
CANTO Y CIENCIA: ASPECTOS CIENTÍFICOS DE LA VOZ CANTADA

SINGING AND SCIENCE: SCIENTIFIC ASPECTS OF THE SINGING VOICE

Isabel García-López•

RESUMEN

El estudio de la voz cantada puede abordarse tanto desde el punto de vista artístico como desde el científico. Estas dos perspectivas no siempre se combinan en los profesionales del canto ni en los de la medicina.

El acto de cantar comienza a nivel cerebral con la intención voluntaria de hacerlo y se produce gracias a la fuente de energía, el aire, que hace vibrar las cuerdas vocales situadas en la laringe para producir el sonido. Dicho sonido se modifica en el tracto vocal permitiendo la articulación del lenguaje y los fenómenos de resonancia de la voz. Todo este proceso está gobernado por la audición, elemento fundamental del canto.

El objetivo de este artículo es revisar los elementos anatómicos que intervienen en todo este proceso, así como explicar los fenómenos fisiológicos que hacen que se produzca la voz cantada.

Palabras clave: voz cantada; canto; laringe; cuerdas vocales; resonancia; respiración.

ABSTRACT

The study of the singing voice can be approached from an artistic or a scientific perspective. Both aspects are not always present in professional singers and in medical doctors.

Singing starts at the brain level with the voluntary intention to do so, and it is produced when the source, the air, generates vibration of the vocal folds. The sound

• Isabel García-López es Doctora en Medicina y Cirugía por la Universidad Autónoma de Madrid. Médico Especialista en Otorrinolaringología y en Medicina Familiar y Comunitaria. Asimismo, es Profesora de Piano y Profesora Superior de Canto por el COSCYL. Trabaja en Madrid como médico especialista en patología de la voz, profesora de canto y rehabilitadora vocal, desarrollando además una intensa actividad docente e investigadora a nivel internacional.

Recepción del artículo: 13-VIII-2020. Aceptación del artículo: 01-IX-2020.

of the larynx is then modified by the vocal tract allowing articulation and resonance phenomena. All this process is under the guidance of the ear, essential element of singing.

The objective of this paper is to review the anatomical structures involved in this entire process and to explain how the physiological phenomena occur when singing.

Key words: singing voice; singing; larynx; vocal folds; resonance; breathing.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la voz cantada puede abordarse desde el punto de vista artístico o desde el científico.

Tradicionalmente el estudio del canto se ha abordado contando con los conocimientos científicos del momento respecto a la anatomía y fisiología de la voz cantada. Valga como ejemplo uno de los maestros de canto más famosos de todos los tiempos, Manuel García, que sin ser médico descubrió, en 1849 cómo un pequeño espejillo podía utilizarse para ver sus propias cuerdas vocales¹. Dicho instrumento, que se conoce desde entonces como espejillo laríngeo, se utiliza hoy en día todavía en las consultas de otorrinolaringología para evaluar las cuerdas vocales de los pacientes.

Otro ilustre ejemplo de la importancia de esta relación canto-ciencia es el de la gran Lilli Lehmann, quien en su tratado de canto *Meine Gesangkunst* «Mi arte del canto» se lamenta: «Es una pena que la ciencia se ocupe tan poco del canto y que el cantante tenga tan poco en cuenta a la ciencia. Me apena que de un fenómeno tan complejo como el canto no se proporcionen explicaciones fisiológicas al alcance del cantante»².

Asimismo, muchos de los médicos que se han dedicado a tratar a los cantantes han mostrado interés por conocer, en mayor o menor medida, la parte artística de la voz.

Parece obvio que ambas vertientes de estudio (la artística y la científica) están destinadas a entenderse y que una y otra pueden enriquecerse mutuamente.³

Sin embargo, existen, probablemente hoy en día aún, maestros de canto y cantantes que conocen poco de la parte científica de su instrumento, no solo de la anatomía y fisiología de los órganos que producen la voz, sino también de los fenómenos acústicos que hacen que llegue a nuestros oídos, como público, la señal sonora con unas características concretas. Sería impensable que un violinista no

¹ S Fernández González et al., «Manuel P. García», *Rev Med Univ Navarra* 50, n.º 3 (2006): 14-18.

² Lilli Lehmann, *Mon art du chant*. Trad. por Maurice Chassang (París: Rouart, Lerolle et Cie.1900), 3. Traducido al español por la autora.

³ I García-López y J Gavilán Bouzas, «La Voz Cantada», *Acta Otorrinolaringol Esp.* 61, n.º 6 (2010): 441-451.

conociera los componentes de su instrumento: 4 cuerdas, una caja, un alma... Seguramente cualquier estudiante de violín conoce detalladamente las partes del mismo.

La diferencia entre ambos instrumentos (el violín y la voz) es evidente: el primero se puede coger con las manos, dar la vuelta, mirarlo por un lado y por otro... La voz, sin embargo, no «está» en ningún sitio. El cantante puede palparse el abdomen, la caja torácica, el cuello, la cara, pero no ve ni toca las estructuras anatómicas que generan el canto. La autora ha tenido personalmente la experiencia de encontrar estudiantes de grado superior que no saben, por ejemplo, cuantas cuerdas vocales hay en la laringe. Sirva este trabajo para aportar un granito de arena en los conocimientos que, en mi humilde opinión deberían tener todos los cantantes, y, sobre todo, aquellos que se dedican a enseñar a cantar.

II. ¿CÓMO EMPIEZA TODO?

La voz se produce cuando las cuerdas vocales se aproximan y el aire procedente de los pulmones pasa a través de ellas y las hace vibrar. La vibración de las cuerdas, por lo tanto, es un proceso pasivo que realiza el aire. El movimiento de las cuerdas vocales, sin embargo, para juntarse o separarse o para modificar su tensión es un proceso activo y voluntario, pero la voz y el canto son mucho más que la vibración de dos repliegues por efecto del aire.

La emisión vocal en general tiene una parte de innata, pero otra muy importante adquirida y aprendida a lo largo del desarrollo del ser humano. En el caso del canto lírico, el control de los elementos que producen la voz precisa habitualmente de un largo proceso de aprendizaje que, en opinión de muchos cantantes profesionales, no termina nunca.

De hecho, existe evidencia científica de que la enseñanza del canto mejora las características acústicas y aerodinámicas de la voz cantada⁴.

La parte innata de la emisión vocal hace referencia a aquellos sonidos que emitimos de forma no aprendida, o que se producen de forma automática, ante estímulos como por ejemplo el dolor o el placer⁵. Para este tipo de emisión, presente en el ser humano desde el nacimiento, hay una vía anatómica específica desde el cerebro a las cuerdas vocales, a través de la sustancia gris periacueductal⁶.

La parte aprendida, a través de la cual se desarrolla el lenguaje y también el canto, discurre anatómicamente por otra vía diferente, la vía córtico-bulbar, que conecta directamente la corteza

⁴ MA McHenry, J Evans y E Powitzky, «Effects of Bel Canto Training on Acoustic and Aerodynamic Characteristics of the Singing Voice», *J Voice* 30, n.º 2 (2016): 198-204.

⁵ U Jürgens, «The neural control of vocalization in mammals: a review», *J Voice* 23, n.º 1 (2009): 1-10.

⁶ La sustancia gris periacueductal forma parte del cerebro y está situada en el mesencéfalo, rodeando el acueducto cerebral. Está involucrada en muchas funciones del ser humano, como el dolor, el miedo o el apetito, y también en la emisión innata de la voz.

cerebral con los núcleos de los nervios que mueven las cuerdas vocales y las estructuras que intervienen en la articulación⁷.

Así pues, existen en todos nosotros dos tipos de emisión vocal, aquella innata, influida y regulada directamente por las emociones y otra que aprendemos a lo largo de nuestra vida, mucho más controlada, de alguna manera más exenta de espontaneidad, en la que se basa el lenguaje y, por supuesto, el canto.

¿No es uno de los objetivos del aprendizaje establecer unos circuitos, una manera de utilizar el instrumento, una técnica vocal que asegure al cantante que la interpretación va a ser exacta independientemente de las circunstancias externas o internas? Definitivamente, sí.

Podríamos pensar, quizá, que sería ideal que estos dos circuitos estuvieran completamente separados (y así los hemos descrito anatómicamente) para que, cuando el artista se sube al escenario, no se vea afectado por ningún estímulo emocional no deseado. Pero esto, desde luego, no es así y lo saben muy bien todos los cantantes profesionales. De hecho, ambos circuitos tienen conexiones que los interrelacionan, de manera que lo técnico y lo emocional no pueden realmente separarse.

Centrándonos por lo tanto en la emisión voluntaria, lo primero que se necesita para cantar es la idea de lo que uno quiere hacer con la voz.

Dicha idea se produce en una zona del cerebro, la corteza cerebral, y más concretamente la corteza motora primaria con conexión directa con los núcleos de las motoneuronas que proporcionan la inervación a los músculos que intervienen en la fonación. Dichas motoneuronas se encuentran en el tronco del encéfalo, específicamente en el bulbo raquídeo. Si hubiera una lesión de esa zona de la corteza cerebral a nivel bilateral perderíamos completamente la capacidad de hablar o cantar, pero seguiríamos siendo capaces de chillar o llorar ante ciertos estímulos⁸.

Y ¿cuáles son las herramientas con las que el cantante controla a nivel cerebral lo que ocurre al emitir su voz?

Son dos:

Una que se denomina propioceptiva, por la cual el cerebro, y más concretamente, la corteza somato-sensorial, recibe continuamente, mientras cantamos, información acerca de cómo están colocadas las estructuras que intervienen en el canto: cómo de abierta está la boca, cómo de tenso está el abdomen, cómo de relajada está la base de la lengua, etc. Todo ello ocurre en virtud de multitud de receptores que existen en todas estas estructuras y que nos «hablan» continuamente mientras cantamos.

⁷ JM Zarate, «The neural control of singing», *Front Hum Neurosci* 7 (2013): 1-12.

⁸ U Jürgens y A Kirzinger, «The laryngeal sensory pathway and its role in phonation. A brain lesioning study in the squirrel monkey», *Exp Brain Res* 59, n.º 11 (1985): 118-124.

Lo que está diseñado para resultar de utilidad al canto, en algunas ocasiones puede volverse en nuestra contra, por ejemplo, cuando existe una excesiva tensión en los músculos del cuello que afecta a la interpretación.

La otra herramienta es la audición.

III. LA AUDICIÓN

La audición constituye, probablemente, una herramienta más importante que la anterior, aunque en esto la opinión de los cantantes no es unánime. Todos nos oímos, por un lado, a través del aire (audición externa) del mismo modo que nos oyen los demás, pero, además, nos oímos a través del hueso (audición interna), recibiendo una información auditiva que no percibe el que nos escucha. Es decir, la manera en que nos oímos nosotros mismos al cantar es diferente a la manera en que nos oyen los demás. Todos los cantantes que lean este trabajo habrán tenido, seguramente, la experiencia de lo útil que es tener a una persona (mejor si es de confianza y conoce nuestra voz) que nos escuche antes de un concierto cuando tenemos que cantar en un sitio nuevo. La percepción de cómo nos oye el público es sin duda complementaria a la información propia. Por eso es, asimismo, tan importante que, durante el aprendizaje, el cantante en formación disponga de un buen oído, el de su maestro o maestra, que sin duda completará la información que proporciona al alumno la autoescucha.

Tanto de una manera como de otra, los sonidos llegan a la cóclea o caracol, en el oído interno, donde la energía sonora mecánica se transforma en energía eléctrica gracias a un órgano altamente especializado, el órgano de Corti, que se encuentra dentro de la cóclea. A partir de ese momento, la información auditiva viaja a través de los nervios, de nuevo hacia la corteza cerebral, cerrando este segundo circuito.

Profundizando un poco más en la información que llega a nuestro cerebro a través del oído, las diferentes características del sonido se reconocen en localizaciones específicas: la altura tonal, el tono o la afinación, términos todos ellos que hacen referencia al mismo concepto, se reconocen a nivel del órgano de Corti, en el oído interno, viajando desde ahí a la corteza cerebral auditiva, donde la señal es procesada en una zona específica localizada en el lado derecho del cerebro⁹.

Otras características del sonido se recogen en estructuras diferentes. Por ejemplo, el timbre, aquella cualidad que nos hace distinguir a un sonido de otro, o a una voz de otra, incluso aunque canten exactamente lo mismo, se procesa también a través del oído en otra zona cerebral, el surco temporal superior. Esta función específica es la que nos hace reconocer, por ejemplo, a un cantante en concreto

⁹ V De Angelis et al., «Cortical processing of pitch: Model-based encoding and decoding of auditory fMRI responses to real-life sounds», *Neuroimage* 180 (2018): 291-300.

en cuanto empezamos a escucharle. En este sentido, hay experimentos científicos que han demostrado que los músicos son mejores que los no-músicos discriminando distintos tonos, timbres y voces^{10, 11}.

Volviendo a la afinación en el canto, fundamental para el cantante que quiere hacer de aquél su profesión, esta se produce por las modificaciones en la tensión y elongación de las cuerdas vocales. Las cuerdas en realidad no son cuerdas al aire sino pliegues de tejido a cada lado (derecho e izquierdo) de la laringe. Tienen una masa constante, diferente para cada individuo: unas tienen más masa (son más largas o más gruesas) y otras tienen menos. La peculiaridad de este instrumento «de cuerda» es que, de forma voluntaria, no solo podemos modificar la longitud de las mismas durante el canto, sino también su calibre y su tensión. De este equilibrio entre tensión, longitud y grosor o calibre en el que la masa de la cuerda se mantiene constante depende algo fundamental para ser cantante: la afinación.

Para afinar mientras se canta se requieren dos cosas: un sistema motor estable, es decir, un perfecto control de los músculos que regulan la tensión y la longitud de las cuerdas vocales y un excelente control auditivo que monitoriza continuamente el sonido que se está produciendo. El control auditivo se modifica, por supuesto, dependiendo del sitio donde estemos cantando. A pesar de las numerosas investigaciones en el campo del control neurológico de la voz, todavía no se conoce en profundidad cómo estos dos sistemas se relacionan.

Lo que sí se sabe, y está demostrado en estudios científicos, es que los cantantes entrenados se benefician de la plasticidad neuronal que depende de la experiencia y, así, son capaces de mantener la afinación mucho mejor en circunstancias desfavorables como la pérdida de audición o la presencia de cualquier interferencia auditiva en comparación con los que no son cantantes¹². Los problemas de audición pueden ser debidos, por supuesto, no solo a un problema de salud del cantante sino a una sala con mala acústica.

En este sentido, los cantantes profesionales son capaces, por ejemplo, de mantener la afinación a pesar de estar escuchando a través de unos auriculares un ruido rosa, como el que emite un aparato de radio sin sintonizar; mantienen la afinación sobre una partitura de manera mucho más exacta que los no profesionales¹³.

¹⁰ L Kishon-Rabin et al., «Pitch discrimination: are professional musicians better than non-musicians?», *J Basic Clin Physiol Pharmacol*. 12 (2001): 125-143.

¹¹ C Micheyl et al., «Influence of musical and psychoacoustical training on pitch discrimination», *Hear Res* 219 (2006): 36-47.

¹² BD Wyke, «Laryngeal neuromuscular control systems in singing. A review of current concepts», *Folia Phoniatr (Basel)* 26 (1974): 295-306.

¹³ JM Zarate y RJ Zatorre, «Experience-dependent neural substrates involved in vocal pitch regulation during singing», *Neuroimage* 40 (2008): 1871-1887.

Una vez establecido que son el cerebro y el oído los que gobiernan el proceso de cantar, la producción de la voz, tanto hablada como cantada se produce gracias a tres elementos: una fuente de energía, la respiración; un elemento vibrador, las cuerdas vocales contenidas dentro de la laringe y un elemento resonador-articulador, el tracto vocal, que comprende todas las estructuras anatómicas que se encuentran entre las cuerdas vocales y la boca y la nariz por donde sale el sonido.

Aunque estos tres elementos anatómicos (sistema respiratorio, laringe y tracto vocal) son realmente los que intervienen en la producción de la voz, desde un punto de vista más global, el cantante, a nivel técnico, introduce un elemento más: la postura corporal. Aunque en algunos tratados de canto escritos por cantantes no se habla específicamente de la postura del cuerpo, se ha demostrado claramente, desde el punto de vista científico, que las alteraciones de la postura, fundamentalmente la tensión muscular excesiva, se acompaña indefectiblemente de alteraciones en la voz¹⁴.

Así pues, el primer elemento del que hablaremos en relación a la producción vocal es la postura corporal.

IV. LA POSTURA CORPORAL

La postura corporal interviene en el canto de dos maneras: por un lado, como acabamos de apuntar, tiene influencia directa sobre el resultado vocal, por otro lado, los cantantes son artistas a los que además de oírseles, se les ve cuando están sobre el escenario. En este sentido, el lenguaje no verbal que transmiten en los conciertos influye, sin duda, en la manera en que el público les percibe y les juzga. Hoy en día, que todo se graba, cualquiera que se sube a un escenario puede ver reproducidos sus gestos *ad infinitum* en canales de internet y redes sociales.

Imaginemos un tenor fantástico vocalmente que al cantar realiza gestos forzados, no naturales con la cara o con el cuerpo. Seguramente el público percibirá la tensión que transmite con el lenguaje no verbal, lo cual resultará incómodo para el que le escucha. Además, por supuesto, la tensión corporal muscular excesiva se transmitirá sin duda en la voz.

Los tratados antiguos de canto recomiendan adoptar una postura noble, con el pecho abierto, la columna estirada y la espalda ancha, sin tensión en el cuello. Pero la verdad es que estas recomendaciones que se han transmitido de maestro a maestro desde hace siglos, hasta hace muy poco tiempo no estaban basadas en estudios científicos que demostraran, de una manera clara, cómo la postura corporal influye en la voz.

¹⁴ E Van Houtte, K Van Lierde y S Claeys, «Pathophysiology and Treatment of Muscle Tension Dysphonia: A Review of the Current Knowledge», *J Voice* 25, n.º2 (2011): 202-207.

En los años más recientes han sido otros autores, creadores de disciplinas relacionadas con la postura, los que más han publicado en relación a este tema. Así, Mathias Alexander, Pilates y Feldenkrais, por poner algunos ejemplos, pueden considerarse los fundadores de auténticas escuelas, con millares de seguidores por todo el mundo, que hacen hincapié en la importancia de la postura corporal, no solo para la voz, sino para mantener la salud en general.

La postura erguida del cuerpo puede considerarse un equilibrio entre músculos flexores (los de la parte anterior del cuerpo) y extensores (los de la parte de atrás o posterior del cuerpo). De arriba a abajo, la cabeza, el cuello, el tronco y las piernas se mantienen erguidos gracias al equilibrio de estos grupos musculares que se insertan en los huesos (cráneo, columna vertebral, pelvis, fémur, tibia y peroné) y que nos hacen mantenernos de pie¹⁵.

La laringe a su vez, como órgano fundamental de la fonación, se encuentra suspendida en el cuello, por delante de la columna vertebral, a través de multitud de músculos que la unen, por una parte, a la base del cráneo hacia arriba y por otra al esternón y la clavícula hacia abajo. Esta ausencia de sujeciones óseas en la laringe permite la gran flexibilidad que necesita el órgano fundamental de la fonación a la hora de cantar.

Si estamos diseñados, por lo tanto, por parejas de músculos agonistas y antagonistas, parece lógico pensar que el equilibrio entre estos dos grupos musculares en el cuerpo sea la manera más eficiente de colocarse y de moverse.

Dicho de otra manera, si existe una excesiva tensión en un músculo o grupo muscular, esto llevará a una postura forzada. Por ejemplo, si en el tronco predominan los músculos flexores sobre los extensores, la postura será encorvada y si los que predominan son los elevadores de la laringe sobre los depresores, encontraremos una laringe demasiado alta para cantar.

Es una práctica recomendable que las clases de canto se impartan en un aula con un espejo. Además de que el profesor pueda dar al alumno indicaciones a este respecto, el que el propio cantante se vea es, sin duda, un elemento importante. Otra práctica recomendable es grabarse cuando uno canta. Hoy en día es facilísimo con cualquier teléfono tener vídeos de calidad donde el cantante puede ver y corregir lo que hace con el cuerpo al cantar.

Pero las alteraciones de la postura corporal no están solo presentes en los estudiantes de canto. Cualquier cantante, ya en su trayectoria como profesional, está en riesgo de desarrollar o generar gestos, posturas, tics, que pueden comenzar poco a poco, porque parece que la voz suena mejor, por ejemplo, al ladear ligeramente la cabeza o al subir los hombros. Estos hábitos a veces pueden convertirse en auténticos gestos parásitos cuando ya es imprescindible hacerlos para poder cantar, y

¹⁵ JS Rubin, E Blake y L Mathieson, «The effects of posture in voice». En *Diagnosis and treatment of voice disorders*, coord. por JS Rubin, RT Sataloff y GS Korovin (San Diego: Plural Publishing, 2006), 707-718.

pueden ser difíciles de eliminar cuando están arraigados. Este es uno de los motivos por los que es recomendable, para los cantantes profesionales, que alguien les escuche, si no regularmente, al menos ocasionalmente, alguien en quien uno confíe y le pueda ayudar a prevenir esta circunstancia.

Y, ¿qué hacer cuando las alteraciones de la postura forman parte del hábito del cantante? Lo primero es realizar un diagnóstico, es decir, detectar exactamente en qué consiste dicha alteración: ¿es una contractura del esternocleidomastoideo de un lado que hace girar la cabeza?, ¿es exceso de tensión en los músculos trapecios?, ¿el problema está en la musculatura de la mímica facial? Creo firmemente que el otorrinolaringólogo con experiencia en patología vocal y en profesionales de la voz debe ser capaz de realizar un examen físico que no incluya solo las cuerdas vocales, sino que evalúe también el resto del cuerpo.

Y ¿cómo hacer para solucionarlo? A veces el hecho de reconocer o diagnosticar el problema no lleva automáticamente a la solución. Sabemos que los hábitos se arraigan en nuestro cerebro con facilidad y son difíciles de cambiar. En este sentido, los tratamientos que van dirigidos exclusivamente a relajar, des-tensar o masajear en estado de inconsciencia por parte del paciente pueden solucionar un problema de forma puntual, pero probablemente es más eficaz realizar un abordaje más global en el que el cantante sea consciente activamente de lo que hace y los hábitos sean corregidos desde una perspectiva consciente. En este sentido, las disciplinas mencionadas más arriba (Técnica Alexander entre otras) pueden ser de gran utilidad¹⁶.

V. LA RESPIRACIÓN

La respiración es algo a lo que muchos maestros de canto otorgan gran importancia.

Manuel García, en su tratado *El Arte del Canto*, comienza el apartado dedicado a la respiración con la afirmación «no se puede ser un buen cantante si no se controla la respiración»¹⁷.

La respiración es una función fundamental del cuerpo que se compone de dos fases: inspiración y espiración. La inspiración se produce cuando el aire entra desde el exterior hacia el interior de los pulmones por una diferencia de presiones (mayor en el exterior que en el pulmón). La espiración es el movimiento contrario, desde los pulmones al exterior, una vez más gracias a una diferencia de presiones inversa (mayor en el interior respecto al exterior).

La función fundamental de la respiración es lo que se denomina «intercambio gaseoso», por el cual el oxígeno entra en las células y los productos de deshecho, el dióxido de carbono, se expulsan desde las células sanguíneas hacia el exterior. Este intercambio se produce en los alveolos, pequeños

¹⁶Beret Arcaya, *Understanding the singing voice* (Nueva York: Beret Arcaya, 2015), iii-iv.

¹⁷Manuel García, *Traité complet L'art du chant* (París: Minkoff, 1848), 32. Traducido por la autora.

sacos que forman los pulmones y que se hinchan y deshinchan con el aire que llega desde la nariz o la boca a través de la tráquea y los bronquios¹⁸.

La respiración es, por lo tanto, fundamental para la vida. Pero también es la fuente de energía de la voz. La primera diferencia que se produce entre la respiración que usamos para vivir y la que usamos para cantar, es que la duración de la espiración en el canto es mucho más larga que en la respiración no fonadora. De hecho, el control del *fiato*¹⁹ es uno de los elementos que conforman la técnica vocal y que los cantantes deben dominar, puesto que en el canto muchas veces se respira donde se puede, no donde se quiere, considerándose incorrecto, por ejemplo, cortar palabras con una inspiración.

Pero, ¿son los pulmones los únicos involucrados en la respiración? No. Los pulmones contienen el aire, pero son los sistemas musculares y elásticos de tórax y abdomen los que permiten que la respiración se produzca.

La inspiración se produce por la expansión de los pulmones en las tres dimensiones: las costillas se expanden como si fueran el asa de un cubo que sube de abajo a arriba gracias a la contracción de los músculos intercostales externos haciendo que los pulmones se hinchen hacia delante, atrás y en sentido lateral. Los músculos escalenos expanden la parte superior del pulmón (la que contiene menos aire) y el músculo diafragma, cuando se contrae, desciende expandiendo la parte inferior de los pulmones, aquella que es más rentable, puesto que contiene más aire.

Al contraerse estos tres grupos musculares se produce un efecto de succión que hace que el aire entre en los pulmones. Cuando el diafragma desciende, empuja todas las vísceras abdominales hacia abajo. Estas, a su vez, tienen que expandirse hacia donde existe una zona elástica, la musculatura abdominal, que debe relajarse para permitir la inspiración. Por eso la tripa se hincha cuando inspiramos, no es el aire el que entra en el abdomen sino las vísceras abdominales que se expanden hacia fuera.

Aunque la respiración que podríamos denominar completa se produce en todas estas dimensiones, durante el canto no es recomendable utilizar la musculatura de la parte superior del tórax y del cuello (respiración clavicular-músculos escalenos), ya que la contracción de estos músculos puede asociarse a tensión del cuello e interferir directamente en la fonación. Por lo tanto, la respiración mejor para cantar es la diafragmática, costo-diafragmática o costo-abdominal.

¹⁸ Educar Portal, «Biología: el oxígeno y la respiración», vídeo de YouTube, 2:13, publicado el 28 de marzo de 2016, https://www.youtube.com/watch?v=Yhpme_G2QcU.

¹⁹ Término italiano que significa respiración y que se utiliza en el canto de manera habitual para describir la misma.

En la respiración no fonadora, la espiración es un proceso pasivo, no consciente, que se produce, como ya hemos dicho, por la diferencia de presiones entre el interior y el exterior (fuerzas elásticas), por la relajación del diafragma y por la contracción de los músculos intercostales internos.

La espiración durante el canto, sin embargo, es un proceso activo y exquisitamente controlado por parte del cantante. El control espiratorio, control del soplo o control del *fiato* es sin duda clave para cantar²⁰.

Desde el punto de vista estricto de la fisiología, la espiración activa del canto se produce por la contracción de los intercostales internos, que descienden las costillas, la relajación del diafragma, que produce el ascenso del mismo, vaciando los pulmones y por la contracción de los músculos abdominales (recto abdominal y músculos oblicuo mayor, menor y transversos) que actúan como un cinturón alrededor del abdomen²¹.

Durante el canto, sin embargo, las cosas no suceden exactamente así. El músculo diafragma, tradicionalmente considerado por los cantantes como el elemento fundamental de la respiración, es un músculo que no podemos palpar ni podemos controlar de forma específica o directa, sino tan solo de forma indirecta. Al final de la inspiración las costillas están expandidas, y, si el diafragma ha descendido, el abdomen debe expandirse. Desde esa posición de inspiración, al cantar, la sensación que debe tener el cantante es que el tórax y el abdomen no se contraen ni se colapsan, sino que se produce un fenómeno que no es real, pero que es percibido así por el cantante, por el cual se mantiene la actitud inspiratoria durante la espiración. Y ¿cómo puede ocurrir esto? precisamente porque el músculo que está controlando la espiración es el diafragma. Es decir, la relajación controlada del diafragma permite al cantante prolongar el *fiato* sin que se colapse el cuerpo.

Francesco Lamperti (1811-1892), uno de los más célebres maestros de la escuela italiana, popularizó el término *appoggio*²², que en español significa apoyo, tan utilizado hoy en día por los cantantes y no siempre bien comprendido. En su definición original, en palabras de Lamperti, «cantar con *appoggio* significa que todas las notas, de las más graves a las más agudas se producen sobre una columna de aire sobre la cual el cantante tiene un perfecto control, conteniendo el aire y sin permitir que salga más que el absolutamente necesario para emitir cada nota»²³. Así es que básicamente el *appoggio* se refiere al control respiratorio.

²⁰ I Macdonald et al., «An Investigation of Abdominal Muscle Recruitment for Sustained Phonation in 25 Healthy Singers», *J Voice* 26, n.º 6 (2012): 815.

²¹ ATENSALUD, «8 músculos de la espiración», vídeo de YouTube, 3:51, publicado el 31 de enero de 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=LcZmzJ-GQE0>.

²² Giovanni Battista Lamperti, *The Technics of Bel Canto*. Trad. por TH Baker (Mansfield Centre: Martino Publishing, 2012), 9.

²³ James Stark, *Bel Canto. A History of Vocal Pedagogy* (Toronto, Buffalo y Londres: University of Toronto Press Incorporated, 1999), 91-92. Traducido al español por la autora.

La mayoría de los cantantes imaginan una columna de aire que soporta o sostiene la voz.

Valga como ejemplo la explicación que da Alfredo Kraus sobre la técnica respiratoria²⁴.

En algunos estudios realizados con cantantes se ha demostrado que estos son capaces de diferenciar, desde el punto de vista acústico, cuándo una voz está apoyada²⁵. Además, se ha comprobado desde el punto de vista científico que cuando se emite con apoyo, el volumen y la proyección de la voz son mayores²⁶.

El aire, fuente de energía, que de forma controlada se va expulsando desde los alveolos hacia los bronquios y la tráquea se encuentra, en su camino al exterior, con una zona estrecha, dos repliegues que voluntariamente abrimos o cerramos según queramos respirar o cantar: las cuerdas vocales.

VI. LA EMISIÓN

El órgano emisor de la voz es la laringe, que se encuentra en el cuello, por delante de la columna vertebral, suspendida entre dos sistemas o tirantes musculares, unos que la sujetan hacia arriba al cráneo y la mandíbula y otros que la sujetan hacia abajo, hacia el esternón y la clavícula. El equilibrio de estos dos grupos musculares proporciona a la laringe la flexibilidad necesaria para ascender y descender libremente al cantar.

La laringe forma parte del sistema respiratorio, se continúa hacia abajo con la tráquea y hacia arriba con la faringe.

La función principal de la laringe no es la emisión de la voz. De hecho, esta es la menos importante de las tres que tiene, que por orden de importancia son:

1. Protección de la vía aérea: cuando nuestros antepasados animales salieron del agua comenzaron a respirar y también a tener la capacidad de atragantarse. Los seres humanos no somos capaces de tragar y respirar al tiempo, de hecho, los recién nacidos, que tienen la laringe muy alta sí son capaces de mamar y respirar a la vez, pero los adultos tenemos que cerrar bien fuerte las cuerdas vocales para tragar (lo que nos impide respirar en ese momento) para evitar atragantarnos. Cuando falla esta función laríngea, por ejemplo, en el caso de la parálisis de una de las cuerdas vocales, podemos atragantarnos al comer o al beber y pasar contenido alimentario a los pulmones (aspiración de alimentos), lo cual puede constituir una situación de extrema gravedad.

²⁴ Kraustrujillo, «Alfredo Kraus habla de técnica vocal (III)», vídeo de YouTube, 6:55, publicado el 2 de mayo de 2009, <https://www.youtube.com/watch?v=AP79QBok-yw>.

²⁵ A Sonninen et al., «Evaluation of Support in Singing», *J Voice* 19, n.º 2 (2005): 223-237.

²⁶ B Griffin et al., «Physiological Characteristics of the Supported Singing Voice. A Preliminary Study», *J Voice* 9, n.º 1 (1995): 45-56.

2. Respiración: ya hemos dicho que la laringe forma parte del sistema respiratorio, permitiendo el paso del aire hacia la tráquea y los pulmones en la inspiración y desde allí hacia el exterior en la espiración. La laringe es la zona más estrecha del tubo respiratorio, por lo que las enfermedades que estrechan aún más este tubo como por ejemplo una reacción alérgica con edema laríngeo pueden condicionar, una vez más, una situación de extrema gravedad por obstrucción al paso aéreo en el que esta función se vea condicionada.

3. Fonación: esta función es la menos importante para la vida, y la más sofisticada en la escala evolutiva. Muchos animales emiten sonidos con sus laringes, pero solo el ser humano utiliza la voz que anteriormente hemos llamado aprendida y que conforma, por ejemplo, el lenguaje o el canto en su expresión más elevada: el canto lírico.

La laringe está formada por una serie de cartílagos. Vamos a describir brevemente los más importantes²⁷:

1. Cartílago tiroides: es el más grande, forma una quilla abierta por detrás y unida hacia delante cuyo límite superior es la nuez de Adán.

2. Cartílago cricoides: por debajo del tiroides, el único cartílago completamente cerrado, fundamental para el soporte respiratorio laríngeo. La parte anterior del cricoides es más delgada, como un anillo y la parte posterior es más ancha como el sello de un anillo de sello. En la parte superior de este sello se articulan otros dos pequeños cartílagos.

3. Cartílagos aritenoides: son dos, articulados con el cricoides en su parte posterior. Son dos pequeños prismas donde se insertan las cuerdas vocales y la mayoría de los músculos denominados intrínsecos, que son los que producen todos los movimientos finos de la laringe, permitiendo las modificaciones antes mencionadas en tensión, elongación y grosor de las cuerdas.

4. Cartílago epiglotis: este cartílago no interviene directamente en la fonación, aunque sí es muy importante para proteger la vía aérea cuando tragamos.

5. Hueso hioides: no siempre se considera parte de la laringe. Constituye un anclaje fundamental para la laringe hacia arriba. A través del hioides la laringe se une a la base del cráneo y la mandíbula.

Las cuerdas vocales se encuentran, por lo tanto, dentro de una caja de cartílago y se insertan por delante y por detrás en sendos cartílagos (tiroides y aritenoides). El que el continente de la voz sea cartílago en lugar de hueso otorga flexibilidad a la voz. Un aspecto importante a este respecto es lo que ocurre con el envejecimiento: los cartílagos de la laringe se van poco a poco calcificando

²⁷ Proyecto Lumina, «Laringe humana. Ciclo vibratorio de las cuerdas vocales», vídeo de YouTube, 5:38, publicado el 18 de junio de 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=IdDFkxUTJ0>.

(convirtiéndose en hueso), lo que puede ocasionar que, con los años, la voz pierda extensión y agilidad. Este es solo uno de los motivos que causan el envejecimiento vocal y el proceso es tremendamente individual. Seguramente todos tenemos en mente los ejemplos de algunos cantantes que con edades relativamente avanzadas conservan estas características de flexibilidad y agilidad en su voz. Valga como ejemplo esta fantástica grabación de Edita Gruberova con 56 años cantando el aria *Grössmächtige Prinzessin* de *Zerbinetta* de la ópera *Ariadne auf Naxos* de Richard Strauss en el Teatro del Liceo de Barcelona²⁸.

La voz se emite gracias a la vibración de las cuerdas vocales cuando el aire pasa a su través. Las cuerdas vocales son dos, una derecha y una izquierda y están situadas dentro del cartílago tiroideos, unidas por delante en su inserción en el tiroideos y separadas por detrás cuando respiramos unidas cada una en su inserción a cada cartílago aritenoides. Las cuerdas, que en realidad no son cuerdas al aire como las de la guitarra o el violín sino pliegues, como los labios, están formados por varias capas de tejido con una ultra-estructura (estructura microscópica) muy compleja y delicada, única en el cuerpo humano. Estas capas fueron descritas por Hirano en 1974²⁹. Esta estructura de capas es fundamental para que la vibración de las cuerdas y por ende la producción del sonido ocurra con absoluta regularidad y limpieza. Cualquier alteración de la estructura de las mismas, bien producida por una lesión por el mal uso vocal, por una cicatriz o por una lesión congénita alterará la vibración y producirá problemas vocales.

La capa más profunda o más lateral es un músculo, el músculo tiroaritenosoideo o músculo vocal. Por fuera del músculo hacia la línea media está la lámina propia profunda e intermedia, que forman el ligamento vocal. Todas estas capas conjuntamente forman el «cuerpo» de la cuerda vocal, que es lo que se moviliza activamente, se elonga o se acorta, se engrosa o se adelgaza gracias a los músculos que controlan el movimiento de las cuerdas. Por fuera de estas capas aún hay otras dos: la lámina propia superficial y el epitelio, que conjuntamente forman la «cubierta» de la cuerda. Estas dos últimas capas son importantísimas para la vibración de las cuerdas vocales, tienen una consistencia blanda, como de gel, que permite su vibración de forma pasiva por efecto del aire.

Las cuerdas vocales pueden estar separadas, por ejemplo, cuando respiramos o juntarse la una a la otra en la línea media cuando tragamos, tosemos o cantamos (figuras 1 y 2).

²⁸ fleurdefeu57bis, «Edita Gruberova - Ariadne auf Naxos - Grössmächtige Prinzessin», vídeo de YouTube, 11:51, publicado el 15 de abril de 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=J.WR98ZiPk1g>.

²⁹ M Hirano, «Morphological Structure of the Vocal Cord as a Vibrator and Its Variations», *Folia Phoniatr (Basel)* 26, n.º 2 (1974): 89-94.

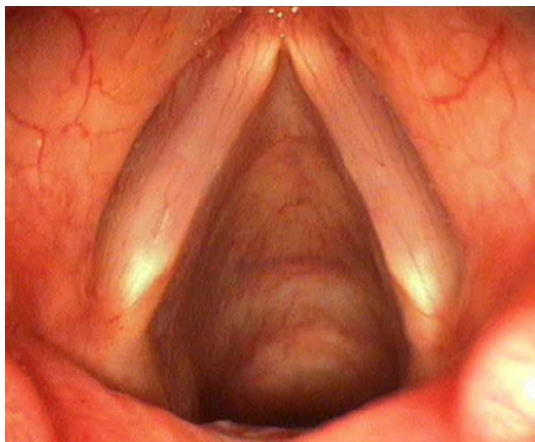


Figura 1. Cuerdas vocales separadas, en posición de respiración³⁰

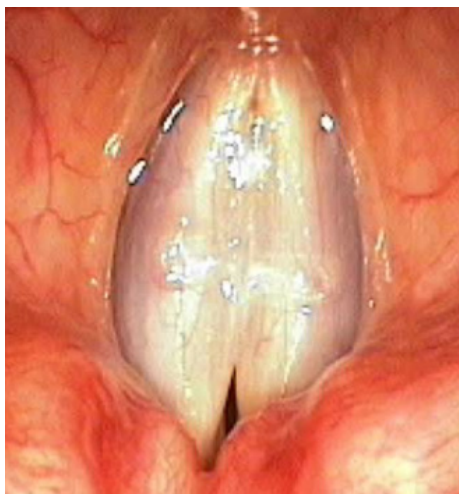


Figura 2. Cuerdas vocales juntas, en posición de fonación

Cuando el aire que procede de los pulmones encuentra a las cuerdas juntas ejerce una presión por debajo de ellas (presión subglótica) que debe vencer la resistencia que le oponen permitiendo el paso de pequeños pulsos de aire a su través con una frecuencia regular determinada por la tensión que

³⁰ Todas las imágenes han sido realizadas por la autora.

tienen las cuerdas y que se corresponde con la frecuencia fundamental de la voz, tono o nota musical que estemos emitiendo³¹.

Estos movimientos de las cuerdas vocales, así como la tensión y elongación que presentan las mismas en cada momento depende de la minuciosa acción coordinada de una serie de músculos muy pequeños dentro y fuera de la laringe: los músculos intrínsecos³².

La mayoría de los músculos intrínsecos aproximan o cierran las cuerdas vocales, mientras que solo uno las separa para respirar, el cricoaritenideo posterior, y solo uno las elonga, el cricotiroides. En realidad, para cantar, los dos músculos más importantes son el músculo tiroaritenideo (el que está en el espesor de la cuerda vocal) y el cricotiroides. Estos dos músculos actúan como antagonistas, es decir, cuando uno se contrae el otro se relaja.

Tradicionalmente se considera, desde el punto de vista científico, que en la voz de pecho existe una predominancia de la contracción del tiroaritenideo y por ende una relajación del cricotiroides, mientras que en la voz de cabeza sucede al contrario. Estudios recientes hablan de que este balance entre los dos músculos está más relacionado con el tono emitido (mayor contracción del tiroaritenideo en los tonos graves y mayor contracción del cricotiroides en los tonos agudos) que con los registros³³.

Quizá el problema esté, precisamente, en definir los registros. Los términos para describirlos son variados y dependen, muchas veces, de cada autor.

Manuel García describió el registro como aquella serie de sonidos consecutivos producidos por un mismo mecanismo cuya naturaleza difiere de otra, consecutiva y homogénea producida, a su vez, por otro mecanismo³⁴. El límite entre un registro y otro se denomina paso.

Los más habitualmente descritos son dos: el registro de pecho y el de cabeza llamado a veces falsete. Manuel García describía el registro de falsete entre el de pecho y el de cabeza, lo que correspondería a un registro medio. Para otros autores el registro de cabeza sería el que está entre el de pecho y el falsete. Los dos registros fundamentales (pecho y cabeza) se mezclan o se solapan entre sí, de manera que al hacerlo forman lo que algunos llaman voz mixta. Además, se describen otros dos registros en los extremos de la extensión vocal: el *Strobass* en la zona más grave y el de flauta, campana o silbido en el lenguaje anglosajón en la zona aguda más extrema.

³¹ Richard Miller, *On the Art of Singing* (Nueva York: Oxford University Press, 1996), 19-25.

³² Juliano Brito, «Canto músculos intrínsecos», vídeo de YouTube, 1:17, publicado el 25 de junio de 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=mmckasxrKEw>.

³³ KA Kochis-Jennings et al., «Cricothyroid Muscle and Thyroarytenoid Muscle Dominance in Vocal Register Control: Preliminary Results», *J Voice* 28, n.º 5 (2014): 652.e21-652.e29.

³⁴ García. «*Traité complet...*», 9-10.

El primer médico que investigó la verdad sobre los registros desde un punto de vista científico fue, de nuevo Minoru Hirano, a quien tanto debemos sobre el conocimiento de la anatomía y fisiología de la voz. Hirano realizó los primeros estudios utilizando la electromiografía³⁵ laríngea, es decir, introduciendo agujas en los distintos músculos laríngeos para comprobar qué es lo que ocurría a nivel muscular³⁶ durante el canto³⁷.

En estos estudios encontró que el músculo tiroaritenoides o músculo vocal, el que está en el espesor de la cuerda vocal es el más implicado en los registros de la siguiente manera: tiene su máxima actividad en el registro de pecho y su actividad disminuye en el registro de cabeza.

En la actualidad existe todavía un debate acerca de si los registros se producen exclusivamente por cambios en el mecanismo laríngeo o si su diferencia se basa en las cualidades del sonido producido.

En la actualidad existen multitud de estudios al respecto. Gracias a los programas de análisis acústico que mencionaremos más adelante se pueden analizar las diferencias entre registros en cuanto a la acústica vocal, y gracias a otras exploraciones, como la electromiografía laríngea antes mencionada y la electroglotografía³⁸, que analiza el tipo de contacto entre las cuerdas vocales al cantar, se pueden estudiar las diferencias en cuanto al mecanismo laríngeo³⁹.

Los estudios más claros a este respecto sobre el canto lírico son aquellos que analizan la voz del contratenor, en el cual los dos registros, pecho y falsete, están claramente diferenciados.

Como ya se ha insinuado antes, uno de los objetivos del cantante lírico es, precisamente eliminar los registros, es decir conseguir una homogeneidad en toda la extensión de la voz, desde la nota más grave a la más aguda, para que parezca que todas están emitidas de una misma manera. Esto no ocurre en otros estilos de canto.

Como ejemplo para ilustrar estas diferencias entre los registros desde el punto de vista de la percepción del que escucha, es decir desde una perspectiva acústica-perceptual, vamos a poner dos ejemplos prácticos. En primer lugar, mostraremos un ejemplo de fusión de dos registros a priori claramente diferentes: el de pecho y el de falsete en la voz masculina, en este caso en la voz

³⁵ La electromiografía es una exploración con fines casi siempre diagnósticos utilizada ampliamente en medicina para la evaluación de las enfermedades neurológicas y que consiste en registrar, mediante electrodos de superficie en la piel o de aguja insertados en los músculos, la actividad eléctrica que se produce en los mismos.

³⁶ I García-López et al., «Electromiografía laríngea en el diagnóstico y tratamiento de los trastornos de la voz», *Acta Otorrinolaringol Esp.* 63, n.º 6 (2012): 458-464.

³⁷ M Hirano, W Vennard y J Ohala, «Regulation of register, pitch and intensity of voices», *Folia Phoniatr (Basel)* 22 (1970): 1-20.

³⁸ La electroglotografía es una prueba de evaluación diagnóstica que permite valorar el grado de contacto entre las cuerdas vocales durante la fonación mediante la colocación de electrodos en la superficie de la piel.

³⁹ A Giovanni y S de Saint-Victor, «Estudio clínico de la voz», *EMC Otorrinolaringología* 42, n.º 4 (2013): 1-17.

de contratenor. Hay algunas obras en el repertorio de contratenor, obras originalmente escritas para *castrati*, que precisan de la utilización de ambos registros. Valga como ejemplo el aria «Ombra mai fu» de *Xerxes* de Handel, en esta ocasión interpretada por Franco Fagioli, donde el intérprete fusiona magníficamente el registro agudo con las notas más graves a nivel tímbrico⁴⁰.

En el otro extremo podríamos encontrar obras en las cuales el compositor busca claramente la diferencia entre los registros. Un ejemplo puede escucharse en el aria «Anegado de tanta dicha» de la ópera *El poeta calculista*, compuesta por Manuel García (el padre del inventor del laringoscopio), que el propio compositor, famosísimo cantante, interpretaba. En esta aria, el tenor canta las dos voces de un dúo, la del hombre (en registro de pecho) y la de la mujer (en registro de falsete). Valga como ejemplo la grabación realizada por el tenor Mark Tucker, en la que él interpreta los dos papeles⁴¹.

En cuanto al mecanismo laríngeo, si analizamos tanto la señal sonora (evaluación acústica objetiva) como el electroglotograma (evaluación de la forma de contacto de las cuerdas vocales) de una voz emitiendo un *glissando*, encontramos un punto en el que dicho mecanismo cambia: así, en lo que podríamos llamar tradicionalmente registro de pecho, o mecanismo 1 (M1), las cuerdas vocales vibran en toda su longitud en cuanto a la fase vertical. Dicho de otra manera, todo el ancho de la cuerda (en cuanto a su dimensión vertical) contacta para producir la vibración. La cuerda vocal está más tensa y la contracción del músculo vocal predomina sobre la del músculo cricotiroides (Figura 3). El tiempo en que las cuerdas contactan durante la emisión (lo que se denomina fase de cierre) es mayor durante la fonación. Este mecanismo puede ser utilizado tanto en hombres como en mujeres en la zona grave y en el centro de la extensión de la voz. En el mecanismo 2 (M2) o registro de cabeza o falsete, por el contrario, la cantidad de masa de cuerda vocal que vibra es menor, las cuerdas vocales están más elongadas y el músculo cricotiroides predomina sobre el músculo vocal (Figura 4). La fase abierta durante la vibración es mayor que la cerrada. Este mecanismo puede utilizarse tanto en hombres como en mujeres en la zona central y aguda de la extensión de la voz⁴².

⁴⁰ Deutsche Grammophon, «Franco Fagioli-Handel: Ombra mai fu», vídeo de YouTube, 3:26, publicado el 5 de febrero de 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=FD8eL-1a0As>.

⁴¹ Orquesta Ciudad de Granada-Tema, «El Poeta Calculista-Duo», vídeo de YouTube, 5:46, publicado el 24 de septiembre de 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=R06Yk9yfd3I>.

⁴² N Henrich, «Mirroring the voice from Garcia to the present day: Some insights into singing voice registers», *Logoped Phoniatr Vocol* 31 (2006): 3-14.

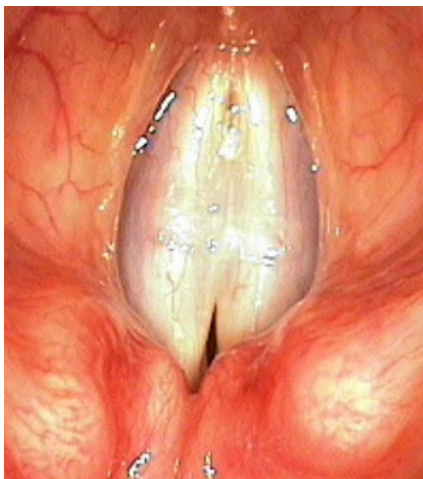


Figura 3. Cuerdas vocales emitiendo un tono grave (fa sostenido₂⁴³). Predomina la contracción del tiroaritenoides y las cuerdas vocales están más acortadas y engrosadas

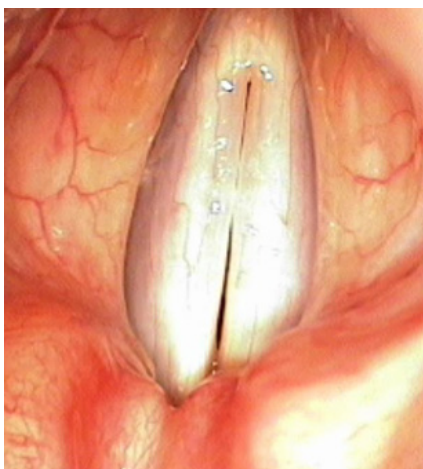


Figura 4. Cuerdas vocales emitiendo un tono agudo (fa sostenido₃). Predomina la contracción del cricotiroides y las cuerdas están más elongadas y adelgazadas

⁴³ Mientras que en la terminología musical en España se utiliza habitualmente la notación franco-belga, el la central del piano (440 Hz) se llama la₃, en la terminología científica se utiliza la notación anglosajona, y a esta misma nota se le denomina la₄. En este artículo se utilizará la notación franco-belga.

Existe, además, una zona en el centro de la voz donde coinciden ambos mecanismos y donde el intérprete puede elegir entre emitir con uno u otro. Esta zona va aproximadamente de mi_2 (165 Hz) a fa sostenido₃ (370 Hz) en el caso de las voces masculinas y de sol_2 (196 Hz) a sol_3 (392 Hz) para las femeninas. Esta zona se puede estirar, incrementando su extensión por los requerimientos de la voz artística. Por ejemplo, en la técnica denominada *belting* ampliamente utilizada en el teatro musical por las mujeres, la voz de pecho o mecanismo 1 se lleva hasta una zona más aguda (por encima de 512 Hz o do_4). Sin embargo, la utilización de la voz de forma habitual con este mecanismo en la zona aguda requiere de una presión de aire (presión subglótica) muy elevada y por lo tanto de una resistencia laríngea asimismo elevada que puede llevar a lesiones.

A la hora de la verdad, sin embargo, estos dos registros tan claramente diferenciados no son los que usan la mayoría de los cantantes líricos: el aria descrita de Manuel García en la que el intérprete canta la voz masculina y la femenina constituye, obviamente, una excepción en el repertorio de tenor.

Los cantantes líricos utilizan mayoritariamente un mecanismo mixto. Las voces masculinas utilizan preferentemente el mecanismo 1 (M1), un registro preferentemente «de pecho» para las notas graves con mayor contracción del músculo tiroaritenodeo y un registro «de cabeza» que en realidad es una voz mixta caracterizada por una actividad mayor del músculo cricoaritenodeo. El *belting* femenino, tan de moda en el teatro musical está producido en realidad también con este mecanismo mixto. Las voces líricas femeninas utilizan mayoritariamente el mecanismo 2 (M2) o registro de cabeza en la zona central y aguda de su extensión vocal. El término falsete se limita al registro utilizado por las voces masculinas, en concreto los contratenores. En ambos casos la cuerda vocal está más elongada, y la masa de cuerda que vibra es menor.

Sea cual sea el modo en que se va a emitir, el hecho es que cuando decidimos cantar ocurren, a nivel laríngeo, una serie de hechos fisiológicos. Las cuerdas vocales se aproximan entre sí juntándose en la línea media. El aire procedente de los pulmones se dirige hacia fuera por las fuerzas que ya se han explicado. Al encontrarse las cuerdas cerradas, el aire choca contra las mismas y las obliga a separarse para dejar pasar el aire a su través. En cuanto se han separado en virtud del fenómeno de Bernoulli las cuerdas son aspiradas de nuevo hacia la línea media comenzando un nuevo ciclo vocal. Estos ciclos vocales se producen de manera regular mientras el flujo de aire sea continuo, y su frecuencia, que se corresponde con el tono de la nota que se está emitiendo (440 veces por segundo para el la_3) depende de la tensión, masa y elongación de las propias cuerdas, como ya se ha mencionado más arriba⁴⁴.

Hemos hablado, por lo tanto, ya, de cómo se emiten los diferentes tonos y también, en parte de cómo se modifica el timbre en la parte que corresponde a los mecanismos laríngeos. Pero ¿cómo se modifica la intensidad o volumen de la voz? El cantante puede elegir entre dos maneras de hacerlo;

⁴⁴ Jordan, «Vocal Cords up close while singing», vídeo de YouTube, 3:14, publicado el 3 de noviembre de 2010, <https://www.youtube.com/watch?v=-XGds2GAvGQ>.

aumentar el flujo aéreo o aumentar la resistencia laríngea. De estos dos, el más rentable desde el punto de vista fisiológico, el menos lesivo, es el aumento del flujo aéreo. Al incrementarse este, la separación que se produce entre las cuerdas en cada ciclo vocal es mayor, y por lo tanto la onda que se produce al juntarse las mismas será de mayor amplitud, produciendo un sonido de mayor intensidad. Al revés, cuanto menor sea el flujo aéreo, menor será lo que se separan las cuerdas en cada ciclo y menor será la amplitud de la onda generada. En muchas publicaciones se utiliza un símil para entender este concepto: si separamos las manos para dar una palmada, cuanto más separadas estén las manos más sonará la palmada sin necesidad de aumentar mucho la fuerza muscular.

Pero ¿es el sonido que se produce en las cuerdas vocales el mismo que escucha nuestro público cuando nos oye cantar? Claro que no. Nos queda un elemento importantísimo, responsable de la articulación del lenguaje y de la modificación de los timbres y colores de la voz: el elemento resonador-articulador o tracto vocal.

VII. LA ARTICULACIÓN Y LA RESONANCIA

El tracto vocal lo componen todas las estructuras que se encuentran por encima de las cuerdas vocales en el camino del aire desde la producción del sonido (emisión) hasta su salida al exterior por la boca o por la nariz. El tracto vocal está involucrado en la articulación del lenguaje y constituye un elemento fundamental en el canto, ya que es el elemento resonador que produce y modifica el timbre de la voz. Además, es un amplificador de la señal sonora, importantísimo especialmente en el canto lírico donde los cantantes se suben al escenario sin ningún tipo de amplificación electrónica.

Las estructuras que forman el tracto vocal son:

1. La faringe: es un tubo que comienza como continuación del esófago por detrás de la laringe (hacia abajo) y se extiende hacia arriba hasta la parte posterior de las fosas nasales. Está rodeada de estructuras musculares que hacen que tenga una gran movilidad, tanto de ascenso y descenso como de contracción-expansión. La faringe forma parte del aparato digestivo y está involucrada en la deglución, pero constituye asimismo un elemento resonador.

2. La lengua: su parte posterior ocupa la faringe y su parte anterior la cavidad oral o boca. Es un órgano fundamentalmente muscular, tremendamente móvil y fundamental para la articulación del lenguaje.

3. El paladar: su parte anterior está formada por hueso (paladar duro) y constituye el techo de la cavidad oral. Su parte posterior está formada por músculo (paladar blando) y separa la boca de la faringe. El paladar blando realiza movimientos de tensión-relajación y de elevación-descenso. Este último movimiento es fundamental para cerrar las fosas nasales por detrás cuando comemos, para que

no se salga alimento por la nariz. También es importante su movilidad durante el canto para abrirse o cerrarse en función de la emisión de fonemas nasales. La falta de cierre en los fonemas no nasales producirá una rinolalia abierta y la falta de apertura en los fonemas nasales una rinolalia cerrada, ambas con un timbre nasal característico en la voz.

4. La cavidad oral: delimitada hacia delante por los labios. El labio superior está en relación con el maxilar superior y el labio inferior con la mandíbula. Los labios son también estructuras bastante móviles que pueden, no solo abrirse o cerrarse para comer, hablar o cantar, sino que pueden llevarse hacia delante o hacia atrás para la articulación de determinadas vocales y consonantes cambiando las dimensiones de la cavidad oral en sus distintos ejes. La cavidad oral es una estructura fundamental para la deglución, pero también para la articulación del lenguaje.

5. La nariz y los senos paranasales: ambas constituyen cavidades formadas por hueso (y cartílago en el caso de la parte más anterior de las fosas nasales) llenas de aire involucradas en la respiración, pero fundamentales, sin duda, en la resonancia y en la amplificación del sonido.

Todos estos elementos se coordinan durante el canto de manera absolutamente precisa. Gracias a los estudios de resonancia magnética funcional⁴⁵, podemos ver hoy en día cómo se producen estos movimientos en tiempo real durante el canto⁴⁶.

La voz se produce, como ya hemos visto, por la vibración de las cuerdas vocales cuando el aire pasa a su través. Así como el sonido que produce un diapason es un sonido simple, formado por una única onda sinusoidal, el sonido que producen las cuerdas vocales es un sonido complejo, formado por una onda compleja, que es la suma de muchas ondas simples a la vez. Dicha onda, sin embargo, es una onda periódica, que se produce a una frecuencia regular que equivale al número de ciclos vocales que se producen por segundo y por tanto a la nota que estemos emitiendo. Si la onda no fuera periódica en vez de sonido produciríamos ruido. Esto es lo que ocurre en algunas patologías, como cuando por ejemplo hay una lesión grande en las cuerdas vocales que impide completamente la vibración periódica. La presencia de dicha lesión se traduciría en la práctica por una disfonía muy severa.

El sonido que genera el cantante es, por lo tanto, una onda compleja que, según el Teorema de Fourier, puede descomponerse en un número de ondas simples. Estas ondas simples tienen entre sí una relación matemática, de manera que existe una que es la más grave, a la que llamamos «fundamental» y que se corresponde con la nota que estamos cantando y todas las demás son múltiplos hacia el agudo de esa fundamental. A todas esas otras notas u otras ondas simples que se generan se les llama armónicos, y se generan tanto en las cuerdas vocales como en la vibración producida por el arco del violín al frotar la

⁴⁵ Infinite Quotes, «Look inside the head of a opera singer as he performs Wagner Live As He Performs», vídeo de YouTube, 1:18, publicado el 8 de mayo de 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=f5SUhhfwxEI>.

⁴⁶ Anna-Maria Hefe, «MRI | Sehnsucht nach dem Frühlinge (Mozart). Anna-Maria Hefe», vídeo de YouTube, 1:13, publicado el 26 de abril de 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=YIUvX7hebBA>.

cuerda, o el macillo del piano al golpear su cuerda. Los músicos aprenden a nombrar esos armónicos con las notas que representan, mejor dicho, con la distancia interválica que mantienen respecto al armónico previo. En este sentido, los armónicos de una nota concreta serían por orden ascendente: la octava, la quinta, la cuarta, la tercera mayor, la tercera menor... Pero si estas mismas distancias las expresamos en términos físicos con la terminología utilizada para describir las frecuencias (ciclos por segundo o hercios), los armónicos que produce una nota concreta, por ejemplo 100 Hz, serían: 200, 300, 400, 500... es decir, todos los múltiplos de la fundamental. A la representación de un sonido con todos sus armónicos se le denomina espectrograma, que consiste en una gráfica en la cual el eje vertical son las frecuencias, el eje horizontal es el tiempo y la intensidad de los armónicos se representa por una escala de grises, de modo que cuanto más negro mayor la intensidad o amplitud de cada armónico (figura 5)⁴⁷.

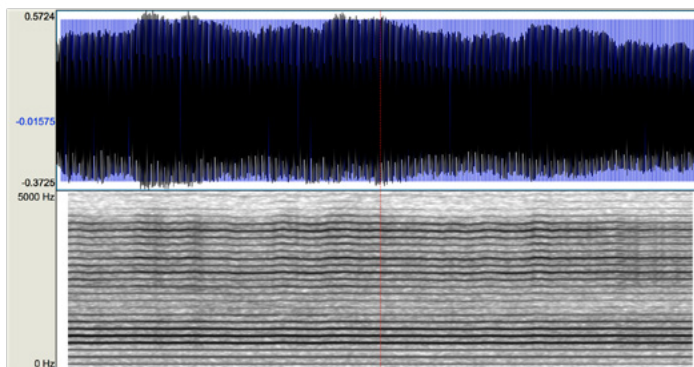


Figura 5. Espectrograma de la voz humana emitiendo el fonema /a/ obtenido mediante el programa Praat

En la parte superior de la imagen se muestra la onda sonora y en la parte inferior el espectrograma, con todos los armónicos entre 0 y 5000 Hz. La línea inferior corresponde a la frecuencia fundamental (en este caso 198 Hz, correspondiente a una voz de mujer) y el resto de líneas corresponden a los armónicos de ese sonido, todos separados por la misma distancia, que coincide con la fundamental.

Si nosotros fuéramos capaces de colocar un micrófono justo encima de las cuerdas vocales y registrar el sonido, observaríamos que la intensidad, amplitud o volumen de todos estos armónicos

⁴⁷F Núñez Batalla y C Suárez Nieto, *Espectrografía clínica de la voz* (Oviedo:Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones, 1999), 15-32.

decrece progresivamente a medida que vamos hacia armónicos más agudos⁴⁸, con una magnitud de unos 12 decibelios por octava⁴⁹.

Pero el sonido que el cantante produce, el que llega al público, no es el que se genera en las cuerdas vocales, la fuente sonora, sino que este sonido pasa a través de un filtro (el tracto vocal) donde sufre una serie de modificaciones que consisten, sencillamente, en potenciar-amplificar algunos armónicos y atenuar-disminuir la intensidad de otros. Este proceso de filtrado de la señal sonora procedente de la laringe es lo que define tanto la articulación como el timbre.

Aquellos armónicos o grupos de armónicos (a veces puede no ser uno solo, sino varios contiguos) que se ven amplificados en intensidad o volumen por efecto del tracto vocal se denominan formantes. En la voz concretamente existen varios formantes que se denominan numéricamente de forma progresiva, de los más graves a los más agudos, así en el espectrograma que se muestra a continuación se observarían 5 formantes, que denominaríamos F1, F2, F3, F4 y F5 (figura 6).

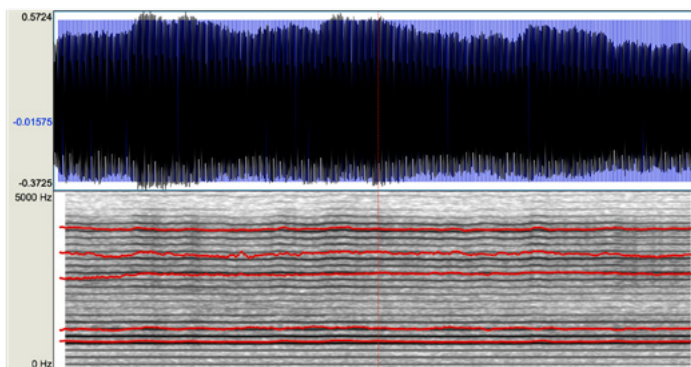


Figura 6. Espectrograma de la voz humana emitiendo el fonema /a/ obtenido mediante el programa Praat (igual a figura 5). Se encuentran marcados en rojo, para facilitar su visión, los formantes del sonido

En lo que respecta a la articulación, todos los fonemas vocálicos (en los que no vibra ninguna otra estructura excepto las cuerdas vocales) se pueden definir por la localización precisa de los dos primeros formantes (F1 y F2) en el espectrograma. Y así, en todas las voces, masculinas o femeninas, el fonema /a/ tendrá su primer y segundo formante en el mismo sitio (figura 7).

⁴⁸ J Sundberg, «Perceptual aspects of singing», *J Voice* 8, n.º 2 (1994): 106-122.

⁴⁹ A Giovanni, A Lagier y N Henrich, «Fisiología de la fonación», *EMC Otorrinolaringología* 43, n.º 3 (2014): 1-16.

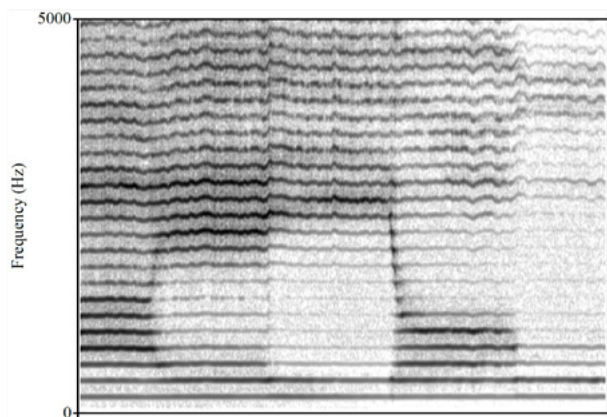


Figura 7. Espectrograma de la voz humana emitiendo consecutivamente los fonemas vocálicos del español /a/, /e/, /i/, /o/, /u/ obtenido mediante el programa Praat. Se observa como la posición relativa del primer y segundo formante cambia cuando lo hace la vocal

Respecto al resto de formantes, se relacionan más bien con el timbre, así que dependen, en parte de la persona que esté hablando o cantando y en parte de la manera en que utilicemos la voz. Dado que la anatomía del tracto vocal de cada persona es diferente (el tamaño de la lengua, la longitud y anchura de la faringe, la anchura del paladar duro...), cada cantante tendrá específicamente reforzados algunos armónicos (formantes) que otorgan a cada uno de ellos su huella vocal y que nos permiten diferenciar unas voces de otras. Pero, por otro lado, como hemos apuntado, dado que el tracto vocal es muscular, y es móvil, el cantante está continuamente modificando la forma de su caja de resonancia, de modo que puede hacer que su voz suene de manera diferente, por ejemplo, dependiendo del rol que esté cantando⁵⁰.

A este respecto es de suma importancia, especialmente en el canto lírico, el fenómeno por el cual las voces de los cantantes son capaces de oírse en un auditorio por encima de una orquesta sinfónica, sin ningún tipo de amplificación. Desde siempre es sabido por los cantantes y por los profesores de canto que es imprescindible que la voz «corra» o que tenga «*squillo*» para que al cantante se le oiga en el teatro. De hecho, uno de los objetivos fundamentales de la técnica vocal en el canto lírico es, precisamente, este, ya que en otros estilos de canto se usa la amplificación mediante micrófonos. Si uno se para a pensarlo, realmente es un misterio cómo algunas voces aparentemente pequeñas pueden, mediante la técnica, hacerse oír en grandes teatros compitiendo con una gran orquesta sinfónica. Obviamente si midiéramos los decibelios que es capaz de gritar un cantante por

⁵⁰ F Roers, D Mürbe y J. Sundberg, «Voice classification and vocal tract of singers: a study of x-ray images and morphology», *J Acoust Soc Am* 125, n.º 1 (2009): 503-512.

potente que sea su voz y midiéramos a su vez los decibelios que emite una orquesta, el cantante siempre saldría perdiendo... Por lo tanto, ¿cuál es el fenómeno que hace que el cantante gane en su lucha contra la orquesta?

Pues es precisamente el refuerzo en energía (amplitud o volumen) de los armónicos que están entre 2500 y 3500 Hz. Se ha demostrado que el cantante lírico es capaz de concentrar la energía sonora en una zona específica (cada voz la tiene en un sitio, las voces agudas más cerca de 3500 Hz y las voces graves más cerca de 2500 Hz). Este refuerzo de energía se consigue agrupando el tercer y cuarto formantes en esta zona del espectro. Lo que ocurre es que el espectrograma de la orquesta, aunque tiene mayor volumen de forma global, en esta zona de 2500-3500 Hz tiene menor volumen que la voz lírica. Además, el oído humano tiene una especial sensibilidad a nivel coclear para escuchar estas frecuencias. El resultado es que, como sabemos, al cantante se le escucha por encima de la orquesta sin necesidad de amplificación⁵¹ (figuras 8 y 9).

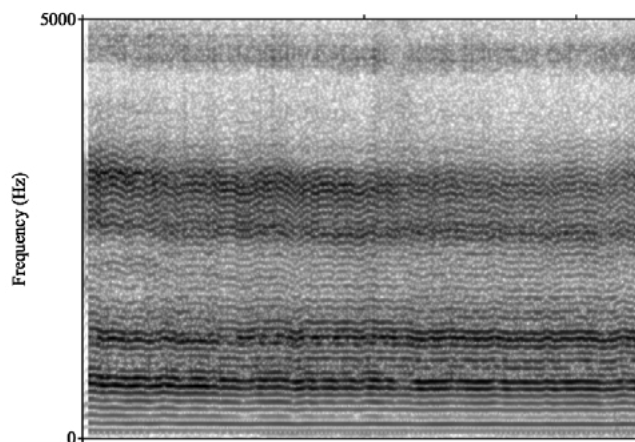


Figura 8. Espectrograma de la voz de un cantante lírico (bajo-barítono) grabado con el programa Praat emitiendo la vocal /a/ en voz hablada sin intención de impostación. Se ve claramente que la energía sonora está repartida entre los armónicos, aunque se aprecian perfectamente los formantes de la voz

⁵¹ J Sundberg, *The Science of the singing voice* (DeKalb, Illinois: Northern Illinois University Press, 1987), 157-181.

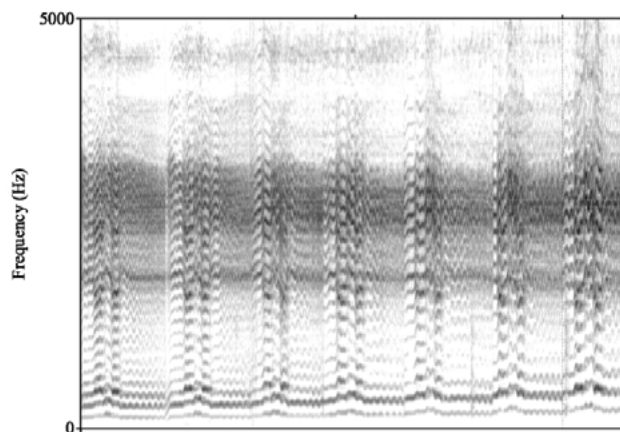


Figura 9. Espectrograma de la voz de un cantante lírico (bajo-barítono) grabado con el programa Praat emitiendo la vocal /a/ vocalizando en voz cantada. Se aprecia claramente como la energía sonora está concentrada en la zona de 2500-3000 Hz (presencia del formante del cantante)

Otro elemento fundamental de la voz cantada, especialmente importante en la voz lírica, aunque también está presente en otros estilos de canto, es el vibrato. El vibrato consiste en una oscilación tanto del tono o frecuencia fundamental como de la intensidad del sonido que proporciona a este una mayor riqueza tímbrica (figura 10).

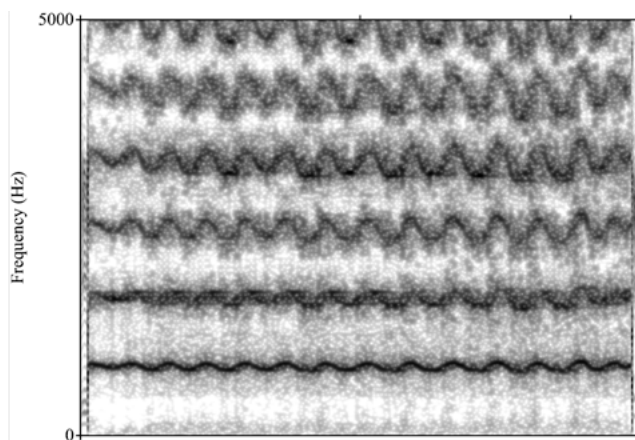


Figura 10. Espectrograma de la voz de una cantante lírica (soprano) grabada mediante el programa Praat emitiendo una vocal sostenida en voz cantada. Se aprecia la oscilación de la frecuencia fundamental correspondiente al vibrato

Hay algunas voces que poseen vibrato de forma natural mientras que otras no lo tienen. Sin embargo, a lo largo del desarrollo de la voz durante el estudio del canto, el vibrato se desarrolla de forma más o menos espontánea⁵².

El vibrato puede ser caracterizado por dos parámetros: la amplitud, medida en hercios⁵³ o en semitonos y la frecuencia o número de ciclos u oscilaciones por segundo⁵⁴.

Está establecido que, para que el vibrato otorgue belleza y riqueza a la voz, debe tener unas características concretas en cuanto a frecuencia y amplitud. En cuanto a la frecuencia, debe estar alrededor de 6 ciclos por segundo. Así, frecuencias mayores serán percibidas por el oído por lo que se denomina un vibrato caprino y frecuencias menores se interpretarán como una voz oscilante. En cuanto a la amplitud, debe estar entre 1 y 2 semitonos. Amplitudes menores se perciben como una voz plana y frecuencias mayores como una voz de nuevo inestable.

VIII. CONCLUSIONES

El estudio de la voz cantada puede abordarse desde un punto de vista artístico y científico. Ambas perspectivas son complementarias. El que los cantantes conozcan más acerca de su instrumento y de cómo funciona es sin duda beneficioso. Asimismo, los profesionales dedicados al estudio y cuidado de la voz desde el punto de vista científico deben conocer la perspectiva del cantante para entender mejor los fenómenos fisiológicos que corresponden a la emisión de la voz y los fenómenos acústicos que influyen en la misma.

El canto comienza a nivel cerebral con la idea de cantar. El cuerpo, concebido de manera global como instrumento, se prepara con una postura idónea para la emisión de la voz. A través de la respiración controlada se produce la energía necesaria, en forma de columna de aire, para hacer vibrar las cuerdas vocales, localizadas en la laringe. Esa vibración produce un sonido complejo, formado por una frecuencia fundamental y una serie de armónicos, que pasan a través de un filtro formado por todas las estructuras anatómicas que conforman el tracto vocal. Dichas estructuras son en parte fijas y producen la huella vocal que nos caracteriza a cada uno, pero en parte son móviles, permitiendo al cantante un número casi infinito de posibilidades en cuanto a la interpretación artística.

Todos los elementos que forman el canto no deben concebirse de forma aislada, sino que deben trabajarse de forma integral. Esto no quiere decir que no sea posible y recomendable trabajar por separado aspectos específicos con la finalidad de fijar la atención sobre cosas concretas, pero este

⁵² D Mürbe et al., «Effects of professional singing education on vocal vibrato, a longitudinal study», *J Voice* 21 (2007): 683-688.

⁵³ C Dromey, L Reese y JA Hopkin, «Laryngeal-Level Amplitude Modulation in Vibrato», *J Voice* 23 (2009): 156-63.

⁵⁴ C Dromey, N Carter y JA Hopkin, «Vibrato Rate Adjustment», *J Voice* 17 (2003): 168-78.

aspecto de detalle debe siempre combinarse con el conjunto de elementos que conforman el canto sin perder de vista la dimensión artística del mismo. Cantar es algo que cualquier persona puede hacer, pero el canto entendido como actividad artística, con su máxima expresión en el canto lírico, es sin duda una de las artes más elevadas. El cantante lírico es un deportista de élite que precisa de unas habilidades extraordinarias para ejercer su profesión. Los conocimientos científicos sobre el canto son importantes a la hora de estudiar y, sobre todo, para su enseñanza. Pero al subirse a un escenario, en ese momento mágico en el que el cantante respira para empezar a cantar, todo eso pasa a un segundo plano y comienza el Arte, con mayúsculas, que es, a fin de cuentas, el objetivo final.

IX. REFERENCIAS

- Anna-Maria Hefe. «MRI | Sehnsucht nach dem Frühlinge (Mozart). Anna-Maria Hefe». Vídeo de YouTube, 1:13. Publicado el 26 de abril de 2017. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=YIUvX7hebBA>.
- Arcaya, Beret. *Understanding the singing voice*. Nueva York: Beret Arcaya, 2015.
- ATENSALUD. «8 músculos de la espiración». Vídeo de YouTube, 3:51. Publicado el 31 de enero de 2018. Acceso el 8 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=LcZmzJ-GQE0>.
- De Angelis, V; F Martino; M Moerel; R Santoro; L Hausfeld y E Formisano. «Cortical processing of pitch: Model-based encoding and decoding of auditory fMRI responses to real-life sounds». *Neuroimage* 180, (2018): 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.11.020>.
- Deutsche Grammophon. «Franco Fagioli-Handel:Ombra mai fu». Vídeo de YouTube, 3:26. Publicado el 5 de febrero de 2018. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=FD8eL-1a0As>.
- Dromey, C, L Reese, y JA Hopkin. «Laryngeal-Level Amplitude Modulation in Vibrato». *J Voice* 23(2009):156-163. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2007.05.002>.
- Dromey, C, N Carter, y JA Hopkin. «Vibrato Rate Adjustment». *J Voice* 17 (2003): 168-178. [https://doi.org/10.1016/s0892-1997\(03\)00039-0](https://doi.org/10.1016/s0892-1997(03)00039-0).
- Educación Portal. «Biología: el oxígeno y la respiración». Vídeo de YouTube, 2:13. Publicado el 28 de marzo de 2016. Acceso el 8 de agosto de 2020. https://www.youtube.com/watch?v=Yhpme_G2QcU.
- Fernández González, S, F Vázquez de la Iglesia, M Marqués Girbau, y R García-Tapia Urrutia. «Manuel P. García». *Rev Med Univ Navarra* 50, n.º 3 (2006): 14-18.

- fleurdefeu57bis. «Edita Gruberova - Ariadne auf Naxos - Grössmächtige Prinzessin». Vídeo de YouTube, 11:51. Publicado el 15 de abril de 2012. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=IWR98ZiPk1g>.
- Garcia, Manuel. *Traité complet L'art du chant*. París: Minkoff, 1848.
- García-López, I, y J Gavilán Bouzas. «La Voz Cantada». *Acta Otorrinolaringol Esp* 61, n.º 6 (2010): 441-451. <https://doi:10.1016/j.otorri.2009.12.006>.
- García-López, I, S Santiago Pérez, J Peñarrocha-Teres, AJ Palacio, y J Gavilán. «Electromiografía laríngea en el diagnóstico y tratamiento de los trastornos de la voz». *Acta Otorrinolaringol Esp* 63, n.º 6 (2012): 458-464. <https://doi:10.1016/j.otorri.2012.05.004>.
- Giovanni, A, A Lagier, y N Henrich. «Fisiología de la fonación». *EMC Otorrinolaringología* 43, n.º 3 (2014): 1-16. [http://dx.doi.org/10.1016/S1632-3475\(14\)68304-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1632-3475(14)68304-1).
- Giovanni, A, y S de Saint-Victor. «Estudio clínico de la voz». *EMC Otorrinolaringología* 42, n.º 4 (2013): 1-17. [http://dx.doi.org/10.1016/S1632-3475\(13\)65961-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1632-3475(13)65961-5).
- Griffin, B, P Woo, R Colton, J Casper, y D Brewer. «Physiological Characteristics of the Supported Singing Voice. A Preliminary Study». *J Voice* 9, n.º 1 (1995): 45-56. [https://doi:10.1016/s0892-1997\(05\)80222-x](https://doi:10.1016/s0892-1997(05)80222-x).
- Henrich, N. «Mirroring the voice from Garcia to the present day: Some insights into singing voice registers». *Logoped Phoniatr Vocol* 31 (2006): 3-14. <https://doi:10.1080/14015430500344844>.
- Hirano, M. «Morphological Structure of the Vocal Cord as a Vibrator and Its Variations». *Folia Phoniatr (Basel)* 26, n.º 2 (1974): 89-94. <https://doi:10.1159/000263771>.
- Hirano, M, W Vennard y J Ohala. «Regulation of register, pitch and intensity of voice». *Folia Phoniatr (Basel)* 22 (1970): 1-20. <https://doi:10.1159/000263363>.
- Infinite Quotes. «Look inside the head of a opera singer as he performs Wagner Live As He Performs». Vídeo de YouTube, 1:18. Publicado el 8 de mayo de 2016. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=f5SUhhfwxEI>.
- Jordan. «Vocal Cords up close while singing». Vídeo de YouTube, 3:14. Publicado el 3 de noviembre de 2010. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=-XGds2GAvGQ>.
- Juliano Brito. «Canto músculos intrínsecos». Vídeo de YouTube, 1:17. Publicado el 25 de junio de 2018. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=mmckasxrKEw>.

- Jürgens, U. «The neural control of vocalization in mammals: a review». *J Voice* 23, n.º 1 (2009): 1-10. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2007.07.005>.
- Jürgens, U, y A Kirzinger. «The laryngeal sensory pathway and its role in phonation. A brain lesioning study in the squirrel monkey». *Exp Brain Res* 59, n.º 1 (1985): 118-124. <https://doi: 10.1007/BF00237672>.
- Kishon-Rabin, L, O Amir, Y Vexler y Y Zaltz. «Pitch discrimination: are professional musicians better than non-musicians?». *J Basic Clin Physiol Pharmacol* 12 (2001): 125-143. <https://doi: 10.1515/jbcpp.2001.12.2.125>.
- Kochis-Jennings, KA, EM Finnegan, HT Hoffman, S Jaiswal y D Hull. «Cricothyroid Muscle and Thyroarytenoid Muscle Dominance in Vocal Register Control: Preliminary Results». *J Voice* 28, n.º 5 (2014): 652. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2014.01.017>.
- Kraustrujillo. «Alfredo Kraus habla de técnica vocal (III)». Vídeo de YouTube, 6:55. Publicado el 2 de mayo de 2009. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=AP79QBok-yw>.
- Lamperti, Giovanni Battista. *The technics of bel Canto*. Traducido por TH Baker. Mansfield Centre: Martino Publishing, 2012.
- Lehmann, Lilli. *Mon art du chant*. Traducido por Maurice Chassang. París: Rouart, Lerolle et Cie, 1900.
- Macdonald, I, JS Rubin, E Blake, S Hirani y R Epstein. «An Investigation of Abdominal Muscle Recruitment for Sustained Phonation in 25 Healthy Singers». *J Voice* 26, n.º 6 (2012): 815. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2012.04.006>.
- McHenry, MA, J Evans y E Powitzky. «Effects of Bel Canto Training on Acoustic and Aerodynamic Characteristics of the Singing Voice». *J Voice* 30, n.º 2 (2016): 198-204. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2014.11.009>.
- Micheyl, C, K Delhommeau, X Perrot y AJ Oxenham. «Influence of musical and psychoacoustical training on pitch discrimination». *Hear Res* 219 (2006): 36-47. <https://doi: 10.1016/j.heares.2006.05.004>.
- Miller, Richard. *On the Art of Singing*. Nueva York: Oxford University Press, 1996.
- Mürbe, D, T Zahnert, E Kuhlisch y J Sundberg. «Effects of professional singing education on vocal vibrato, a longitudinal study». *J Voice* 21 (2007): 683-8. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2006.06.002>.

- Núñez Batalla, F y C Suárez Nieto. *Espectrografía clínica de la voz*. Oviedo: Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones, 1999.
- Orquesta Ciudad de Granada-Tema. «El Poeta Calculista-Duo». Vídeo de YouTube, 5:46. Publicado el 24 de septiembre de 2014. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=R06Yk9yfd3I>.
- Proyecto Lumina. «Laringe humana. Ciclo vibratorio de las cuerdas vocales». Vídeo de YouTube, 5:38. Publicado el 18 de junio de 2012. Acceso el 10 de agosto de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=IdDFkxUTj0>.
- Roers, F, D Mürbe y J Sundberg. «Voice classification and vocal tract of singers: a study of x-ray images and morphology». *J Acoust Soc Am* 125, n.º 1 (2009): 503-512. <https://doi: 10.1121/1.3026326>.
- Rubin, JS, E Blake y L Mathieson. «The effects of posture in voices». En *Diagnosis and treatment of voice disorders*, coordinado por JS Rubin, RT Sataloff y GS Korovin, 707-718. San Diego: Plural Publishing, 2006.
- Sonninen, A, M Laukkanen, K Karma y P Hurme. «Evaluation of Support in Singing». *J Voice* 19, n.º 2 (2005): 223-237. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2004.08.003>.
- Stark, James. *Bel Canto. A History of Vocal Pedagogy*. Toronto, Buffalo y Londres: University of Toronto Press Incorporated, 1999.
- Sundberg, J. *The Science of the singing voice*. DeKalb, Illinois: Northern Illinois University Press, 1987.
- . «Perceptual aspects of singing». *J Voice* 8, n.º 2 (1994): 106-22. [https://doi: 10.1016/s0892-1997\(05\)80303-0](https://doi: 10.1016/s0892-1997(05)80303-0).
- Van Houtte, E, K Van Lierde y S Claeys. «Pathophysiology and Treatment of Muscle Tension Dysphonia: A Review of the Current Knowledge». *J Voice* 25, n.º 2 (2011): 202-207. <https://doi: 10.1016/j.jvoice.2009.10.009>.
- Wyke, BD. «Laryngeal neuromuscular control systems in singing. A review of current concepts». *Folia Phoniatr (Basel)* 26 (1974): 295-306. <https://doi: 10.1159/000263791>.
- Zarate, JM. «The neural control of singing». *Front Hum Neurosci* 7 (2013): 1-12. <https://doi: 10.3389/fnhum.2013.00237>.
- Zarate, JM y RJ Zatorre. «Experience-dependent neural substrates involved in vocal pitch regulation during singing». *Neuroimage* 40 (2008): 1871-1887. <https://doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.01.026>. ■