

Curso:

Estimación del riesgo auditivo por exposición a ruido según la Norma ISO 1999 : 1990

Federico Miyara

1. Introducción

ISO es la sigla en inglés de *International Organization for Standardization*, es decir, Organismo Internacional de Normalización. Esta institución agrupa institutos nacionales como el IRAM (Instituto Argentino de Normalización), y emite normas internacionales luego de someterlas a la votación de sus miembros. Estas normas son el resultado del trabajo de diversos comités técnicos, en los que participan representantes de los diversos organismos nacionales. Una vez que un comité elabora un borrador (draft), el mismo pasa a consideración de sus miembros, y finalmente a votación. Los procedimientos de aprobación son severos, requiriéndose una mayoría especial del 75% para que un borrador se transforme en Norma.

Las normas internacionales, de igual modo que las nacionales, son de adhesión voluntaria, vale decir que constituyen bases para un compromiso o acuerdo explícito o implícito entre dos o más partes. Sin embargo, en muchas oportunidades pasan a formar parte de legislaciones de alcance local, nacional o internacional.

Las normas correspondientes a Acústica son preparadas y discutidas por el Comité Técnico *ISO/TC 43 Acoustics*, que ha emitido una considerable cantidad de normas internacionales. Muchas de las normas establecen procedimientos de medición que garanticen resultados correctos y repetibles cuando los mismos son aplicados por diversas personas o laboratorios. Otras normas, como la que nos ocupa, se refieren a los efectos esperables cuando se aplican determinados estímulos al ser humano. Para su trabajo, este Comité reúne resultados de numerosos trabajos científicos, los compara y compatibiliza, obteniendo relaciones que gocen del máximo consenso o acuerdo posible en un determinado estado de avance del conocimiento sobre el asunto considerado.

2. Antecedentes históricos

El efecto del ruido laboral sobre la audición humana es conocido desde tiempos remotos. Ocupaciones como la herrería, la calderería y otras industrias metalúrgicas conducían a la larga a la sordera de quienes las practicaban.

Plinio el Viejo (28-79 DC) había observado que los nativos que vivían y pescaban cerca de las cascadas y rápidos del alto Nilo ensordecían (Rosen, 1974).

Hacia el año 1700, Bernardino Ramazzini (1633-1714) describía, en su obra "*De Morbis Artificum Diatriba*", los efectos del ruido sobre la audición de los bronceadores en estos términos: "...Existen bronceadores en todas las urbes y en Venecia se agrupan en un solo barrio; allí martillan el día entero para dar ductilidad al bronce y fabricar luego con él vasijas de diversas clases; allí también sólo ellos tienen sus tabernas y domicilios, y causan tal estrépito que huye todo el mundo de un paraje tan molesto. Dáñase pues principalmente el oído del continuo fragor y toda la cabeza por consiguiente; ensordecen poco a poco y al envejecer quedan totalmente sordos; el tímpano del oído pierde su tensión natural de la incesante percusión que repercute a su vez hacia los lados en el interior de la oreja debilitando y pervirtiendo todos los órganos de la audición..." (Werner et al., 1995; González, 2000)

La investigación sistemática de tales efectos más allá de la observación empírica debió esperar al siglo XX, cuando la tecnología hizo posible cuantificar y medir no sólo el sonido en sus diferentes aspectos (intensidad y contenido espectral), sino también la propia audición. Debido a la imposibilidad ética de experimentar intencionalmente con la audición humana, por ejemplo induciendo pérdidas auditivas por exposición a ruidos controlados, los científicos recurrieron a reunir grandes cantidades de datos obtenidos de situaciones de exposición a ruidos de carácter laboral.¹ En algunos casos se ha utilizado la hipótesis denominada de *igualdad de los efectos temporarios*, según la cual la disminución auditiva temporal (y por lo tanto reversible) ante una exposición a ruidos de determinadas características es una réplica de la pérdida auditiva permanente al cabo de varios años de reiterada exposición al mismo tipo de ruidos. Esta hipótesis permite realizar experimentos menos cuestionables, al no implicar daños permanentes sino temporarios en los sujetos investigados, los cuales pueden extrapolarse a los efectos irreversibles. Sin embargo, la hipótesis ha revelado no ser del todo correcta.

En el célebre libro “*Acoustics*”, publicado por Leo Beranek en 1954, se describen los primeros criterios tentativos en relación con los niveles capaces de dañar el oído. En este caso el criterio, propuesto por Kryter en 1950, estaba dado en términos de lo que en Psicoacústica se conoce como *bandas críticas*.² Según el mismo, se establecía un límite para el nivel de presión sonora en cada banda crítica de 85 dB por encima del umbral de audición (Tabla 1). Si en todas las bandas críticas el nivel del ruido estaba 5 dB por debajo del límite, entonces ante exposiciones laborales de 8 horas diarias y 50 semanas al año durante 5 años la probabilidad de tener daño auditivo era muy baja. Si, en cambio, la exposición estaba 5 dB por encima en alguna banda, aún en una exposición durante un año la probabilidad de que algunas personas expuestas tuvieran daño permanente era alta (Beranek, 1986).

Tabla 1. Criterio de Kryter sobre daño auditivo (adaptación)

f	$L_{m\acute{a}x}$ [dB] Banda crítica	$L_{m\acute{a}x}$ [dB] Banda de octava
50	110	110
100	95	102
200	88	97
400	85	95
800	84	95
1600	83	95
3150	82	95
6300	81	95

¹ Al parecer, en el ámbito ocupacional priman y han primado siempre otros criterios éticos (a nuestro entender severamente cuestionables) por los cuales el factor económico se encuentra por encima del derecho individual a la salud orgánica y psíquica. Aunque las técnicas de control de ruido han mejorado notablemente en las últimas décadas, la así llamada *factibilidad económica* suele ser la principal preocupación, en detrimento de la salud y bienestar de los trabajadores. Como ejemplo notable de cuán internalizada está esta concepción en el pensamiento contemporáneo, podemos citar las siguientes palabras del Dr. Aram Glorig, un conocido investigador sobre los efectos del ruido: “*Es obvio (...) que si vamos a adoptar la postura de que no haya riesgo auditivo en absoluto, los niveles de exposición a ruido deben ser de 80 dBA o menos. También se sabe que lograr esos niveles en la industria con maquinarias tal como están diseñadas en la actualidad es económicamente impráctico. Por consiguiente, la comunidad debe aceptar un compromiso y asumir cierto riesgo que sea consistente con ese compromiso*” (Beranek, 1988).

² Una banda crítica es una banda de frecuencia centrada alrededor de un tono tal que el enmascaramiento producido por un ruido blanco que se extiende hasta afuera de dicha banda no es mayor que si el ruido se limita sólo a la banda (suponiendo la misma potencia total).

En otro libro compilado por Beranek con la colaboración de otros autores, “*Noise Reduction*” (1960), Kryter aporta un capítulo con criterios actualizados sobre los efectos del ruido en la audición (Beranek, 1960). Los dos más significativos son los incluidos en el reglamento AFR 160-3 de la fuerza aérea norteamericana, de 1956, y el de la American Standards Association de 1954. El primero de ellos establece un límite de 85 dB para la exposición a ruidos de banda ancha a lo largo de toda la vida en todas las bandas de octava, que por comparación con el de Kryter demuestra ser bastante más estricto. Además, por primera vez incluye una penalización de 10 dB por sonidos tonales. Es decir, que para un tono puro el límite ha de ser de 75 dB en lugar de 85 dB. La razón para ello es que en una octava hay alrededor de 10 bandas críticas,³ por lo cual un ruido de banda ancha de 85 dB en una dada octava correspondería aproximadamente a 75 dB en cada una de sus 10 bandas críticas.

El criterio de la American Standards Association, por su parte, establece que si se somete a un grupo de personas a una exposición laboral (8 horas por día laborable) durante 25 años de manera que en las bandas de octava superiores a 300 Hz el nivel sea menor de 80 dB los daños auditivos serán despreciables. Lo interesante de este criterio es que por primera vez se considera el concepto de distribución estadística de la población en cuanto a su agudeza auditiva, y a la introducción de dos límites arbitrarios con respecto a cuándo se considera que se tiene daño auditivo (en este caso, cuando la pérdida alcanza los 15 dB) y a qué porcentaje de afectados se considera despreciable (en este caso, un 1%).

Finalmente, Kryter concluye proponiendo un criterio en el cual tiene en cuenta la susceptibilidad para diferentes grupos etarios, teniendo en cuenta el concepto de *presbiacusia*, es decir la disminución de la agudeza auditiva con la edad. Kryter propone en este caso que la presbiacusia se origina en la menor tolerancia a los ruidos de la vida diaria a medida que avanza la edad.

La conclusión anterior es coherente con un célebre trabajo de Rosen, Bergman, Plester, El-Mofty y Satti de 1962. Este grupo de investigadores se trasladó a la República de Sudán, en el continente africano, e investigó a los Mabaans, un pueblo tribal primitivo de desarrollo cultural comparable a la edad de piedra tardía. La condición que cumplían era la de ser personas muy tranquilas, pacíficas y silenciosas, siendo el nivel sonoro habitual de 40 dBC. Los máximos niveles encontrados fueron de 110 dB al final gritado de unos cánticos corales realizados esporádicamente durante los dos meses al año de cosecha primaveral. Realizaron estudios audiométricos a más de 500 individuos de uno y otro sexo y todas las edades, y comprobaron que las pérdidas auditivas promedio eran, a los 70 años, comparables a las correspondientes a individuos de entre 30 y 50 años del estado norteamericano de Wisconsin y otros, aún de grupos poblacionales seleccionados por su baja exposición a ruidos (Rosen et al., 1962). Estos resultados han consolidado la denominación de *socioacusia* para el deterioro auditivo con la edad en contextos sociales relativamente ruidosos (si bien de niveles no tan altos como los laborales).

En otro importante libro compilado por Leo Beranek con la contribución de un nutrido grupo de especialistas, “*Noise and Vibration Control*” (1971, reeditado en 1988), Aram Glorig, médico higienista, aporta el capítulo sobre criterios de riesgo auditivo. En él aparece un criterio completo de carácter estadístico en el que se tiene en cuenta la exposición en términos de nivel sonoro del ruido con compensación A (ver sección 4), en lugar de clasificarlo en términos de su distribución espectral. Esto implica una enorme simplificación en la obtención de los datos, ya que permite prescindir de equipamientos costosos tales como analizadores de espectro. El precio a pagar es que se limita a cierto tipo de ruidos industriales de banda ancha.

El criterio, indicado en la Tabla 2, considera la cantidad de años de exposición así como la edad, y proporciona el *riesgo porcentual* de adquirir una discapacidad auditiva permanente, definida como un aumento promedio de 25 dB en el umbral auditivo correspondiente a las frecuencias de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz (a partir del cual comienza a haber dificultades para la inteligibilidad de la palabra hablada). El *riesgo*, a su vez, se define como la diferencia entre el porcentaje de personas en un grupo sometido a una determinada exposición a ruido que adquiere

³ Las bandas críticas para sonoridad resultan ser 2,5 veces mayores que las para enmascaramiento, lo cual corresponde a alrededor de 1/3 de octava. Se ha argumentado que las “bandas críticas para el daño auditivo” deberían ser más acordes a las correspondientes a la sonoridad que al enmascaramiento.

discapacidad auditiva permanente y el porcentaje de personas no expuestas que adquiere dicha discapacidad. Según puede observarse, el riesgo aumenta hasta cierta edad y luego disminuye. Esto se debe a que a edades avanzadas, ya sea por efectos presbiacúsicos o socioacúsicos, la audición se deteriora rápidamente aún sin exposición significativa a ruidos laborales, por lo cual el efecto del ruido parece menos importante (Beranek, 1988).

Tabla 2. Criterio de Glorig sobre riesgo porcentual de daño auditivo (adaptación)

Edad		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Años de exposición		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Nivel de exposición [dBA]	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	85	0	1,0	2,6	4,0	5,0	6,1	6,5	8,0	8,0	6,5
	90	0	3,0	6,6	10,0	11,9	13,4	15,6	17,5	18,0	14,5
	95	0	5,7	12,3	18,2	21,4	24,1	26,7	28,3	28,0	24,0
	100	0	9,0	20,7	30,0	35,9	38,1	40,8	41,5	40,0	35,0
	105	0	13,2	31,7	44,0	49,9	54,1	57,8	57,5	54,0	44,5
	110	0	19,0	46,2	61,0	68,4	73,1	73,8	71,5	64,0	51,5
	115	0	26,0	61,2	79,0	83,9	86,1	84,3	89,5	70,0	55,0

En 1972, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA)⁴, fue comisionada por el Congreso, como parte de los requerimientos de la Ley de Control de Ruido (Noise Control Act, 1972), para elaborar y publicar una serie de criterios con respecto al ruido. El resultado fue un extenso documento emitido en marzo de 1974 bajo el título de “*Información sobre los niveles de ruido ambiental requeridos para proteger la salud y el bienestar públicos con un adecuado margen de seguridad*”, más conocido como “*The ‘Levels’ Document*” (EPA, 1974). Es una afortunada circunstancia el que el propósito de dicha investigación fuera sólo *informar* y no *regular*, ya que entonces fueron dejados de lado diversos intereses políticos y económicos y el estudio se concentró en obtener resultados científicos y no compromisos entre lo deseable y lo posible.⁵ Si bien los criterios abarcan varios rubros además del daño auditivo, nos concentraremos aquí en los criterios para la protección de la audición.

Las premisas básicas de las cuales partió este organismo fueron las siguientes: 1) En general el efecto más notorio del ruido se produce en la frecuencia audiométrica de 4000 Hz, por lo tanto el propósito del criterio es proteger esta frecuencia. 2) Los cambios en el nivel de audición menores de 5 dB son difíciles de determinar confiablemente y además se consideran escasamente significativos. 3) Un individuo no puede ser dañado auditivamente por sonidos que no puede escuchar. 4) Si se protege al 96% de las personas con mejor audición, el 4% restante también estará protegido pues corresponden a aquéllos que, por tener ya hipoacusias, no pueden oír los sonidos que resultan admisibles para el resto. Bajo estas condiciones, la EPA concluye que el nivel de protección es de 70 dBA promedio a lo largo de las 24 horas diarias durante un intervalo de 40 años. Trasladado al campo laboral, esto es equivalente a un límite de 75 dBA en una jornada laboral de 8 horas.

Ahora bien, este criterio no debe interpretarse (como erróneamente suele hacerse) en el sentido de que sea generalmente peligroso exponerse a sonidos de más de 75 dBA. Por empezar, el criterio propuesto es el de un cambio de 5 dB en el umbral auditivo, que es un criterio muy conservativo. De hecho, el criterio audiológico comúnmente aceptado es de entre 20 dB y 25 dB para ingresar en el terreno de la patología. En segundo lugar, este criterio protege aún a las personas con mayor labilidad auditiva, por lo cual la mayoría de las personas no sufrirán ninguna

⁴ La EPA es el organismo gubernamental federal encargado de regular los aspectos medioambientales en los Estados Unidos.

⁵ Es significativo el hecho de que algunos años más tarde la Oficina de Reducción y Control de Ruido, encargada de llevar a cabo las políticas ambientales sobre ruido fue desfinanciada y por lo tanto virtualmente desmantelada por el gobierno federal.

consecuencia. En tercer lugar, el descriptor utilizado es un nivel equivalente o promedio, por lo cual a menos que el ruido sea casi constante, habrá altibajos que permiten que, superándose por momentos dicho valor, en otros los niveles sean menores.

En 1975 surge la primera edición de la Norma que nos ocupa: la ISO 1999, que se propone normalizar la determinación del riesgo auditivo por exposición a ruido. El principio es similar al de Glorig, con diferencias en los valores. Utiliza el criterio de daño auditivo de 25 dB para el promedio del aumento del umbral auditivo en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, y el parámetro considerado como nivel de exposición es el nivel sonoro continuo equivalente con ponderación A (ver sección 4) referido a una semana laboral de 40 horas. Para otras exposiciones será necesario efectuar una conversión. La versión 1975 de esta norma daba un procedimiento de cálculo basado en tablas de índices parciales de exposición asociados con un nivel sonoro y su duración. El índice parcial de exposición es el porcentaje de energía aportado por la presencia de un nivel sonoro L_i durante un tiempo Dt_i (en horas) con respecto al aportado por un nivel sonoro de 90 dBA durante 40 horas, es decir:

$$E_i = \frac{Dt_i}{40} 10^{\frac{L_i - 70}{10}} \quad (1)$$

Luego se obtiene el nivel equivalente L_{eq} mediante la expresión

$$L_{eq} = 70 + 10 \log \sum E_i \quad (2)$$

En la actualidad este procedimiento puede evitarse teniendo en cuenta que la mayoría de los sonómetros son integradores.

Tabla 3. Criterio ISO 1999:1975 sobre riesgo porcentual de daño auditivo (adaptación)

Edad		18	23	28	33	38	43	48	53	58	63
Años de exposición		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Nivel de exposición [dBA]	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	85	0	1	3	5	6	7	8	9	10	7
	90	0	4	10	14	16	16	18	20	21	15
	95	0	7	17	24	28	29	31	32	29	23
	100	0	12	29	37	42	43	44	44	41	33
	105	0	18	42	53	58	60	62	61	54	41
	110	0	26	55	70	76	78	77	72	62	45
	115	0	36	71	82	86	84	81	75	64	47

Consideremos un ejemplo que nos permitirá una comparación ulterior con la edición de 1990. Supongamos un disc-jockey que trabaja 4 horas por día durante 3 días semanales sometido a un nivel equivalente en cada sesión de 105 dBA, y que efectúa ese trabajo desde los 18 años hasta los 33 años. Entonces, efectuando los cálculos, el nivel equivalente resulta ser de aproximadamente 100 dBA. La exposición es de 15 años, por lo cual el riesgo porcentual es de un 37 %: casi 4 de cada 10 individuos en estas condiciones superará los 25 dBA de pérdida auditiva promedio.

3. Introducción a la Norma Internacional ISO 1999 : 1990

La segunda edición de esta Norma Internacional, actualmente en vigencia, se titula “Acústica – Determinación de la exposición a ruido laboral y estimación de la pérdida auditiva

inducida por ruido” (ISO, 1975).⁶ A diferencia de la primera edición, la actual no se propone determinar directamente el riesgo auditivo, sino más bien la distribución estadística del daño auditivo expresado en términos del desplazamiento del umbral de audición a las diversas frecuencias.

Para comprender esta diferencia, recordemos que el riesgo auditivo es la diferencia porcentual entre los que adquieren una discapacidad determinada en un grupo expuesto y los que la adquieren en un grupo no expuesto. Ello implica adoptar un criterio más ó menos arbitrario sobre qué se entiende por “discapacidad”. Ya hemos visto por lo menos dos criterios diferentes: 1) que el promedio de los desplazamientos del umbral auditivo en 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz supere los 25 dB (Glorig, ISO 1999 : 1975); y 2) que el umbral auditivo en 4 kHz sufra un desplazamiento de 5 dB (EPA).

El criterio *es* arbitrario porque responde a una decisión de carácter más político que científico. Por ejemplo, podría considerarse que el tener dificultades para la comprensión oral implica discapacidad (lo cual corresponde al criterio de los 25 dB), pero también podría considerarse una discapacidad cualquier desplazamiento permanente medible del umbral (y entonces estaríamos en el criterio EPA). Aún refiriéndonos a la inteligibilidad oral, podría a su vez depender de la calidad de la inteligibilidad (expresada, por ejemplo, en términos del índice de articulación silábica deseado). El criterio a adoptar puede responder a condicionamientos de tipo económico o ético. Por ejemplo, si la legislación obliga al Estado (o al empleador, o a la compañía aseguradora) a pagar una indemnización a quienes adquieran discapacidad auditiva, la cantidad de indemnizaciones dependerá inversamente de la altura en se ubique la “valla”.

La edición de 1990 de esta norma se aparta explícitamente de esta discusión, la cual se deja en manos de los entes de aplicación, sean éstos reparticiones gubernamentales nacionales, regionales o locales, o los departamentos de personal de las empresas, en caso de que desearan fijar políticas de higiene y seguridad más estrictas que las exigibles por ley (por ejemplo quienes se encuentren en el nivel 4 de la Ley de Riesgos del Trabajo vigente en la Argentina). Las razones argumentadas son, esencialmente, la gran cantidad de criterios de discapacidad existentes, muchos de los cuales pueden estar plenamente justificados según el contexto.

El objetivo de esta edición de la norma es, entonces, dar, tan objetivamente como los conocimientos científicos disponibles lo permitan, la distribución estadística del desplazamiento permanente del umbral a diversas frecuencias en función de la edad y del nivel de exposición a ruido normalizado a una jornada laboral de 8 horas.

En las secciones que siguen introduciremos los conocimientos esenciales para la comprensión y aplicación satisfactoria de esta Norma. Se refieren a las mediciones acústicas, a los mecanismos básicos involucrados en la hipoacusia inducida por ruido y su evaluación, y a los conceptos estadísticos utilizados.

4. Medición del ruido

La norma ISO 1999 : 1990 utiliza el *nivel de exposición a ruido*, $L_{EX, 8h}$, como magnitud fundamental para describir la intensidad del ruido. El mismo se origina en el nivel de presión sonora L_p , definido por la ecuación

$$L_p = 10 \log (p / p_0)^2, \quad (3)$$

donde p es la *presión sonora*, o diferencia entre la presión instantánea y la presión atmosférica estática, y p_0 es la *presión de referencia*, igual a 20 μ Pa. El nivel de presión sonora se expresa en decibeles, abreviados dB. La utilización de una expresión logarítmica para la presión sonora permite comprimir un rango muy amplio (típicamente desde 20 μ Pa hasta 2000 Pa) de manera de expresarlo con menos órdenes de magnitud (0 dB a 160 dB).

⁶ La primera edición llevaba el siguiente título: “Acústica – Evaluación de la exposición ocupacional a ruido para los fines de la conservación de la audición”

El nivel de presión sonora es un descriptor físico de la intensidad instantánea del sonido, pero no tiene un correlato muy definido con lo que percibe el oído humano. En un intento por lograr una medida mejor correlacionada con la percepción subjetiva del sonido se recurrió a las curvas isofónicas obtenidas en 1933 por Fletcher y Munson (figura 1), las cuales indican, en un diagrama $f - L_p$, una serie de contornos para cada uno de los cuales la sonoridad subjetiva es la

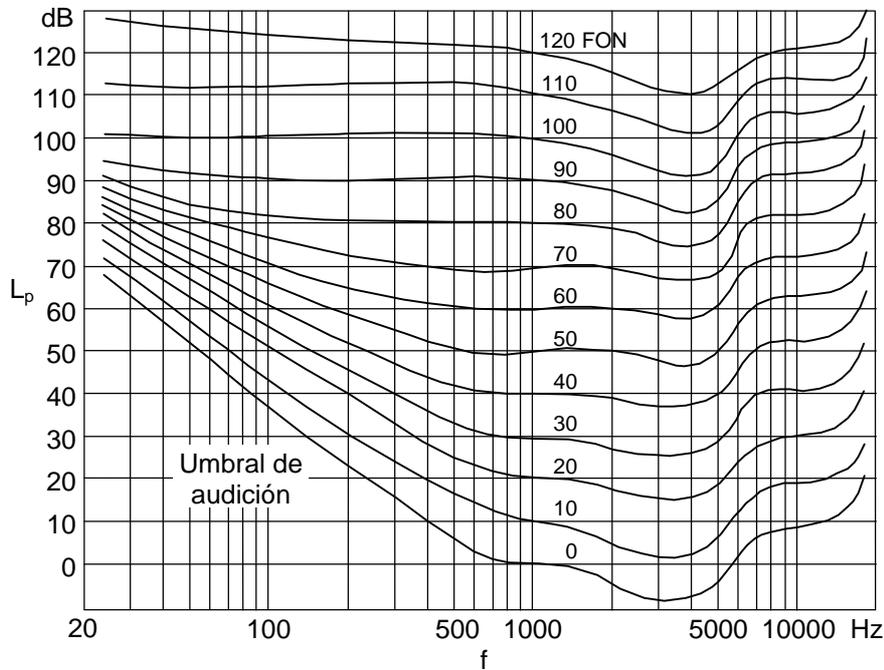


Figura 1. Contornos de Fletcher y Munson. Un tono de $f = 200$ Hz y $L_p = 40$ dB provocará la misma sensación de sonoridad que uno de 1000 Hz y 20 dB. Se dice entonces que tiene un nivel de sonoridad de 20 fon.

misma. El *nivel de sonoridad*, expresado en *fon*, es el nivel de presión sonora correspondiente a un dado contorno en la frecuencia 1000 Hz. Se observa que en baja frecuencia y en muy alta frecuencia la sensibilidad del oído es menor, ya que a igual L_p el nivel de sonoridad percibido resulta menor⁷. Para realizar una medición que a la vez fuera objetiva pero vinculada a lo percibido, se introdujeron tres filtros, denominados A, B y C, destinados a procesar la señal sonora previamente a su efectiva medición. El filtro A tenía una respuesta en frecuencia aproximadamente opuesta al contorno de 40 fon, el B, opuesta al de 70 fon, y el C, opuesta al de 100 fon (figura 2). De esa manera, cada uno de estos filtros atenúa las frecuencias en que el oído es menos sensible, siendo el resultado aproximadamente indicativo de lo realmente percibido (Fletcher et al. 1933).

El resultado de medir intercalando el filtro A se expresa siempre en dBA, y análogamente en los otros casos. La idea original no funcionó demasiado bien, ya que la sensación de sonoridad en el caso de tonos múltiples o de ruidos de espectro amplio no puede ser determinada mediante los contornos isofónicos, que fueron obtenidos para tonos puros. No obstante, los medidores de nivel sonoro equipados con los filtros A, B y C se popularizaron, y ello puede haber condicionado parcialmente las investigaciones, llevadas a cabo entonces con los instrumentos disponibles. El resultado fue que los efectos sobre la audición humana exhibían una

⁷ Las curvas de Fletcher y Munson fueron reemplazadas por las de Robinson y Dadson, determinadas nuevamente, con posterioridad, en condiciones más controladas. Actualmente están normalizadas por la norma ISO 226.

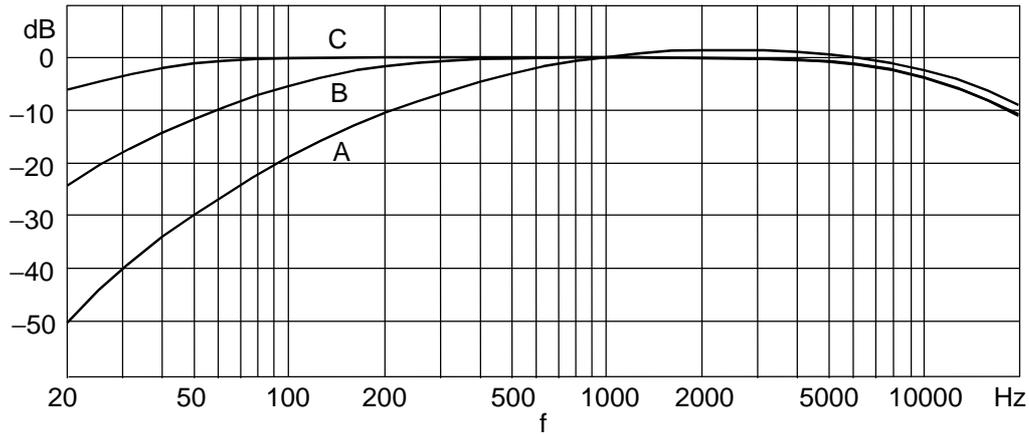


Figura 2. Curvas de compensación (o ponderación) A, B, y C. Para cada frecuencia, el valor de la ordenada representa la corrección aditiva a aplicar al nivel de presión sonora de un tono de esa frecuencia para obtener su nivel sonoro. En 1 kHz las tres curvas coinciden en 0 dB.

importante correlación con los niveles sonoros con compensación A (es decir, filtrados con el filtro A), lo cual llevó a adoptar universalmente el nivel sonoro A para todas las cuestiones relativas a la audición. Formalmente, el *nivel sonoro A* (o *nivel de presión sonora compensado A*) se define como

$$L_{pA} = 10 \log (p_A / p_0)^2, \quad (4)$$

donde p_A es la *presión sonora con compensación A*, es decir la presión sonora filtrada con el filtro A. El nivel sonoro se mide en forma directa por medio del *sonómetro* o *medidor de nivel sonoro* (a veces llamado *decibelímetro*),⁸ cuyo circuito interno se encarga de realizar las operaciones indicadas en la ecuación 4.

Ahora bien, tanto la presión sonora como el nivel sonoro A son en general muy variables en el tiempo. Con el fin de determinar los efectos a largo plazo es necesario trabajar con niveles medios, surgiendo así el *nivel sonoro continuo equivalente*, o *nivel equivalente*, $L_{Aeq,T}$, definido como

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right), \quad (5)$$

donde T es el intervalo de tiempo considerado. La promediación se hace *energéticamente*⁹ porque se utiliza aquí la *teoría de la igualdad de la energía*, según la cual los efectos sobre la audición están determinados por la energía sonora total recibida diariamente. El nivel equivalente se puede determinar hoy en día en forma directa por medio de un sonómetro o medidor de nivel

⁸ Los medidores de nivel sonoro a utilizar en las mediciones requeridas por la Norma ISO 1999 deben responder a normas reconocidas internacionalmente, más específicamente la IEC 651. La Norma IRAM 4074 es la versión nacional de dicha norma IEC. Debe desconfiarse de los instrumentos en cuyas especificaciones se lea “*Diseñado para cumplir con la Norma IEC 651*”, ya que, en primer lugar, no existe modo de verificar si tal afirmación es verdadera, y en segundo lugar no siempre la implementación de un dispositivo cumple las especificaciones de diseño. La única manera de certificar el cumplimiento de dicha norma es un certificado individual por equipo extendido por un laboratorio acreditado y en el cual conste la cadena de trazabilidad hacia patrones internacionales reconocidos.

⁹ La energía sonora es proporcional al cuadrado de la presión sonora.

sonoro *integrador*.¹⁰ Cuando la duración total de la exposición es muy larga pero pueden identificarse intervalos en los que, por tratarse de operaciones repetitivas o sonidos continuos, pueda obtenerse el nivel equivalente mediante mediciones más cortas, será posible aplicar esta otra fórmula:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n T_i 10^{L_{Aeq,T_i}/10} \right) \quad (6)$$

donde L_{Aeq,T_i} es el nivel equivalente extendido al intervalo T_i y $T = \sum T_i$. Es de destacar que si dentro de un intervalo T_i hay ciclos repetitivos, es aceptable medir L_{Aeq,T_i} en uno solo de los ciclos, extrapolarlo el valor obtenido a los restantes. Esto permite ahorrar en general mucho tiempo de medición.

A modo de ejemplo, supongamos que un operario está sometido a tres tipos de exposición durante sus 8 horas de trabajo. En la primera, que dura 1 h, el nivel equivalente es de 80 dBA. En la segunda, de tres horas de duración, se observa un ciclo que se repite cada 20 minutos, habiéndose medido un nivel equivalente de 92 dBA en uno de los ciclos. En el tercer tipo de exposición se individualizan ciclos cortos de 5 minutos de duración, en cada uno de los cuales el nivel equivalente medido es de 86 dBA. El tiempo total de medición ha sido de 1 h 25 min, en contraposición con las 8 horas que habría requerido una medición directa. El nivel equivalente resultante es:

$$L_{Aeq,8h} = 10 \log \left[\frac{1}{8} \left(1 \times 10^{80/10} + 3 \times 10^{92/10} + 4 \times 10^{86/10} \right) \right] = 89 \text{ dBA} . \quad (7)$$

Obsérvese que si bien los 92 dBA se midieron durante 20 minutos, se consideró que dicho valor se extendía al intervalo de 3 horas durante el cual se repite dicho ciclo. Lo mismo es válido para los 86 dBA, que se midieron durante 5 minutos.

Dado que el intervalo T es muy variable según la duración administrativa de la jornada laboral, resulta muy conveniente definir un *nivel de exposición a ruido normalizado a 8 h*, $L_{EX,8h}$, definido por:

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,T} + 10 \log (T/T_0), \quad (8)$$

donde $T_0 = 8 \text{ h}$ es el *tiempo de referencia*, y T el tiempo efectivo de duración de la jornada laboral. Este parámetro representa un ruido continuo y constante a lo largo del tiempo de referencia de 8 h que contiene la misma energía total (ponderada por el filtro A) que el ruido real, variable y extendido al tiempo total T dentro de una jornada.

En aquellos casos en que la exposición no pueda describirse con precisión, por ejemplo en el caso de un supervisor que visita en forma aleatoria o según requerimientos diferentes sectores de una planta industrial, suele ser recomendable utilizar *dosímetros personales*. Un dosímetro es, esencialmente, un instrumento integrador portable cuyo micrófono se coloca en las proximidades del oído (por ejemplo en el casco, o en la solapa) y que calcula la *dosis* diaria de energía sonora del ruido al que es expuesto del usuario. Dicha dosis se expresa como porcentaje de un nivel sonoro continuo equivalente máximo admisible según la legislación vigente:

$$D = \frac{\int_0^T p_A^2(t) dt}{p_0^2 T_0 10^{L_{MAX}/10}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

¹⁰ Los medidores de nivel sonoro integradores deben cumplir con la Norma IEC 804, y valen las mismas observaciones de la nota 8.

donde L_{MAX} es el máximo nivel admisible durante el tiempo de referencia T_0 . Si, por ejemplo, se admiten 90 dBA durante 8 horas diarias, una exposición precisamente de 90 dBA durante 8 horas corresponderá a una dosis del 100%. En cambio, 87 dBA durante 8 horas ó 90 dBA durante 4 horas corresponderán a una dosis del 50%.

Con ciertas precauciones, puede utilizarse un dosímetro para determinar el nivel de exposición.¹¹ A partir de las ecuaciones (5) y (9) se obtiene

$$L_{Aeq,T} = L_{MAX} + 10 \log \left(\frac{T_0}{T} \frac{D}{100} \right), \quad (10)$$

y, de (8),

$$L_{EX,8h} = L_{MAX} + 10 \log \left(\frac{D}{100} \right). \quad (11)$$

Si, por ejemplo, el nivel máximo para el cual está configurado el dosímetro fuera 90 dBA, y se lee una dosis del 40 %, el nivel de exposición a ruido referido a 8 horas sería 86 dBA.

La ecuación (11) es válida en la medida en que el cálculo de la dosis sea efectuado por el dosímetro de acuerdo con la ley de igualdad de la energía. Dado que no en todos los países la legislación se rige por este criterio, es necesario asegurarse de que el instrumento es compatible con el mismo. Un importante contraejemplo lo constituyen los dosímetros que responden a la OSHA (*Occupational Safety and Health Act*, es decir la Ley de Seguridad y Salud Laboral de Estados Unidos). Los mismos se rigen por un criterio derivado de la teoría de la igualdad de los efectos temporarios que conduce a que la dosis no sea proporcional a la energía acumulada. En los dosímetros internacionales el usuario puede configurar la forma en que se calcula la dosis mediante el parámetro denominado *tasa de intercambio* (*exchange rate* o *halving rate*). Este parámetro indica en cuántos dB puede incrementarse el nivel sonoro si el tiempo de exposición se reduce a la mitad. Para la OSHA corresponde a 5 dB, mientras que para el criterio de igualdad de la energía corresponde a 3 dB. Para poder aplicar la ecuación 11 debe seleccionarse esta última.

5. Hipoacusia inducida por ruido

Para comprender los mecanismos de la hipoacusia inducida por ruido es conveniente conocer la estructura anatómica y funcional del aparato auditivo.

El oído está formado por tres secciones claramente diferenciadas, que se ilustran en la figura 3: el oído externo, el oído medio y el oído interno. Las secciones externa (pabellón y canal auditivo) y media (tímpano, caja timpánica, huesecillos, trompa de Eustaquio) cumplen funciones conductivas y protectoras, mientras que la sección interna tiene funciones perceptivas.

Más específicamente, el oído externo focaliza el sonido hacia el tímpano, provocando una modificación del espectro selectiva con la dirección de procedencia del sonido, lo cual tiene importancia en la audición direccional (especialmente en el plano de elevación). Además protege al tímpano frente a la introducción de objetos y partículas externas, para lo cual posee pilosidades y segrega cerumen, que arrastra lentamente hacia afuera la suciedad. La secreción de cerumen es, asimismo, más copiosa cuando el individuo está sometido a ruidos intensos, tendiendo lentamente a reducir la efectividad del conducto auditivo.

¹¹ Una característica de los dosímetros que los diferencia de un medidor de nivel sonoro integrador es la existencia de un nivel umbral, generalmente configurable por el usuario, por debajo del cual no se integra, por ejemplo 80 dBA. Cuando los niveles involucrados son bastante mayores (por ejemplo 90 dBA), o bien la dosis registrada es importante (por ejemplo, 50%), el error cometido al utilizar el dosímetro como integrador es despreciable. Pero para dosis bajas el error puede ser considerable.

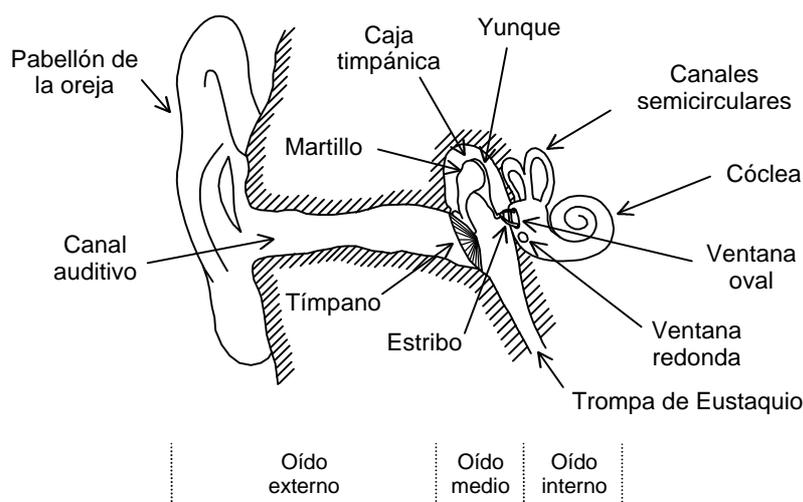


Figura 3. Corte transversal del oído derecho, en el cual se muestran las partes anatómicas más representativas del aparato auditivo.

El oído medio convierte las vibraciones de amplitud relativamente grande pero de baja presión del tímpano en oscilaciones de menor amplitud pero mayor presión en el líquido del oído interno. Actúa, así, como *palanca* o *transformador mecánico*. Los huesecillos que componen esta palanca, en presencia de ruidos intensos pierden su eficacia y reducen la transmisión. Este mecanismo protector actúa sólo para sonidos de duración superior a los 200 ms. Los ruidos impulsivos son demasiado cortos para esta protección, aumentando su peligrosidad. El oído medio normalmente contiene aire.

Finalmente, el oído interno está formado por el laberinto y el caracol, o *cóclea*. El laberinto es el órgano sensor del equilibrio, enviando al cerebro señales ante cualquier rotación del cuerpo. La cóclea es, por su parte, el sensor acústico. Es un caracol de dos vueltas y media y contiene una membrana semielástica denominada *membrana basilar*, capaz de vibrar en respuesta a las vibraciones de los huesecillos, que son recibidas a través de la ventana oval y transmitidas a ella a través del contenido líquido del caracol. La característica más sobresaliente de esta membrana es que se comporta como un analizador de espectro, ya que para cada frecuencia su máxima amplitud de vibración se verifica a una determinada distancia medida desde la ventana oval. Los sonidos agudos hacen vibrar intensamente las partes cercanas a la ventana oval, mientras que los sonidos graves producen igual respuesta en el punto más alejado (en el vértice o ápice del caracol). Este comportamiento es aprovechado por una serie de células que recubren toda la extensión de la membrana basilar, denominadas *células ciliadas* o *células pilosas*,¹² y que actúan como los transductores primarios, transformando la vibración mecánica en impulsos nerviosos (eléctricos) que son dirigidos hacia el cerebro a través del nervio auditivo. Resulta así que la información proveniente del oído interno se envía al cerebro descompuesta en sus componentes espectrales.

Estamos interesados específicamente en los mecanismos de la hipoacusia inducida por ruido. Digamos antes que hay dos tipos de hipoacusias: las *conductivas* y las *perceptivas*. Las hipoacusias conductivas se originan en algún mal funcionamiento del oído externo o del oído medio, es decir, constituyen trastornos de la *conducción* del sonido. Pueden deberse a una razón tan simple como una obstrucción del conducto auditivo por un tapón de cerumen, a un desgarramiento del tímpano (que normalmente se regenera en forma natural), al anegamiento del oído

¹² Las células ciliadas reciben ese nombre pues contienen en su parte superior una serie de pelos o cilios en contacto con otra membrana, la membrana tectoria. Estos cilios detectan la vibración relativa entre ambas membranas (la basilar y la tectoria), provocando señales nerviosas.

medio con mucosidad (en la llamada otitis media), o al esclerosamiento de la cadena de huesecillos. En general las hipoacusias conductivas son de buen pronóstico, ya que son tratables farmacológica o quirúrgicamente, y por lo tanto suelen ser temporarias, aunque pueden tornarse crónicas si se omite el tratamiento.

Las hipoacusias perceptivas pueden afectar a las células ciliadas (hipoacusia coclear) o al nervio auditivo (hipoacusia retrococlear). En cualquiera de los dos casos son en general irreversibles. Pueden originarse en malformaciones congénitas (muchas veces debidas a determinadas enfermedades de la madre, como la rubéola, durante las etapas del embarazo críticas para la formación del aparato auditivo) o por sobreestimulación, como en el caso de la exposición a ruidos muy intensos.

Las hipoacusias inducidas por ruido pueden ser a su vez de dos clases: las ocasionadas por algún accidente auditivo (por ejemplo una explosión demasiado cerca del oído), cuya consecuencia puede variar desde una perforación del tímpano hasta la destrucción del oído interno, y las causadas a lo largo de años de exposición. En el primer caso, a veces puede recuperarse si se trata de un desgarramiento del tímpano, ya que si el desgarramiento se produce suficientemente rápido como para no superar la inercia de la cadena de huesecillos el oído interno no recibe un estímulo suficientemente intenso como para destruirse. En el segundo caso, es decir cuando la afección se desarrolla paulatinamente, se debe en general a la destrucción gradual de las células ciliadas, ya sea en forma aislada o en grupos. En algunos casos la destrucción es por causas mecánicas (por estar sometidas a esfuerzos mecánicos mayores que lo que toleran), y en otros por causas metabólicas (falta de oxigenación por la constricción de los vasos sanguíneos en presencia de ruidos intensos). Debido a la especialización frecuencial de las células ciliadas, es decir, al hecho de que cada grupo de ellas responde a un conjunto limitado de frecuencias, la hipoacusia coclear suele ser selectiva en frecuencia. La determinación de cómo se ve afectada la audición en cada frecuencia es uno de los objetivos de la Norma ISO 1999 : 1990.

Nos interesa ahora centrarnos en la manera en que se determina y representa la capacidad auditiva Aunque existen diversos indicadores de posibles patologías, la audición queda adecuadamente representada por el umbral auditivo, que es función de la frecuencia, y que se determina mediante una audiometría tonal.

El audiómetro tonal es un equipo que permite generar tonos puros de frecuencias tomadas de una serie normalizada de *frecuencias audiométricas* (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, 6000 Hz y 8000 Hz) administradas al individuo bajo examen por medio de auriculares en la *audiometría por vía aérea* y por medio de transductores vibratorios en la *audiometría por vía ósea*.¹³ Nos ocuparemos aquí solamente de la audiometría por vía aérea, ya que las hipoacusias inducidas por ruido son en general perceptivas, y en ese caso ambas audiometrías son esencialmente equivalentes.

Una de las dificultades para la obtención del umbral auditivo es la determinación del umbral normal o de referencia, es decir, el que supuestamente debería poseer a cada frecuencia un individuo joven *otológicamente normal*.¹⁴ Podría intentar determinarse dicho umbral en términos del nivel de presión sonora media que se requiere para que un individuo normal comience a escuchar cada frecuencia. La dificultad para ello reside en que dicho valor depende mucho de las condiciones de escucha y de las condiciones en que se mide dicho nivel de presión sonora. Lo ideal sería determinar el nivel de presión sonora sobre el propio tímpano, pero no es fácil ya que debería insertarse una sonda que seguramente alteraría las condiciones de audición. Por ello se ha recurrido a definir un *cero audiométrico* no en forma absoluta sino relativa al auricular particular que se utilice. Así, se han normalizado en la Norma ISO 389 : 1985 los valores del *cero audiométrico* para las diversas frecuencias para dos modelos específicos de auriculares, el

¹³ La audiometría por vía ósea permite determinar si una hipoacusia es conductiva o perceptiva. En el caso de la hipoacusia conductiva se tiene una audiometría aérea anormal, pero ósea normal, ya que al ir la transmisión ósea directamente al oído interno, el buen funcionamiento de éste asegura que los sonidos se perciban, mientras que en la hipoacusia perceptiva ambas son anormales.

¹⁴ Un individuo *otológicamente normal* es uno que goza de buena salud general, que no tiene cerumen en sus oídos ni antecedentes de enfermedades auditivas ni de exposición a ruidos anormalmente intensos (como los de las actividades laborales ruidosas).

Telephonics TDH39 y el *Beyer DT 48* (actualizada por las partes 1 a 7; ISO 389, 1994 a 1998). En ambos casos se especifica la almohadilla que debe utilizarse, y la calibración se puede efectuar en un *acoplador acústico*¹⁵ normalizado o en un *oído artificial*¹⁶ (en este caso según lo prescrito en el Addendum 1 de 1983 de la ISO 389 :1985). En el caso del oído artificial se puede especificar el cero con independencia del auricular. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo del cero audiométrico (denominado *nivel de presión sonora de referencia umbral*) para el TDH39 medido con acoplador acústico y los valores correspondientes para un auricular cualquiera medido con un oído artificial normalizado.

Para interpretar correctamente una audiometría deben introducirse los conceptos de *nivel de audición* y *nivel umbral de audición*. Se define el *nivel de audición* para un modelo dado de auricular, aplicado de una manera especificada y para una frecuencia determinada, como la diferencia entre el nivel de presión sonora real y el cero audiométrico para esa frecuencia. Por ejemplo, si el TDH39 está emitiendo un tono de 500 Hz y 75 dB, el nivel de audición será de 75 dB – 11,5 dB = 63,5 dB. Debe comprenderse que el nivel de audición no se refiere al umbral auditivo; es sólo una manera de expresar el nivel de presión sonora con respecto al umbral medio de la población otológicamente normal.

Tabla 4. Cero audiométrico para auriculares Telephonics TDH39 con acoplador acústico normalizado y para auriculares cualesquiera con oído artificial, según norma ISO 389 : 1985 y su Addendum 1.

<i>f</i> [Hz]	<i>Nivel de presión sonora de referencia umbral para TDH39 con acoplador acústico</i> [dB]	<i>Nivel de presión sonora de referencia umbral medido con oído artificial</i> [dB]
125	45,0	45,0
250	25,5	27,0
500	11,5	13,5
1000	7,0	7,5
1500	6,5	7,5
2000	9,0	9,0
3000	10,0	11,5
4000	9,5	12,0
6000	15,5	16,0
8000	13,0	15,5

El *nivel umbral de audición* (a veces referido simplemente como *umbral de audición*) es el mínimo nivel de audición que un individuo es capaz de escuchar a cada frecuencia.¹⁷ Así, una persona joven otológicamente normal tendrá, en término medio, un nivel umbral de audición de 0 dB en todas las frecuencias, ya que su mínimo nivel de audición es 0 dB (o, equivalentemente, el mínimo nivel de presión sonora que percibe coincide con el cero audiométrico).

El propósito de una *audiometría tonal* es determinar y representar gráficamente el nivel umbral de audición de una persona. El gráfico normalizado que se utiliza para ello es el que se ilustra en la figura 4. En él se representa la *pérdida auditiva*, que es la denominación habitual en

¹⁵ Un *acoplador acústico* es una cavidad de forma y volumen especificados que permite conectar acústicamente de manera normalizada un dispositivo (por ejemplo un auricular o un protector auditivo) con un transductor (el micrófono).

¹⁶ Un *oído artificial* es un tipo particular de acoplador acústico que emula con bastante precisión la forma y las características acústicas del oído externo humano medio y que se utiliza para la calibración objetiva de audiómetros.

¹⁷ El nivel umbral de audición en la práctica se determina como aquel nivel de audición para el cual un 50% de las veces el individuo afirma escuchar el tono y un 50% afirma no escucharlo.

Audiología para el nivel umbral de audición. En el diagrama audiométrico se incluye la recta de audición normal y la curva de pérdida total de la audición.¹⁸

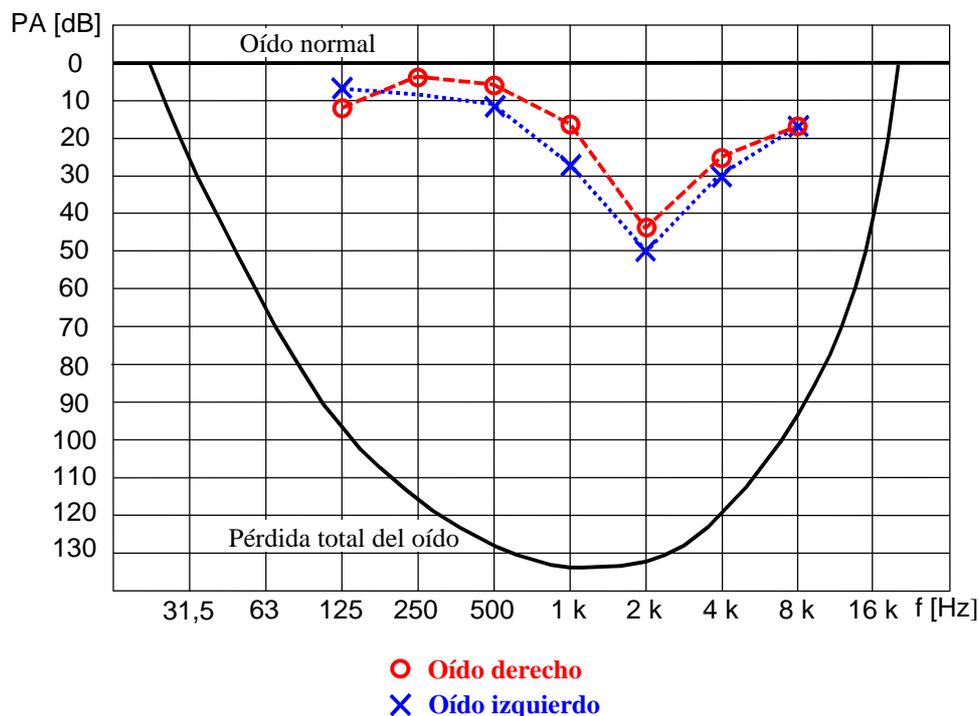


Figura 4. Ejemplo de audiometría tonal, en el que se muestra el resultado de un estudio por vía aérea en ambos oídos. La demarcación con círculos y cruces es de uso habitual. En el eje vertical se indica la pérdida auditiva. Se incluye la curva considerada como de pérdida total del oído. La recta de 0 dB corresponde a audición normal.

Así, por ejemplo, en el oído derecho, a 2000 Hz se observa una pérdida auditiva de 45 dB, lo cual significa, teniendo en cuenta que el cero audiométrico a esa frecuencia es de 9 dB (utilizando un TDH39), que el nivel de presión sonora requerido por ese oído para percibir los 2000 Hz equivale a $45 \text{ dB} + 9 \text{ dB} = 54 \text{ dB}$ generados por el auricular en el acoplador acústico normalizado.

De la misma manera, la pérdida auditiva en 4000 Hz es de 31 dB para el oído izquierdo. Como el cero audiométrico correspondiente a cualquier auricular ensayado con un oído artificial normalizado es, a esa frecuencia, 12 dB, para que dicho tono sea perceptible por el oído izquierdo su nivel de audición deberá ser tal que se produzcan $31 \text{ dB} + 12 \text{ dB} = 43 \text{ dB}$ en el oído artificial.

Una vez aclarados estos conceptos, abandonaremos toda referencia a los valores reales de nivel de presión sonora en los correspondientes acopladores acústicos, y nos referiremos siempre al nivel umbral de audición, entendiendo que el valor nulo a todas las frecuencias corresponde a un individuo normal.

Para dar a entender que el umbral de audición cambió como consecuencia de alguna condición (por ejemplo, el envejecimiento, en el caso de la presbiacusia, o el ruido excesivo en el caso de las *profesoacusias*) se suele hablar de *desplazamiento del umbral*. En la Norma ISO 1999 : 1990 se introduce, así, el *desplazamiento permanente del umbral inducido por ruido* (*noise-induced permanent threshold shift, NIPTS*), definido como el aumento permanente (definitivo o irreversible) del nivel umbral de audición debido al ruido (real o potencial).

¹⁸ Cabe señalar que el formulario indicado en la figura 4 también es apropiado para la audiometría de alta frecuencia, que se ha desarrollado bastante en los últimos años como examen preventivo.

En las audiometrías también se suele dejar constancia de las frecuencias de los *acúfenos* o *tinnitus*, es decir los zumbidos o silbidos permanentes de los oídos, lo cual se determina por comparación con sonidos de prueba presentados por el examinador. Esta información no se tiene en cuenta a los efectos de la Norma ISO 1999 : 1990.

6. Algunos conceptos de estadística

Debido al enfoque fuertemente estadístico de la norma ISO 1999 : 1990, es conveniente recordar algunos conceptos fundamentales de estadística .

En primer lugar, tengamos en cuenta que uno de los objetivos de esta disciplina es obtener propiedades globales de un conjunto de entes (denominado *población*) cuya determinación individual no es posible en forma exacta para todos los entes. Un ejemplo es la altura de las personas de una determinada región. Tomada una persona al azar, no es posible predecir exactamente cuál será su altura. Pero sí puede determinarse un *descriptor global*, tal como la *altura promedio* de tal conjunto de personas, e inclusive puede especificarse la *dispersión* de la altura, es decir, qué tan diferente puede llegar a ser la altura real de la altura promedio. Lo más interesante de los métodos estadísticos es la posibilidad de *estimar* dichas propiedades globales a través del examen de una adecuada *muestra* de la población, es decir un subconjunto reducido de la misma. Esta tarea se denomina *inferencia estadística*.

Las propiedades asociadas a los entes que forman la población se expresan en general como *variables aleatorias*, es decir variables que asumen un valor determinado (pero en general desconocido) para cada elemento de la población. En el ejemplo anterior, la altura de los individuos de una dada región geográfica constituye una variable aleatoria. En el caso de la Norma ISO 1999 : 1990, la variable aleatoria de interés será el *nivel umbral de audición*.

El comportamiento de las variables aleatorias está determinado por su *distribución estadística*. Para esclarecer este concepto, supongamos que estamos interesados en el nivel umbral de audición a 4000 Hz de un conjunto de 50 personas. En primer lugar subdividimos el rango total de dicha variable en subintervalos de 5 dB en 5 dB. Luego simplemente contamos la cantidad de individuos cuyos umbrales se encuentran en cada uno de estos subintervalos. Obtenemos una tabla como la siguiente, en la cual también se expresaron las cantidades como porcentajes:

Tabla 5. Ejemplo de distribución de frecuencias: el nivel umbral auditivo de un conjunto de 50 personas.

Intervalo [dB]	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
Cantidad	2	3	9	13	10	7	4	2
Porcentaje [%]	4	6	18	26	20	14	8	4

Las cantidades de personas en cada “clase” se denominan *frecuencias*,¹⁹ obteniendo de esta manera la denominada *distribución de frecuencias*. Los porcentajes, por otra parte, dan origen a la *distribución porcentual*. Ambas pueden representarse gráficamente como se indica en la figura 5.

La distribución porcentual es una manera más conveniente de representar la distribución estadística de una variable aleatoria, ya que en primer lugar permite comparar los comportamientos de diferentes conjuntos de datos, y en segundo lugar da origen a la *inferencia estadística*, ya que si de acuerdo con algún criterio podemos considerar que la muestra (en este caso los niveles umbrales de las 50 personas) es representativa de la población podemos extrapolar los resultados obtenidos en la muestra a toda la población y por ende a otras muestras extraídas de la misma.

¹⁹ No confundir la *frecuencia de aparición* de una clase de valores con el concepto físico de *frecuencia* de un tono o de cualquier otro fenómeno periódico

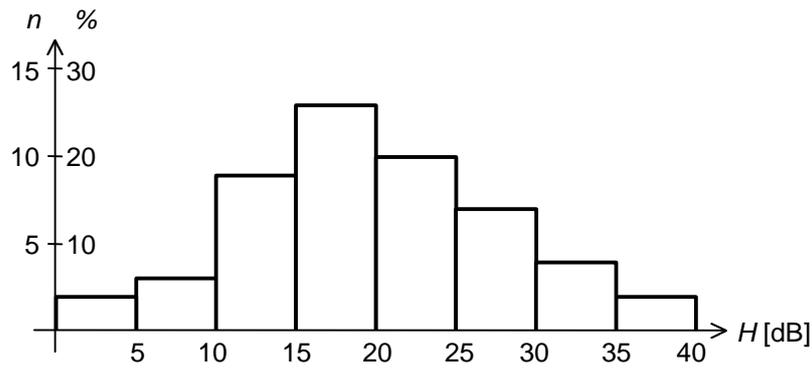


Figura 5. Representación gráfica de las distribuciones de frecuencias y porcentual correspondientes al ejemplo de la tabla 5.

También es posible hablar de la *distribución acumulada de frecuencias*. En este caso se van sumando las cantidades correspondientes a niveles umbrales crecientes, lo cual se ilustra en la figura 6. Si se representan como porcentajes se obtiene la *distribución porcentual acumulada*.

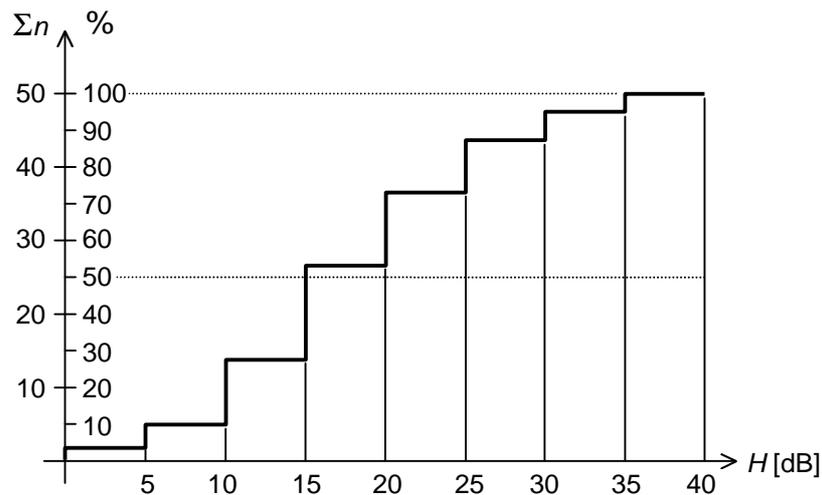


Figura 6. Representación gráfica de la distribución acumulada de frecuencias y la distribución porcentual acumulada del ejemplo de la tabla 5.

Con cada variable aleatoria es posible asociar además dos tipos de medidas numéricas: las de *tendencia central* y las de *dispersión*. Las medidas de tendencia central determinan, según diversos criterios, un valor “central” alrededor del cual se agrupan, aglutinan o distribuyen los valores de la variable correspondientes a todos los integrantes de la población. Las medidas de dispersión indican, también según una variedad de criterios, cuán cerca o lejos se encuentran, en general, los valores de la variable del valor “central”.

Las tres medidas de tendencia central más utilizadas son el *valor medio* (o *promedio*, o *media*), la *mediana* y la *moda*. El *valor medio* \bar{x} de una variable aleatoria x se obtiene como la suma de los valores de la variable correspondientes a toda la población dividida por la cantidad de elementos integrantes de la población, es decir:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k, \quad (12)$$

donde N es la cantidad de integrantes de la población y x_k el valor de la variable para el k -ésimo integrante. En el caso en que el rango total de la variable aleatoria se haya subdividido en una cantidad (relativamente pequeña) m de clases (como en el ejemplo de la tabla 5), la ecuación (12) puede reescribirse

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i x_i, \quad (13)$$

donde x_i es el valor de la variable aleatoria asociado a la clase i -ésima y n_i la frecuencia correspondiente. Aplicando esta ecuación a las frecuencias de la tabla 5, y suponiendo que la variable en cada intervalo toma el valor medio de sus extremos (por ejemplo en el intervalo 20-25, supondremos $x_i = 22,5$), resulta $\bar{x} = 19,8$ dB.

La *mediana*, $med(x)$, o x_{med} , es un valor tal que un 50% de los integrantes tienen valores de la variable menores que $med(x)$ y el restante 50% tienen valores mayores que $med(x)$. Es fácil determinar la mediana a partir de la distribución porcentual acumulada, viendo cuál es el valor más cercano al 50%. En el ejemplo anterior, de la figura 6 se desprende que dicho valor es el valor intermedio entre 15 y 20, es decir 17,5 dB.

Por último, la *moda* de una distribución, $moda(x)$, es el valor en el cual la distribución de frecuencias alcanza un máximo. En el ejemplo anterior, de la figura 5 se observa que dicho valor es también el valor medio entre 15 y 20, es decir 17,5 dB. Es de notar que una distribución puede tener más de una moda, lo cual se da cuando existe una gran polarización en torno dos o más valores. Un ejemplo es el nivel umbral de audición entre los trabajadores de una empresa industrial: los empleados administrativos, que trabajan en ambientes relativamente silenciosos tendrán umbrales variados pero bajos; los operarios que trabajan en producción con maquinarias y procesos ruidosos exhibirán también diversos umbrales, pero grupalmente más elevados. Este tipo de distribución se denomina *bimodal*.

La utilización de una u otra medida de tendencia central depende de varios factores. El valor medio es analíticamente más simple, y permite el aprovechamiento de los resultados de la teoría de la Probabilidad, por su correspondencia con la *esperanza matemática*. La principal desventaja es que es muy sensible a los valores extremos, sobre todo en variables que pueden asumir valores muy disímiles. Un caso típico lo constituye el nivel equivalente L_{eq} . Por ejemplo, si el ruido de fondo es de alrededor de 55 dBA, el paso de un camión emitiendo 90 dBA durante 10 s llevará el nivel equivalente a 82,3 dBA, mucho más cercano a 90 dBA que a 55 dBA, a pesar de la escasa duración del ruido más intenso. Cuando la distribución es simétrica alrededor de un valor, el valor medio y la mediana coinciden. En las distribuciones fuertemente asimétricas la mediana suele dar mejores resultados. La moda es un buen descriptor a la hora de comunicar resultados, más que al procesarlos. Una desventaja es que ignora lo que sucede con todos los valores de la variable excepto el más frecuente.²⁰

La medida de dispersión más utilizada es el desvío estándar, s_x , definido como la raíz cuadrada del promedio de las desviaciones con respecto a la media elevadas al cuadrado:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2}{N}}, \quad (14)$$

²⁰ La moda es útil cuando se requiere analizar variables aleatorias nominales, es decir no numéricas; por ejemplo, cuando se pretende averiguar mediante una encuesta qué tipo de ruido resulta más molesto entre el de las motos con escape libre, el de una discoteca, y el de los martillos neumáticos. No es posible en casos como éste promediar los tres tipos de ruido ni ordenarlos de “menor” a “mayor”.

donde x_k son los valores que asume la variable aleatoria en la población, N la cantidad total de integrantes de la población y \bar{x} el valor medio de x . En caso de que la variable haya sido agrupada en subintervalos, también puede calcularse como

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m n_i (x_i - \bar{x})^2}{N}} . \quad (15)$$

donde x_i es el valor correspondiente al i -ésimo subintervalo y n_i la frecuencia de aparición de valores en dicho subintervalo, siendo $N = \sum n_i$. A modo de ejemplo, podemos calcular el desvío estándar correspondiente al nivel umbral de audición del ejemplo de la tabla 5. Resulta $s_x = 8,2$ dB. En general una parte importante de los valores de una distribución se encuentran comprendidos entre $\bar{x} - s_x$ y $\bar{x} + s_x$. Cuanto mayor sea el desvío estándar, más difusa y por lo tanto menos concentrada será la distribución de la variable aleatoria.

Tanto el valor medio de una variable aleatoria como su desvío estándar relativos a una población pueden ser *estimados* a partir de una *muestra* seleccionada apropiadamente. En general, para que una muestra sea adecuada debe seleccionarse aleatoriamente²¹ y de un tamaño suficiente para garantizar una alta probabilidad de que el error en la estimación no supere cierto valor (por ejemplo, que la probabilidad de tener un error menor que 2 dB sea de un 99%). La discusión detallada de los criterios de selección y las pruebas preliminares requeridas excede el propósito introductorio de este trabajo.

El *valor medio poblacional* puede ser estimado directamente por el *valor medio muestral*, que se calcula en forma idéntica a aquél, es decir

$$\bar{x}_{muestra} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k , \quad (16)$$

donde n es el *tamaño de la muestra*. El *desvío estándar poblacional* se estima por medio del *desvío estándar muestral*, que se calcula en forma ligeramente diferente:

$$s_{x,muestra} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}_{muestra})^2}{n - 1}} . \quad (17)$$

La diferencia en el denominador se vuelve pequeña para muestras grandes. Por ejemplo, para muestras de más de 10 elementos, el error cometido es menor al 5%, y para muestras de más de 50 elementos, el error es menor al 1%.

Aun cuando la variable aleatoria que hemos estado utilizando en los ejemplos (el nivel umbral de audición) es inherentemente *continua*, en el sentido de que sus valores pueden ser en principio números reales cualesquiera, para su tratamiento estadístico la transformamos en una variable *discreta*, ya que de cada subintervalo se tomó como representativo su valor central. Hay dos razones para ello. La primera es que en general no es posible una determinación tan precisa del umbral, ya que para una misma persona el umbral puede variar de un momento a otro y

²¹ Por ejemplo, si se desea obtener el umbral de audición promedio (a cierta frecuencia) de los trabajadores de una industria, debería elegirse la muestra a examinar procurando que las variables demográficas (edad, sector en el que trabajan, antigüedad, etc.) aparezcan en proporciones similares a las del total de la planta. Sería erróneo, en cambio, seleccionar todos los empleados en una misma sección o de cierto segmento etario, excepto si se pretenden resultados correspondientes a dichos subconjuntos.

además el examen audiométrico ofrece varias dificultades.²² La segunda razón es que al reducir la cantidad de valores posibles para la variable aleatoria se simplifica el manejo estadístico de los datos.

A efectos de la modelización y el análisis teórico, en general es más conveniente trabajar con distribuciones continuas, especialmente cuando las poblaciones son grandes y de dimensiones indeterminadas. En ese caso se considera un concepto en cierta medida análogo al de distribución porcentual. Debido a que existen infinitos valores posibles, es poco probable que uno cualquiera de ellos corresponda a algún elemento de la población. Por ejemplo ¿cuántas personas tendrán un umbral de audición exactamente igual a 4,572349 dB? Probablemente, ninguna. Es más razonable preguntarse cuántas personas tendrán un umbral entre 4 dB y 5 dB. Con mayor generalidad, podemos preguntarse qué proporción del total de la población tendrá un umbral entre x y $x + \Delta x$. En otras palabras, nos preguntamos qué *probabilidad* hay de que un individuo al azar tenga su umbral entre x y $x + \Delta x$. Es evidente que cuanto menor sea Δx menor será dicha probabilidad. Pero si dividimos la probabilidad por Δx obtendremos una magnitud que tiene (para cada x) a un valor bien definido que denominamos *densidad de probabilidad*, es decir

$$p(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x_0 < x < x_0 + \Delta x)}{\Delta x}. \quad (18)$$

Si consideramos como dominio todos los posibles valores de x_0 , tendremos la *función de densidad de probabilidad*, ilustrada para un caso particular en la figura 7.

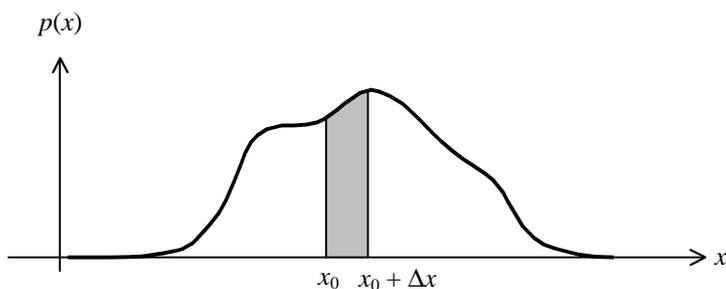


Figura 7. Un ejemplo de función de densidad de probabilidad. El área rayada es la probabilidad de que la variable aleatoria se encuentre entre x_0 y $x_0 + \Delta x$.

Llamando $F(x_0)$ a la probabilidad de que x sea menor que x_0 , es decir la *función de probabilidad acumulada*, que puede obtenerse como

$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} p(x) dx. \quad (19)$$

En la figura 8 se muestra el ejemplo de función de probabilidad acumulada que corresponde a la densidad de probabilidad de la figura 7.

En el caso de las variables aleatorias continuas, el valor medio puede calcularse mediante la fórmula

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x) dx \quad (20)$$

²² Por ejemplo, la posición de los auriculares, o la atención y la fatiga del examinado, pueden afectar apreciablemente el resultado de las mediciones.

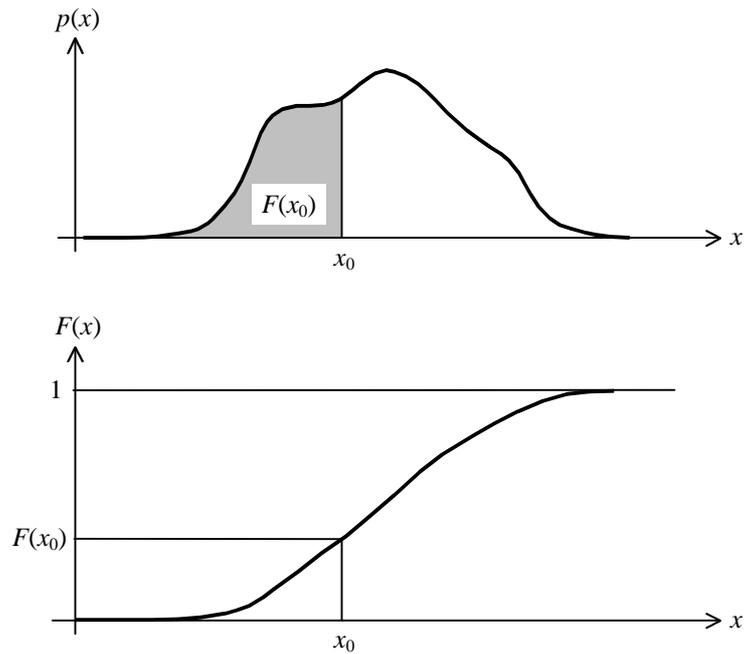


Figura 8. Función de densidad de probabilidad $p(x)$ y su función de probabilidad acumulada. El área rayada representa la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor que x_0 .

Asimismo, el desvío estándar puede calcularse como

$$s_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx} . \quad (21)$$

Estas expresiones son formalmente equivalentes a las que corresponden a las variables aleatorias discretas, habiéndose reemplazado las sumatorias por integrales.

La función de distribución acumulada permite definir los *fractiles*. Según las Norma ISO 1999 el *fractil* Q asociado a una variable aleatoria es el valor X_Q de la variable que es superado por una fracción Q de la población.²³ Así, si x es el nivel umbral de audición H , el fractil Q es el nivel umbral de audición H_Q tal que es superado por una fracción Q de la población, o, lo que es equivalente, tal que hay una fracción Q de la población cuya audición es peor que H_Q . En la figura 9 se muestra el concepto de fractil para la misma distribución de la figura 8. El fractil 0,5 es la mediana.

Un caso sumamente importante es la *distribución normal* o *distribución de Gauss*, cuya función de densidad de probabilidad es

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{x^2}{2}} . \quad (22)$$

²³ En realidad la definición usual en Estadística es la opuesta: el fractil Q es el valor de la variable aleatoria que supera a una fracción Q de la población.

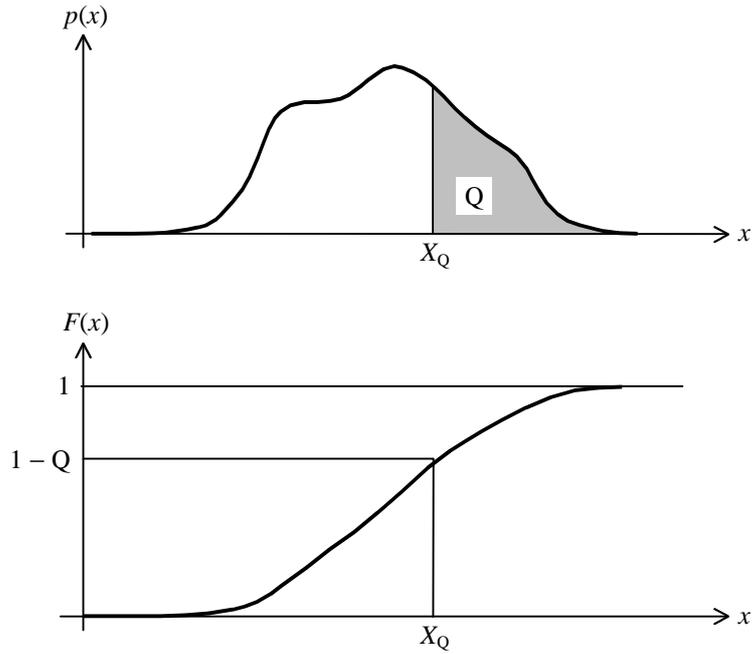


Figura 9. Función de densidad de probabilidad $p(x)$ y su función de probabilidad acumulada. El área rayada representa la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor que x_0 .

Esta función, mostrada en la figura 10, tiene un valor medio nulo y un desvío estándar igual a 1. Es posible tener una distribución normal con valor medio \bar{x} y desvío estándar s_x por medio de la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_x} e^{-\frac{(x - \bar{x})^2}{2s_x^2}}. \quad (23)$$

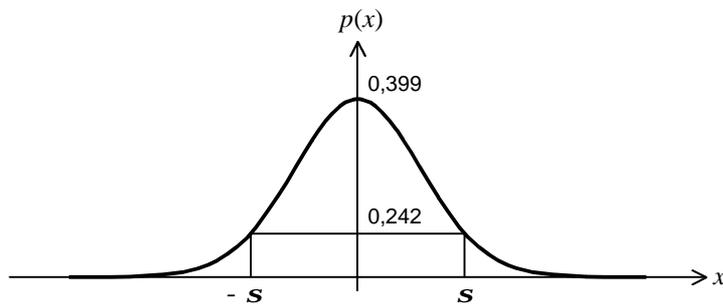


Figura 10. Función de densidad de probabilidad de Gauss.

Una de las propiedades interesantes que tiene la distribución normal de Gauss es que el valor medio de las muestras de tamaño n de cualquier distribución (sea o no Gaussiana) tiende a estar

distribuida normalmente cuando $n \rightarrow \infty$. Esta propiedad, denominada *Teorema central del límite*, tiene importantes aplicaciones en la teoría de errores. Además resulta

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}, \quad (24)$$

es decir que cuanto mayor sea la muestra, menor será el “error” cometido al estimar el valor medio poblacional con el valor medio muestral. Esta es la base para la inferencia estadística. Para mayor ampliación puede consultarse el texto de Johnson et al., 1994.

7. Presbiacusia y la Norma ISO 7029

La presbiacusia ha sido definida como el *deterioro auditivo progresivo con la edad*. Para que el deterioro auditivo padecido por un individuo dado pueda atribuirse *sólo a la edad* es necesario asegurarse de que dicho individuo no esté ni haya estado expuesto a factores capaces de alterar la audición. Entre estos factores se encuentra la exposición a ruidos intensos (ya sean laborales, comunitarios, recreacionales o de cualquier otra naturaleza), las enfermedades o alteraciones conductivas o cocleares, la exposición a sustancias o fármacos ototóxicos, etc. El estudio realizado por Rosen en Sudán (Rosen et al., 1962) señala, inclusive, otras posibles razones, como la relación indirecta entre alimentación, tensión arterial y oxigenación del órgano de Corti. En general es difícil separar en forma rigurosa los efectos atribuibles sólo a la edad de otras causas.

Si bien sería de interés científico obtener resultados “absolutos” inherentes a la especie humana, ello implicaría descartar cada una de las causas no atribuibles específicamente al proceso natural de envejecimiento. Pero ¿acaso es posible desvincular el envejecimiento de la influencia ambiental? Muy probablemente el envejecimiento general (incluyendo el del aparato auditivo) se acelere a causa de algunos factores y se retarde debido a otros. Tal vez el envejecimiento se reduzca a un mínimo bajo ciertas condiciones (alimentación ideal, costumbres saludables en todos los aspectos, actividades de reducido impacto emocional, anímico o psicológico, etc.),²⁴ pero los resultados obtenidos sobre poblaciones que cumplieran con esas condiciones no serían generalizables y por lo tanto su valor práctico sería muy limitado.

La Norma ISO 7029 constituye una solución de compromiso para este dilema. Sin pretender controlar todos los factores que podrían incidir en el envejecimiento auditivo, tiene en cuenta al menos los elementos principales que pudieran afectar a la audición en forma permanente o temporaria. Resume el conocimiento científico acumulado para el caso de personas *otológicamente normales*, es decir, personas que gozan de buena salud general, que no tienen cerumen en sus oídos ni antecedentes de enfermedades auditivas ni de exposición a ruidos anormalmente intensos (como los de las actividades laborales ruidosas).

El parámetro que permite medir o expresar el grado de deterioro auditivo es el *desplazamiento del nivel umbral de audición* (también denominado *desplazamiento del umbral de audición*), es decir, el incremento del mínimo nivel de presión sonora audible. Este desplazamiento del umbral depende de la frecuencia y de otros factores. A los fines de esta Norma, los factores que se consideran son el sexo y la edad.

Esta Norma proporciona la distribución estadística del desplazamiento del umbral auditivo para las edades entre los 18 y los 70 años. Comienza dando la mediana para cada edad Y (en años) por medio de la expresión

$$H_{med, Y} = \alpha(Y - 18)^2 + H_{med, 18}. \quad (25)$$

La mediana correspondiente a 18 años, $H_{med, 18}$, puede considerarse 0, debido a que el concepto de cero audiométrico toma en cuenta personas jóvenes de buena audición. La constante α está

²⁴ De hecho, condiciones como éstas fueron las buscadas por el equipo de Rosen (Rosen et al. 1962).

especificada en la Norma para cada frecuencia audiométrica. En la tabla 6 se indican algunos valores, y en la figura 11 se muestran en forma gráfica.

Una vez calculada la mediana se pueden obtener los fractiles considerando que cada una de las mitades de la función de densidad de probabilidad está dada aproximadamente por una

Tabla 6. Algunos valores representativos de α .

f [Hz]	α [dB/año ²]	
	Hombres	Mujeres
125	0,003	0,003
2000	0,007	0,006
4000	0,016	0,009

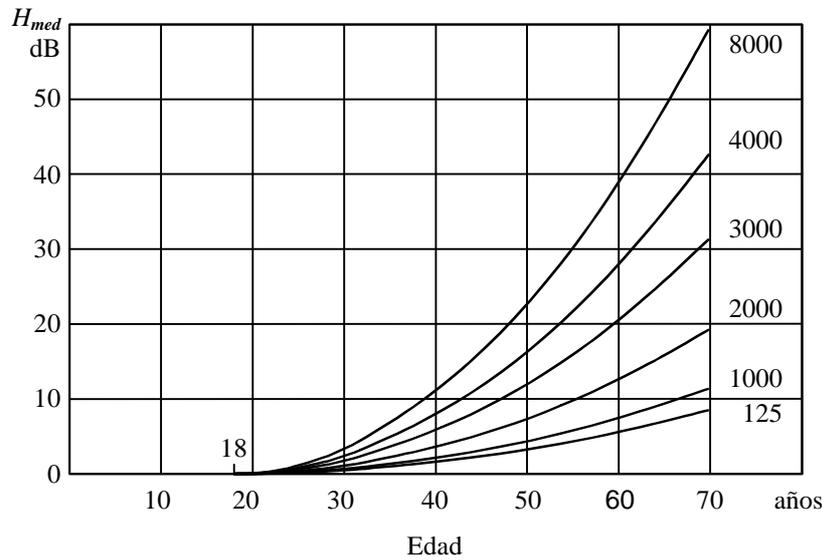


Figura 11. Mediana del nivel umbral de audición en función de la edad, con la frecuencia en Hz como parámetro.

distribución de Gauss. Naturalmente, sería mejor si pudiera utilizarse una única función gaussiana, pero lamentablemente la distribución no es simétrica. Se recurre entonces a una distribución con dos desvíos estándar diferentes. Uno menor, $\sigma_{H,l}$, para la mitad inferior, y uno mayor, $\sigma_{H,u}$, para la mitad superior²⁵, dados por:

$$\sigma_{H,l} = b_l + 0,356 H_{med,Y} \quad (26)$$

$$\sigma_{H,u} = b_u + 0,445 H_{med,Y} \quad (27)$$

donde b_l y b_u son valores que vienen tabulados para ambos sexos y para las diversas frecuencias audiométricas. En la tabla 7 se proporcionan algunos ejemplos y en la figura 12 se muestran las funciones de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada.

²⁵ Nos apartamos ligeramente de la notación utilizada en la norma, que denomina s_l y s_u respectivamente a estos desvíos estándar, a fin de conservar la notación tradicional de la Estadística.

Para determinar el fractil Q , $H_{Q,Y}$, se aplican las ecuaciones 28 y 29 según que Q esté comprendido entre 0,05 y 0,5 o entre 0,5 y 0,95:²⁶

$$H_{Q,Y} = H_{med,Y} + z_Q \sigma_{H,u} \quad (0,05 < Q < 0,50) \quad (28)$$

$$H_{Q,Y} = H_{med,Y} + z_Q \sigma_{H,l} \quad (0,50 < Q < 0,95) \quad (29)$$

donde z_Q es el valor de la variable una distribución de Gauss con $\sigma = 1$ y media 0 tal que la probabilidad de que la variable exceda a z_Q es precisamente Q . Estos valores están dados en la Norma (bajo la designación k) y pueden además obtenerse de cualquier manual estadístico o tabla de funciones (véase, por ejemplo, Abramowitz et al., 1972 o Johnson, 1994).

Tabla 6. Algunos valores representativos de α (en dB por año al cuadrado).

f [Hz]	b_u [dB]		b_l [dB]	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
125	7,23	6,67	5,78	5,34
2000	7,23	6,67	5,78	5,34
4000	8,34	7,78	6,67	6,23

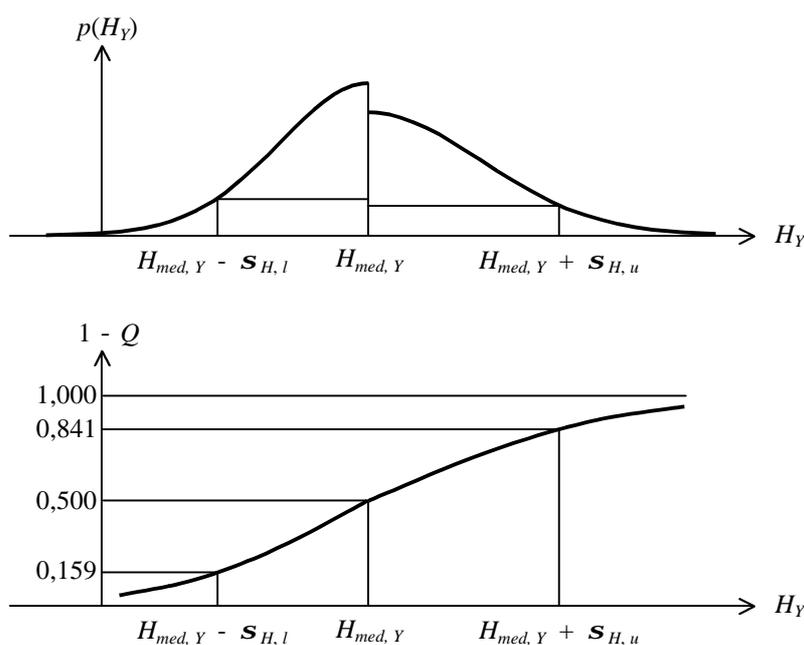


Figura 12. Densidad de probabilidad (asimétrica) para la distribución del nivel umbral de audición, y la función de probabilidad acumulada expresada en términos del fractil Q .

Calculemos, como ejemplo, el umbral de audición correspondiente a varones de 43 años en 4000 Hz. La mediana viene dada por la ecuación 25:

²⁶ Para los rangos $Q < 0,05$ y $Q > 0,95$ los valores obtenidos no son suficientemente confiables pues representan sólo extrapolaciones de los datos experimentales .

$$H_{med, 43} = 0,016 (43 - 18)^2 = 10 \text{ dB.}$$

Los desvíos estándar inferior y superior, dados por las ecuaciones 26 y 27

$$\sigma_{H,l} = 6,67 + 0,356 \cdot 10 = 10,23 \text{ dB,}$$

$$\sigma_{H,u} = 8,34 + 0,445 \cdot 10 = 12,79 \text{ dB.}$$

Con estos valores podemos estimar el umbral de audición que es superado, por ejemplo por un 20 % de la población otológicamente normal. Como $Q = 0,2 < 0,50$, debemos utilizar el valor de $\sigma_{H,u}$. De tablas estadísticas para la distribución de Gauss, $z_{0,20} = 0,842$. Entonces:

$$H_{Q,Y} = 10 + 0,842 \cdot 12,79 = 20,77 \text{ dB} \cong 21 \text{ dB.}$$

Esto se interpreta diciendo que un 20 % de la población de varones otológicamente normales (no expuestos a ruido) de 43 años el nivel umbral de audición en 4000 Hz es de 21 dB o más. En la tabla 7 se agregan algunos resultados más para varones de 45 y 65 años, correspondientes a tres fractiles.

Tabla 7. Desplazamiento del umbral H_Q en dB diversas frecuencias, edades y fractiles (varones)

Frecuencia [Hz]	Edad [años]					
	45			65		
	0,90	0,50	0,10	0,90	0,50	0,10
1000	-5	3	12	-1	9	22
2000	-5	5	17	1	15	34
4000	-2	12	29	11	35	66

Puede resultar curioso que los desplazamientos correspondientes al fractil 0,90 sean negativos. Por ejemplo, para varones de 45 años, el desplazamiento $H_{0,9}$ a 2000 Hz es de -5 dB. Ello significa que el 90 % de dicha población tiene un umbral de audición a esa frecuencia superior a -5 dB respecto al umbral normal. También puede interpretarse como que el 10 % restante tiene una audición mejor en 5 dB con respecto a la normal. En otras palabras, en toda población siempre existe un pequeño porcentaje de individuos con audición superior a lo normal.

8. Hipoacusia inducida por ruido y la Norma ISO 1999

La Norma ISO 1999 presenta una relación estadística entre la exposición a ruido y el desplazamiento permanente del umbral auditivo. Para su determinación se revisaron los resultados de numerosas investigaciones realizadas en contextos de ruido laboral. La gran diversidad de situaciones inspeccionadas (véase, por ejemplo, Johnson, 1973 y 1978) ha permitido obtener correlaciones estadísticas que constituyen fuente para la elaboración de esta Norma. Aún cuando los datos se obtuvieron en condiciones laborales, con ciertos cuidados son extrapolables a otros ruidos no laborales.

La Norma ISO 1999 tiene dos ediciones, de las cuales, como sucede siempre, la que tiene vigencia es la más reciente (1990). La diferencia entre ambas es que en la edición original se establecía un criterio para valorar el riesgo auditivo, es decir, se proporcionaba una definición de pérdida auditiva global en función de las características de la exposición. Ello implica tomar ciertas decisiones en cuanto a lo que se considera aceptable. Así, un criterio permisivo conside-

raría que una pérdida promedio de 30 dB no implica deterioro de la audición, mientras que un criterio más exigente podría imponer un límite de 10 dB en todas las frecuencias.²⁷ La nueva edición, en cambio, se limita a decir cuál es el desplazamiento del umbral esperable ante determinadas condiciones de exposición, dejando a cada usuario la responsabilidad de definir cuánto se considera aceptable y cuánto no.

8.1. Terminología

A los efectos de la Norma, se utiliza la siguiente terminología y simbología:

- L_{pA} Nivel de presión sonora compensado A (nivel sonoro A). La compensación A consiste en un filtro que atenúa las componentes más graves (baja frecuencia) y más agudas (alta frecuencia) antes de la medición propiamente dicha, bajo la hipótesis de que su efecto es menos perjudicial.
- $L_{Aeq, T}$ Nivel de presión sonora compensado A continuo equivalente (nivel sonoro continuo equivalente). Es el nivel sonoro promediado durante un tiempo T.
- $L_{EX, 8h}$ Nivel de exposición a ruido referido a 8 horas. Es el nivel sonoro de un ruido constante durante 8 horas que produce el mismo efecto que el ruido dado durante el tiempo efectivo en que éste tiene lugar.
- H Desplazamiento del nivel umbral de audición debido a la edad.
- N Desplazamiento del nivel umbral de audición debido al ruido.
- H' Desplazamiento del nivel umbral de audición debido a la edad y al ruido.
- Q Fractil (fracción de la población con peor audición que una dada).

Igual que para la norma ISO 7029, el indicador a utilizar es el desplazamiento del nivel umbral de audición. También depende de la frecuencia, y puede depender además de multitud de factores.²⁸ A los fines de esta Norma, los factores que se consideran son el sexo, la edad y la exposición al ruido.

8.2. Desplazamiento del umbral asociado con la edad

En primer lugar se considera el desplazamiento del umbral debido sólo a la edad, es decir, el que corresponde a la *presbiacusia*. Existen dos posibilidades. La primera es considerar que se trata de personas “otológicamente normales”, es decir, personas en buen estado de salud, sin antecedentes de enfermedades auditivas ni de exposición indebida a ruidos. Esto da origen a lo que se denomina *base de datos A*, y es objeto de la norma ISO 7029 ya estudiada en detalle. La ISO 1999 contiene un resumen de dicha base de datos.

La segunda alternativa es considerar una población *real* no expuesta a ruidos laborales, pero representativa de una determinada sociedad, zona geográfica o nación, lo cual da origen a una *base de datos B*. En este caso se admite la exposición normal a ruidos de carácter social, como el ruido del tránsito o el bullicio propio de las grandes urbes. Como tal corresponde al concepto de *socioacusia*. La Norma ISO 1999 sugiere que cada país debería realizar investiga-

²⁷ De hecho, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos adoptó como criterio para el deterioro de la audición una pérdida de 5 dB en la frecuencia de 4000 Hz. Este criterio estaba orientado exclusivamente a proveer información sobre niveles que protegerían a virtualmente toda la población, y no se proponían establecer normas ni legislaciones.

²⁸ Por ejemplo, podrían influir el carácter tonal o impulsivo, la intermitencia, la susceptibilidad o labilidad individual determinada mediante algún test objetivo (por ejemplo, la determinación del desplazamiento temporario del umbral)

ciones a fin de determinar su propia base de datos B, pero brinda un ejemplo correspondiente a países industrializados típicos (Johnson, 1978).

8.3. Desplazamiento permanente del umbral debido al ruido

Consideremos ahora el desplazamiento del umbral debido a la exposición sistemática al ruido, N . En este caso se consideran dos factores: la intensidad de la exposición, expresada a través del nivel de exposición referido a 8 horas, $L_{EX, 8h}$, y su extensión, en años. Es interesante destacar que se efectúa aquí la abstracción de suponer que el intervalo es independiente de la edad. Luego se indicará cómo tener en cuenta simultáneamente el efecto del ruido y de la edad.

La Norma ISO 1999 se refiere con detenimiento a la determinación de $L_{EX, 8h}$, mediante la metodología básica que expusimos en la sección 4. Dicho nivel puede obtenerse directamente con un sonómetro integrador en caso de que la duración de la jornada laboral sea de 8 horas, restando 3 dB por cada disminución a la mitad de la jornada o exposición semanal (sobre una base de 5 días por semana).²⁹ Así, en el caso de un disc-jockey que trabaja expuesto a 102 dBA durante 4 horas los días viernes y sábado y durante 2 horas los domingos, dado que está expuesto la cuarta parte del tiempo nominal (10 horas semanales en lugar de 40), debe restarse 3 dB dos veces, obteniéndose un nivel de exposición de $102 - 6 = 96$ dBA

Al igual que antes, puede obtenerse la mediana, N_{med} , ahora en función de la frecuencia, los años de exposición y el nivel de exposición $L_{EX, 8h}$.³⁰ A diferencia de H_Q , N_Q no depende del sexo; en otras palabras, los mecanismos por los que se produce la hipoacusia inducida por ruido son independientes del sexo.³¹ La fórmula de cálculo es

$$N_{med} = \begin{cases} \left(u + v \log \frac{\Theta}{\Theta_0} \right) (L_{EX, 8h} - L_0)^2 & \text{si } \Theta > 10 \text{ años} \\ \frac{\log(\Theta + 1)}{\log 11} (u + v) (L_{EX, 8h} - L_0)^2 & \text{si } \Theta < 10 \text{ años} \end{cases} \quad (30)$$

donde los valores u y v se encuentran tabulados en función de las frecuencia audiométricas (en la tabla 8 se dan algunos valores), Θ es la cantidad de años de exposición, $\Theta_0 = 1$ año y L_0 es un nivel dependiente de la frecuencia, también tabulado, por debajo del cual $N_{med} = 0$ dB.

Tabla 8. Valores de los parámetros u , v y L_0 en función de la frecuencia.

f [Hz]	u	v	L_0 [dB]
1000	-0,020	0,070	89
2000	-0,045	0,066	80
4000	+0,025	0,025	75

²⁹ Con mayor generalidad, se obtiene sumando $10 \log (T_{ex} / 8 \text{ h})$ al resultado de integrar durante el tiempo real T_{ex} de exposición.

³⁰ Si bien N_{med} depende de la frecuencia, los años de exposición y el nivel de exposición, para no sobrecargar la notación omitimos los subíndices correspondientes.

³¹ La dependencia del sexo del desplazamiento del umbral debido a la edad se explica en general observando que aún sin exposición específica a ruido, las mujeres por tradición suelen ocupar diferentes funciones sociales que los hombres, por lo cual su exposición a condiciones ambientales desfavorables (ruido ambiente de origen comunitario, estrés, perturbaciones del sueño, etc.) puede diferir con respecto al promedio masculino. Es posible que, a medida que las diferenciaciones ocupacionales se vayan reduciendo, los datos de la norma ISO 7029 deban adaptarse convergiendo en un único conjunto de datos válido para ambos sexos.

En la figura 13 se ilustra gráficamente la ecuación 30 para algunas combinaciones de valores de los parámetros.

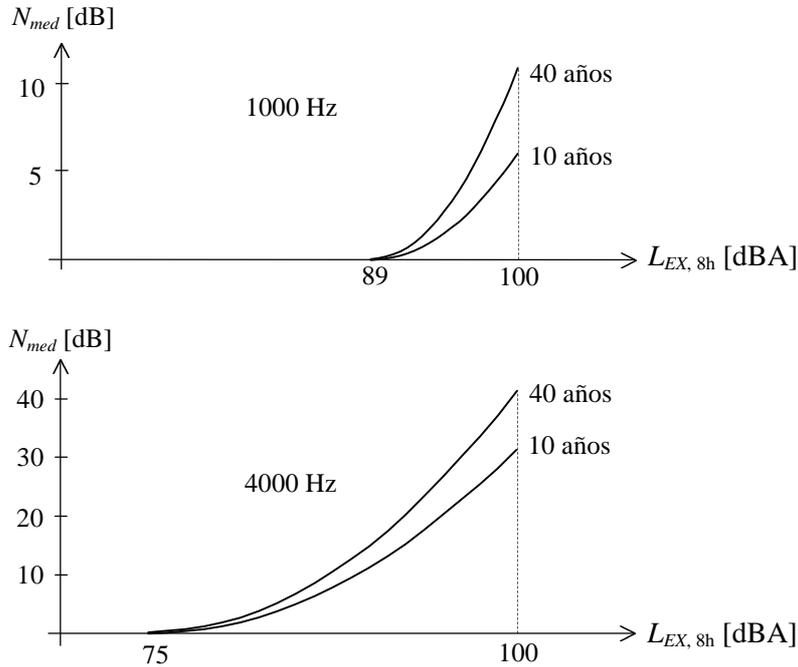


Figura 12. Mediana del desplazamiento temporal debido al ruido como función del nivel de exposición $L_{EX, 8h}$ y el tiempo de exposición, para dos frecuencias.

Las curvas anteriores demuestran que las frecuencias cercanas a 4000 Hz son afectadas mucho más rápidamente que las bajas frecuencias. También muestran que a mayor tiempo de exposición mayor el deterioro. Finalmente, se observa que para cada frecuencia existe un nivel de exposición “seguro”, es decir que por debajo de él la percepción de dicha frecuencia no se verá afectada (o lo que es lo mismo, el umbral no experimentará desplazamientos). Así, por debajo de 89 dBA, no existen efectos perjudiciales sobre los 1000 Hz, pero habrá que descender hasta los 75 dBA para evitar deterioro en la región de los 4000 Hz.

Igual que para el caso de H , la Norma ISO 1999 prosigue describiendo un método de cálculo para determinar los desplazamientos del umbral correspondientes a otros fractiles Q . Para ello se aproxima la distribución por dos semicampanas de Gauss con diferentes desvíos estándar $\sigma_{N,u}$ y $\sigma_{N,l}$ respectivamente, dados por las ecuaciones siguientes:

$$\sigma_{N,u} = \left(X_u + X_u \log \frac{\Theta}{\Theta_o} \right) (L_{EX,8} - L_o)^2 \quad (31)$$

$$\sigma_{N,l} = \left(X_l + X_l \log \frac{\Theta}{\Theta_o} \right) (L_{EX,8} - L_o)^2 \quad (32)$$

Para determinar el fractil Q , N_Q , se aplican las ecuaciones 33 y 34 según que Q esté comprendido entre 0,05 y 0,5 o entre 0,5 y 0,95:³²

³² Para los rangos $Q < 0,05$ y $Q > 0,95$ los valores obtenidos no son suficientemente confiables pues no están respaldados por suficiente evidencia experimental.

$$N_Q = N_{med} + z_Q \mathbf{s}_{N,u} \quad (0,05 < Q < 0,50) \quad (33)$$

$$N_Q = N_{med} + z_Q \mathbf{s}_{N,l} \quad (0,50 < Q < 0,95) \quad (34)$$

donde z_Q tiene el mismo significado que en el caso de la presbiacusia (ecuaciones 28 y 29).

A modo de ejemplo, en la Tabla 9 se incluyen los valores correspondientes a las frecuencias 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz para exposiciones durante 10 y 40 años y fractiles 0,90, 0,50 y 0,10 cuando $L_{EX, 8h} = 90$ dBA, es decir la exposición que toleran las reglamentaciones de muchos países, entre ellos la Argentina.

Tabla 9. Desplazamiento del umbral debido al ruido, N_Q , en dB, para diversas frecuencias, exposiciones y fractiles, siendo $L_{EX, 8h} = 90$ dBA.

Frecuencia [Hz]	Duración de la exposición [años]					
	10			40		
	0,90	0,50	0,10	0,90	0,50	0,10
1000	0	0	0	0	0	0
2000	0	2	6	4	6	10
4000	7	11	15	11	15	20

Vemos, por ejemplo, que un 10% de los individuos expuestos durante 40 años a 90 dBA de carácter laboral desarrollarán un desplazamiento permanente del umbral de 20 dB o más en la frecuencia 4000 Hz (sin tener en cuenta aún el efecto de la edad).

8.4. Desplazamiento permanente del umbral debido al ruido y a la edad

Llegamos finalmente a la combinación de los dos efectos: el de la edad y el del ruido. Podría pensarse que simplemente se suman, y de hecho es lo que sucede para desplazamientos del umbral pequeños. Para desplazamientos considerables, esta aproximación no es válida y entonces debe aplicarse la fórmula siguiente:

$$H' = H + N - \frac{HN}{120},$$

que para un fractil Q dado se convierte en

$$H'_Q = H_Q + N_Q - \frac{H_Q N_Q}{120}.$$

El término $HN/120$ tiene en cuenta que para desplazamientos grandes, el efecto ulterior de un agravante (como es el ruido) no es tan importante como cuando el desplazamiento es relativamente menor.

A manera de ejemplo, supongamos una población de varones de 60 años expuestos laboralmente desde los 20 a 90 dBA. Nos interesa saber cuál es la mediana del desplazamiento y el desplazamiento correspondiente al fractil 0,1. Considerando que esta población acumulará una exposición de $60 - 20 = 40$ años, en el primer caso podemos escribir:

$$H'_{0,5} = 28 + 15 - \frac{28 \cdot 15}{120} = 43 - 3,5 = 39,5 \text{ dB},$$

y en el segundo

$$H'_{0,5} = 55 + 20 - \frac{55 \cdot 20}{120} = 75 - 9,2 = 65,8 \text{ dB}.$$

Es decir, un 50% de los individuos expuestos al régimen citado tendrá una pérdida de alrededor de 40 dB en la frecuencia 4000 Hz, mientras que un 10 % de tales individuos habrán perdido 66 dB.

8.5. Comentarios finales

Debemos tener en cuenta que esta Norma no establece un criterio específico en cuanto a aceptabilidad de un determinado desplazamiento del umbral. En ese sentido, no permite obtener directamente la proporción de individuos afectados ante determinada intensidad y extensión de exposición a ruido, ya que no define qué significa “afectado”. Se limita, por consiguiente, a establecer la distribución estadística de los desplazamientos auditivos correspondientes a dicha exposición sin pretender valorarlos.

Existen, desde luego, tales criterios, algunos sostenidos por legislaciones o baremos, otros por sociedades científicas, pero no forman parte de la Norma Internacional ISO 1999, la cual deja explícitamente libertad al usuario para seleccionar el criterio que más le convenga.

Un criterio que goza de bastante aceptación es el que considera hipoacúsico a un individuo que exhibe un desplazamiento del umbral promedio de 25 dB entre las frecuencias 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, ya que este criterio concuerda bastante bien con el de hipoacusia funcional respecto a la inteligibilidad de la palabra.

Con este criterio es posible determinar el fractil de la población que puede considerarse hipoacúsico ante una exposición de características dadas. La diferencia entre los fractiles correspondientes al efecto combinado de la edad y el ruido y al efecto sólo de la edad se denomina *riesgo de deterioro auditivo debido al ruido*.

Agradecimientos

El autor agradece al Dr. Emilio Víctor Pineda y al Ing. Rafael Sánchez Quintana del IRAM por proveer las normas ISO 1999:1990 e ISO 7029: 1984, al Dr. Mario Munich por gestionar y proveer material de publicaciones especializadas, al Dr. Daniel Johnson del Aerospace Medical Research Laboratory, Ohio y a la Dra. Elizabeth González, del IMFIA, Montevideo, por proveer material de su autoría citado en las referencias.

Referencias

- Abramowitz, Milton; Stegun, Irene A. (Eds.): "Handbook of Mathematical Functions". Dover Publications, New York, 1972
- Beranek, Leo L. (Ed): "Noise Reduction". McGraw-Hill Book Company, New York USA, 1960.
- Beranek, Leo L.: "Acoustics". American Institute of Physics (Acoustical Society of America). Cambridge, USA, 1986.
- Beranek, Leo L., : "Noise and Vibration Control" . Institute of Noise Control Engineering. Washington, USA, 1988.
- EPA (US Environmental Protection Agency): "Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety". US Environmental Protection Agency, 550/9-74-004, Washington DC, USA, March 1974.
- Fletcher, H.; Munson, W. A.: "Loudness, its definition, measurement and calculation". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 5, pp. 82-108, 1933.
- González, Alice Elizabeth: "Contaminación Sonora en Ambiente Urbano: Optimización del Tiempo de Muestreo en Montevideo y Desarrollo de un Modelo Predictivo en un Entorno Atípico" Tesis para la obtención del grado de Doctora en Ingeniería Ambiental expedido por la Universidad de la República. Montevideo, Uruguay, 2000.
- ISO 389-1:1998 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 1: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and supra-aural earphones
- ISO 389-2:1994 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 2: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and insert earphones
- ISO 389-3:1994 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 3: Reference equivalent threshold force levels for pure tones and bone vibrators
- ISO 389-4:1994 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 4: Reference levels for narrow-band masking noise
- ISO/TR 389-5:1998 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 5: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones in the frequency range 8 kHz to 16 kHz
- ISO 389-7:1996 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions
- ISO 1999:1990 (E). "Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment". International Organization for Standardization, Genève, Suiza, 1990.
- ISO 7029:1984 (E). "Acoustics – Threshold of hearing by air conduction as a function of age and sex for otologically normal persons". International Organization for Standardization, Genève, Suiza, 1984.
- Johnson, Daniel L.: "Prediction of NIPTS Due to Continuous Noise Exposure", AMRL-TR-73-91, EPA-550/9-73-001-B, Aerospace Medical Research Laboratory, Washington, DC, USA, July 1973
- Johnson, Daniel L.: "Derivation of Presbycusis an Noise Induced Permanent Threshold Shift (NIPTS) to be Used for the Basis of a Standard on the Effects of Noise in Hearing", AMRL-TR-78-128, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, September 1978.
- Jonsohn, Richard A.: "Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund". Prentice Hall Hispanoamericana. Naucalpán de Juárez, México, 1994.
- Rosen, S.; Bergman, M.; Plestor, D.; El-Mofly, A.; Satti, M: "Presbycusis Study of a Relatively Noise-Free Population in the Sudan" Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 71:727-743 (1962)
- Rosen, G. : "A backward glance at noise pollution". American Journal of Public Health, 64, pp. 574-577. May 1974.
- Werner, A., Méndez, A., Salazar, E.: "El Ruido y la Audición". Editorial Ad Hoc. Buenos Aires, Argentina, 1995