

---

# DISCRIMINACIÓN TONAL EN PERSONAS CON Y SIN ENTRENAMIENTO MUSICAL

## TONAL DISCRIMINATION IN PEOPLE WITH AND WITHOUT MUSICAL TRAINING

## DISCRIMINAÇÃO TONAL EM PESSOAS COM E SEM FORMAÇÃO MUSICAL

---

RECIBIDO: 18 enero 2023

ACEPTADO: 23 mayo 2024

**Franco Giordano Sánchez García**<sup>1</sup> **Miriam Elizabeth Jiménez Maldonado**<sup>2</sup>  
**Teresita de Jesús Villaseñor Cabrera**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitario de Ciencias de la Salud, Universidad de Guadalajara -ORCID ID: 0009-0000-9030-3627

<sup>2</sup> Universidad de Guadalajara. Hospital Civil Fray Antonio Alcalde - ORCID ID: 0009-0009-0176-2625

<sup>3</sup> Universidad de Guadalajara. Hospital Civil Fray Antonio Alcalde - ORCID ID: 0000-0001-5403-436X

### RESUMEN

La discriminación tonal es un proceso que involucra múltiples dominios cognitivos y ha sido asociada con la regulación de diversas áreas neuroanatómicas. Los músicos presentan una percepción tonal incrementada, vinculada a cambios cerebrales tanto estructurales como funcionales. Se han identificado áreas clave en la discriminación tonal y relación con la funcionalidad cerebral. Dado el interés en conocer formas cómo el cerebro procesa los sonidos, la discriminación tonal representa un aspecto fundamental, ya que sugiere un procesamiento diferenciado entre personas con y sin instrucción musical. Esta revisión explora la diversidad de correlaciones en áreas específicas del sistema nervioso y las diferencias funcionales entre músicos y no músicos. El giro de Heschl, el giro temporal superior y el plano temporal se han señalado como zonas clave en la discriminación tonal, vinculadas con áreas poco exploradas, además de cambios funcionales entre músicos, músicos con tono absoluto y no músicos. Sugerimos integrar áreas relacionadas con la discriminación tonal, realizar paradigmas de evaluación de funciones cognitivas en músicos para identificar diferencias en capacidades funcionales específicas, y ampliar los estudios entre músicos con y sin tono absoluto para analizar posibles diferencias en el Sistema Nervioso Central.

**Palabras clave:** discriminación tonal, música, percepción tonal, tono absoluto, neuroimagen, cognición.

**Keywords:** Pitch/tonal discrimination, music, pitch/tonal perception, absolute pitch, neuroimage, cognition.

**Palavras-chave:** discriminação do tom, música, percepção do tom, tom 81bsolute, neuroimagem, cognição.

**Correspondencia:** Miriam Elizabeth Jiménez Maldonado – Email: [elizabeth.jimenez@academicos.udg.mx](mailto:elizabeth.jimenez@academicos.udg.mx)



Publicado bajo licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

### ABSTRACT

Tonal/pitch discrimination is a process that involves multiple cognitive domains and has been associated with the regulation of various neuroanatomical areas. Musicians exhibit an enhanced tonal perception, linked to both structural and functional brain changes. Key areas related to tonal discrimination and brain functionality have been identified. Given the interest in understanding how the brain processes sounds, tonal discrimination represents a fundamental aspect, as it suggests differentiated processing between individuals with and without musical training. This review explores the diversity of correlations in specific areas of the nervous system and the functional differences between musicians and non-musicians. Heschl's gyrus, the superior temporal gyrus, and the planum temporale have been identified as key regions in tonal discrimination, associated with little-explored areas and functional changes between musicians, musicians with absolute pitch, and non-musicians. We suggest integrating areas related to tonal discrimination, implementing cognitive function evaluation paradigms for musicians to identify differences in specific functional capacities, and expanding studies between musicians with and without absolute pitch to analyze potential differences in the Central Nervous System.

### RESUMO

A discriminação tonal é um processo que envolve múltiplos domínios cognitivos e tem sido associada à regulação de várias áreas neuroanatômicas. Os músicos apresentam uma maior percepção tonal, associada a alterações cerebrais estruturais e funcionais. Foram identificadas áreas-chave na discriminação tonal e relacionadas com a funcionalidade cerebral. Dado o interesse em compreender as formas como o cérebro processa os sons, a discriminação tonal representa um aspecto fundamental, uma vez que sugere um processamento diferencial entre pessoas com e sem treino musical. Esta revisão explora a diversidade de correlações em áreas específicas do sistema nervoso e as diferenças funcionais entre músicos e não-músicos. O giro de Heschl, o giro temporal superior e o plano temporal foram identificados como áreas-chave na discriminação da altura, com ligação a áreas pouco exploradas, bem como alterações funcionais entre músicos, músicos de altura absoluta e não-músicos. Sugerimos a integração de áreas relacionadas com a discriminação do tom, a realização de paradigmas de avaliação da função cognitiva em músicos para identificar diferenças em capacidades funcionais específicas, e o alargamento dos estudos entre músicos de tom absoluto e músicos de tom não absoluto para analisar possíveis diferenças no Sistema Nervoso Central.

La percepción y producción tonal y musical generan demandas únicas en el Sistema Nervioso (SN), por lo que su entendimiento podría revelar aspectos específicos del funcionamiento cerebral y cognitivo.<sup>1</sup> Estos procesos se relacionan con diversos tipos de procesamiento cerebral especializado, por lo que han sido cada vez más estudiados en la investigación cognitiva y de funcionamiento cerebral.<sup>2</sup> Las diferencias entre músicos y no músicos se consideran relacionadas principalmente con el aprendizaje, el instrumento en el que se entrenaron, el momento del desarrollo en que se comenzó la formación musical, y la plasticidad del SN, que permite una adaptación cerebral vinculada al entrenamiento musical.<sup>3</sup>

La música y el lenguaje son los procesos que representan los usos más complejos del sonido, lo que ha motivado comparaciones entre sus componentes, como fonemas y tonos, o palabras y melodías, organizándose jerárquicamente en complejidad y alcanzando niveles como oraciones y canciones.<sup>4</sup> Los patrones melódicos, los intervalos tonales específicos y las variaciones tonales son codificados en la memoria, siendo fundamentales para el procesamiento musical.<sup>5 6</sup> En este sentido, los cambios tonales en la música tienden a ocurrir en escalas de tiempo mucho menores que en el lenguaje, y estas rápidas variaciones en los componentes tonales contribuyen a la microestructura melódica, influyendo en el timbre, y permitiendo que los distintos modos de percepción musical sean identificados más rápidamente.<sup>7</sup> Aunado a ello, el hemisferio derecho del cerebro desempeña un rol predominante en el procesamiento tonal, posiblemente como resultado de su especialización en el lenguaje, como un sistema de mayor orden que organiza circuitos locales intrahemisféricos, sirviendo así como una solución general ante la necesidad de optimizar el procesamiento acústico del entorno tanto en dominios temporales como de frecuencia.<sup>8</sup>

## CONCEPTOS TEÓRICOS

### ***Neurodesarrollo en la discriminación tonal.***

La discriminación tonal ha sido objeto de estudio desde etapas tempranas. En relación con los cambios de frecuencia, se ha demostrado en fetos y recién nacidos la habilidad cognitiva de discriminación tonal, evidenciada por sus respuestas a variaciones en la frecuencia de sonidos con distintas latencias.<sup>9</sup> Esto confirma la presencia de esta habilidad cognitiva en etapas prenatales y facilita la identificación del sistema auditivo en fases muy tempranas.

El desarrollo de la discriminación tonal, la capacidad para diferenciar entre tonos musicales es un proceso que involucra desde factores genéticos hasta ambientales. Desde la infancia, la exposición a un entorno sonoro y, en particular, a la música facilita el refinamiento de esta habilidad, ya que el cerebro comienza a organizar y procesar las frecuencias sonoras de manera más eficiente. La práctica musical regular y el entrenamiento en habilidades auditivas juegan un papel fundamental en este desarrollo, permitiendo que los individuos afinen su percepción de las diferencias sutiles en altura, timbre y duración de los tonos. Investigaciones sugieren que las áreas auditivas del cerebro, como la corteza auditiva primaria, y redes asociadas, como la corteza prefrontal, se adaptan y fortalecen con el tiempo mediante el entrenamiento musical, contribuyendo a una mejor discriminación tonal. Esta habilidad es esencial no sólo en el ámbito musical, sino también en el reconocimiento de habla, su prosodia y la adaptación a ambientes sonoros complejos, demostrando su impacto en el procesamiento cognitivo y emocional.<sup>1, 3, 13</sup>

Así mismo, se ha descubierto que los recién nacidos de uno a tres días muestran cambios en la actividad neuronal, especialmente en el hemisferio derecho, al escuchar música en diferentes tonalidades, con una alteración específica de esta actividad ante la disonancia musical. Esto demuestra que los circuitos neurales utilizados para el procesamiento musical están presentes ya en el recién nacido.<sup>10</sup> Además, se ha encontrado que, desde los cuatro meses los bebés muestran preferencia por tonos consonantes sobre los disonantes,<sup>11</sup> caracterizados estos últimos por ser intervalos aumentados o disminuidos.

Las capacidades de los niños para percibir diferencias acústicas básicas también pueden ser estudiadas mediante potenciales relacionados a eventos (PRE's). En un estudio realizado por Piazza<sup>12</sup> con infantes de seis meses, se empleó un paradigma acústico *oddball* pasivo para presentar tonos estándar, observando respuestas tanto en la corteza auditiva como en áreas corticales extra-auditivas, principalmente bilaterales. También se encontraron combinaciones corticales diferenciadas que contribuyen a la percepción de la frecuencia y duración de secuencias alteradas. A través de distintos análisis funcionales, se localizaron zonas de respuesta rápida cercanas a la corteza cingulada medial, confirmando así lo observado en estudios previos en infantes.

### ***Neuroanatomía funcional de la discriminación tonal.***

La música es un estímulo multimodal que transmite información visual, auditiva y motora al SN, particularmente al cerebro, el cual, hasta donde se conoce, cuenta con diferentes redes, incluyendo una específica para el procesamiento multimodal, compuesta principalmente por regiones fronto-temporo-parietales.<sup>13</sup> La activación de esta red puede ser utilizada en el tratamiento de diversos síndromes y enfermedades, ya sea para rehabilitación o para estimular conexiones neuronales alteradas. Es por ello por lo que resulta esencial estudiar las diferencias entre el cerebro de personas expuesta a la música y observar cómo el cerebro se adapta según las necesidades para mejorar tanto la percepción como la ejecución musical.<sup>14</sup>

Las rutas anatómicas y funcionales del análisis del sonido (similares las de procesamiento visual) distinguen dos rutas principales de procesamiento: 1) la ruta anterior/ventral, asociada a la identificación o el "qué", y 2) ruta posterior/dorsal, encargada de identificar la localización espacial o el "dónde". La corteza auditiva se organiza, tanto anatómicamente como funcionalmente, en redes ventrales para el reconocimiento del sonido y en redes dorsales para su localización. En este contexto, se ha asociado la localización del sonido con la activación del giro de Heschl y el *planum temporale*.<sup>15</sup>

Estas estructuras, el giro de Heschl y el *planum temporale*, están implicadas en subprocesos de discriminación e integración tonal. A través de resonancia magnética funcional (RMf), Puschmann y colaboradores<sup>16</sup> observaron activación ante tonos dicóticos, especialmente en la zona lateral del giro de Heschl de manera bilateral. Asimismo, se encontraron activaciones relacionadas con la melodía en el plano temporal y el polar. En otro estudio con RMf, Rinne y colaboradores<sup>17</sup> realizaron una tarea de memoria de trabajo tonal, de tipo *n-back* con variación de dificultad, encontrando activaciones anteriores de la corteza auditiva en las tareas de discriminación, y activaciones mayores en el lóbulo parietal inferior en tareas de memoria. En personas con entrenamiento musical, el tono se procesa predominantemente en el hemisferio izquierdo, en áreas como la corteza prefrontal dorsolateral.

Además de las áreas corticales, el procesamiento tonal o musical involucra otras estructuras; por ejemplo, el ritmo, la métrica y el tempo son procesados en los ganglios basales y el cerebelo, sugiriendo su automatización, mientras que el tiempo se procesa bilateralmente en el giro y surco temporal superior, complejizando los requerimientos cognitivos y aumentando la regulación cortical. La melodía y su contorno son procesados en el giro temporal superior derecho, los intervalos musicales en el lóbulo temporal dorsal de forma bilateral, y la sintaxis musical en los lóbulos frontales bilateralmente, en áreas adyacentes a las implicadas en el procesamiento de la sintaxis del lenguaje. En las áreas posteriores del lóbulo temporal, bilateralmente, se procesa la semántica musical.<sup>13 14 18 19 20</sup> Así, el procesamiento musical se organiza en una serie de subprocesos que, al igual que su jerarquización en complejidad, también son procesados en estructuras corticales y subcorticales en función de dicha jerarquía.

Una de las fases iniciales del procesamiento auditivo corresponde al tono, esencial para la percepción del lenguaje, la música y el reconocimiento auditivo en general. Los cambios tonales pueden ser detectados por el sistema auditivo desde la infancia temprana e incluso antes del nacimiento, como hemos mencionado.<sup>21</sup> Esta discriminación tonal puede verse afectada por la adquisición de nuevos idiomas, que favorece el engrosamiento cortical; se ha encontrado una correlación entre la discriminación de cambios tonales y el grosor cortical en el homólogo derecho del área de Broca.<sup>22</sup> La capacidad para procesar y discriminar cambios en la producción de tonos activa la corteza prefrontal derecha, subrayando el rol del hemisferio derecho en la percepción y discriminación tonal.<sup>23</sup>

Parámetros como la intensidad y duración del tono también son relevantes en el procesamiento musical; se han observado diferencias de actividad cerebral en la categorización de tonos por intensidad, el en cual predominó la actividad en la corteza auditiva izquierda, mientras que en la categorización por su duración se observó actividad tanto en la corteza auditiva izquierda como en la derecha.<sup>24</sup>

Además de los aspectos de orden superior del procesamiento de la discriminación tonal, no sólo están implicadas las estructuras cortico-subcorticales; en la regulación sensorial básica, la cóclea y la membrana basilar responden a estímulos sonoros de diferentes frecuencias que movilizan distintas partes de la membrana hacia atrás o adelante, lo cual indica que la codificación de frecuencias se realiza por localización, especialmente en tonos altos y bajos, interpretados por neuronas específicas para cada frecuencia.<sup>25</sup> Por lo tanto, el procesamiento requerido es de tipo multimodal.

## CONCEPTOS APLICADOS

### ***Diferencias entre personas con y sin entrenamiento musical:***

El entrenamiento musical facilita cambios estructurales y funcionales en el cerebro, lo cual sugiere que la exposición musical puede modificar habilidades cognitivas específicas. Sin embargo, estos efectos son transitorios y no se relacionan con la inteligencia en personas sin entrenamiento musical, aunque pueden persistir en músicos o individuos con formación musical.<sup>26</sup>

En cuanto a la corteza auditiva primaria es sabido que responde a tonos puros de diversas frecuencias. No obstante, el reconocimiento de tonos complejos también se asocia con esta región cortical, según estudios de imagen en humanos. Se observa que la discriminación tonal ocurre en una zona de la circunvolución temporal superior y lateral a la corteza auditiva primaria.<sup>27</sup>

Así, investigar los efectos del entrenamiento musical en la plasticidad cerebral de músicos podría ser un modelo idóneo para estudiar el cerebro humano, y examinar dos aspectos clave: la complejidad del estímulo musical y grado de exposición a dicho estímulo. A pesar de que aún se desconocen ciertos aspectos específicos, estudios de imagen cerebral han identificado diferencias estructurales en el cuerpo calloso anterior, cerebelo, plano temporal y áreas motoras, que experimentan cambios tanto en su estructura como en su tamaño. También se han observado modificaciones en la discriminación tonal, como el fenómeno de oído absoluto (vinculado a cambios en el tamaño del plano temporal), el control motor grueso y fino, y la coordinación bimanual.<sup>28</sup>

Los músicos tienden a presentar una discriminación tonal más avanzada en comparación con personas sin entrenamiento musical. Esto se debe a que la habilidad de discriminación tonal en músicos se relaciona con una representación mejorada de los tonos en etapas centrales del sistema auditivo, en lugar de una mayor selectividad de frecuencias periféricas.<sup>29</sup> Un estudio de los correlatos corticales y subcorticales en la discriminación tonal mostró que los músicos presentan respuestas neuronales de mayor intensidad, esencialmente para tonos complejos, en áreas hemisféricas derechas relacionadas con el giro temporal superior derecho, el giro de Heschl, la corteza de la ínsula, el giro frontal inferior y el colículo inferior, diferenciando así los patrones funcionales y estructurales entre músicos y no músicos.<sup>30</sup>

Además, estudios muestran que el entrenamiento musical mejora el procesamiento y la discriminación auditiva. En un experimento en el que músicos y personas sin entrenamiento musical escucharon secuencias auditivas, los músicos demostraron una mayor capacidad para detectar desviaciones en el patrón rítmico, lo cual sugiere que el entrenamiento musical afecta la memoria auditiva.<sup>3</sup> Igualmente, en estudios morfométricos de la materia gris se ha encontrado que los músicos con oído absoluto presentan un incremento significativo en el plano temporal izquierdo y una mayor profundidad en el surco central en comparación con músicos sin oído absoluto.

En otro experimento, se evaluaron las capacidades de discriminación unisensorial y multisensorial en estímulos auditivos, táctiles y auditivos-táctiles, encontrando que los músicos presentan umbrales de discriminación más bajos que los no músicos en todos estos tipos de estímulos.<sup>31</sup>

También se ha evidenciado que el volumen de la materia gris en la zona anteromedial del giro de Heschl en la corteza auditiva es un 130% mayor en músicos que en personas sin formación musical, subrayando la importancia de esta región en la percepción tonal.<sup>32</sup>

No sólo la instrucción musical influye en el procesamiento musical, sino que la maduración encefálica desempeña un rol esencial en la discriminación tonal melódica y rítmica. Ellis y colaboradores<sup>33</sup> evaluaron, mediante RMf, a un grupo extenso de personas entre cinco y 33 años, con diferentes niveles de entrenamiento musical (oscilando entre cero y 21,000 horas de práctica). Se encontraron efectos relacionados a la edad y maduración cerebral, tanto para la discriminación tonal melódica como rítmica, en la unión temporofrontal, la corteza premotora ventral y el surco intraparietal inferior. El tiempo de entrenamiento musical se relacionó con activación en la porción posterior del giro temporal superior izquierdo y el *planum temporale*.

La percepción tonal y musical presenta demandas únicas para el SN, revelando aspectos específicos del funcionamiento cerebral y cognitivo. Las diferencias entre músicos y no músicos se atribuyen al aprendizaje, la etapa de desarrollo en que comenzó el entrenamiento musical y la plasticidad del SN, que permite la adaptación cerebral ante dicha formación musical.

Los estudios anteriores han mostrado que importantes activaciones y relaciones estructurales en el giro de Heschl, la corteza superior temporal y el plano temporal a partir de la percepción tonal.<sup>15 16 27 34</sup> Sin embargo, también se ha identificado una red funcional más amplia, incluyendo la corteza prefrontal, la ínsula, el putamen, el giro inferior derecho, la corteza rinal, el área motora suplementaria anterior y componentes hipocámpales, lo que sugiere que el procesamiento de la música implica una red compleja de estructuras interconectadas y que sus variaciones pueden ser a causa de la tarea más que de una especialización de ciertas estructuras.<sup>15 24</sup>

Custodio y Cano-Campos<sup>26</sup> y otros estudios han demostrado que el entrenamiento musical produce cambios estructurales y funcionales en el SN, en comparación con personas sin entrenamiento musical,<sup>29 30 32 35 36</sup> incluso desde etapas tempranas,<sup>6 10 11 12 37</sup> incluyendo el desarrollo prenatal como se demuestra en los estudios con fetos de Draganova y colaboradores.<sup>9</sup> Esto confirma que los músicos presentan variaciones en sus funciones cognitivas en comparación con personas sin entrenamiento musical, como indican investigaciones de Akiva-Kabiri y Henik,<sup>38</sup> Zatorre et. al.<sup>1</sup> y Soria-Urios.<sup>13 14</sup> Este tipo de diferencias funcionales se revisaron en las investigaciones de Sharp, et. al.<sup>31</sup>, Justel y Abraham<sup>3</sup>, Gaab y Schlaugh<sup>37</sup>, Junger, et. al.<sup>39</sup>, Weston et. al.<sup>40</sup>, Hernández, et. al.<sup>41</sup>, Chang, et. al.<sup>42</sup>, Mazaheri, et. Al.<sup>43</sup>, Münte y Altenmüller<sup>28</sup>, Moerel et. Al.<sup>44</sup>, y Bidelman<sup>45 46</sup>, y pueden darse en sentido de la atención, la plasticidad cerebral, la organización tonal, la saliencia, la detección de desviaciones en secuencias auditivas, discriminaciones unisensoriales o multisensoriales, memoria tonal, el sistema de recompensa y el placer recibido, la identificación de la voz según el género del tono, la percepción temporal, e incluso las funciones ejecutivas, como la fluidez verbal, la atención ejecutiva y la velocidad de procesamiento.

Además, la habilidad de oído absoluto que presentan algunos músicos genera diferencias no sólo entre músicos y no músicos, sino también entre aquellos músicos que poseen esta habilidad y aquellos que no. Investigaciones realizadas Loui y colaboradores<sup>47</sup>, entre otros<sup>48 49</sup>, han explorado este fenómeno en profundidad, revelando cómo el oído absoluto influye en la diferenciación de tonos y la percepción musical. Estos estudios sugieren que los músicos con oído absoluto no sólo tienen un rendimiento superior en tareas de identificación tonal, sino que también exhiben diferencias en la actividad cerebral al procesar estímulos auditivos, lo que destaca la importancia de esta habilidad en el desarrollo y la práctica musical.

Con base en lo anterior y debido a la amplia variedad de estructuras relacionadas con la discriminación tonal, es prioritario integrar estas áreas para identificar redes neurales especializadas en esta función. Esta integración permitirá comprender mejor cómo interactúan diferentes regiones del cerebro en el procesamiento auditivo. Además, será fundamental tratar de aislar otro tipo de funciones que podrían estar relacionadas, ya que el tipo de tareas que utilizadas para evaluar la discriminación tonal puede influir en los resultados y en la interpretación de los datos. Esto no sólo contribuirá a una comprensión más precisa de la neuroanatomía involucrada, sino que también podría tener implicaciones en el diseño de intervenciones y programas de entrenamiento musical que optimicen las capacidades auditivas.

Por otro lado, es fundamental considerar la creación de un paradigma específico de evaluación que incluya una amplia gama de funciones cognitivas y ejecutivas, así como tareas que sean congruentes con las habilidades particulares que pueden desarrollarse en personas con entrenamiento musical. Esto cobra relevancia, ya que se ha demostrado que los músicos presentan capacidades cognitivas y ejecutivas funcionales diferentes a las de quienes no han recibido dicho entrenamiento. Al hacerlo, se podrá establecer un perfil diferencial que se utilice en el ámbito de la rehabilitación, aplicando el entrenamiento musical para aquellos que no tienen formación musical. Además, este enfoque permitirá aprovechar el entrenamiento musical en personas que sí son músicos, ya sea como un factor de protección o como una oportunidad para potenciar su rehabilitación funcional.

Asimismo, es importante ampliar los estudios sobre personas con entrenamiento musical que posean diferentes habilidades, como el oído absoluto, en comparación con aquellas que no la presenten. Esto permitirá entender las diferencias que pueden surgir, tanto a nivel estructural como funcional, en el SN. Además, es necesario investigar en razones específicas y las condiciones en las que puede manifestarse este tipo de habilidad, así como su papel en actividades cotidianas. También es crucial considerar su utilidad en la rehabilitación de personas con fallos cognitivos, así como el impacto que puede tener en adultos que desarrollan esta habilidad desde edades tempranas en la infancia.

Finalmente, se ha documentado una amplia variedad de estudios que abordan distintos paradigmas, habilidades utilizadas y tipo de población. Aunque esta diversidad contribuye de manera significativa al estado del arte en el reconocimiento musical, también presenta un desafío: la heterogeneidad de los enfoques que dificulta la identificación de todas las redes neuronales implicadas en este proceso. Por lo tanto, es fundamental trabajar hacia una homogeneización de los estudios en esta área, lo que permitiría una comprensión más clara y precisa de las complejas interacciones y estructuras involucradas en el reconocimiento musical. Esta unificación facilitaría la comparación de resultados y, en última instancia, podría potenciar el avance de la investigación en este campo.

## CONCLUSIONES

Para futuras investigaciones, sugerimos una integración sistemática de las áreas estructurales y funcionales vinculadas a la discriminación tonal, ya que su estudio unificado podría revelar redes neuronales especializadas y sus posibles interacciones en la percepción musical. Además, recomendamos desarrollar un paradigma de evaluación específico que abarque una amplia gama de funciones cognitivas y ejecutivas en músicos, con especial atención en aquellos con entrenamiento musical, dadas las diferencias funcionales que pueden presentar en comparación con personas sin este tipo de entrenamiento. Este enfoque podría ayudar a establecer perfiles diferenciales que ofrezcan aplicaciones en ámbitos de rehabilitación, así como estrategias de protección y desarrollo de capacidades en músicos.

Así mismo, consideramos importante ampliar los estudios que comparen a músicos con y sin tono absoluto, puesto que explorar más a fondo las diferencias estructurales y funcionales en el sistema nervioso central en estos grupos podría proporcionar información clave sobre la especialización neural en el reconocimiento musical. Esto debería incluir una revisión exhaustiva de temas interrelacionados, como la amusia, el lenguaje y otros trastornos que podrían compartir bases estructurales o funcionales alteradas. Una evaluación detallada de estas conexiones permitiría no sólo entender mejor cómo influye el entrenamiento musical en la plasticidad neural, sino también en qué medida estas diferencias pueden impactar en el desarrollo y tratamiento de dificultades cognitivas y lingüísticas.

Por último, en pos de comprender mejor los mecanismos neurobiológicos subyacentes a la discriminación tonal, es fundamental realizar estudios adicionales de neuroimagen funcional (como RMf, PET o MEG), que permitan identificar las áreas cerebrales activadas durante tareas de discriminación tonal. La implementación de estudios longitudinales aportaría información sobre cómo cambia la actividad cerebral con la práctica o con la exposición continua a entornos musicales específicos. Así mismo, estudios de conectividad cerebral permitirían explorar la interacción entre distintas áreas cerebrales en estas tareas, revelando las redes neurales especializadas y los patrones de conectividad entre regiones auditivas, de procesamiento lingüístico y de memoria, todos asociados a la discriminación tonal. Además, la investigación genética y epigenética podría enriquecer el entendimiento de las capacidades auditivas y lingüísticas, al analizar variantes génicas relacionadas con la percepción auditiva o la plasticidad neural. Esto ayudaría a explicar por qué algunos individuos son más hábiles en la discriminación tonal o el desarrollo del tono absoluto, y cómo factores ambientales, como la exposición temprana al lenguaje tonal o a la música, pueden modular la expresión de estos genes.

Entre las limitaciones del estudio, se destaca que la mayoría de las investigaciones se basan en tareas específicas de discriminación auditiva realizadas en entornos controlados, lo cual podría no reflejar la complejidad de la discriminación tonal en contextos más naturales o dinámicos. Otra limitación importante es la homogeneidad de las muestras de participantes, dado que en diversos casos se han utilizado poblaciones reducidas o pertenecientes a una sola cultura, lo cual restringe la posibilidad de generalizar los resultados a individuos de diferentes orígenes lingüísticos y culturales, quienes podrían poseer distintas habilidades en la percepción tonal. Asimismo, las herramientas de medición y los protocolos experimentales empleados pueden no captar todas las variables que inciden en la discriminación tonal, tales como factores individuales (edad, experiencia musical) o el contexto social y lingüístico. Por ende, es necesario que en futuras investigaciones incluyan muestras más diversas y contextos de evaluación más ecológicamente válidos, a fin de mejorar la aplicabilidad de los hallazgos a una variedad más amplia de escenarios culturales y lingüísticos.

### Declaración de conflictos de interés.

Los autores declararon no tener conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- <sup>1</sup> Zatorre, R., Chen, J., Penhune, V. (2007) *When the brain plays music: auditory–motor interactions in music perception and production*. *Nature reviews neuroscience*; 8(7): 547-558.
- <sup>2</sup> Pantev, C., Herholz, S. (2011) *Plasticity of the human auditory cortex related to musical training*. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*; 35(10): 2140-2154.
- <sup>3</sup> Justel, N., Abrahan. V. (2012) *Plasticidad cerebral: Participación del entrenamiento musical*. *Suma Psicológica*; 19(2): 97-108.
- <sup>4</sup> Krumhansl, CL. (2001) *Cognitive foundations of musical pitch*. Oxford University Press. 17th ed. New York, EE. UU.: Oxford University Press.
- <sup>5</sup> Attneave, F., Olson, R. (1971) *Pitch as a medium: A new approach to psychophysical scaling*. *The American journal of psychology*; 84(2):147-66.
- <sup>6</sup> Vos, P., Troost, J. (1989) *Ascending and descending melodic intervals: Statistical findings and their perceptual relevance*. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*; 6(4): 383-396.
- <sup>7</sup> Miller, J., Carterette, E. (1975) *Perceptual space for musical structures*. *The Journal of the Acoustical Society of America*; 58(3): 711-720.
- <sup>8</sup> Zatorre, R., Belin, P., Penhune, V. (2002) *Structure and function of auditory cortex: music and speech*. *Trends in cognitive sciences*; 6(1): 37-46.
- <sup>9</sup> Draganova, R., Eswaran, H., Murphy, P., Huotilainen, M., Lowery, C., Preissl, H. (2005) *Sound frequency change detection in fetuses and newborns, a magnetoencephalographic study*. *Neuroimage*; 28(2): 354-361.
- <sup>10</sup> Perani, D., Saccuman, M. C., Scifo, P., Spada, D., Andreolli, G., Rovelli, R, et. al. (2010) *Functional specializations for music processing in the human newborn brain*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*; 107(10): 4758-4763.
- <sup>11</sup> Zentner, M., Kagan, J. (1998) *Infants' perception of consonance and dissonance in music*. *Infant Behavior and Development*; 21(3): 483-492.
- <sup>12</sup> Piazza, C., Cantiani, C., Akalin-Acar, Z., Miyakoshi, M., Benasich, A., Reni, G, et. al. (2016) *ICA-derived cortical responses indexing rapid multi-feature auditory processing in six-month-old infants*. *Neuroimage*; 133: 75-87.
- <sup>13</sup> Soria-Urios, G., Duque, P., García-Moreno, J. (2011) *Música y cerebro: fundamentos neurocientíficos y trastornos musicales*. *Rev Neurol*; 52(1): 45-55.
- <sup>14</sup> Soria-Urios, G., Duque, P., García-Moreno, J. (2011) *Música y cerebro (II): evidencias cerebrales del entrenamiento musical*. *Rev Neurol*; 53(12): 739-746.
- <sup>15</sup> Barrett, D., Hall, D. (2006) *Response preferences for “what” and “where” in human non-primary auditory cortex*. *Neuroimage*; 32(2): 968-977.
- <sup>16</sup> Puschmann, S., Uppenkamp, S., Kollmeier, B., Thiel, C. (2010) *Dichotic pitch activates pitch processing centre in Heschl's gyrus*. *Neuroimage*; 49(2): 1641-1649.
- <sup>17</sup> Rinne, T., Koistinen, S., Salonen, O., Alho, K. (2009) *Task-dependent activations of human auditory cortex during pitch discrimination and pitch memory tasks*. *Journal of Neuroscience*; 29(42): 13338-13343.
- <sup>18</sup> Gómez, M. (2007) *Música y neurología*. *Neurología*; 22(1): 39-45.
- <sup>19</sup> Bermudez, P., Lerch, J., Evans, A., Zatorre, R. (2008) *Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-based morphometry*. *Cerebral cortex*; 19(7): 1583-1596.
- <sup>20</sup> García-Casares, N., Torres, M., Walsh, S., González-Santos, P. (2013) *Modelo de cognición musical y amusia*. *Neurología*; 28(3): 179-186.
- <sup>21</sup> Maess, B., Jacobsen, T., Schröger, E., Friederici, A. (2007) *Localizing pre-attentive auditory memory-based comparison: magnetic mismatch negativity to pitch change*. *Neuroimage*; 37(2): 561-571.
- <sup>22</sup> Novén, M., Schremm, A., Nilsson, M., Horne, M., Roll, M. (2019) *Cortical thickness of Broca's area and right homologue is related to grammar learning aptitude and pitch discrimination proficiency*. *Brain and language*; 188: 42-47
- <sup>23</sup> Zatorre, R., Evans, A., Meyer, E., Gjedde, A. (1992) *Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing*. *Science*; 256(5058): 846-849.
- <sup>24</sup> Angenstein, N., Brechmann, A. (2013) *Division of labor between left and right human auditory cortices during the processing of intensity and duration*. *Neuroimage*; 83: 1-11.
- <sup>25</sup> Manley, G., Narins, P., Fay, R. (2012) *Experiments in comparative hearing: Georg von Békésy and beyond*. *Hearing research*; 293(1-2): 44-50.
- <sup>26</sup> Custodio, N., Cano-Campos, M. (2017) *Efectos de la música sobre las funciones cognitivas*. *Revista de Neuro-Psiquiatría*; 80(1): 60-69.
- <sup>27</sup> Bendor, D., Wang, X. (2006) *Cortical representations of pitch in monkeys and humans*. *Current opinion in neurobiology*; 16(4): 391-399.



- <sup>28</sup> Münte, T., Altenmüller, E., Jäncke, L. (2002) *The musician's brain as a model of neuroplasticity*. *Nature Reviews Neuroscience*; 3(6): 473.
- <sup>29</sup> Bianchi, F., Santurette, S., Wendt, D., Dau, T. (2016) *Pitch discrimination in musicians and non-musicians: Effects of harmonic resolvability and processing effort*. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*; 17(1): 69-79.
- <sup>30</sup> Bianchi, F., Hjortkjær, J., Santurette, S., Zatorre, R., Siebner, H., Dau, T. (2017) *Subcortical and cortical correlates of pitch discrimination: Evidence for two levels of neuroplasticity in musicians*. *Neuroimage*; 163: 398-412.
- <sup>31</sup> Sharp, A., Houde, M., Maheu, M., Ibrahim, I., Champoux, F. (2019) *Improved tactile frequency discrimination in musicians*. *Experimental brain research*; 237(6): 1575-1580
- <sup>32</sup> Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H., Specht, H., Gutschalk, A., Rupp, A. (2002) *Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians*. *Nature neuroscience*; 5(7): 688.
- <sup>33</sup> Ellis, R., Norton, A., Overy, K., Winner, E., Alsop, D. Schlaug, G. (2012) *Differentiating maturational and training influences on fMRI activation during music processing*. *Neuroimage*; 60(3): 1902-1912.
- <sup>34</sup> Tse, C., Penney, T. (2008) *On the functional role of temporal and frontal cortex activation in passive detection of auditory deviance*. *Neuroimage*; 41(4): 1462-1470.
- <sup>35</sup> Bermudez, P., Zatorre, R. (2005) *Differences in gray matter between musicians and nonmusicians*. *Annals of the New York Academy of Sciences*; 1060(1): 395-399.
- <sup>36</sup> Gaab, N., Schlaug, G. (2003) *Musicians differ from nonmusicians in brain activation despite performance matching*. *Annals of the New York Academy of Sciences*; 999(1): 385-388.
- <sup>37</sup> Ruiz, E. (2013) *Beneficios del entrenamiento musical en el desarrollo de las funciones ejecutivas*. *UNIR*: 33-37
- <sup>38</sup> Akiva-Kabiri, L., Henik, A. (2012) *A unique asymmetrical stroop effect in absolute pitch possessors*. *Experimental Psychology*; 59(5): 272-8
- <sup>39</sup> Junger, J., Pauly, K., Bröhr, S., Birkholz, P., Neuschaefer-Rube, C., Kohler, C., et. al. (2013) *Sex matters: Neural correlates of voice gender perception*. *Neuroimage*; 79: 275-287.
- <sup>40</sup> Weston, P., Hunter, M., Sokhi, D., Wilkinson, I., Woodruff, P. (2015) *Discrimination of voice gender in the human auditory cortex*. *Neuroimage*; 105: 208-214.
- <sup>41</sup> Hernández, M., Palomar-García, M., Nohales-Nieto, B., Olcina-Sempere, G., Villar-Rodríguez, E., Pastor, R., et. al. (2019) *Separate contribution of striatum volume and pitch discrimination to individual differences in music reward*. *Psychological science*; 30(9): 1352-1361.
- <sup>42</sup> Chang, A., Bosnyak, D., Trainor, L. (2019) *Rhythmicity facilitates pitch discrimination: Differential roles of low and high frequency neural oscillations*. *Neuroimage*; 198: 31-43.
- <sup>43</sup> Mazaheri, A., Van Schouwenburg, M., Dimitrijevic, A., Denys, D., Cools, R., Jensen, O. (2014) *Region-specific modulations in oscillatory alpha activity serve to facilitate processing in the visual and auditory modalities*. *Neuroimage*; 87: 356-362.
- <sup>44</sup> Moerel, M., De Martino, F., Santoro, R., Yacoub, E., Formisano, E. (2015) *Representation of pitch chroma by multi-peak spectral tuning in human auditory cortex*. *Neuroimage*; 106: 161-169.
- <sup>45</sup> Bidelman, G., Grall, J. (2014) *Functional organization for musical consonance and tonal pitch hierarchy in human auditory cortex*. *Neuroimage*; 101: 204-214.
- <sup>46</sup> Bidelman, G., Krishnan, A. (2009) *Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem*. *Journal of Neuroscience*; 29(42): 13165-13171.
- <sup>47</sup> Loui, P., Zamm, A., Schlaug, G. (2012) *Enhanced functional networks in absolute pitch*. *Neuroimage*; 63(2): 632-640.
- <sup>48</sup> Coll, S., Vuichoud, N., Grandjean, D., James, C. (2019) *Electrical Neuroimaging of Music Processing in Pianists With and Without True Absolute Pitch*. *Frontiers in Neuroscience*; 13: 142.
- <sup>49</sup> McKetton, L., DeSimone, K., Schneider, K. (2019) *Larger auditory cortical area and broader frequency tuning underlie absolute pitch*. *Journal of Neuroscience*; 39(15): 2930-2937.