10.1121/1.1908155>
- Baer, L. H., Park, M. T. M., Bailey, J. A., Chakravarty, M. M., Li, K. Z. H., & Penhune, V. B. (2015). Regional cerebellar volumes are related to early musical training and finger tapping performance. *Neuroimage*, 109, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.12.076>
- 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. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00527
- Bangert, M., & Schlaug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *European Journal of Neuroscience*, 24(6), 1832-1834. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05031.x>
- Belden, A., Zeng, T., Przysinda, E., Anteraper, S. A., Whitfield-Gabrieli, S., & Loui, P. (2020). Improvising at rest: Differentiating jazz and classical music training with resting state functional connectivity. *Neuroimage*, 207, 116384. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116384>
- Bengtsson, S., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forssberg, H., & Ullén, F. (2005) Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neuroscience*, 8, 1148-1150. <https://doi.org/10.1038/nn1516>
- Berlucchi, G., & Buchtel, H. A. (2009). Neuronal plasticity: historical roots and evolution of meaning. *Experimental Brain Research*, 192(3), 307-319. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1611-6>
- Bermudez, P. (2008). *The neural correlates of absolute pitch* (Tesis doctoral). McGill University, Canadá. <https://tinyurl.com/28672ydz>
- 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(7), 1583-1596. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn196>
- Bermudez, P., & Zatorre, R. J. (2005). Differences in Gray Matter between Musicians and Nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 395-399. <https://doi.org/10.1196/annals.1360.057>
- Bianco, V., Berchicci, M., Gigante, E., Perri, R. L., Quinzi, F., Mussini, E., & Di Russo, F. (2022). Brain Plasticity Induced by Musical Expertise on Proactive and Reactive Cognitive Functions. *Neuroscience*, 483, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.12.032>
- Bianco, R., Novembre, G., Keller, P. E., Villringer, A. & Sammler, D. (2018). Musical genre-dependent behavioural and EEG signatures of action planning: A comparison between classical and jazz pianists. *Neuroimage*, 169, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.058>
- Brans, R. G., Kahn, R. S., Schnack, H. G., van Baal, G. C., Posthuma, D., van Haren, N. E., Lepage, C., Lerch, J. P., Collins, D. L., Evans, A. C., Boomsma, D. I., & Hulshoff Pol, H. E. (2010). Brain plasticity and intellectual ability are influenced by shared genes. *The Journal of Neuroscience*, 30(16), 5519-5524. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5841-09>
- Brown, W. A., Cammuso, K., Sachs, H., Winklosky, B., Mullane, J., Bernier, R., Svenson, S., Arin, D., Rosen-Sheidley, B., & Folstein, S. E. (2003). Autism-related Language, Personality, and Cognition in People with Absolute Pitch: Results of a Preliminary Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders* volume, 33(2), 163-167. <https://doi.org/10.1023/a:1022987309913>
- Burkhard, A., Hänggi, J., Elmer, S., & Jäncke, L. (2020). The importance of the fibre tracts connecting the planum temporale in absolute pitch possessors. *Neuroimage*, 211, 116590. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116590>
- Choi, U.-S., Sung, Y.-W., Hong, S., Chung J.-Y., & Ogawa, S. (2015). Structural and functional plasticity specific to musical training with wind instruments. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 597. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00597>
- Choleris, E., Galea, L. A. M., Sohrabji, F., & Frick, K. M. (2018). Sex differences in the brain: Implications for behavioral and biomedical research. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 85, 126-145. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.07.005>
- Cosgrove, K. P., Mazure, C. M., & Staley, J. K. (2007). Evolving knowledge of sex differences in brain structure, function, and chemistry. *Biological psychiatry*, 62(8), 847-855. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2007.03.001>

- Coro, G., Masetti, G., Bonhoeffer, P., & Betcher, M. (2019). Distinguishing Violinists and Pianists Based on Their Brain Signals. En I. Tetko, V. Kůrková, P. Karpov, & F. Theis, F. (Eds.). *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2019: Theoretical Neural Computation. Lecture Notes in Computer Science*, 11727 (pp. 123-137). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30487-4_11
- Dalla Bella, S. (2016). Music and Brain Plasticity. En S. Hallam, I. Cross, & M. Thaut (Eds.). *The Oxford Handbook of Music Psychology* (pp. 325-342). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198722946.013.23>
- Danielsen, A., Nymoen, K., Langerød, M.T., Jacobsen, E., Johansson, M., & London, J. (2022). Sounds familiar(?): Expertise with specific musical genres modulates timing perception and micro-level synchronization to auditory stimuli. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 84, 599-615. <https://doi.org/10.3758/s13414-021-02393-z>
- Deutsch D., Henthorn T., & Dolson, M. (2004). Absolute pitch, speech, and tone language: some experiments and a proposed framework. *Music Perception*, 21(3), 339-356. <https://doi.org/10.1525/mp.2004.21.3.339>
- Doelling, K. B., & Poeppel, D. (2015). Cortical entrainment to music and its modulation by expertise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(45), E6233-E6242. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508431112>
- Dohn, A., Garza-Villarreal, E. A., Ribe, L. R., Wallentin, M., & Vuust, P. (2014). Musical Activity Tunes Up Absolute Pitch Ability. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 31(4), 359-371. <https://doi.org/10.1525/mp.2014.31.4.359>
- Dohn, A., Garza-Villarreal, E. A., Chakravarty, M. M., Hansen, M., Lerch, J. P., & Vuust, P. (2015). Gray- and White-Matter Anatomy of Absolute Pitch Possessors. *Cerebral Cortex*, 25(5), 1379-1388. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht334>
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270(5234), 305-307. <https://doi.org/10.1126/science.270.5234.305>
- Elmer S., Rogenmoser L., Kühnis J., & Jäncke L. (2015). Bridging the gap between perceptual and cognitive perspectives on absolute pitch. *Journal of Neuroscience*, 35(1), 366-371. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3009-14.2015>
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100(3), 363-406. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.100.3.363>
- Foster, N. E. V., Halpern, A. R., & Zatorre, R. J. (2013). Common parietal activation in musical mental transformations across pitch and time. *Neuroimage*, 75, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.044>
- Gärtner, H., Minnerop, M., Pieperhoff, P., Schleicher, A., Zilles, K., Altenmüller, E., & Amunts, K. (2013). Brain morphometry shows effects of long-term musical practice in middle-aged keyboard players. *Frontiers in Psychology*, 4, 636. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00636>
- Gegenhuber, B., & Tollkuhn, J. (2020). Signatures of sex: Sex differences in gene expression in the vertebrate brain. *WIREs Developmental Biology*, 9(1), e348. <https://doi.org/10.1002/wdev.348>
- Groussard, M., Viader, F., Landeau, B., Desgranges, B., Eustache, F., & Platel, H. (2014). The effects of musical practice on structural plasticity: The dynamics of grey matter changes. *Brain and Cognition*, 90, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.06.013>
- Guadalupe, T., Willems, R. M., Zwiers, M. P., Arias Vasquez, A., Hoogman, M., Hagoort, P., Fernández, G., Buitelaar, J., Franke, B., Fisher, S., & Francks, C. (2014). Differences in cerebral cortical anatomy of left- and right-handers. *Frontiers in Psychology*, 5, 261. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00261>
- Habib, M., & Besson, M. (2009). What do music training and musical experience teach us about brain plasticity? *Music Perception*, 26(3), 279-285. <https://doi.org/10.1525/mp.2009.26.3.279>
- 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, 156. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00156>
- Hamilton, R. H., Pascual-Leone, A., & Schlaug, G. (2004). Absolute pitch in blind musicians. *Neuroreport*, 15(5), 803-806. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000118981.36602.90>
- Hammond, G. (2002). Correlates of human handedness in primary motor cortex: a review and hypothesis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26(3), 285-292. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(02\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(02)00003-9)
- Hansen, N. C., & Reymore, L. (2021). Articulatory motor planning and timbral idiosyncrasies as underlying mechanisms of instrument-specific absolute pitch in expert musicians. *Plos One*, 16(2), e0247136. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247136>
- Hedger, S. C., Heald, S. L. M., & Nusbaum, H. C. (2013). Absolute Pitch May Not Be So Absolute. *Psychological Science*, 24(8), 1496-1502. <https://doi.org/10.1177/0956797612473310>
- Hedger, S. C., Heald, S. L., Koch, R., & Nusbaum, H. C. (2015). Auditory working memory predicts individual differences

- in absolute pitch learning. *Cognition*, 140, 95-110. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.03.012>
- Herholz, S. C., Boh, B., & Pantev, C. (2011). Musical training modulates encoding of higher-order regularities in the auditory cortex. *European Journal of Neuroscience*, 34(3), 524-529. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07775.x>
- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity: behavior, function, and structure. *Neuron*, 76(3), 486-502. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.10.011>
- Hirata, Y., Kuriki, S., & Pantev, C. (1999). Musicians with absolute pitch show distinct neural activities in the auditory cortex. *Neuroreport*, 10(5), 999-1002. <https://doi.org/10.1097/00001756-199904060-00019>
- Hou, J., Chen, A. C. N., Song, B., Sun, C., & Beauchaine, T. P. (2017). Neural correlates of absolute pitch: A review. *Musicae Scientiae*, 21(3), 287-302. <https://doi.org/10.1177/1029864916662903>
- Hund-Georgiadis, M., von Cramon, D. (1999). Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals. *Experimental Brain Research*, 125, 417-425. <https://doi.org/10.1007/s002210050698>
- Hutchinson, S., Lee, L. H., Gaab, N., & Schlaug, G. (2003). Cerebellar volume of musicians. *Cerebral Cortex*, 13(9), 943-949. <https://doi.org/10.1093/cercor/13.9.943>
- Ireland, K., Iyer, T. A., & Penhune, V. B. (2019). Contributions of age of start, cognitive abilities and practice to musical task performance in childhood. *Plos One*, 14(4), e0216119. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216119>
- Itoh, K., Suwazono, S., Arao, H., Miyazaki, K., & Nakada, T. (2005). Electrophysiological correlates of absolute pitch and relative pitch. *Cerebral Cortex*, 15(6), 760-769. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh177>
- Jäncke, L. (2009). Music drives brain plasticity. *F1000 Biology Reports*, 1(10), 78. <https://doi.org/10.3410/B1-78>
- Jäncke, L., Langer, N., & Hänggi, J. (2012). Diminished Whole-brain but Enhanced Peri-sylvian Connectivity in Absolute Pitch Musicians. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(6), 1447-1461. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00227
- Jäncke, L., Peters, M., Schlaug, G., Posse, S., Steinmetz, H., & Müller-Gärtner, H.-W. (1998). Differential magnetic resonance signal change in human sensorimotor cortex to finger movements of different rate of the dominant and subdominant hand. *Cognitive Brain Research*, 6(4), 279-284. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(98)00003-2)
- Johansson, B. B. (2006). Music and brain plasticity. *European Review*, 14(1), 49-64. <https://doi.org/10.1017/S1062798706000056>
- Kanaan, R. A., Chaddock, C., Allin, M., Picchioni, M. M., Daly, E., Shergill, S. S., & McGuire, P. K. (2014). Gender influence on white matter microstructure: a tract-based spatial statistics analysis. *Plos One*, 9, e91109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091109>
- Kawase S., Ogawa J., Obata S., & Hirano T. (2018). An investigation into the relationship between onset age of musical lessons and levels of sociability in childhood. *Frontiers in Psychology*, 9, 2244. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02244>
- Keenan, J. P., Thangaraj, V., Halpern, A. R., & Schlaug G. (2001). Absolute pitch and planum temporale. *Neuroimage*, 14(6), 1402-1408. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0925>
- Kertesz, A., Polk, M., Black, S. E., & Howell, J. (1990). Sex, handedness, and the morphometry of cerebral asymmetries on magnetic resonance imaging. *Brain Research*, 530(1), 40-48. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(90\)90655-U](https://doi.org/10.1016/0006-8993(90)90655-U)
- Kim, S. G., Ashe, J., Hendrich, K., Ellermann, J. M., Merkle, H., Uğurbil, K., & Georgopoulos, A. P. (1993). Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science*, 261(5121), 615-617. <https://doi.org/10.1126/science.8342027>
- Kim, S. G., & Knösche, T. R. (2016). Intracortical myelination in musicians with absolute pitch: Quantitative morphometry using 7-T MRI. *Human Brain Mapping*, 37(10), 3486-3501. <https://doi.org/10.1002/hbm.23254>
- Kim, S. G., & Knösche, T. R. (2017a). On the Perceptual Subprocess of Absolute Pitch. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 557. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00557>
- Kim, S. G., & Knösche, T. R. (2017b). Resting state functional connectivity of the ventral auditory pathway in musicians with absolute pitch. *Human Brain Mapping*, 38(8), 3899-3916. <https://doi.org/10.1002/hbm.23637>
- Kliuchko, M., Brattico, E., Gold, B. P., Tervaniemi, M., Bogert, B., Toiviainen, P., & Vuust, P. (2019). Fractionating auditory priors: A neural dissociation between active and passive experience of musical sounds. *Plos One*, 14(5), e0216499. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216499>
- Kodiweera, C., Alexander, A. L., Harezlak, J., McAllister, T. W., & Wu, Y. C. (2016). Age effects and sex differences in human brain white matter of young to middle-aged adults: A DTI, NODDI, and q-space study. *Neuroimage*, 128, 180-192. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.12.033>
- Kolb, B. (2018). Brain plasticity and experience. En R. Gibb & B. Kolb (Eds.). *The Neurobiology of Brain and*

- Behavioral Development* (pp. 341-389). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804036-2.00013-3>
- Kurth, F., Thompson, P. M., & Luders, E. (2018). Investigating the Differential Contributions of Sex and Brain Size to Gray Matter Asymmetry. *Cortex*, *99*, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.11.017>
- Lee, S. K. (2018). Sex as an important biological variable in biomedical research. *BMB Reports*, *51*(4), 167-173. <https://doi.org/10.5483/BMBRep.2018.51.4.034>
- Lee, D. J., Chen, Y., & Schlaug, G. (2003). Corpus callosum: musician and gender effects. *Neuroreport*, *14*(2), 205-209. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000053761.76853.41>
- Leipold, S., Klein, C., & Jäncke, L. (2021). Musical Expertise Shapes Functional and Structural Brain Networks Independent of Absolute Pitch Ability. *Journal of Neuroscience*, *41*(11), 2496-2511. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1985-20.2020>
- Levitin, D. J., & Rogers, S. E. (2005). Absolute pitch: perception, coding, and controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(1), 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.11.007>
- Loui, P., Li, H. C., Hohmann, A., & Schlaug, G. (2011). Enhanced cortical connectivity in absolute pitch musicians: A model for local hyperconnectivity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(4), 1015-1026. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21500>
- Luders, E., Gaser, C., Narr, K. L., & Toga, A. W. (2009). Why Sex Matters: Brain Size Independent Differences in Gray Matter Distributions between Men and Women. *Journal of Neuroscience*, *29*(45), 14265-14270. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2261-09.2009>
- McKetton, L., DeSimone, K., & Schneider, K. A. (2019). Larger Auditory Cortical Area and Broader Frequency Tuning Underlie Absolute Pitch. *The Journal of Neuroscience*, *39*(15), 2930-2937. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1532-18.2019>
- Mateos-Aparicio, P., & Rodríguez-Moreno, A. (2019). The impact of studying brain plasticity. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, *13*, 66. <https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00066>
- Matthews, T. E., Thibodeau, J. N. L., Gunther, B. P., & Penhune, V. B. (2016). The Impact of Instrument-Specific Musical Training on Rhythm Perception and Production. *Frontiers in Psychology*, *7*, 69. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00069>
- Mehrabinejad, M. M., Rafei, P., Sanjari Moghaddam, H., Sinaeifar, Z., & Aarabi, M. H. (2021). Sex Differences are Reflected in Microstructural White Matter Alterations of Musical Sophistication: A Diffusion MRI Study. *Frontiers in Neuroscience*, *15*, 622053. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.622053>
- Merrett, D. L.; Peretz, I., & Wilson, S. J. (2013). Moderating variables of music training-induced neuroplasticity: a review and discussion. *Frontiers in Psychology*, *4*, 606. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00606>
- Merrett, D. L., & Wilson, S. J. (2012). Music and neural plasticity. En N. S. Rickard & K. McFerran (Eds.). *Lifelong Engagement with Music: benefits for mental health and well-being* (pp. 119-160). Nova Science Publishers.
- Miles S. A., Miranda R. A., & Ullman M. T. (2016). Sex differences in music: a female advantage at recognizing familiar melodies. *Frontiers in Psychology*, *7*, 278. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00278>
- Moore, E., Schaefer, R. S., Bastin, M. E., Roberts, N., & Overy, K. (2017). Diffusion tensor MRI tractography reveals increased fractional anisotropy (FA) in arcuate fasciculus following music-cued motor training. *Brain and Cognition*, *116*, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.05.001>
- Moulton C. (2014). Perfect pitch reconsidered. *Clinical medicine*, *14*(5), 517-519. <https://doi.org/10.7861/clinmedicine.14-5-517>
- Norgaard, M., Stambaugh, L. A., & McCranie, H. (2019). The Effect of Jazz Improvisation Instruction on Measures of Executive Function in Middle School Band Students. *Journal of Research in Music Education*, *67*(3), 339-354. <https://doi.org/10.1177/0022429419863038>
- Oechslin, M.S., Imfeld, A., Loenneker, T., Meyer, M., & Jäncke, L. (2010). The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a function of musical expertise: a diffusion tensor imaging study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 76. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.076.2009>
- Olszewska, A. M., Gaca, M., Herman, A. M., Jednoróg, K., & Marchewka, A. (2021). How Musical Training Shapes the Adult Brain: Predispositions and Neuroplasticity. *Frontiers in Neuroscience*, *15*, 630829. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.630829>
- Penhune, V. B. (2011). Sensitive periods in human development: Evidence from musical training. *Cortex*, *47*(9), 1126-1137. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.010>
- Penhune, V. B. (2019). Musical expertise and brain structure: the causes and consequences of training. En Michael H. Thaut and Donald A. Hodges (Eds.). *The Oxford handbook of music and the brain* (pp. 417-438). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198804123.013.17>
- Penhune, V. B. (2020). A gene-maturation-environment model for understanding sensitive period effects in musical training. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *36*, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2020.05.011>
- Penhune, V. B. (2021). Understanding Sensitive Period Effects in Musical Training. En S.L. Andersen (Ed.) *Sensitive*

- Periods of Brain Development and Preventive Interventions. Current Topics in Behavioral Neurosciences*, 53 (pp. 167-188). Springer. https://doi.org/10.1007/7854_2021_250
- Penhune, V. B., & de Villers-Sidani, E. (2014). Time for new thinking about sensitive periods. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 55. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00055>
- Pool, E. M., Rehme, A. K., Fink, G. R., Eickhoff, S. B., & Grefkes, C. (2014). Handedness and effective connectivity of the motor system. *NeuroImage*, 99, 451-460. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.05.048>
- Ragert, P., Schmidt, A., Altenmüller, E., & Dinse, H. R. (2004). Superior tactile performance and learning in professional pianists: evidence for meta-plasticity in musicians. *European Journal of Neuroscience*, 19(2), 473-478. <https://doi.org/10.1111/j.0953-816X.2003.03142.x>
- Ramos-Loyo, J., González-Garrido, A. A., Llamas-Alonso, L. A., & Sequeira, H. (2022). Sex differences in cognitive processing: An integrative review of electrophysiological findings. *Biological Psychology*, 172, 108370. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2022.108370>
- Ritchie, S. J., Cox, S. R., Shen, X., Lombardo, M. V., Reus, L. M., Alloza, C., Harris, M. A., Alderson, H. L., Hunter, S., Neilson, E., Liewald, D. C. M., Auyeung, B., Whalley, H. C., Lawrie, S. M., Gale, C. R., Bastin, M. E., McIntosh, A. M., & Deary, I. J. (2018). Sex Differences in the Adult Human Brain: Evidence from 5216 UK Biobank Participants. *Cerebral Cortex*, 28(8), 2959-2975. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy109>
- Rose, D., Bartoli, A. J., & Heaton, P. (2019). Formal-informal musical learning, sex and musicians' personalities. *Personality and Individual Differences*, 142, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2018.07.015>
- Ruigrok, A. N. V., Salimi-Khorshidi, G., Lai, M.-C., Baron-Cohen, S., Lombardo, M. V., Tait R. J., & Suckling, J. (2014). A meta-analysis of sex differences in human brain structure. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 39(100), 34-50. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.12.004>
- Shahin, A., Bosnyak, D. J., Trainor, L. J., & Roberts, L. E. (2003). Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians. *The Journal of Neuroscience*, 23(13), 5545-5552. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-13-05545.2003>
- Shahin, A. J., Roberts, L. E., Chau, W., Trainor, L. J., & Miller, L. M. (2008). Music training leads to the development of timbre-specific gamma band activity. *NeuroImage*, 41(1), 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.01.067>
- Shahin, A., Roberts, L. E., & Trainor, L. J. (2004). Enhancement of auditory cortical development by musical experience in children. *Neuroreport*, 15(12), 1917-1921. <https://doi.org/10.1097/00001756-200408260-00017>
- Schlaug, G. (2008). Music, musicians, and brain plasticity. En S. Hallam, I. Cross & M. Thaut (Eds). *Oxford Handbook of Music Psychology*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199298457.013.0018>
- Schlaug, G. (2015). Musicians and music making as a model for the study of brain plasticity. En E. Altenmüller, S. Finger, & F. Boller (Eds.). *Progress in Brain Research. Music, Neurology, and Neuroscience: Evolution, the Musical Brain, Medical Conditions, and Therapies*, 217 (pp. 37-55). Elsevier.
- Schulze, K., Gaab, N., & Schlaug, G. (2009). Perceiving pitch absolutely: Comparing absolute and relative pitch possessors in a pitch memory task. *BMC Neuroscience*, 10, 106. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-106>
- Seppänen, M., Brattico, E., & Tervaniemi, M. (2007). Practice strategies of musicians modulate neural processing and the learning of sound-patterns. *Neurobiology of Learning and Memory*, 87(2), 236-247. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2006.08.011>
- Seppänen, M., Hämäläinen, J., Pesonen, A.-K., & Tervaniemi, M. (2012). Music training enhances rapid neural plasticity of n1 and p2 source activation for unattended sounds. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 43. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00043>
- Shenker, J. J., Steele, C. J., Chakravarty, M. M., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2022). Early musical training shapes cortico-cerebellar structural covariation. *Brain Structure & Function*, 227(1), 407-419. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02409-2>
- 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. *Journal of Neuroscience*, 33(3), 1282-1290. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3578-12.2013>
- Swaminathan, S. & Schellenberg, E. G. (2018). Musical Competence is Predicted by Music Training, Cognitive Abilities, and Personality. *Scientific Reports*, 8(1), 9223. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27571-2>
- Tan, Y. T., McPherson, G. E., Peretz, I., Berkovic, S. F., & Wilson, S. J. (2014). The genetic basis of music ability. *Frontiers in Psychology*, 5, 658. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00658>
- Tervaniemi, M., Janhunen, L., Kruck, S., Putkinen, V., & Huotilainen, M. (2016). Auditory Profiles of Classical, Jazz, and Rock Musicians: Genre-Specific Sensitivity to Musical Sound Features. *Frontiers in Psychology*, 6, 1900. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01900>
- Tervaniemi, M., Rytkönen, M., Schröger, E., Ilmoniemi, R. J., & Näätänen, R. (2001). Superior formation of cortical memory traces for melodic patterns in musicians. *Learning & Memory*, 8(5), 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2001.04.001>

- org/10.1101/lm.39501
- van Vugt, F. T., Hartmann, K., Altenmüller, E., Mohammadi, B., & Margulies, D.S. (2021). The impact of early musical training on striatal functional connectivity. *Neuroimage*, 238, 118251. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118251>
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., Càmara, 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.008>
- Vaquero, L., Rousseau, P. N., Vozian, D., Klein, D., & Virginia, P. (2020). What you learn & when you learn it: Impact of early bilingual & music experience on the structural characteristics of auditory-motor pathways. *Neuroimage*, 213, 116689. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116689>
- Voskuhl, R. & Klein, S. (2019). Sex is a variable in the brain too. *Nature*, 568(7751), 171. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01141-6>
- Vuust, P., Brattico, E., Seppänen, M., Näätänen, R., & Tervaniemi, M. (2012a). Practiced musical style shapes auditory skills. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252(1), 139-146. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06409.x>
- Vuust, P., Brattico, E., Seppänen, M., Näätänen, R., & Tervaniemi, M. (2012b). The sound of music: differentiating musicians using a fast, musical multi-feature mismatch negativity paradigm. *Neuropsychologia*, 50(7), 1432-1443. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.02.028>
- Wan, C., & Schlaug, G. (2010). Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *Neuroscientist*, 16(5), 566-577. <https://doi.org/10.1177/1073858410377805>
- Walhovd, K.B., Fjell, A. M., Reinvang, I., Lundervold, A., Dale, A. M., Eilertsen, D. E., Quinn, B. T., Salat, D., Makris, N., & Fischl, B. (2005). Effects of age on volumes of cortex, white matter and subcortical structures. *Neurobiology of Aging*, 26(9), 1261-1270. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.05.020>
- Walhovd, K. B., Westlye, L. T., Amlien, I., Espeseth, T., Reinvang, I. R., Raz, N., Agartz, I., Salat, D. H., Greve, D. N., Fischl, B., Dale, A. M., & Fjell, A. M. (2011). Consistent neuroanatomical age-related volume differences across multiple samples. *Neurobiology of Aging*, 32(5), 916-932. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2009.05.013>
- Ward, W. D., & Burns, E. M. (1982). Absolute Pitch. En D. Deutsch (Ed.). *The Psychology of music* (pp. 431-451). Academic Press.
- Watanabe, D., Savion-Lemieux, T., & Penhune, V. B. (2007). The effect of early musical training on adult motor performance: evidence for a sensitive period in motor learning. *Experimental Brain Research*, 176(2), 332-340. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0619-z>
- Wengenroth, M., Blatow, M., Heinecke, A., Reinhardt, J., Stippich, C., Hofmann, E., & Schneider, P. (2014). Increased Volume and Function of Right Auditory Cortex as a Marker for Absolute Pitch. *Cerebral Cortex*, 24(5), 1127-1137. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs391>
- Wenhardt, T., Bethlehem, R., Baron-Cohen, S., & Altenmüller, E. (2019). Autistic traits, resting-state connectivity, and absolute pitch in professional musicians: shared and distinct neural features. *Molecular autism*, 10, 20. <https://doi.org/10.1186/s13229-019-0272-6>
- White-Schwoch, T., Carr, K. W., Anderson, S., Strait, D. L., & Kraus, N. (2013). Older adults benefit from music training early in life: biological evidence for long-term training-driven plasticity. *The Journal of Neuroscience*, 33(45), 17667-17674. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2560-13.2013>
- Wilson, S. J., Lusher, D., Wan, C. Y., Dudgeon, P., & Reutens, D. C. (2009). The neurocognitive components of pitch processing: insights from absolute pitch. *Cerebral Cortex*, 19, 724-732. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn121>
- Wizemann, T. M., & Pardue, M. L. (eds.) (2001). *Exploring the Biological Contributions to Human Health: Does Sex Matter?*. National Academies Press.
- Zarate, J. M., & Zatorre, R. J. (2008). Experience-dependent neural substrates involved in vocal pitch regulation during singing. *Neuroimage*, 40(4), 1871-1887. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.01.026>
- Zatorre, R. J. (2003). Absolute Pitch: A Model for Understanding the Influence of Genes and Development on Neural and Cognitive Function. *Nature Neuroscience*, 6(7), 692-695. <https://doi.org/10.1038/nn1085>
- Zatorre, R. J. (2013). Predispositions and Plasticity in Music and Speech Learning: Neural Correlates and Implications. *Science*, 342(6158), 585-589. <https://doi.org/10.1126/science.1238414>
- Zatorre, R. J., Perry, D. W., Beckett, C. A., Westbury, C. F., & Evans, A. C. (1998). Functional anatomy of musical processing in listeners with absolute pitch and relative pitch. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(6), 3172-3177. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.6.3172>
- Zhu, Y. (2018). Influence of music training on the plasticity of the brain. *NeuroQuantology*, 16(5), 234-239. <https://doi.org/10.14704/nq.2018.16.5.1409>