

**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ACÚSTICA**



Profesor Patrocinante:  
**Dr. Jorge P. Arenas**  
Instituto de Acústica  
UACH.

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LA PONDERACIÓN “A”  
PARA EVALUAR EFECTOS DEL RUIDO  
EN EL SER HUMANO**

*Tesis presentada como parte de los requisitos  
para optar al Grado Académico de Licenciado  
en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero  
Acústico.*

**PABLO KOGAN MUSSO**

VALDIVIA – CHILE  
2004.

# **Análisis de la Eficiencia de la Ponderación “A” para Evaluar Efectos del Ruido en el Ser Humano**

# **Análisis de la Eficiencia de la Ponderación “A” para Evaluar Efectos del Ruido en el Ser Humano**

**PABLO KOGAN MUSSO**

Escuela de Ingeniería Acústica

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**

*Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Grado Académico de Licenciado en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero Acústico.*

PROFESOR PATROCINANTE : **Jorge P. Arenas**, Ingeniero Acústico, Magíster en Física, Doctor en Ingeniería Mecánica.  
Instituto de Acústica, UACH.

PROFESORES INFORMANTES: **Jorge Sommerhoff**, Ingeniero Acústico, Doctor en Ingeniería Industrial.  
Instituto de Acústica, UACH.

**José Luis Barros**, Ingeniero Acústico, Doctor en Ciencias de la Ingeniería.  
Instituto de Acústica, UACH.

PROFESORA COLABORADORA: **Karla Caspers**, Médico.  
Universidad Witten/Herdecke, Alemania.

VALDIVIA – CHILE  
2004.

## **RESUMEN**

La ponderación “A” surgió, hace varias décadas, a partir de las curvas isofónicas para bajos niveles de sonoridad, para los cuales el oído tiene poca sensibilidad en frecuencias bajas. Actualmente, el decibel “A” es ampliamente utilizado en las mediciones de ruido y para determinar si los niveles sonoros emitidos cumplen o no las exigencias legales.

El ruido provoca diversos efectos adversos sobre la salud: auditivos y extra-auditivos; conscientes e inconscientes; fisiológicos y psicosociales. Cada uno de estos efectos puede ser inducido en mayor o menor medida según cuál sea la naturaleza del estímulo acústico. En este trabajo se analizan las frecuencias sonoras que pueden ocasionar cada uno de los efectos del ruido en el ser humano.

Existen efectos adversos de carácter extra-auditivo provocados por el ruido en el ser humano, que no están representados apropiadamente por la ponderación “A”. Esto se debe a que los espectros sonoros que causan algunos de estos efectos, no coinciden con el espectro de la sensibilidad auditiva.

Se realizó una extensa recopilación bibliográfica acerca de los efectos del ruido en el ser humano y sus espectros causantes. Estos espectros se agruparon y analizaron de acuerdo a varios criterios, comparándose con las frecuencias de corrección de la curva “A”.

Se halló que los efectos del ruido que se producen a causa de la exposición a las frecuencias bajas de niveles sonoros superiores a 90 dB, son severamente adversos sobre la salud. Esto condujo a concluir que la ponderación “A” no es adecuada para evaluar el impacto global que tiene el ruido sobre la salud humana en ámbitos donde se superen estos niveles sonoros.

## **ABSTRACT**

The A-weighting network is derived from the equal loudness curves, where the human ear has a low sensitivity in the low frequency range. Nowadays, the dB “A” is widely used in acoustics measurements and noise legal assessment.

Noise causes many types of adverse effects on health: auditory and non auditory; conscious and unconscious; physiological and psycho-social . The extent of each effect depends on the acoustic stimulus nature. This work analyzes the sound frequencies capable to induce each one of the effects of noise on humans.

There are extra-hearing adverse effects of noise on humans that are not appropriately represented by the A-weighting network. This is because the sound spectra that cause some health disturbances are not equal to the hearing sensitivity spectrum.

An extensive bibliographic review is presented and discussed. The noise spectra related with each effect on health were grouped and analyzed with different criteria. These spectra were compared with the A-weighting correction frequencies.

It was found that several adverse effects on health are produced above 90 dB because of the low frequency range. Consequently, it was concluded that the A-weighting network is not adequate for evaluating the total effect of noise on humans in places where the noise rise above this sound level.

# CONTENIDOS

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Metodología y Estructura del Trabajo	3
1.4.1. Etapas	3
1.4.2. Estructura Temática	4
<b>2. SONIDO, RUIDO Y AUDICIÓN</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción	5
2.2. Sonido	5
2.2.1. Definición	5
2.2.2. Variables Objetivas del Sonido	6
2.2.3. Variables Subjetivas del Sonido	8
2.3. Ruido	8
2.3.1. Definición	8
2.3.2. Tipos de Ruido	9
2.3.3. Indicadores para la Medida del Ruido	10
2.3.4. División del Espectro en Bandas	12
2.3.5. Curvas de Ponderación	13
2.3.6. Contaminación Acústica	15
2.4. Audición y Noción de Psicoacústica	16
2.4.1. Fisiología del Oído Humano	16
2.4.1.1. El Oído Externo	17
2.4.1.2. El Oído Medio	17
2.4.1.3. El Oído Interno	18
2.4.1.4. De la Cóclea al Cerebro	21
2.4.2. Mecanismos de Autoprotección del Oído	22
2.4.3. Umbrales Auditivos	23
2.4.4. Altura	25
2.4.5. Sonoridad	26
2.4.6. Timbre	28
2.4.7. Localización de los Sonidos	29
2.4.8. Efecto Cóctel	31
2.4.9. Efecto Hass	31
2.4.10. Bandas Críticas	32

<b>3. EFECTOS DEL RUIDO EN EL SER HUMANO</b>	<b>34</b>
3.1. Introducción	34
<b>3.2. Efectos Auditivos</b>	<b>36</b>
3.2.1. Pérdida Auditiva	37
3.2.2. Dolor en el Oído	40
3.2.3. Enmascaramiento	40
3.2.4. Otros Efectos Auditivos	41
<b>3.3. Efectos Fisiológicos No Auditivos</b>	<b>41</b>
3.3.1. Efectos Fisiológicos Conscientes	41
3.3.1.1. Respuesta Reflejo	42
3.3.1.2. Alteración del Equilibrio	42
3.3.1.3. Fatiga Corporal	43
3.3.1.4. Resonancias del Organismo	43
3.3.1.5. Deficiencias Vocales	46
3.3.1.6. Dolores y Otros Efectos Localizados	46
3.3.2. Efectos Fisiológicos Inconscientes	46
3.3.2.1. La Causa de los Efectos Inconscientes	47
3.3.2.2. Efectos Cardiovasculares	48
3.3.2.3. Efectos Gastrointestinales	50
3.3.2.4. Respiración	51
3.3.2.5. Alteraciones Endocrinas e Inmunológicas	51
3.3.2.6. Cambios en el Sistema Nervioso Central	52
3.3.2.7. Efectos sobre la Piel	53
3.3.2.8. Efectos en la Vista	53
3.4. Efectos Psicosociales	54
3.4.1. Interferencia en la Comunicación	54
3.4.2. Rendimiento en las Tareas	55
3.4.2.1. Ruido Constante	56
3.4.2.2. Ruido Intermitente	57
3.4.2.3. Ruido Impulsivo	58
3.4.2.4. Voces	58
3.4.2.5. Efectos Positivos sobre el Rendimiento	58
3.4.3. Efectos sobre el Sueño	59
3.4.3.1. El Sueño y sus Fases	59
3.4.3.2. Antes del Sueño	60
3.4.3.3. Durante el Sueño	60
3.4.3.4. Despues del Sueño	61
3.4.4. Estrés	62
3.4.5. Molestia	63
3.4.6. Estado de Ánimo	64
3.4.6.1. Efecto de la Música	65
<b>3.5. Enfermedad Vibroacústica</b>	<b>65</b>

3.5.1. Desarrollo de la Enfermedad Vibroacústica	66
<b>3.6. Grupos Especialmente Vulnerables</b>	<b>69</b>
<b>4. EL DECIBEL “A”</b>	<b>70</b>
4.1. Descripción de la Ponderación “A”	70
4.2. La Utilidad de un Valor Único	71
4.3. Origen del dB(A)	72
4.3.1. Un Poco de Historia	72
4.3.2. Nacimiento de la Curva “A”	74
4.4. Aplicaciones del dB(A)	75
<b>5. LOS ESPECTROS SONOROS QUE AFECTAN LA SALUD</b>	<b>77</b>
5.1. Introducción.	77
5.2. Frecuencias de Importancia para el Sistema Auditivo	78
5.2.1. El Espectro Auditivo	78
5.2.2. Resonancias en el Oído	79
5.2.3. Mecanismos de Autoprotección del Oído	82
5.2.4. Otras Frecuencias Auditivas a Considerar	84
5.3. Pérdida Auditiva	86
5.4. Dolores y Molestias en el Oído	89
5.5. Bandas de Enmascaramiento	89
5.6. El Espectro de la Comunicación	94
5.7. Molestia y Ruidosidad	97
5.8. Descenso del Rendimiento	99
5.9. Enfermedad Vibroacústica	99
5.10. Fatiga Corporal	100
5.11. Mareos, Nauseas y Desmayos	100
5.12. Frecuencia y Sueño	101
5.13. Efectos Vegetativos	102
5.13.1. Variación del Pulso	103
5.13.2. Efectos sobre la Respiración	103
5.13.3. Alteraciones en el Sistema Digestivo	103
5.13.4. Cambios Endocrinos	103
5.13.5. Tensión de Músculos de Fibra Lisa	104
5.14. Efectos sobre la Piel	104
5.14.1. Efectos sobre el Rostro	104
5.15. Variaciones sobre el Habla	104
5.16. Tos y Ahogamiento	105
5.17. Efectos en la Vista	105
5.18. Vibraciones Localizados	105
5.19. Efectos Positivos	108

5.20. Estrés	108
5.21. Cuadros Psiquiátricos	108
<b>5.22. Síntesis de Efectos del Ruido y sus Espectros</b>	<b>109</b>
<b>6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN</b>	<b>116</b>
<b>6.1. Introducción</b>	116
6.1.1. La Dificultad de las Fuentes Bibliográficas	116
6.1.2. La Legislación sobre Ruido	117
<b>6.2. Análisis Espectral General</b>	118
6.2.1. División del Espectro	118
6.2.2. Frecuencias Bajas e Infrasónicas	118
6.2.3. Frecuencias Medias	119
6.2.4. Frecuencias Altas y Ultrasónicas	120
<b>6.3. Análisis Espectral por Rangos de Niveles Sonoros</b>	120
6.3.1. Rango I (< 60 dB)	122
6.3.2. Rango II (> 60 dB ; < 90 dB )	123
6.3.3. Rango III (> 90 dB )	124
<b>6.4. Análisis Según el Tiempo de Exposición</b>	126
<b>6.5. Ventajas del Uso del dB(A)</b>	127
<b>6.6. Antecedentes Negativos sobre el Uso del dB(A)</b>	127
6.6.1. Sonoridad y Ruidosidad	127
6.6.2. Molestia	128
6.6.3. Frecuencias Bajas	129
6.6.4. Enmascaramiento	130
6.6.5. Ancho de Banda, Forma Espectral y Componentes Tonales	130
6.6.6. Ruidos Impulsivos	131
6.6.7. Otros Antecedentes	132
<b>6.7. Ámbitos de Inmisión</b>	133
6.7.1. Viviendas	133
6.7.2. Exposición Laboral	134
6.7.3. Uso de Protectores Auditivos	135
6.7.4. Discotecas, Locales de Entretenimiento y Eventos	136
6.7.5. Vía Pública	137
6.7.6. Transporte Público de Pasajeros	137
6.7.7. Hospitales, Escuelas y Otros Ámbitos Vulnerables	138
<b>6.8. Investigación Futura</b>	139
6.8.1. Necesidad de Complementar el Número Único	139
6.8.2. Prácticas Sugeridas en las Mediciones de Ruido	140
6.8.3. ¿Puede el Ruido Evaluar Solamente en Términos Físicos?	141
6.8.4. Otros Aspectos a Considerar	142
6.8.5. Estudios Futuros	143
6.8.6. Palabras Finales	144

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>146</b>
AGRADECIMIENTOS	148
REFERENCIAS	150
ANEXO: Molestia Generada Por Ruidos con Igual Nivel Sonoro “A” y Distinto Contenido Espectral.	154
GLOSARIO	164

***“La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no sólo la ausencia de enfermedad o dolencia”***

Organización Mundial de la Salud.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El ruido puede ser analizado como un conjunto de magnitudes físicas mesurables. Sin embargo, cuando se requiere conocer cuál es el impacto que el ruido provoca en un ser vivo, es necesario considerar variables relativas a su recepción. En los seres humanos, el principal órgano receptor del sonido es el oído, el cual recibe ondas sonoras dentro de un rango particular de frecuencias y de niveles sonoros. Dentro del rango auditivo humano existen zonas de mayor sensibilidad que otras, y el conjunto de todas ellas configura los que se denomina *respuesta en frecuencia del oído*. Si deseamos considerar con qué magnitud el oído humano recibirá cada frecuencia contenida en el ruido, además de las características físicas de este último, debemos considerar la respuesta en frecuencia del oído. Para tal fin, se han trazado varias *curvas de ponderaciónpectral*, las cuales simulan la respuesta en frecuencia del oído en distintos rangos de niveles sonoros. Estas curvas datan de la primera mitad del siglo XX y han sido obtenidas en base a experimentos auditivos con poblaciones humanas en condiciones de laboratorio. Los contornos de igual sonoridad para tonos puros, hallados por Fletcher y Munson en Inglaterra en 1933, han constituido la base para el trazado de las curvas de ponderación “A”, “B” y “C”. Cada una de ellas fue obtenida, respectivamente, para los niveles bajos, medios y altos de los contornos de igual sonoridad. De estas tres curvas, se ha generalizado especialmente el uso de la “A”. La curva “A”, que fue creada como una simplificación de la respuesta en frecuencia del oído para tonos puros de niveles sonoros bajos, se ha estado empleando por décadas para la medición de todo tipo de ruido que reciben los seres humanos.

La exposición al ruido causa múltiples efectos en las personas. La perdida auditiva es el efecto del ruido de mayor estudio y más considerado en la legislación sobre ruido. La pérdida auditiva se manifiesta en particular en aquellas frecuencias sonoras donde el oído tiene mayor sensibilidad. Por este motivo, podríamos pensar que resulta adecuado medir el ruido en decibeles con ponderación “A” para evaluar su potencialidad destructiva sobre el oído. Sin embargo, existen otros efectos del ruido de igual (o incluso mayor) gravedad que la pérdida auditiva. Usualmente, éstos efectos “extra-auditivos” no son considerados. Muchos de ellos son de naturaleza fisiológica y algunos tienen un reflejo psíquico y pudiendo ocasionar consecuencias sociales severas. Entre estos efectos podemos nombrar: la pérdida de la calidad del sueño (con su correspondiente decremento del rendimiento y bienestar), el estrés, la interferencia en la comunicación, las alteraciones cardiovasculares, las complicaciones gastrointestinales, los cambios endocrinos e inmunológicos, la modificación del ritmo respiratorio, la fatiga corporal y las resonancias del organismo, entre otros. Algunas de las razones por las cuales estos efectos del

ruido hasta el momento no han sido ampliamente difundidos y normalizados son: la complejidad de la reacción y su difícil evaluación, su reciente hallazgo, la falta de resultados concluyentes e intereses económicos, entre otras.

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Cada uno de los efectos del ruido es producido en mayor o menor medida según cuál sea la naturaleza del estímulo acústico. Por este motivo, es esperable que la frecuencia del ruido tenga incidencia en la magnitud de cada una de estas consecuencias fisiológicas y psicológicas. Por ejemplo, la fatiga corporal provocada por una banda de ruido centrada en 100 Hz de un determinado nivel sonoro no tendría por qué ser similar a la fatiga corporal provocada por un ruido de igual nivel sonoro y forma espectral, pero centrado en 5000 Hz. Este razonamiento lo podríamos aplicar para cada uno de los efectos del ruido en las personas. Entonces, podríamos decir que cada efecto del ruido tiene su propia respuesta en frecuencia. En la actualidad muchas de estas respuestas no son conocidas. Sin embargo, existen registros experimentales que sustentan la idea de que la respuesta en frecuencia de algunos de los efectos del ruido no coincide con la respuesta del oído humano. ¿La magnitud de las secreciones de ácido estomacal que se ha observado en presencia de ruido necesariamente tiene que ser mayor en las frecuencias de mayor sensibilidad del oído? Preguntas como éstas se podrían hacer para cada efecto nombrado, y también para los restantes. En este trabajo se estudia cada efecto del ruido y las frecuencias sonoras que lo causan. La pérdida auditiva se analiza sólo como uno más de todos los efectos que el ruido produce en el ser humano.

*La ponderación “A” surgió exclusivamente de la respuesta en frecuencia del oído. Sin embargo, ésta es actualmente utilizada para evaluar algo que excede a su naturaleza: el impacto global del ruido sobre el ser humano. Por lo tanto, si la ponderación “A” representase apropiadamente la respuesta del oído humano (luego veremos que esto no es estrictamente correcto tampoco), nuestros oídos estarían protegidos de las frecuencias más dañinas, pero no estaría adecuadamente cuidado el resto de nuestro cuerpo, ni nuestra psiquis.*

A pesar de ello, no es posible afirmar que la ponderación “A” es inadecuada sin antes realizar un estudio completo sobre los efectos del ruido en las personas y las frecuencias sonoras que los ocasionan. Esto es precisamente lo que se persigue realizar en este trabajo.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar si el nivel sonoro con ponderación “A” es adecuado para evaluar íntegramente el conjunto de efectos adversos que el ruido provoca en el ser humano.

### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los efectos que el ruido causa en las personas.
- Recopilar, interpretar y relacionar trabajos de investigación que asocien los distintos efectos del ruido en el ser humano y sus características espectrales.
- Cotejar las bandas de frecuencia de mayor sensibilidad auditiva con aquellas de mayor relevancia para provocar efectos no auditivos en el ser humano.
- Determinar, en caso que la evidencia analizada lo permita, si la ponderación “A” es eficiente desde el punto de vista de la salud, para medir los tipos y niveles de ruido para los que actualmente se emplea.
- Estudiar el comportamiento del dB(A) en distintos ámbitos de inmisión del ruido.
- Identificar, siempre que corresponda, áreas temáticas específicas donde se requiera investigación en miras a una mejor evaluación del ruido desde el punto de vista de la salud.

## 1.4. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

### 1.4.1. ETAPAS

Para la realización del presente trabajo se cumplieron las siguientes etapas:

1. Se realizó una exhaustiva recopilación de antecedentes sobre estudios realizados con los efectos en la salud provocados por el ruido, en especial aquellos trabajos que consideran las características espectrales. Esta búsqueda fue fundamental para el trabajo, ya que sus resultados aportaron su pilar principal.
2. Análisis, selección y agrupamiento de los estudios hallados. Este proceso permitió concentrarse en los resultados más significativos y descartar la información inocua o redundante.

3. La tercera etapa consistió en el estudio a fondo de los resultados de utilidad, así como la teoría que los sustenta.
4. El cruzamiento de la información estudiada y el establecimiento de las relaciones necesarias entre los resultados.
5. Análisis de la información ya clasificada en rangos y categorías.
6. La formulación de conclusiones que permitan conocer cualitativamente la eficiencia propia de la curva “A” en distintas condiciones y situaciones, como ponderación espectral del ruido que afecta al ser humano.

#### **1.4.2. ESTRUCTURA TEMÁTICA**

La primera etapa del presente trabajo consiste en el estudio teórico de algunos conceptos fundamentales acerca de la naturaleza del ruido y la audición (Capítulo 2). También, se revisan algunos temas de la psicoacústica que son de especial utilidad para el análisis posterior.

El Capítulo 3 contiene el estado del arte sobre los efectos del ruido en el ser humano. Se abordaron todos los efectos conocidos hasta el momento, incluso aquellos que aún no brindan resultados concluyentes, pero de los cuales existen registros de casos producidos. Se clasificó a los efectos del ruido en: auditivos, fisiológicos no auditivos (los que a su vez se dividen en conscientes e inconscientes), y efectos psico-sociales del ruido.

El Capítulo 4 está dedicado a la ponderación “A”, su origen, sus cualidades y aplicaciones.

El Capítulo 5 aborda directamente los resultados de mayor utilidad para el desarrollo del análisis planteado: los espectros sonoros que provocan los distintos efectos en las personas. En muchos casos la información es poca y limitada, sin embargo, se ha realizado un esfuerzo por incluir la mayor cantidad de información espectral que pueda hallarse.

Con todas estas herramientas, se aborda el análisis esencial del trabajo (Capítulo 6). En él se consideran tanto los resultados de los estudios expuestos, como algunas inducciones teóricas realizadas respecto a temas donde los registros son insuficientes o incluso inexistentes. El análisis se llevó a cabo en varios frentes. Por un lado, se realizó un análisis espectral general, considerando por separado las frecuencias bajas, medias y altas. Por otra parte, se analizaron: la influencia que tienen los distintos rangos de niveles sonoros y la duración del estímulo sonoro causante de cada efecto. Se revisó el comportamiento de la ponderación “A” en algunos ámbitos específicos de exposición sonora. Se incluyen varias citas bibliográficas sobre antecedentes negativos respecto al empleo del dB(A). Por último, se discuten las líneas de investigación requeridas y se formularon las conclusiones del trabajo.

# CAPÍTULO 2

## SONIDO, RUIDO Y AUDICIÓN

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se revisan los conceptos fundamentales sobre la naturaleza del sonido, el concepto de ruido y el funcionamiento del oído humano. Para comprender realmente cómo funciona la audición humana no basta con el estudio de su fisiología, sino que es preciso entender varios procesos psicoacústicos. Se realizará una revisión de algunos conceptos físicos del oído y se estudiarán sólo los procesos psicoacústicos que son necesarios para el análisis posterior. Debido a que la característica del sonido de mayor interés en el presente estudio es la frecuencia, se priorizarán los temas que tienen relación con ello y se omitirán aquellos tópicos que no tienen tanta relación con los objetivos trazados. Por este motivo, serán abarcados procesos como la sonoridad y la selectividad en frecuencia, mientras que otros temas de la psicoacústica, como el proceso temporal de la señal o la percepción del habla no se abordarán.

### 2.2. SONIDO

#### 2.2.1. DEFINICIÓN

Para que exista el sonido debe haber una fuente emisora, un medio de propagación y un receptor capaz de percibir el mismo. La fuente genera *ondas sonoras* debido a la vibración de una superficie que se encuentra en contacto con el medio de propagación. El medio de propagación debe ser elástico para conducir la onda sonora generada, la que viaja por éste en forma de perturbación sobre la *presión estática* existente. Por dicho motivo, las ondas acústicas también son denominadas *ondas de presión*. Ante una onda de presión, las partículas del medio oscilan con cierta *velocidad* y *amplitud*, desplazándose de su posición de equilibrio y luego retornando a ella (en un medio elástico las partículas siempre regresan a su posición). Entonces, las partículas del medio (aire, agua, sólido, etc.), sin viajar con la onda, permiten que ésta se desplace con cierta velocidad. Ésta se denomina *velocidad de propagación (c)* y depende de las características del medio (en el aire c está comprendida entre 330 m/s y 360 m/s dependiendo de las condiciones meteorológicas). Por último, debe existir un receptor que capte la onda acústica propagada, por ejemplo el oído humano o un micrófono.

### 2.2.2. VARIABLES OBJETIVAS DEL SONIDO

El sonido más simple que se encuentra en la naturaleza es un *tono puro*. Se trata de un sonido cuya onda tiene una forma sinusoidal (ver Fig. 2.2). Toda sinusoide posee una *amplitud*, una *frecuencia* y una *fase*.

La amplitud de un tono puro usualmente está determinada por el *nivel de presión sonora (NPS)*, *nivel sonoro* o simplemente *nivel* de un sonido, que se define como:

$$NPS = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \text{ (dB)}, \quad 2.1$$

donde  $p$  representa la presión sonora y  $p_0$  la presión de referencia. En el aire,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

El NPS se expresa en *decibeles (dB)*. Su carácter logarítmico permite operar magnitudes de niveles dentro de un rango más acotado, ya que el *rango dinámico* de presiones que el oído puede percibir es demasiado grande.

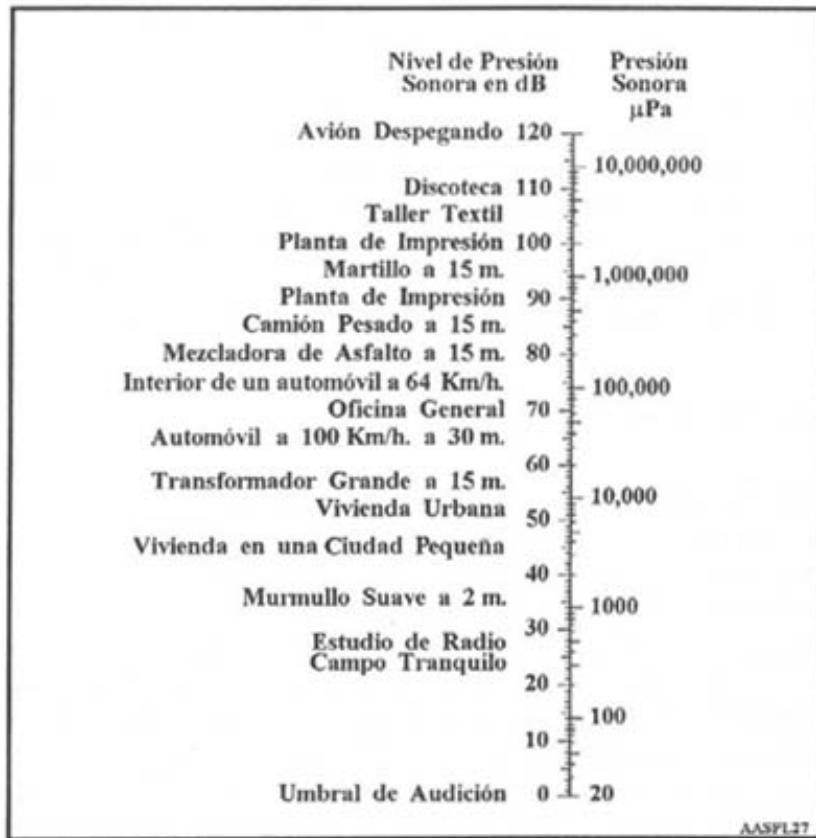


Fig. 2.1: Presiones sonoras y niveles de presión sonora generados por distintas fuentes acústicas (Recuero, 2002).

La Figura 2.1 muestra los niveles característicos de distintos eventos sonoros, también se indican la distancia a cada fuente para la que es válido el valor indicado y las presiones en *micropascales ( $\mu Pa$ )* a esas distancias (obsérvese el gran rango de valores de las presiones respecto al rango en decibeles).

Una sinusoida periódica en el tiempo tiene una *frecuencia de oscilación* (o simplemente *frecuencia*). La frecuencia ( $f$ ) de un tono puro está determinada por la cantidad de veces que la onda repite su ciclo por unidad de tiempo (ver Fig. 2.2). Se ha adoptado *el segundo* como unidad de tiempo, entonces la frecuencia de un sonido se mide en *ciclos por segundo*, lo que se conoce como *Hertz (Hz)* y es equivalente a  $1/s$  en el *sistema internacional de unidades (SI)*.

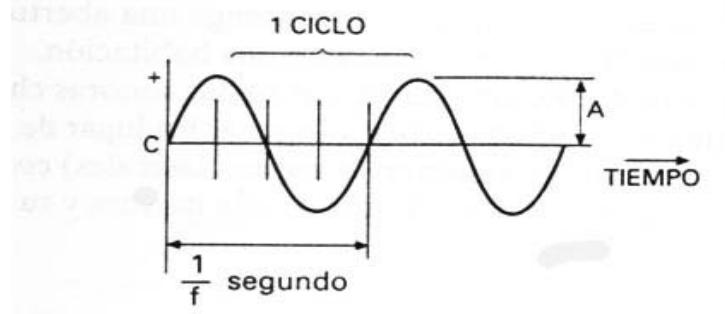


Fig. 2.2: Onda sinusoidal.

La frecuencia es inversa con el *periodo* ( $T$ ), el cual se define como el tiempo en segundos que dura un ciclo:

$$f(Hz) = \frac{1}{T(s)} . \quad 2.2$$

Cuando una onda sonora se propaga en cierta dirección a través de un medio, esta onda posee determinada longitud. Se conoce como *longitud de onda* ( $\lambda$ ) al largo que una sola onda ocupa en el medio donde se propaga, o sea la distancia en metros que existe entre dos máximos o dos mínimos consecutivos (ver Fig. 2.3).

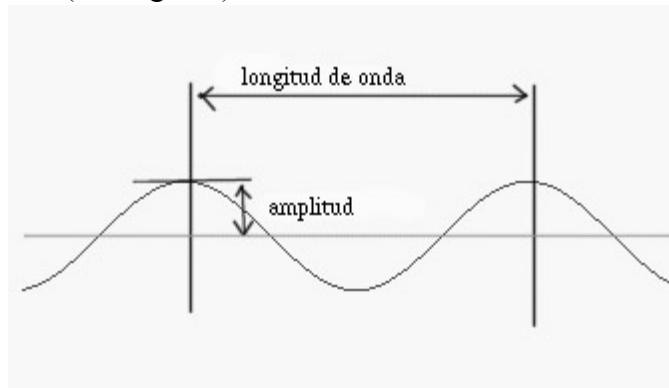


Fig. 2.3: Longitud de onda de una onda sinusoidal

La longitud de onda se relaciona inversamente con la frecuencia:

$$\lambda(m) = \frac{c(m/s)}{f(Hz)}, \quad 2.3$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación sonora en metros por segundo (m/s).

Los sonidos que no son simples tonos se denominan *sonidos complejos*. Todo sonido complejo puede ser expresado como sumatorias de sinusoides de distintas amplitudes, frecuencias y fases.

La descomposición de un sonido en todas sus componentes de frecuencia se denomina *espectro*. En la acústica se suele dividir el espectro audible en *octavas* (el rango comprendido entre una frecuencia y el doble de ella) y a su vez éstas se descomponen en *tercios de octava*. Sin embargo, en ocasiones es conveniente trabajar con el espectro continuo.

### 2.2.3. VARIABLES SUBJETIVAS DEL SONIDO

El sonido es una magnitud física objetiva, sin embargo cuando este es recibido por el oído da lugar a una serie de procesos subjetivos. De esta manera se pueden definir variables subjetivas relacionadas con la percepción del sonido, las cuales tienen relación (aunque no siempre de manera simple) con las variables físicas definidas. Las principales variables subjetivas son: sonoridad, altura, timbre y duración subjetiva.

Fácil sería si pudiésemos asociar linealmente éstas variables subjetivas con los parámetros físicos mencionados. Pero no es así, sino por el contrario, cada una de estas variables subjetivas depende de la combinación de más de una variable objetiva. Más adelante en el capítulo se abordarán con detalle las variables subjetivas del sonido.

## 2.3. RUIDO

### 2.3.1. DEFINICIÓN

Los seres humanos estamos expuestos a ondas sonoras en forma cotidiana. Algunas de las ondas sonoras que inciden sobre nuestros oídos contienen información deseada o útil. Otras de ellas son parte de un entorno natural y están tan integradas a nuestra percepción del ambiente, que muchas veces ni siquiera notamos. Sin embargo, existe otro tipo de ondas sonoras que no son bien acogidas. Estos sonidos no deseados reciben el nombre de *ruido*.



Fig. 2.4: Ilustración del ruido como un sonido no deseado.

El ruido puede provocar efectos de muy variada índole, que van desde simples molestias hasta problemas clínicos no reversibles o alteraciones psíquicas severas. El más estudiado y cuantificable de los efectos de ruido en el ser humano es la pérdida de la audición.

La variedad de ruidos que puede percibir una persona es infinita. Las principales variables que definen físicamente a un ruido son: sus componentes espectrales, su dinámica temporal, sus amplitudes, sus fases relativas y su duración.

La combinación de estas variables físicas en todos sus rangos de acción, hacen del sonido un fenómeno físico que podría resultar complejo. Afortunadamente, el desarrollo tecnológico actual permite cuantificar dichas magnitudes con buena precisión. No obstante, subyace un problema que aún dista de ser completamente resuelto. Se trata de la percepción que tienen los seres humanos de las nombradas variables objetivas y las respuestas psíquicas y fisiológicas frente a cada una de ellas.

### 2.3.2. TIPOS DE RUIDOS

Los ruidos se pueden clasificar de varias maneras: por su carácter temporal (*ruido constante, intermitente, fluctuante, de impacto, periódico, etc.*); por sus características espectrales (*tono puro, ruido de banda estrecha, banda ancha, blanco, rosado, etc.*); por su naturaleza (fuente o ámbito del que proviene u otra característica peculiar, por ejemplo ruido comunitario, ruido industrial, ruido aeronáutico, etc.); por su contenido semántico (significado asociado); por su nivel sonoro (alto, medio, bajo); etc.

### 2.3.3. INDICADORES PARA LA MEDIDA DEL RUIDO

Existen muchas formas de medir el ruido. Todas ellas requieren de un *indicador* (también llamado *índice* o *descriptor*) que permita cuantificar de alguna manera el sonido captado por un micrófono. Los descriptores de ruido procesan los niveles sonoros recibidos en el tiempo, algunos dan cuenta de la energía sonora en un período de tiempo, otros indican niveles máximos o mínimos que se alcanzan en un determinado lapso y otros son simplemente valores en un instante. Además del proceso de los niveles en el tiempo que realizan los indicadores, comúnmente se aplican filtros espectrales para algún propósito dado (por ejemplo el de simular la respuesta del oído humano). Estos filtros se denominan *curvas de ponderación* y serán revisados en la siguiente sección. Sin embargo, cabe señalar que todos los indicadores que se describirán pueden aplicarse con o sin ponderación espectral. Si se utiliza una ponderación se agrega una letra a las unidades (por ejemplo con la ponderación “A” los “dB” se transforman en “dB(A)”).

A continuación se sintetizarán los indicadores más empleados para la medición y evaluación del ruido comunitario e industrial:

*Nivel instantáneo (L<sub>p</sub>):* Nivel de presión sonora que se registra en un instante de medición (también denominado NPS como se indica en la expresión 2.1).

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \quad (dB), \quad 2.4$$

$p(t)$  : presión sonora en un instante.

$p_0$  : presión de referencia de 20  $\mu\text{Pa}$ .

*Nivel sonoro continuo equivalente (Leq):* Nivel sonoro que tendría un ruido constante en el mismo período de tiempo que el ruido medido. El Leq da cuenta de la energía sonora en un determinado lapso de tiempo y es ampliamente utilizado.

$$Leq = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (dB), \quad 2.5$$

$p(t)$ : presión sonora en función del tiempo.

$T$  : período de medición.

*Nivel máximo (L<sub>max</sub>):* Nivel sonoro más alto que se registra durante un período de medición (dB).

*Nivel mínimo (L<sub>min</sub>):* Menor nivel que se registra durante un intervalo de medición (dB).

*Percentiles (L<sub>10</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>90</sub>, etc.):* Nivel sonoro que es superado determinado porcentaje del tiempo de medición. Cuánto más chico es el porcentaje de tiempo, más alto será el nivel a superar. Por ejemplo, el L<sub>90</sub> es el nivel sonoro que fue superado el 90 % del tiempo de medición, por lo cual se

suele emplear para registrar el ruido de fondo existente. Por el contrario, el  $L_{10}$  registrará un nivel que incluirá sólo los eventos más sonoros, los cuales en total estuvieron presentes tan sólo el 10% del tiempo de medición (dB).

*Nivel equivalente día-tarde-noche ( $L_{den}$ ):* Integración de los niveles sonoros medidos durante 24 h, considerando 12 h de día, 4 h de tarde (donde se exigen 5 dB menos que en el día) y 8 h de noche (donde se exigen 10 dB menos que en el día). Este indicador es actualmente empleado en la Comunidad Europea y con frecuencias es evaluado a lo largo de un año.

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{24} \cdot \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \right] \text{ (dB)}, \quad 2.6$$

donde:

$L_{day}$ : Nivel sonoro integrado durante las 12 h diurnas definidas en cada estado o región (usualmente de 7 a 19 hrs.).

$L_{evening}$ : Nivel sonoro integrado durante las 4 h vespertinas definidas en cada estado o región (usualmente de 19 a 23 hrs.)

$L_{night}$ : Nivel sonoro integrado durante las 8 h nocturnas definidas en cada estado o región (usualmente de 23 a 7 hrs.).

De manera similar, es posible aplicar el indicador *día-noche* ( $L_{dn}$ ), considerando 14 h de día y 10 h noche, con 10 dB de diferencia entre ambas.

*Clima de ruido (CR):* Da cuenta de la fluctuación del ruido, complementando en muchos casos al Leq.

$$CR = L_{10} - L_{90} \text{ (dB)}. \quad 2.7$$

*Nivel de contaminación acústica ( $L_{NP}$ ):* El  $L_{NP}$  informa, tanto acerca de la energía del ruido (Leq), como de su fluctuación. Se define de dos maneras distintas; si la distribución de niveles en el período de medición es *gaussiana*:

$$L_{NP} = Leq + L_{10} - L_{90} \text{ (dB)}, \quad 2.8$$

mientras que para los demás casos se expresa como:

$$L_{NP} = Leq + K\sigma \text{ (dB)}, \quad 2.9$$

$\sigma$ : desviación estándar de la serie de niveles instantáneos registrados en el período de medición.

$K$ : constante experimental, usualmente fijada en 2,56.

*Nivel de ruido de tráfico (TNI):* Índice que se emplea para casos de poca circulación de automóviles (menos de 300 vehículos/hora) (Recuero, 2002).

$$TNI = 4 \cdot (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \text{ dB } (\text{dB}). \quad 2.10$$

*SEL (“Single Event Level”):* Nivel sonoro que, si se mantuviese constante durante 1 s, tendría la misma energía que el evento sonoro medido. Se suele emplear para eventos de ruido aislados, como el paso de un avión, una motocicleta, etc.

$$SEL = 10 \cdot \log \left[ \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T_{ref}} \cdot 10^{\frac{Lp(t)}{10}} dt \right] (\text{dB}), \quad 2.11$$

donde:

$T_{ref}$ : tiempo de referencia de 1 segundo.

$t_1$ : tiempo de inicio de la medición del evento de ruido

$t_2$ : tiempo de finalización de la medición del evento de ruido

*DOSIS DE RUIDO:* Cuantificación porcentual del total de ruido recibido por una persona durante una jornada de trabajo de 8 h. Una dosis de un 100 % corresponde a la máxima exposición sonora aceptada para un trabajador. Existen distintos criterios para la máxima energía sonora aceptable. En Chile, se permite un Leq máximo de 85 dB durante la jornada laboral, mientras que otras organizaciones internacionales como “International Standard Association” (ISO) y “Occupational Safety and Health Administration” (OSHA) de Estados Unidos coinciden en fijar un máximo de 90 dB. Sin embargo, estos criterios difieren en la *tasa de intercambio* adoptada. ISO sólo permite incrementar 3 dB por una reducción a la mitad en el tiempo de exposición, mientras que OSHA, al igual que la legislación chilena (D.S. N° 594, 1999), acepta 5 dB de incremento.

Además de los indicadores definidos, distintos organismos han creado muchos otros para fines específicos.

### 2.3.4. DIVISIÓN DEL ESPECTRO EN BANDAS

Para facilitar la tarea de medición, comparación y análisis de datos, se ha dividido el espectro audible en bandas de octava, las que a su vez están subdivididas en tercios de octava. Las frecuencias centrales de tercio de octava que se ha acordado utilizar en la acústica, pueden calcularse igualando el logaritmo en base 10 de la frecuencias a valores separados 1/10 entre sí (1, 1.1, 1.2, 1.3, etc.). Por ejemplo:

$$1 = \log (f_1)$$

$$1,1 = \log (f_2)$$

$$1,2 = \log (f_3)$$

$$1,3 = \log (f_4)$$

etc. ,

de lo que se obtiene:

$$f_1 = 10,0$$

$$f_2 = 12,6$$

$$f_3 = 15,8$$

$$f_4 = 20,0$$

etc.

Estos valores, junto con los restantes hasta 20.000 Hz, han sido aproximados (y normalizados) a los siguientes:

10 Hz, 12,5 Hz, 16 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 31,5 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz.

Esta secuencia se repite entre 100 Hz y 1000 Hz:

125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz

y entre 1 kHz y 10 kHz:

1,25 kHz, 1,6 kHz, 2 kHz, 2,5 kHz, 3,15 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6,3 kHz, 8 kHz, 10 kHz

y 12,5 kHz, 16 Hz y 20 kHz.

Para obtener un valor único de NPS a partir de las bandas individuales, se debe realizar la suma energética de las mismas:

$$Lp_{TOT} = 10 \cdot \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{Lp_i}{10}} \quad (dB), \quad 2.13$$

donde  $n$  es la cantidad de bandas de frecuencia que se desea sumar para obtener un valor único en decibeles (dB), ó, como se verá a continuación, en decibeles ponderados: dB(A), dB(C), etc.

### 2.3.5. CURVAS DE PONDERACIÓN

Cuando se realizan mediciones de nivel de presión sonora, usualmente se quiere considerar con qué sonoridad los niveles medidos serán percibidos por el oído humano. Para ello, la medición realizada se debe ponderar de acuerdo a la respuesta que tiene el oído humano en función de la frecuencia. A causa de este requerimiento se crearon curvas de ponderación espectral para la medición del ruido, y luego los medidores de nivel de presión sonora comenzaron a incluirlas. Originalmente fueron definidas las curvas “A”, “B” y “C”,

correspondiendo cada una a un rango de niveles de sonoridad. La curva “A” fue concebida para niveles bajos (del orden de los 40 fonos lo cual es equivalente a 40 dB en 1000 Hz como se verá más adelante en este capítulo), la “B” para valores medios (alrededor de 70 fonos) y la “C” para los contornos de sonoridad superiores (aproximadamente 100 fonos).

Estas ponderaciones, además de adecuar cada banda de frecuencia a la respuesta del oído, cumplen la útil función de entregar un número único correspondiente a la suma energética de todas las bandas del sonido medido (cada una de ellas con su respectiva corrección de acuerdo a la ponderación empleada).

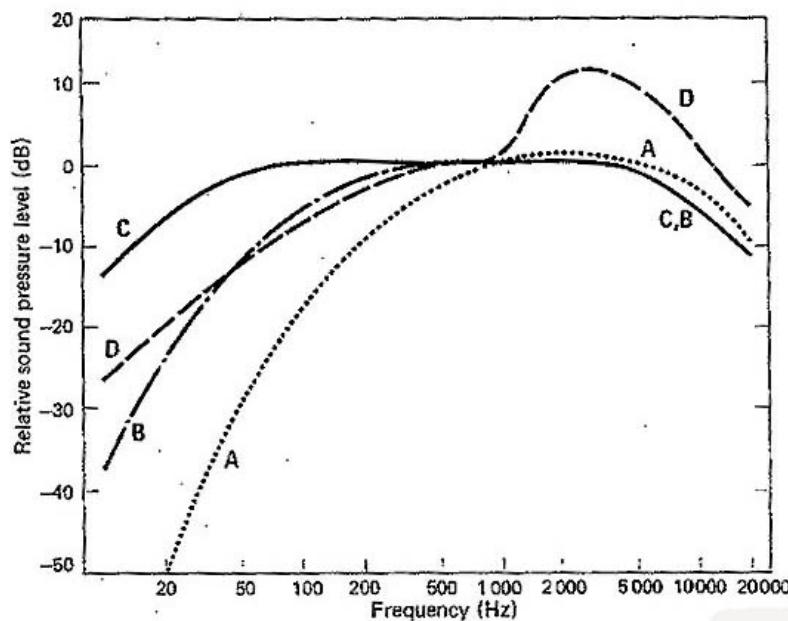


Fig. 2.5: Curvas de ponderación espectral “A”, “B”, “C” y “D”.

De estas tres antiguas ponderaciones, la que más se utiliza actualmente es la “A”. Es cuestión de revisar cualquier normativa o legislación sobre ruido, bien algún instrumento de medición acústica para encontrarse con los *decibeles “A”* (*o dBA*).

En la Fig. 2.5 se presentan las curvas de ponderación “A”, “B”, “C” y “D”. La curva “D” surgió en forma posterior a las primeras tres. Los dB(D) surgieron de las curvas de ruidosidad percibida y fueron concebidos para evaluar un evento único de ruido aeronáutico (este tema se abordará más adelante en el texto).

Además, existen ponderaciones que han sido creadas para otros tipos específicos de ruidos:

- La ponderación “G” fue creada para ruido infrasónico y de frecuencia baja, posee su “cero” en 10 Hz, su máximo en 20 Hz, tiene una pendiente aproximada de 12 dB/octava entre 1 y 20 Hz, una pendiente negativa de 24 dB/octava sobre 20 Hz y se extiende hasta 315 Hz. Está definida en la norma ISO 7196: 1995 (E) “Acoustics – Frequency – Weighting Characteristic for Infrasound Measurements”, sin embargo esta ponderación es muy poco utilizada.
- La ponderación “U” fue definida en la norma europea EN 61012: 1998 “Filters for the measurement of audible sound in the presence of ultrasound” y su objetivo es filtrar las

frecuencias ultrasónicas. La ponderación “U” actúa entre 12,5 kHz y 40 kHz. Las bandas del espectro inferiores a 12,5 kHz no son corregidas por el dB(U), y en esta frecuencia comienza a producirse un ponderación de -2,8 dB hasta llegar a -61,8 dB en 40 kHz (pendiente máxima de -36 dB/oct.).

- La ponderación “AU”, que combina las correcciones de la ponderación “U” y de la popular curva “A”. Los dB(AU) se comportan como los dB(A) desde 20 Hz hasta 10 kHz, pero sobre ésta banda realizan una fuerte ponderación negativa que comienza por -7,1 dB en 12,5 kHz y logra pendientes de -48 dB/octava, llegando a corregir con -81,1 dB en 40 kHz..

Cuando se desea realizar una suma energética ponderada de las distintas bandas para obtener un valor único como el dB(A), dB (B), etc., se debe aplicar la corrección correspondiente a cada banda de frecuencia (ya sea de octava o de tercio de octava) y luego realizar la suma energética, de acuerdo a la Ecuación 2.13.

### 2.3.6. CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

El contaminante acústico posee características peculiares respecto de otras formas de polución. En primera instancia, a diferencia de otros contaminantes, el ruido no deja residuos sólidos, líquidos o gaseosos. En segundo lugar, podemos decir que la contaminación acústica tiene un fuerte carácter subjetivo. Por ejemplo, una emanación gaseosa contaminante provocará un efecto negativo en todos los seres vivos que se encuentren a su alcance. Sin embargo, el ruido no se comporta de la misma manera. Esto se debe a que el sonido es un medio de comunicación, de expresión y de comprensión entre los seres vivos y con su entorno. Para exemplificar la característica subjetiva del ruido respecto de otros contaminantes, pensemos en la música emitida por un concierto en la vía pública. Ésta podría ser disfrutada por los espectadores y al mismo tiempo ser un contaminante para los vecinos en las inmediaciones.

Las personas afectadas por la contaminación acústica pueden ser trabajadores en el ámbito de su trabajo, ciudadanos al interior de sus viviendas, usuarios de los medios de transportes públicos o privados, transeúntes, etc. Por lo general, las fuentes de ruido causantes de la contaminación no pueden ser controladas por el afectado, y en la gran mayoría de los casos estas fuentes de ruido se deben a algún tipo de actividad humana.

No sólo los seres humanos nos vemos afectados por la contaminación acústica, la fauna también es víctima de esta forma de agresión. Muchas especies animales poseen códigos de comunicación basados en la acústica. Estos mecanismos biológicos pueden verse afectados por la contaminación acústica que causa la actividad del hombre. Incluso en especies en las cuales el ruido no interfiere sus formas de comunicación, pueden tener lugar otros efectos adversos sobre los ecosistemas, lo que con frecuencia se manifiesta a través de los cambios en el comportamiento de las especies.

El crecimiento demográfico, la industrialización, el aumento de la movilidad de las personas y la conglomeración en los núcleos urbanos, son factores que incrementan la contaminación acústica. Estas causas provocaron que en el último siglo se hayan elevado mucho los niveles de ruido. En vistas de esto, se han empezado a tomar una serie de medidas políticas, económicas y sociales para luchar contra la contaminación acústica. Algunas de estas acciones

incluyen la redacción de normativa que establece procedimientos de medición y análisis del ruido, la elaboración de legislación que regula los máximos niveles sonoros admisibles en los diferentes ámbitos de la sociedad y define las sanciones pertinentes; la creación de mecanismos de fiscalización; la proliferación de los ámbitos y recursos para la investigación en materia de ruido; la creación de espacios de debate e intercambio científico para los distintos actores que conforman las disciplinas relacionadas con el ruido y la contaminación acústica; el desarrollo de nuevas tecnologías, el trazado de mapas de ruido; etc.



Fig. 2.6: Tránsito vehicular, la principal fuente de contaminación acústica urbana.

A pesar de todos los avances mencionados, el ruido sigue siendo un contaminante de gran magnitud, sobre todo en las grandes ciudades y en ciertos ámbitos laborales e industriales. Los efectos de la contaminación acústica sobre los seres vivos son alarmantes y aún están muy poco difundidos. Resta mucho por investigar en este tema y mucha acción por realizar en materia de gestión y educación para reducir aceptablemente la contaminación acústica.

## 2.4. AUDICIÓN Y NOCIONES DE PSICOACÚSTICA

### 2.4.1. FISIOLOGÍA DEL OÍDO HUMANO

El oído es el mecanismo receptor y transductor del sonido que tenemos algunos seres vivos. El oído humano es un complejo y preciso sistema biológico que funciona en base a principios acústicos, mecánicos y eléctricos. Aún no se conoce en forma acabada varios aspectos relativos a su funcionamiento. En esta sección se realizará una breve revisión de su anatomía y de sus funciones básicas.

El oído posee tres etapas de transducción claramente diferenciadas: *oído externo, medio e interno*.

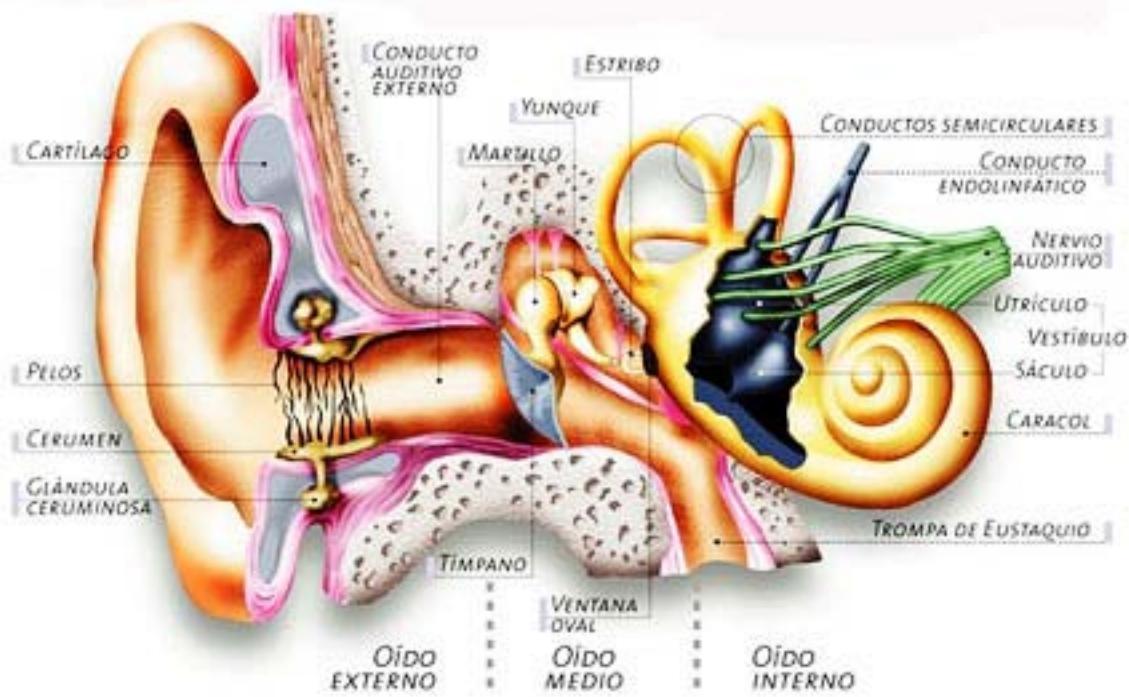


Fig. 2.7: Corte longitudinal del oído humano.

#### 2.4.1.1. El Oído Externo

El oído externo consta del pabellón auditivo (comúnmente llamado oreja) y el canal auditivo externo. En el oído externo el sonido es propagado en forma aérea. Los pabellones auditivos ayudan a localizar los sonidos en el espacio y, por medio de reflexiones dirigen el sonido hacia el canal auditivo, incrementando así su nivel. También juegan un papel importante en la adaptación de impedancias entre el aire y el timpano.

El canal auditivo externo conduce las ondas sonoras hasta el timpano y también “*colorea*” la señal brindando mayor sensibilidad en las frecuencias necesarias para la comprensión de la voz humana. Esto se debe a que se comporta aproximadamente como lo hace un tubo abierto en un extremo (en el Capítulo 5 se estudiará la influenciapectral del pabellón y canal auditivo con más detalle). Además, el canal auditivo externo cumple la función de proteger a la *membrana timpánica* (*timpano*).

#### 2.4.1.2. El Oído Medio

El oído medio está constituido por el timpano, la cavidad del oído medio (o *caja timpánica*) que contiene la cadena de huesosillos formada por el *martillo*, *yunque* y *estribo*, las *trompas de eustaquio* y por pequeños músculos tensores. Las ondas sonoras provocan que la membrana timpánica vibre. El timpano transforma la energía acústica aérea en vibración mecánica. El aire contenido en la cavidad del oído medio contribuye a que la membrana timpánica pueda deflectarse correctamente ante la presencia de las ondas sonoras y luego retornar a su posición de reposo. La presión al interior de la cavidad del oído es regulada por las trompas

de eustaquio, las cuales consisten de conductos que unen el oído medio con el exterior por medio de las cavidades bucal y nasal. Las trompas de eustaquio compensan la presión de la caja timpánica cuando son abiertas, lo que sucede al tragarse y al bostezar.

El sonido es propagado en forma mecánica por los tres huesosillos, los que producen una leve amplificación en una razón de 1,3, debido a su efecto de “palanca” (Miyara, 2000). El estribo, último de los huesosillos del oído medio, transmite la vibración mecánica a través de la *ventana oval* hacia el oído interno. La superficie de la ventana oval es aproximadamente 15 veces más pequeña que la del tímpano. Esta diferencia entre ambas membranas produce un incremento de la presión sobre la membrana oval amplificando aún más el sonido que ingresa al oído interno. Todo el sistema de transmisión y amplificación del oído medio, desde el tímpano hasta la ventana oval, funciona como un adaptador de impedancias entre la baja impedancia acústica del aire y la alta impedancia acústica del fluido contenido en el oído interno.

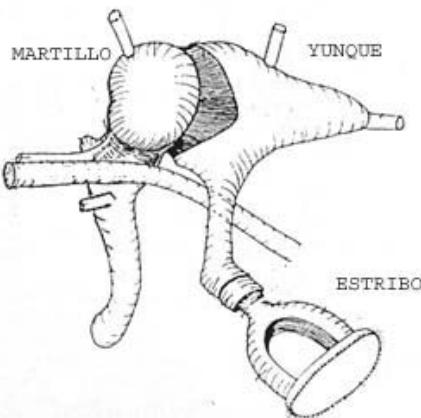


Fig. 2.8: Cadena de huesosillos del oído medio: martillo, yunque y estribo (Gelfand, 1998).

#### 2.4.1.3. El Oído Interno

El oído interno está formado por la *cóclea* y por los *canales semicirculares*. Estos últimos constituyen el sistema encargado del equilibrio. La cóclea es el mecanismo más complejo que posee la audición humana y posiblemente uno de los sistemas mecánicos más sofisticados de la fisiología humana. La cóclea posee forma de espiral (por eso es también denominada *caracol*) y está encargada de transformar la energía acústica en impulsos eléctricos, que son conducidos por las vías neuronales hacia el cerebro. En la Fig. 2.9, mediante un corte transversal de la cóclea se puede observar su complejidad anatómica (sin embargo en este texto sólo se mencionarán las componentes necesarias para comprender su funcionamiento básico). El largo de la cóclea estirada es de 35 mm aproximadamente y su diámetro medio es de 2 mm (Miyara, 2000). La cóclea posee tres conductos llamados *rampa vestibular*, *rampa coclear* y *rampa timpánica*. La rampa vestibular y la rampa timpánica están unidas en el extremo de la cóclea, denominado *helicotrema*. Estos dos últimos conductos contienen un fluido denominado *perilinfá*, mientras que la rampa timpánica contiene *endolinfá*.

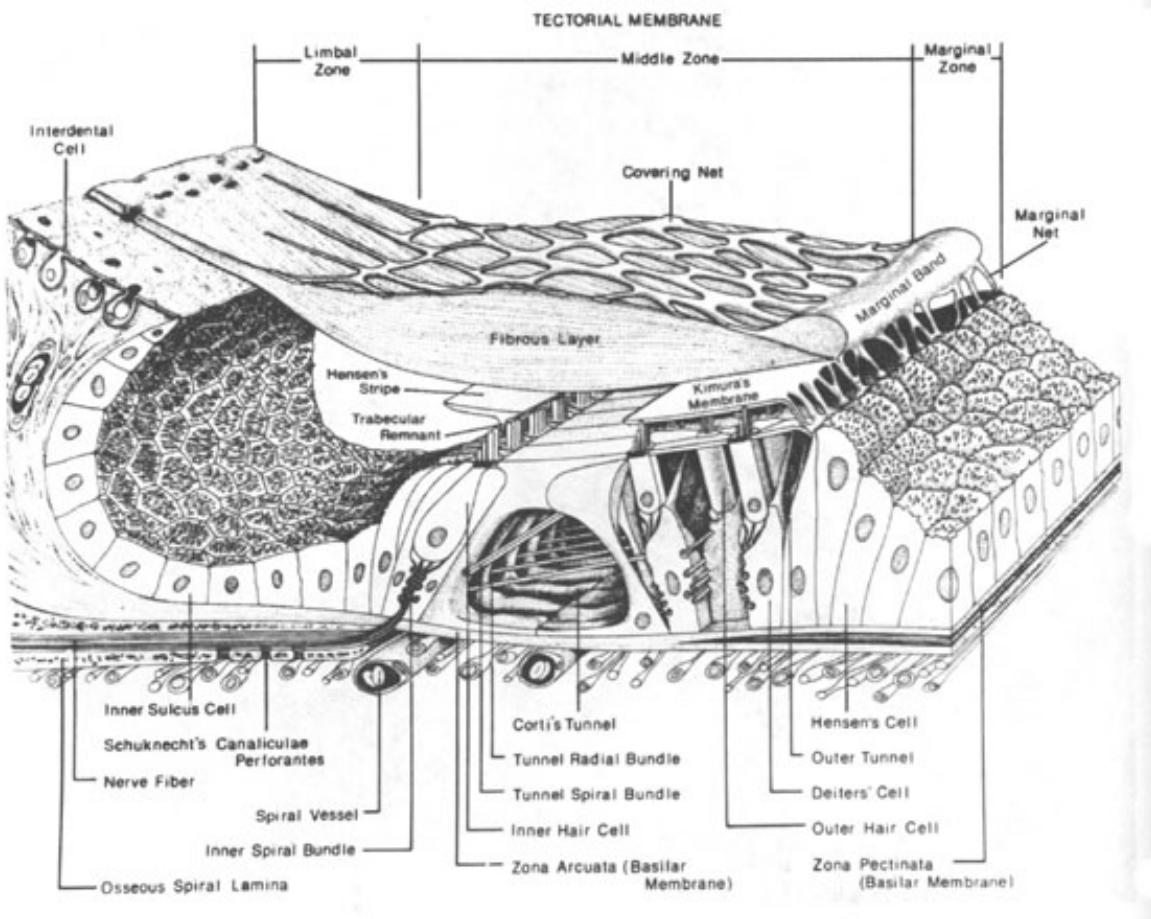


Fig. 2.9 : Corte transversal de la cóclea (Gelfand, 1998).

La onda sonora ingresa a la cóclea debido a la vibración de la ventana oval (ver Fig. 2.7), luego se propaga por los fluidos inter-cocleares hasta ser absorbida. Entre las rampas vestibular y coclear se sitúa la *membrana basilar*, que es un preciso sistema de vibración mecánica. La membrana basilar tiene un largo aproximadamente igual al de la cóclea estirada y su ancho y rigidez varían en sus distintos puntos. Cuanto más cerca está de la ventana oval (comienzo de la cóclea), más angosta y más rígida es la membrana basilar. Al alejarnos de la ventana oval hacia el interior de la cóclea, ésta aumenta su ancho y disminuye su rigidez. En las zonas de la membrana basilar que poseen mayor rigidez y menor tamaño, esta membrana resonará en frecuencias mayores que en las partes de mayor tamaño y menor rigidez. Debido a que estas dos variables, sección transversal y rigidez, varían a lo largo de la membrana, cada zona resonará en distintas frecuencias. En la zona de la membrana basilar donde se produce la resonancia para una determinada frecuencia, se producirá la amplitud máxima de oscilación. En ese punto la energía de la onda acústica será absorbida.

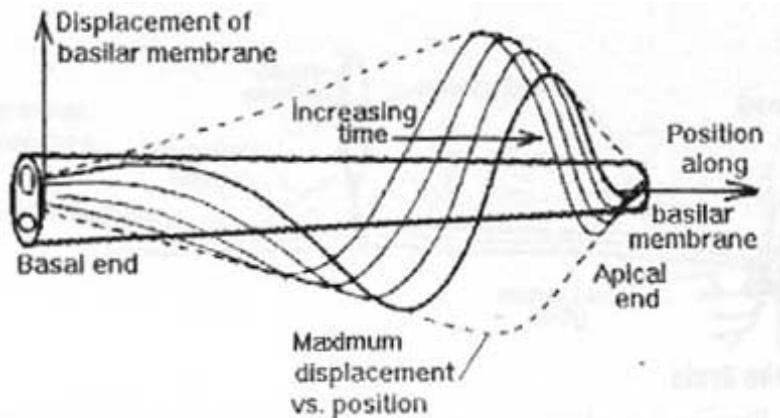


Fig. 2.10: Oscilación de membrana basilar en presencia de un estímulo acústico (Cook, 1999).

Entonces, para cada frecuencia sonora existe una zona particular de la membrana basilar donde ésta es captada y transducida. Por ello, la cóclea es un complejo mecanismo biológico que puede descomponer una onda acústica en toda sus componentes espectrales (por esta razón en ocasiones se dice que nuestro oído puede “calcular la transformada de Fourier”).

La membrana basilar está recubierta de *células ciliadas*, que son las encargadas de la transducción mecánico-eléctrica. El conjunto de estas células situadas sobre la membrana basilar es denominado *órgano de Corti*. Las células ciliadas tienen su base sobre otra membrana, denominada *membrana tectoria*.

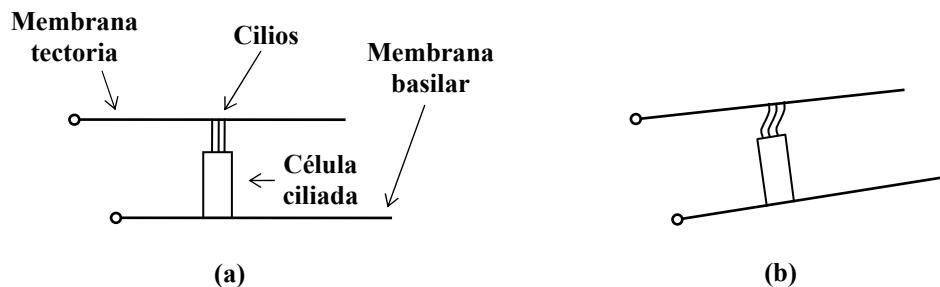


Fig. 2.11: Esquema de célula ciliada en reposo (a) y estimulada (b) (Miyara, 2000).

Cuando la membrana basilar oscila producto del estímulo acústico, las células ciliadas son excitadas y se flexionan. Existen células ciliadas internas y externas, se estima que existen aproximadamente 3500 células ciliadas internas, formando 40 terminales y 12.000 células ciliadas externas agrupadas en 140 terminales (Moore, 2003). Debido al movimiento de las células ciliadas (provocado por la oscilación de la membrana basilar respecto a la membrana tectoria), se generan impulsos eléctricos.

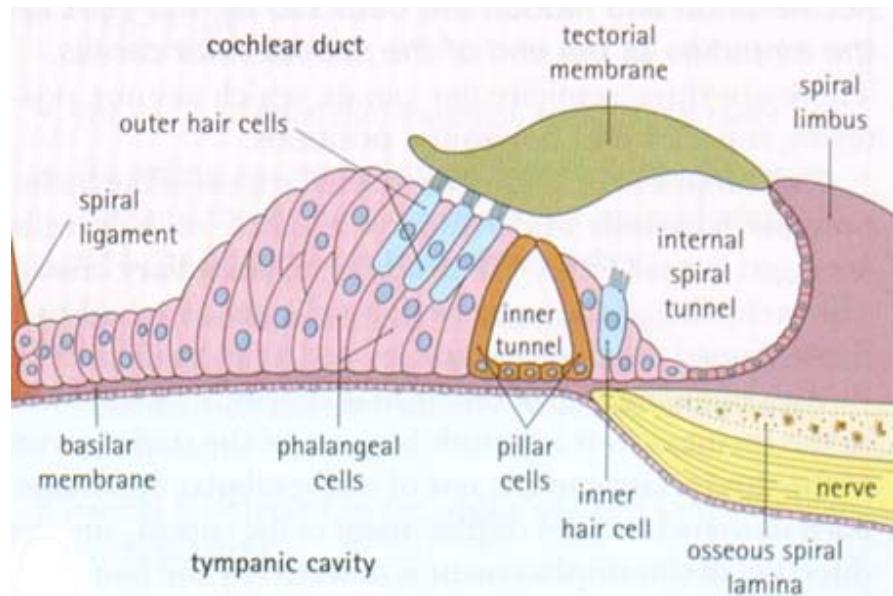


Fig. 2.12: Esquema de corte transversal de la cóclea. (Stevens – Lowe, 1999)

Las células ciliadas externas, además de su rol transductor, juegan un papel activo en la audición. Estas células poseen pequeños músculos. Cuando las células son excitadas, estos músculos ejercen una fuerza sobre la zona de la membrana basilar donde se ubican. Esta fuerza funciona como una retroalimentación, que vuelve a entregar energía al sistema vibrante en el área correspondiente a la frecuencia recibida. Esta acción de las células ciliadas externas produce una resonancia que puede ser captada por pequeños micrófonos aún hacia afuera del tímpano (por medio de sondas situadas en el canal auditivo externo). Estas radiaciones del oído son denominadas *otoemisiones* y en los últimos años se han comenzado a utilizar como una técnica objetiva de evaluación de la audición.

#### 2.4.1.4. De la Cóclea al Cerebro

Luego de la transducción realizada por las distintas zonas del órgano de Corti, la información acústica ya descompuesta en todos sus componentes de frecuencia, viaja en la forma de señales eléctricas por las vías nerviosas (*nervio auditivo*) hacia el cerebro.

El nervio auditivo, como todos los nervios, tienen un comportamiento similar a los cables eléctricos: conducen impulsos eléctricos (llamados *potenciales de acción*). Estos potenciales de acción son señales eléctricas codificadas según su disposición en el tiempo. El nervio auditivo posee muchas fibras que conectan las células ciliadas con las *neuronas* dedicadas a la audición en la corteza cerebral. Cada neurona posee una frecuencia característica a la cual tendrá su mayor sensibilidad (tarea sincronizada con las células ciliadas del oído interno). En las frecuencias aledañas a la frecuencia de mayor sensibilidad (o menor *umbral de acción*), las neuronas también recibirán información, pero con umbrales mayores (las neuronas pierden sensibilidad más abruptamente hacia las altas frecuencias que hacia las bajas).

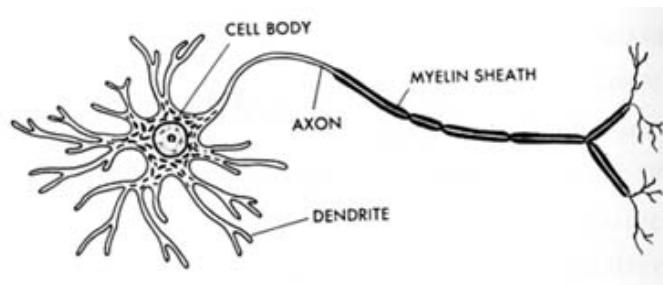


Fig. 2.13: Anatomía de una neurona.

Si se estimula el oído con un ruido de banda ancha, serán muchas más las fibras del nervio auditivo por las que se transmitirán potenciales de acción que si se lo estimula con tonos puros o bandas estrechas de ruido.

#### 2.4.2. MECANISMOS DE AUTOPROTECCIÓN DEL OÍDO

El oído posee algunos mecanismos por los cuales se protege de agentes externos. La mayor protección contra el ruido la constituye el *reflejo estapedial* (también denominado *reflejo auditivo*). Este reflejo consiste en la contracción del músculo *estapedio* y del músculo tensor del tímpano (o músculo del martillo), ambos pertenecientes al oído medio. El estapedio es un diminuto músculo que termina en el cuello del estribo y al contraerse puede inhibir parcialmente el movimiento de éste (ver Fig. 2.8). Lo mismo puede decirse del músculo tensor del tímpano, rigidiza la membrana timpánica reduciendo la transmisión mecánica al oído medio. Esta acción conjunta atenúa entre 6 dB y 20 dB el nivel de presión sonora (NPS) que ingresa a la cóclea, y es efectiva bajo los 2000 Hz (Avan, 1987). Para que el reflejo auditivo se produzca, es necesario que el oído reciba un nivel sonoro que supere el umbral auditivo en 80 dB como mínimo. Pasado ese valor, el cerebro envía la orden de contracción a los músculos, los cuales reaccionan recién luego de un tiempo que oscila entre 20 y 150 ms luego de recibido el estímulo sonoro. La magnitud de la rigidización muscular se incrementa cuando el NPS del estímulo es elevado. Por otra parte, a medida que disminuye la frecuencia del estímulo que acciona el mecanismo, tanto el nivel requerido para producir el reflejo como la demora hasta que éste se produce, son mayores.

Durante el lapso comprendido entre la recepción del sonido de alta intensidad y la aparición del reflejo protector, el oído interno se encuentra más vulnerable (en especial a los sonidos de gran nivel con contenido en frecuencias bajas). Este período es lo suficientemente largo como para permitir el ingreso de la energía generada por ruidos impulsivos. Si percibimos una sucesión de impactos, el reflejo estapedial nos protegerá sólo a partir del segundo impacto. Si el primero de ellos contiene demasiada energía, entonces el tímpano puede desgarrarse. Este desgarro también es un mecanismo de protección ya que, de no ocurrir, esta gran carga de energía acústica alcanzaría al Órgano de Corti, arrasando con un buen número de células ciliadas de manera irreversible. En cambio, el tímpano tiene la capacidad de regenerarse. El reflejo estapedial también nos protege de nuestra propia voz, activándose en forma previa a su emisión. Sin él, un grito nuestro nos aturdiría. El reflejo auditivo es involuntario, sin embargo se estima que entre el 1 y 2 % de la población puede controlarlo, logrando atenuaciones mayores a 30 dB en bajas frecuencias (Kryter, 1985).

Otro mecanismo de protección del oído es la secreción de *cerumen* en el canal auditivo externo. Esta sustancia, por un lado protege al tímpano de polvo y partículas extrañas, y por el otro, puede constituir un medio de atenuación acústica. En condiciones de elevados niveles sonoros, la secreción de cerumen se incrementa y produce lo que se conoce popularmente como *tapón de cera* (Miyara, 2003).

También, el oído interno realiza un papel auto-protector. Cuando se perciben niveles sonoros elevados, el cerebro envía información nerviosa a las células ciliadas externas. Luego éstas empiezan a experimentar *contracciones lentas*, las cuales generan movimientos que se oponen a la oscilación de la membrana basilar. Al igual que en el caso del reflejo estapedial, la información demora en ir y regresar del cerebro, por lo cual los sonidos súbitos no alcanzan a ser detectados a tiempo.

Además de los mecanismos nombrados, existen otros que protegen al oído de agentes ambientales. Algunos de ellos son: las *trompas de eustaquio* (ver sección 2.4.1) que protegen al oído medio de los cambios de presión ambiente; la vellosoidad, que junto con el cerumen protegen del ingreso de partículas externas; y la curvatura del canal auditivo evita que los objetos grandes puedan alcanzar al tímpano (Miyara, 2003).

#### 2.4.3. UMBRALES AUDITIVOS

El umbral auditivo es el mínimo nivel sonoro al cual es detectable cada frecuencia en ausencia de otros sonidos. Los umbrales auditivos en función de la frecuencia se pueden medir en forma *binaural* o *monoaural*.

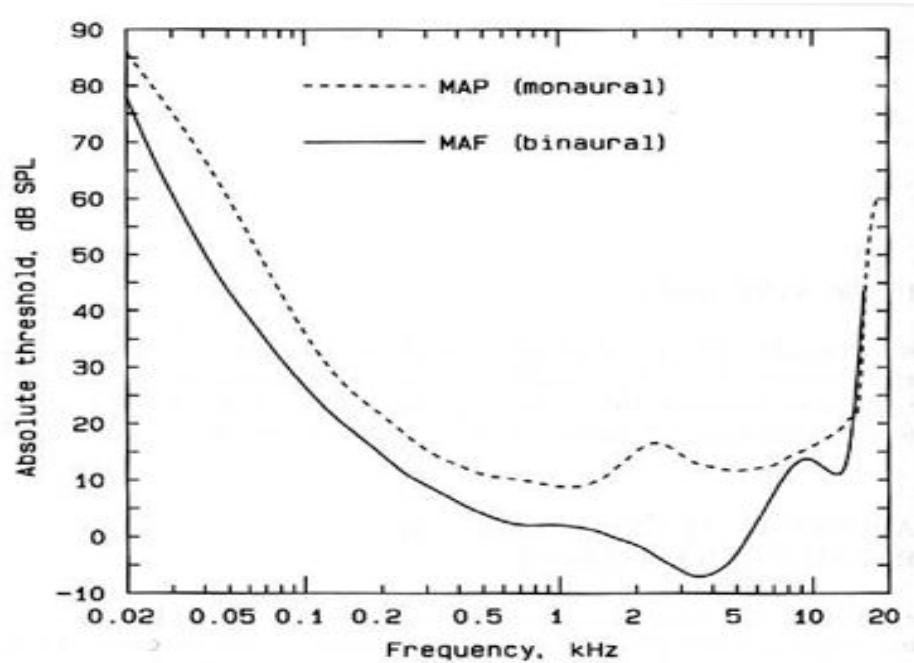


Fig. 2.14: Umbrales auditivos monoaurales (línea punteada) y binaurales (línea sólida) (Moore, 2003).

La medición binaural (denominada *MAF* “minimum audible field”) se realiza en cámara anecoica. Se miden los niveles en la posición del centro de sus 2 oídos, pero en ausencia del sujeto. El umbral monoaural (*MAP* “minimum audible pressure”) se mide mediante la introducción de un pequeño micrófono muy cerca de la membrana timpánica de un oído. En la Fig. 2.14 se muestran los resultados de ambos métodos para tonos puros aplicados a una población joven de audición normal<sup>1</sup> (Moore, 2003).

Los sonidos más agudos que la frecuencia superior audible se denominan *ultrasonidos*, y los más bajos que la frecuencia inferior audible se denominan *infrasonidos*. Otras especies del reino animal poseen rangos auditivos distintos del humano. Algunos animales escuchan rangos de frecuencia menores y otros mayores al nuestro, extendiéndose en algunos casos al rango de los infrasonidos (elefantes por ejemplo) y en otros casos al rango de los ultrasonidos (por ejemplo los delfines). En la Fig. 2.15 se muestran los rangos en frecuencia y nivel de la audición humana, de la música y de la palabra.

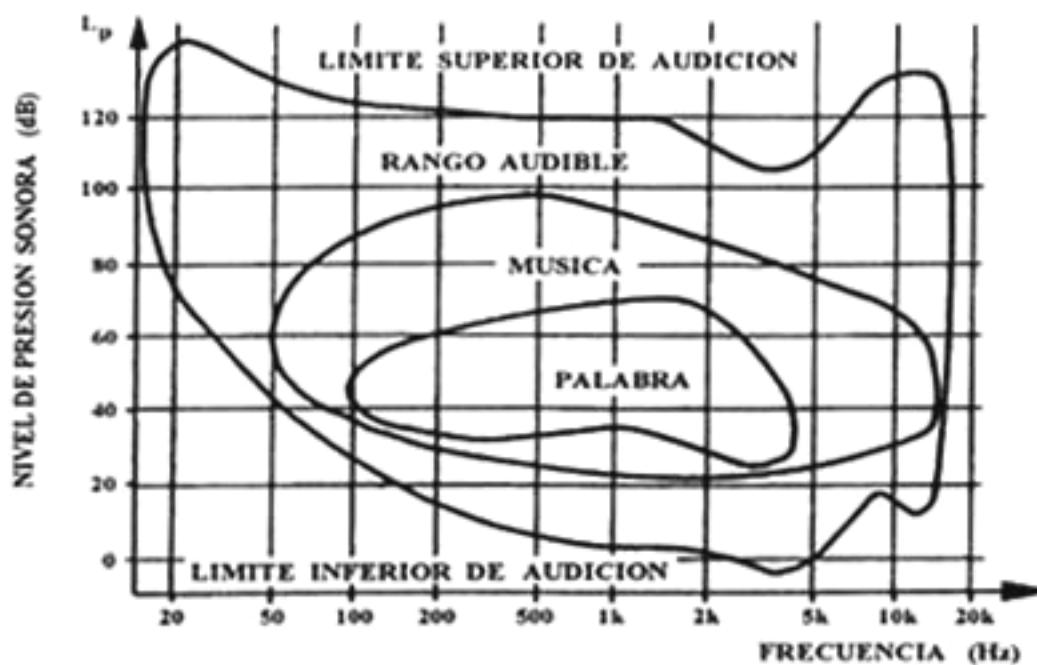


Fig. 2.15: Rangos dinámico y espectral de la audición humana, la música y la palabra (Recuero, 2002).

<sup>1</sup> Debe tenerse en cuenta que dentro de lo que se considera como audición normal pueden existir variaciones de hasta 20 dB por sobre o por debajo de la media para una frecuencia específica (Moore, 2003).

#### 2.4.4. ALTURA

La *altura* es la percepción que tenemos de “cuan agudo” o “cuan grave” es un sonido. Un sonido de mayor altura es más agudo mientras que un sonido de menor altura (más bajo) es más grave. La altura percibida de un sonido es la variable subjetiva relacionada con la frecuencia (la cual es una variable objetiva). El oído posee dos mecanismos por los cuales percibe la altura. Por un lado cuenta los ciclos de los tonos periódicos (este mecanismo es más efectivo en bajas y medias frecuencias). La otra forma de percibir la altura es mediante el lugar de la cóclea donde es absorbida la onda sonora (ver Fig. 2.16).

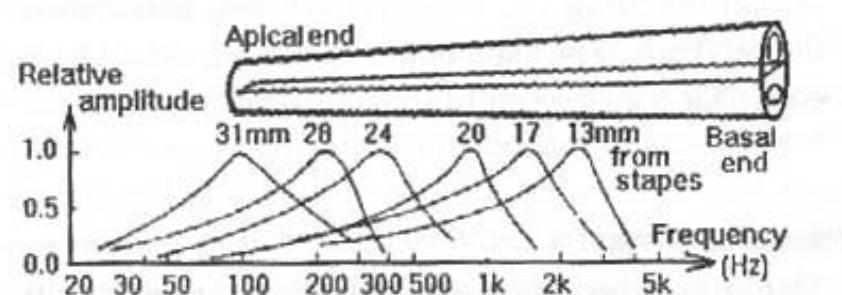


Fig. 2.16: Distancia de la ventana oval (*basal end*) a la cual se absorben las distintas frecuencias al interior de la cóclea (Cook, 1999).

Como se observa en la Fig. 2.16, las ondas sonoras de frecuencia baja se propagan por el fluido intercoclear más distancia que los sonidos agudos, los cuales son absorbidos más cerca de la ventana oval al inicio de la cóclea.

La altura percibida también depende del nivel sonoro. La Fig. 2.17 muestra la variación de la altura percibida respecto al NPS. Se observa que el incremento del nivel produce que los graves se perciban “más graves” y lo agudos “más agudos”.

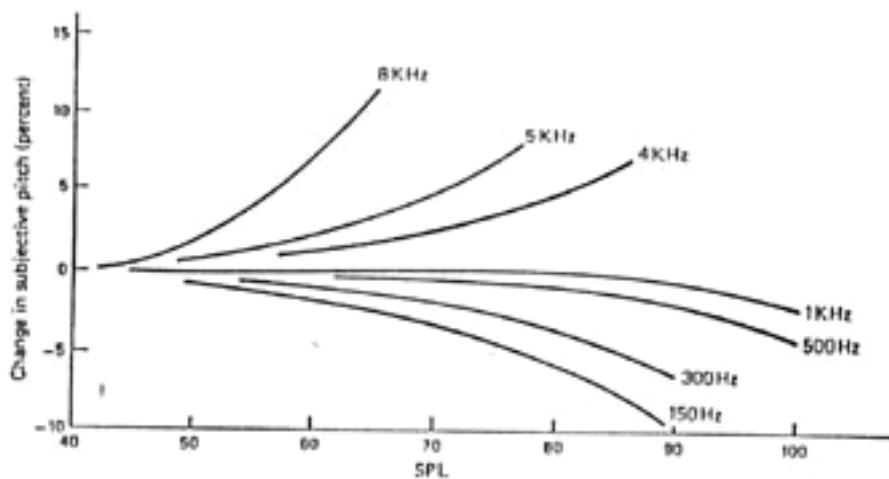


Fig. 2.17: Variación de la altura percibida de tonos puros en función del nivel sonoro.

#### 2.4.5. SONORIDAD

La *sonoridad* es el nivel sonoro subjetivo del sonido. Es la percepción que tenemos de la intensidad sonora (comúnmente llamada “volumen”). La variable objetiva del sonido que está íntimamente relacionada es el nivel de presión sonora (ver 2.2.2). Cuanto mayor es el nivel de presión sonora de un sonido, mayor sonoridad percibimos que éste tiene. Sin embargo, la sonoridad no depende exclusivamente del nivel de presión sonora, sino que como toda variable subjetiva, su dependencia de variables objetivas es más complejo.

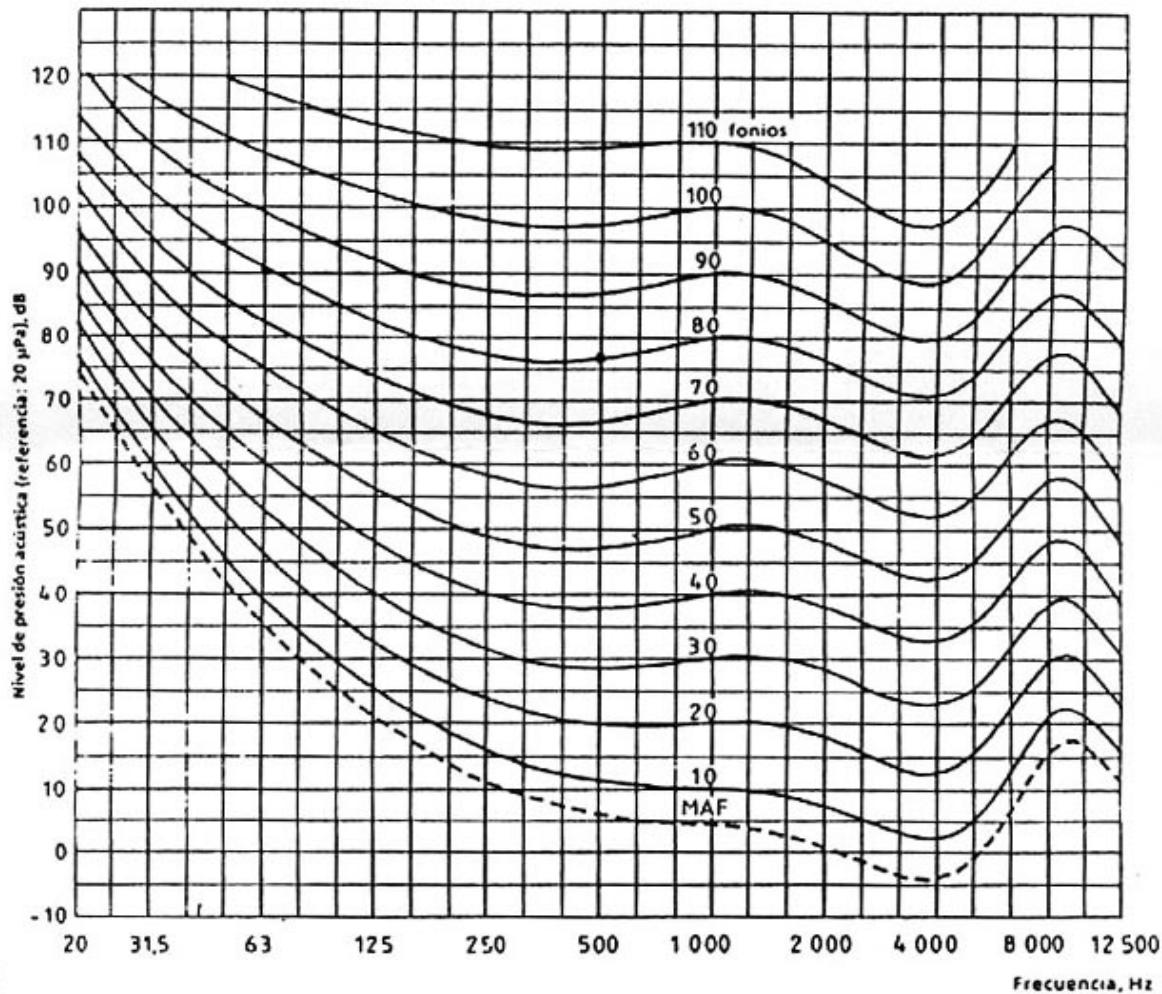


Fig. 2.18: Contornos de igual sonoridad (Iram, 1996).

Además del nivel de presión sonora, la sonoridad depende, entre otros factores, de la frecuencia y de la duración de un sonido. Como hemos visto cuando hablamos de los umbrales auditivos (sección 2.4.3), el oído humano posee sensibilidades distintas para cada frecuencia. Además, al incrementarse los niveles sonoros el aumento de la sonoridad no es igual en todas las frecuencias. Este fenómeno se observa claramente en los *contornos de igual sonoridad*. Se trata de un conjunto de curvas (Fig. 2.18) que fueron halladas por primera vez en Inglaterra por Fletcher y Munson, en 1933 (Fletcher, 1933). Los experimentos que dieron lugar al trazado de

estas curvas fueron realizados con tonos puros reproducidos a adultos con audición normal y se hicieron en condiciones de campo libre. La sonoridad percibida es la misma sobre todos los puntos de cada una de las curvas, de ahí el nombre de contornos de igual sonoridad (o *curvas isofónicas*). Para realizarse el estudio empírico que dio lugar a las curvas, los sujetos encuestados comparaban la sonoridad que percibían de cada tono, con un tono de referencia de 1000 Hz. Por esta razón, en la frecuencia de 1000 Hz el nivel de presión sonora (dB) coincide con el nivel de sonoridad.

El nivel de sonoridad es medido en *fonos* (también denominados *fonios o phones*). Cada una de las curvas de la Fig. 2.18 corresponde a un nivel de sonoridad dado. Se puede observar que el menor nivel de presión sonora al cual es percibida cada curva de sonoridad, se encuentra en torno a 4000 Hz. Esto se debe a que el oído tiene su mayor sensibilidad en esa zona del espectro. También puede observarse que la sensibilidad en frecuencias bajas es menor que en las frecuencias superiores. Sin embargo, esta diferencia de sensibilidad se hace menor al incrementarse los niveles sonoros. Por esta razón, se dice que la sonoridad no es lineal respecto al nivel sonoro (hecho bien notorio en frecuencias bajas). Debido a esta falta de linealidad que algunos equipos de audio poseen un circuito que incrementa las bajas frecuencias cuando los niveles sonoros de reproducción son bajos (usualmente denominado “loudness”, que significa sonoridad).

La sonoridad puede medirse en *sonos* (a diferencia del nivel de sonoridad medido en fono). La equivalencia entre los fonos y los sonos es:

$$\begin{aligned} 1 \text{ sono} &= 40 \text{ fonos} \\ 2 \text{ sonos} &= 50 \text{ fonos} \\ 4 \text{ sonos} &= 60 \text{ fonos} \\ \text{etc.} & \end{aligned}$$

Como se ve, por cada 10 fonos que se incrementa el nivel de sonoridad aumenta al doble la sonoridad. Esto puede expresarse en forma general como:

$$Sonos = 2^{\frac{fonos - 40}{10}}. \quad 2.14$$

Las curvas de sonoridad de Fletcher y Munson fueron revisadas y vueltas a trazar en varias oportunidades. Algunas de las revisiones más renombradas de las curvas isofónicas son las realizadas por Churcher y King en 1937 y las trazadas por Robinson y Dadson en 1956 (Gelfand, 1998). Sin embargo, no se han hallado diferencias significativas respecto a los resultados originales de 1933. Sin embargo, no parece ser erróneo suponer que los ancestros genéticos de las personas, la cultura y la edad tengan algún grado de influencia en el trazo de los contornos de igual sonoridad. Pero no abundan los estudios que comparan las curvas isofónicas de distintos grupos humanos.

Como se mencionó, la sonoridad de un tono también depende de su duración. Los sonidos más cortos son percibidos como más intensos que los de mayor duración. La Fig. 2.19 grafica este efecto para tonos de relativamente corta duración.

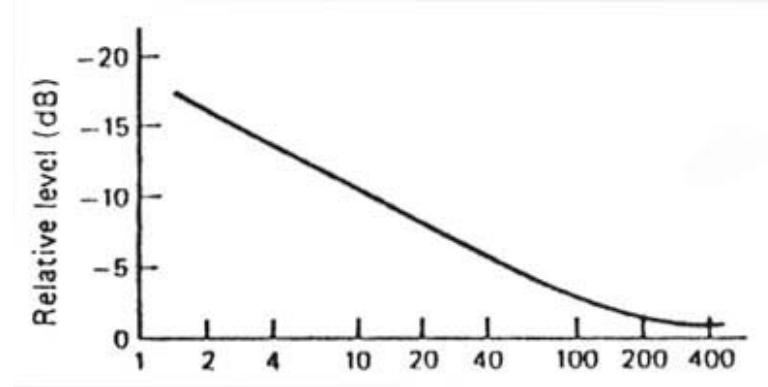


Fig. 2.19: Sonoridad relativa de un tono en función de su duración en milisegundos.

#### 2.4.6. TIMBRE

El *timbre* es la identidad de cada sonido, la expresión cualitativa de cómo “suena”. Tiene que ver con cómo percibimos el conjunto de las características físicas de una fuente sonora. El timbre, a diferencia de algunas variables subjetivas mencionadas, no es cuantificable. Por lo tanto no puede establecerse una correlación entre el timbre y una o más características del sonido. Sin embargo, el cambio de alguna de las variables objetivas del sonido puede modificar el timbre percibido.

Una analogía que podría ejemplificar el concepto de timbre, es el rostro humano. Éste es único en cada persona. Si modificamos la edad, el estado de ánimo o algún factor externo como la condición climática o la iluminación, el rostro se verá modificado pero su “identidad” será la misma. De igual manera, el timbre de un determinado instrumento musical de cuerdas por ejemplo, será característico del mismo a pesar de los matices que puedan dar la edad de la madera, la humedad del aire o la sala donde se ejecuta.

Obviamente, no basta con que dos instrumentos de naturaleza distinta ejecuten con igual sonoridad la misma nota para que suenen igual. Existen características propias de cada instrumento que influirán en el timbre: su principio de funcionamiento, su forma y dimensiones, algunas variables físicas como la rigidez y la densidad de los materiales, además de otras propiedades intrínsecas de los materiales, tan complejas como su estructura molecular.

#### 2.4.7. LOCALIZACIÓN DE LOS SONIDOS

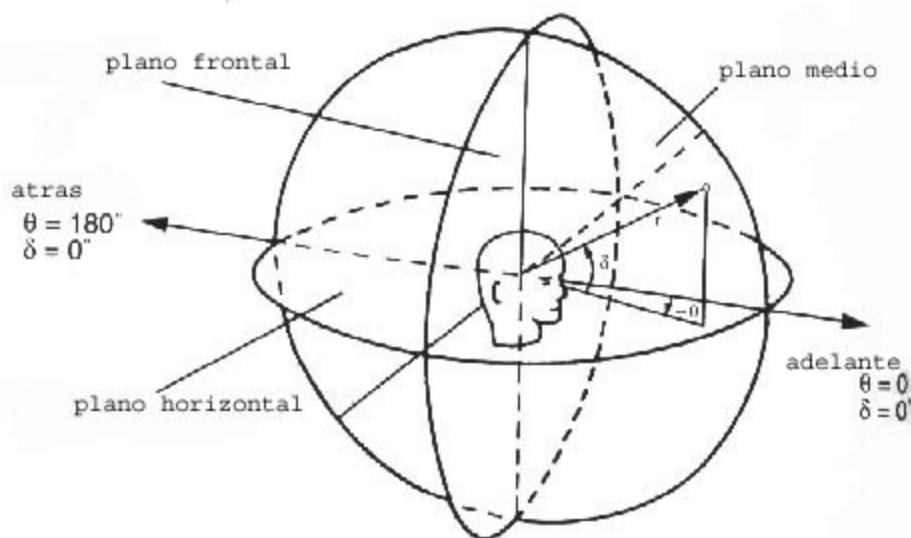


Fig. 2.20: Definición de planos para estudiar la espacialidad de los sonidos respecto a la cabeza humana (Moore, 2003).

El sistema auditivo cuenta con varias herramientas para identificar la procedencia espacial de los sonidos que recibe. Una de ellas es la diferencia de tiempo en que el sonido alcanza a ambos oídos. Debido a la *distancia interaural*, las señales en ambos oídos poseen diferencias de fase. Esta diferencia es utilizada para la detección de la procedencia del sonido. Este mecanismo es más efectivo en frecuencias bajas, debido que en frecuencias altas pueden producirse errores debido a la presencia de más de un semiciclo de señal entre ambos oídos. Sin embargo, si el ancho de banda del estímulo es lo suficientemente grande, el error es minimizado.

Otra herramienta que poseemos para la localización sonora es la diferencia de intensidades entre ambos oídos. Este efecto es más notorio en frecuencias altas y para fuentes sonoras cercanas, debido a que el arribo de sonidos provenientes de fuentes lejanas proporciona menor diferencia de niveles entre ambos oídos. Las frecuencias bajas experimentan mayor difracción alrededor de la cabeza, en cambio las altas producen una zona de sombra mayor. Esto produce una diferencia de niveles entre ambos oídos (la cual es mayor para posiciones laterales de la fuente que para los puntos frontales).

Sin embargo, las diferencias de tiempo y nivel no son suficientes para identificar la posición exacta de la fuente sonora. La diferencia de tiempo es la misma para todos los puntos que forman un cono con su vértice en el oído (ver Fig. 2.22). Para poder identificar la posición de la fuente dentro de este cono, el cerebro cuenta con el moviendo de la cabeza. Si la rotamos en torno a un eje vertical una cantidad “x” de grados y la fuente sonora parece rotar en la misma cantidad, entonces se concluye que ésta se encuentra en el plano horizontal. Si no percibimos una rotación de la misma, entonces concluimos que está justo debajo o sobre nosotros. Adicionalmente, en el caso de los sonidos complejos, la rotación de la cabeza (o bien de la

fuente) produce cambios espectrales en el sonido recibido en cada oído. Estos cambios son utilizados para la localización.

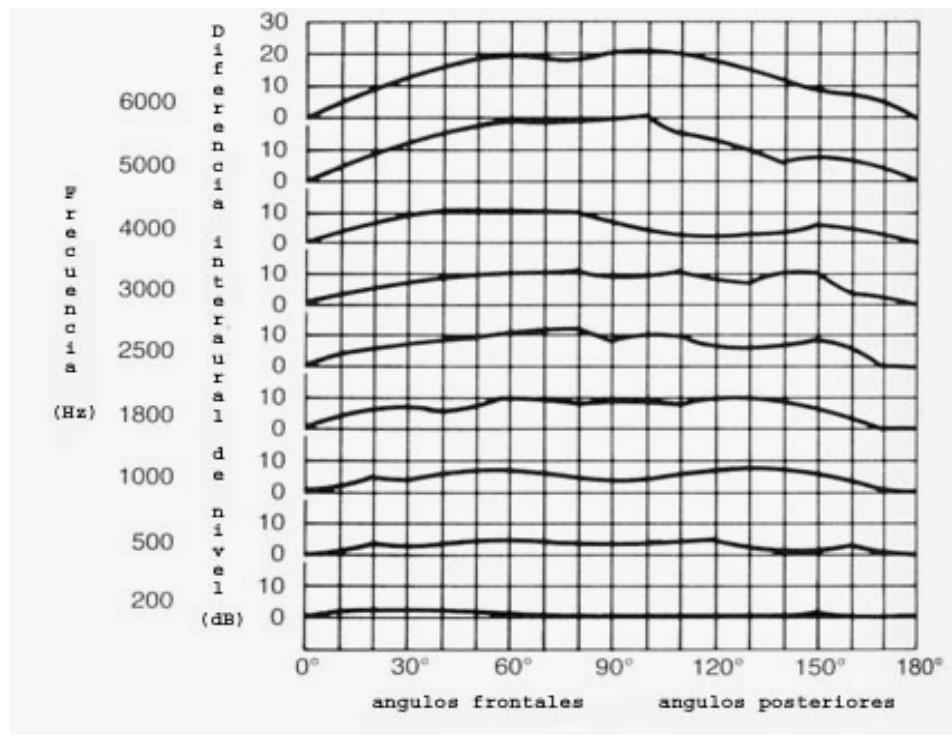


Fig. 2.21: Diferencia interaural de nivel sonoro para distintas frecuencias en función del ángulo de recepción del sonido (Moore, 2003).

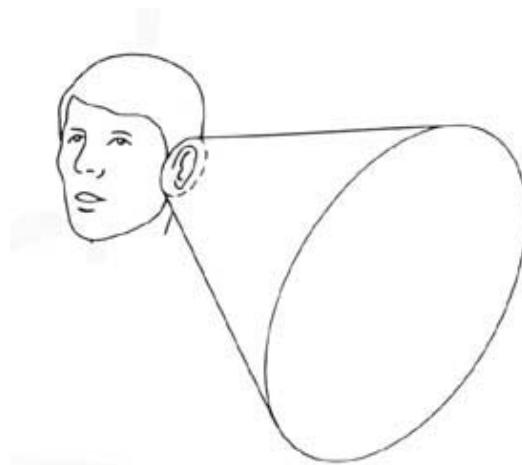


Fig. 2.22: Cono de localización de los sonidos. Los puntos situados sobre cada circunferencia definida por el manto están equidistantes del oído (Moore, 2003).

El pabellón auditivo se comporta como un filtropectral complejo. Según cuál sea la dirección de procedencia de un sonido, la oreja “colorea” la señal de un modo distinto. Por ejemplo, una misma cavidad del pabellón auditivo podría alterar el sonido recibido entre 6 kHz y 10 kHz, según cual sea el ángulo de incidencia de dicho sonido (Blauert, 2001). La oreja es

particularmente importante para la localización de sonidos que se encuentran en el plano medio (ver Fig. 2.21), o sea equidistantes de ambos oídos.

La difracción y reflexión sonora producidas en la cabeza y hombros también forman parte de este proceso espectral sobre el señal, denominado *función de transferencia de la cabeza y su entorno* (“head-related transfer function”) (Moore, 2003).

Un estudio realizado por Wettchurek en 1973 halló que la habilidad que poseemos para estimar la procedencia de sonidos de banda ancha (ruido blanco) tiene una precisión de  $\pm 4^\circ$  en direcciones frontales y de  $\pm 10$  sobre la cabeza. Sin embargo, para sonidos que carecen de contenido en frecuencias altas (sobre 4000Hz aproximadamente), esta habilidad es inferior (Blauert, 2001).

#### 2.4.8. EFECTO CÓCTEL

El efecto *cóctel* es la capacidad de poder sintonizar y prestar atención a una de las fuentes sonoras que son percibidas simultáneamente. Su nombre ilustra bien el significado del efecto. Si estamos en una cóctel donde se desarrollan varias conversaciones simultáneamente en posiciones del espacio distintas, entonces podemos elegir prestar atención a una o a otra. Sin embargo, para que ello suceda deben cumplirse determinadas condiciones acústicas del recinto y distancia de la fuente. Además, para que el efecto cóctel pueda tener lugar, el cerebro deberá filtrar la señal útil entre toda información acústica recogida por los oídos. Para la sintonización espacial de la fuente deseada, el centro auditivo del cerebro utiliza las diferencias de tiempo y de nivel del sonido a un oído respecto al otro (ver 2.4.7) (Pollack – Pickett, 1957).

#### 2.4.9. EFECTO HASS (O PROCEDENCIA)

El retardo de algunos milisegundos de una fuente sonora respecto a otra idéntica puede producir lo que se denomina *efecto Hass* o *efecto procedencia*. La fuente sonora que es retardada se percibe con un nivel inferior. La Fig. 2.23 indica la diferencia de niveles con que se perciben las dos fuentes sonoras cuando se aplica un retardo a una de ellas.

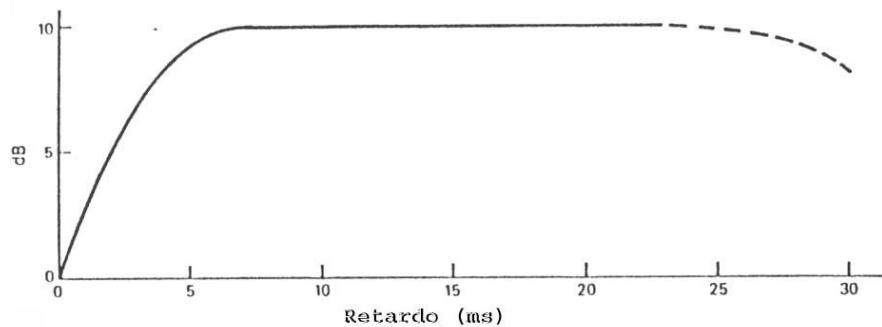


Fig. 2.23: Efecto Hass: diferencia de nivel percibido en función del tiempo de retardo entre dos fuentes sonoras.

El efecto corresponde a una diferencia aproximada de 10 dB para retardos comprendidos entre 5 y 25 ms.

#### 2.4.10. BANDAS CRÍTICAS

En 1940, Fletcher encontró que al aumentar el ancho de banda de un ruido se reducía la sonoridad de un tono puro centrado en la misma banda que sonaba simultáneamente. Este fenómeno se seguía produciendo al aumentar el ancho de banda pero sólo hasta cierto límite, más allá del cual no continuaba reduciéndose la sonoridad del tono oculto por el ruido. A este ancho de banda límite se lo denominó *banda crítica*. Este experimento fue confirmado en reiteradas oportunidades hasta la actualidad y dio lugar al conocimiento de que el oído se comporta como un banco de filtros pasa-banda, donde la energía acústica es sumada dentro de cada uno de ellos. Los filtros auditivos se solapan unos con otros, como se muestra en la Fig. 2.24. Los diferentes *filtros auditivos* están asociados a las distintas zonas de la membrana basilar.

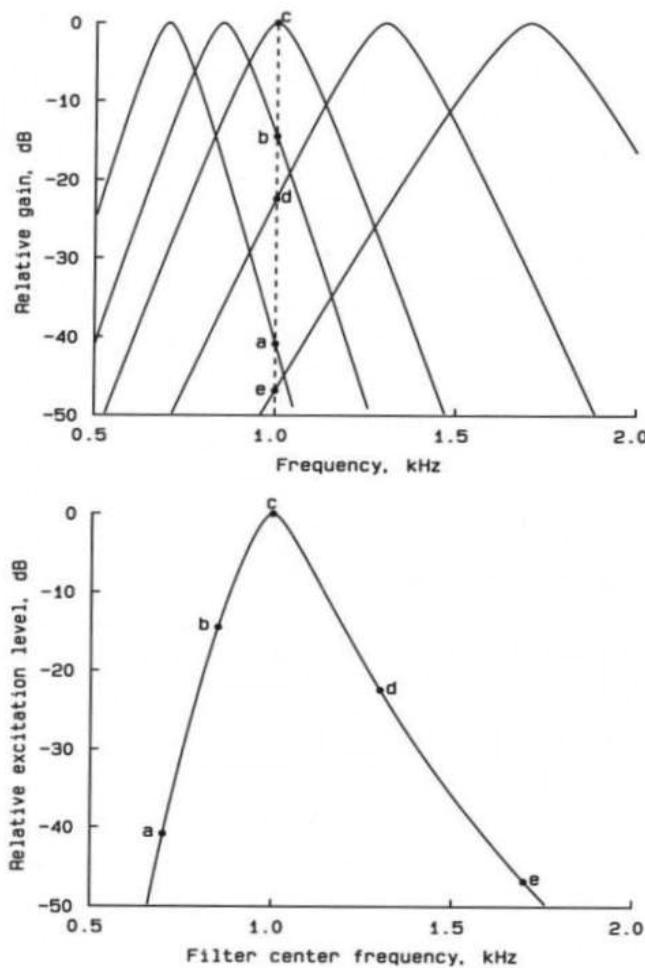


Fig. 2.24: Filtros auditivos (a) y patrón de enmascaramiento construidos a partir de ellos (b) (Moore,2003).

Por ejemplo, el ancho de banda del filtro auditivo en torno a los 1000 Hz es de 160 Hz. Pero el ancho de banda de los filtros se incrementa con la frecuencia. La Figura 2.25 compara este incremento respecto del de los filtros de octava y tercio de octava utilizados habitualmente en la acústica.

Si dos ondas sinusoidales se encuentran dentro de una banda crítica muy cercanos uno del otro (diferiendo sólo en unos pocos ciclos), escucharemos un tono único de amplitud oscilante. La frecuencia de esta oscilación está relacionada con la separación en Hertz de ambos tonos. Este efecto se denomina *batido* o (“*beats*”). Si los tonos son separados aún más, podemos escuchar un sonido correspondiente a la diferencia de ambos tonos, lo que puede percibirse como una vibración o “aspereza”. Estos fenómenos de interacción tienen lugar dentro de la banda crítica, pero fuera de ella se puede distinguir la independencia de ambos tonos.

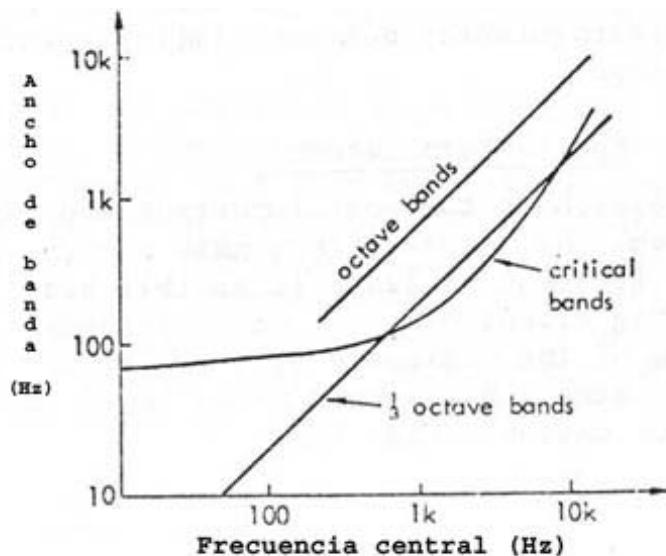


Fig. 2.25: Ancho de banda de los filtros auditivos en función de su frecuencia central.

## CAPÍTULO 3

# EFFECTOS DEL RUIDO EN EL SER HUMANO

### 3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudiarán los efectos adversos que el ruido provoca en las personas. No todo sonido puede ser considerado como *ruido*, debido a que algunos de ellos son inocuos y otros son agradables (o hasta incluso placenteros, como puede ser el caso de la música predilecta, la voz de algunas personas, los sonidos de entornos naturales, etc.). Cómo se explicó en la Sección 2.3.1, el concepto de ruido es subjetivo e involucra varios factores psicológicos y sociales. Sin embargo, usualmente se define el ruido como un *sonido no deseado*. Esta definición es didáctica, pero en ciertos casos puede resultar insuficiente. Esto puede reflejarse en el hecho de que existen efectos del ruido de los cuales no somos conscientes. Este tema se abordará en detalle en el presente capítulo. No podemos afirmar que todo *ruido* es percibido como un sonido “no deseado” en el momento de la exposición. Una persona que ignora las consecuencias que tiene la exposición al ruido, podría no considerar como *ruido* a cierto sonido, aunque de todas maneras éste provoque efectos adversos sobre su salud. Por tal motivo, en este texto se considerará *ruido* tanto a los sonidos no deseados, como a cualquier clase de onda acústica que provoque efectos adversos sobre la salud o el bienestar de las personas, ya sea en forma consciente o no. Estas consecuencias negativas de la exposición al ruido serán denominadas en término genérico como “*efectos del ruido*”. Paralelamente, cuando usemos genéricamente el término “*ruido*”, entenderemos que se trata de cualquier sonido capaz de producir algún *efecto* humano adverso. Aunque en este capítulo se harán algunas menciones sobre las características del estímulo sonoro, el énfasis estará puesto en el estudio de las respuestas a dichos estímulos. En el Capítulo 5 se estudiarán las propiedades acústicas de tales estímulos, en especial sus cualidades espectrales.

La diversidad de efectos provocados por el ruido en el ser humano es muy amplia. Algunos de ellos han sido identificados y son cuantificables, mientras que otros aún no han sido claramente determinados. Existen varios problemas prácticos que hacen muy lenta la extracción de conclusiones que permiten el avance del conocimiento en este campo.

Muchas veces nos encontramos con la dificultad de cuantificar variables subjetivas como, por ejemplo, la molestia o el estado de ánimo. La elección de escalas representativas, la interpretación de éstas por parte de los encuestados y la influencia de las variables modeladoras son algunas de las dificultades más comunes.

Por otra parte, en algunas ocasiones se deben medir reacciones fisiológicas que requieren del empleo de tecnologías caras, poco disponibles o incluso aún no existentes. Un ejemplo de ello es el registro de los patrones de vibración de algunos órganos internos del ser humano.

Otro impedimento que acota la posibilidad de extraer conclusiones generales en un estudio empírico, es la existencia de múltiples factores distintos al ruido pero capaces de provocar los mismos síntomas. Para imaginarnos esto, veamos el siguiente caso: debido a que el ruido es un factor causante de estrés, durante una exposición sonora o después de ella se manifestarán los síntomas propios del estrés. La pregunta que surge es: ¿Cómo saber si el estrés manifestado por el individuo fue causado por el ruido o por algún otro de los múltiples factores generadores de estrés?

Como consecuencia de la dificultad que existe para determinar con precisión la relación causa-efecto, muchos de los efectos del ruido estudiados en este capítulo pueden ser determinados sólo en forma probabilística. Un ejemplo de ello podría ser: “*Un estudio realizado con 1826 trabajadores expuestos cotidianamente a más de 85 dB(A) y con 5825 trabajadores expuestos a menos de 75 dB(A), mostró que las úlceras intestinales y estomacales eran 5 veces más frecuentes en el primer grupo que en el segundo*” (Kryter, 1985).

El lector observará que algunos de los efectos que se describen en este capítulo son contradictorios en apariencia, ya que se registran incrementos y decrementos de la misma variable frente a la exposición sonora. La óptica que aclara esta dualidad reside en que, en el presente capítulo está vertida la información de todos los efectos provocados por el ruido, pero no se particulariza el contexto en el que fueron hallados ni las características del estímulo sonoro. Así, una misma variable fisiológica o psicológica podría tener rangos de acción diferenciados en función de los niveles sonoros, de la frecuencia, o bien dependiendo de otros factores endógenos.

Generalmente, en los estudios *in situ* se dificulta el control de todas las variables involucradas y además se requieren largos períodos de toma de datos. Por otra parte, los estudios en laboratorio permiten un mayor control de las variables exógenas, pero enfrentan las ineludibles consecuencias de trabajar en un medio artificial para los individuos. Este medio sin duda predispone de manera diferente a las personas que su ambiente cotidiano.

Además, someter a gente a exposiciones sonoras de prueba tiene límites que responden a la salud, a la ética y al derecho. En algunos países se realizan estudios empíricos en los que se otorga una remuneración económica a los individuos que acceden a participar en las pruebas requeridas. Este incentivo económico puede considerarse una retribución por su tiempo, o, en ciertos casos, una compensación por los posibles efectos perjudiciales provocados sobre el individuo (a causa de la exposición sonora).

Debido a los conflictos que ocasiona realizar estudios con seres humanos, se han realizado muchas experiencias utilizando poblaciones animales. Debido a que la legislación y la “exigencia ética social” que rige sobre la protección de la fauna en general es menos estricta que para el caso de las personas, estos trabajos permiten mayores períodos y niveles de exposición, por lo cual pueden conducir a conclusiones más acertadas. Sin embargo, como es de imaginarse, los resultados no pueden ser extrapolados en forma directa a los seres humanos.

Los autores e instituciones que publicaron en el tema, han clasificado los efectos del ruido de diferentes maneras. En el presente trabajo se optó por una visión integral, estructurando el análisis con una base lógica que busca considerar los fundamentos de la problemática. El lector al que está dirigido este texto no pertenece necesariamente al área de la salud, por lo cual se discutirá el tema en forma conceptual y se minimizará la terminología médica empleada. En los

casos en que sea necesario, se brindará la explicación pertinente (ya sea en el texto o en el glosario). Además, para facilitar la comprensión de algunos tópicos de la biología o la medicina por parte de estudiantes o profesionales de la ciencia ajenos a estas áreas, en algunos casos se han empleado analogías físicas, mecánicas o eléctricas.

Clasificaremos los efectos del ruido sobre las personas en tres grandes grupos: *efectos auditivos, efectos fisiológicos no auditivos y efectos psicosociales*. En varios casos, la línea que separa a estas tres categorías es difusa, ya que existen interacciones entre ellas. Las alteraciones psicológicas tienen un reflejo biológico y los efectos fisiológicos son posibles gestores de consecuencias psíquicas.

Históricamente, el efecto fisiológico derivado de la exposición al ruido más estudiado es la pérdida de la audición. Esto se debe a que es la patología más directa producida por el ruido, y por otro lado es measurable gracias a la tecnología médica y acústica desarrollada. Por este motivo, la bibliografía acerca de los daños auditivos, las técnicas de diagnóstico y rehabilitación, es extensa. Con el tiempo se han desarrollado ciencias de la salud abocadas a este tema, como es el caso de la otología y la audiología. Existen otras ciencias de la salud también involucradas con esta problemática, como la medicina laboral (gran parte de los trastornos auditivos se producen en ámbitos laborales). Sin embargo, actualmente no existen ramas desarrolladas de la medicina que se dediquen exclusivamente al estudio de los disturbios extra-auditivos provocados por la exposición al ruido. Una posible explicación de ello es que varios de los efectos fisiológicos producidos por el ruido se han investigado recién en los últimos años; o bien han sido estudiados anteriormente sin obtenerse resultados concluyentes.

## 3.2. EFECTOS AUDITIVOS

Dado que el oído es el principal órgano receptor de los sonidos, éste será el primer órgano afectado ante una sobrecarga acústica. Por este motivo, los efectos auditivos del ruido en general constituyen la más directa y cuantificable de las consecuencias del ruido en las personas. El exceso de presión sonora que llega al oído provoca pérdidas de sensibilidad auditiva temporales o permanentes. Además, a causa de la exposición al ruido puede experimentarse dolor en el oído. Por otra parte, la presencia de ruidos intensos oculta a sonidos de niveles inferiores (este fenómeno se denomina enmascaramiento y se abordará próximamente). En esta sección se estudiarán los efectos fisiológicos y funcionales<sup>1</sup> del ruido sobre el sistema auditivo.

<sup>1</sup> En medicina, la palabra “funcional” implica trastornos que no tienen una base anatómica. O sea, que afectan a la función pero no a la estructura.

### 3.2.1. PÉRDIDA AUDITIVA

La pérdida auditiva es el efecto del ruido que ha sido más investigado. La exposición a ruidos que contienen gran cantidad de energía acústica (en relación a las dosis tolerables) puede ocasionar desplazamientos de los umbrales de audición. Estos desplazamientos son ascendentes, es decir que luego de que éstos se produzcan, los sonidos requerirán de mayores niveles de presión sonora (NPS) para ser escuchados.

El mecanismo por el cual se producen estos desplazamientos es el siguiente: Durante una exposición sonora, los vasos sanguíneos del oído se contraen. Esta contracción reduce el paso del la sangre y por lo tanto llega menos oxígeno a las células ciliadas de la cóclea (en la Sección 2.4.1. se revisaron los conceptos fisiológicos de oído). Esta situación provoca un decremento en el proceso metabólico y las células ciliadas se fatigan. La fatiga implica que se requieren mayores niveles de estímulos externos para lograr una reacción. Y eso significa elevar los umbrales.

Los desplazamientos de los umbrales auditivos por exposición al ruido, pueden ser temporales o permanentes, éstos se conocen como *TTS* (“*temporal threshold shift*”) y *PTS* (“*permanent threshold shift*”), respectivamente. La exposición sonora a niveles elevados durante un cierto lapso de tiempo puede producir una pérdida temporal de la audición (TTS). La magnitud del TTS depende de la cantidad de energía total recibida por el oído (ambos oídos pueden experimentar distintos grados de TTS). En la Sección 2.3.3 se habló sobre la dosis de ruido, la cual es una cuantificación de la energía recibida en un lapso de 8 hrs. (basada en la duración de una jornada laboral). Esta dosis considera los niveles sonoros que recibe el oído durante la jornada y el tiempo que fue registrado cada uno de estos niveles. La normalización de esta definición de dosis de ruido brinda información sobre los tiempos aceptados de exposición, en función de los niveles sonoros.

Leq [dB(A)]	Tiempo de exposición por día		
	Horas	Minutos	Segundos
80	24,00		
85	8,00		
90	2,52		
95		47,40	
100		15,00	
105		4,70	
110		1,49	
115			29,12

Tabla 3.1: Tiempos máximos de exposición al ruido admisibles según la legislación chilena vigente (D.S. 594, 1999).

Una vez producido un desplazamiento temporal del umbral auditivo, se requieren ciertos tiempos de reposición del oído. Durante este tiempo el oído deberá descansar de todo ruido intenso. La cantidad de tiempo de descanso requerido entre un período de exposición y otro

depende de la dosis de ruido recibida. En caso de exposiciones sonoras laborales, la relajación completa del oído suele producirse durante la noche. La Figura 3.1 muestra los lapsos de descanso auditivo requeridos en función del nivel sonoro, la cantidad de exposiciones y la duración de cada una de ellas.

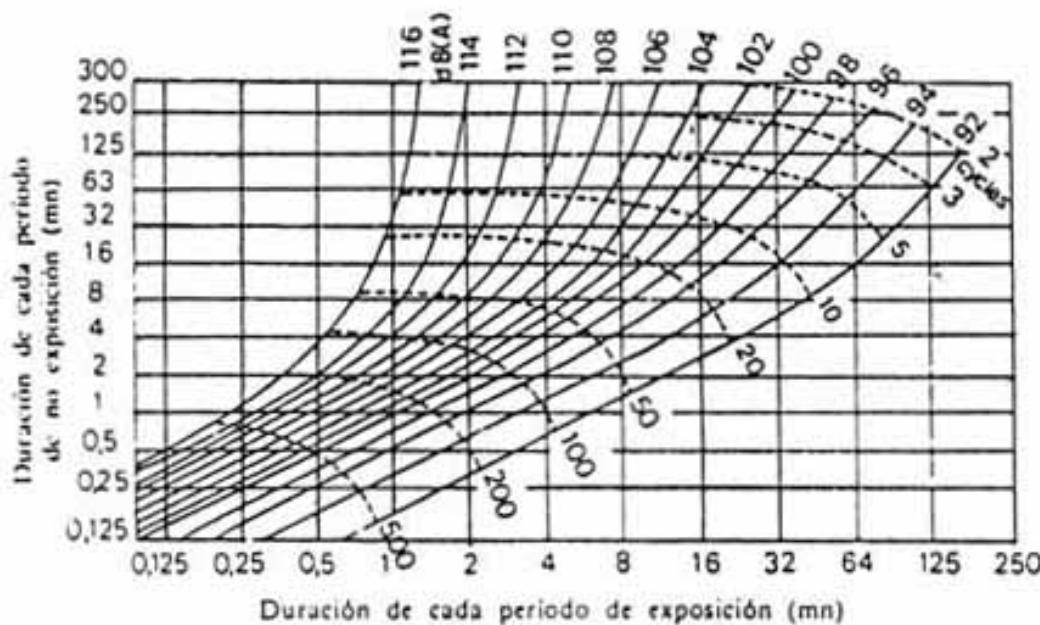


Fig. 3.1: Tiempo de descanso auditivo necesario entre exposición y exposición en función del tiempo y período de exposición, para distintos niveles sonoros (Muñoz, 1995).

Si estos tiempos de reposo auditivo no son cumplidos, la pérdida temporal puede ir transformándose gradualmente en una pérdida permanente del oído (PTS). Una alteración de este tipo implica un daño fisiológico irreversible. Un PTS involucra la muerte de células ciliadas al interior de la cóclea.

La pérdida auditiva inducida por ruido puede verse claramente desde un punto de vista histológico. Un Órgano de Corti intacto posee contornos precisos formados por las células ciliadas y sus núcleos. Esto es claramente identificable, al igual que la distribución de su crecimiento sobre la membrana basilar. La elevada exposición sonora produce que las células se desprendan de su base (ver 2.4.1.3).

A diferencia del oído de algunas especies de aves, las células ciliadas del oído humano no se regeneran (ver Fig. 3.2). Tampoco es posible inducir su crecimiento mediante fármacos ni realizando operaciones. Esto significa que la pérdida del oído por ruido, es irreversible. Mediante el empleo de prótesis auditivas sólo se puede elevar artificialmente el nivel de los sonidos externos. El único remedio para la pérdida del oído inducida por ruido, es prevenir la exposición sonora elevada.

La pérdida auditiva suele ser más acentuada en frecuencias comprendidas entre 4 kHz y 6 kHz (a la vez es el primer rango de frecuencia que habitualmente se pierde). Determinados tipos de sonidos pueden provocar, además de la fatiga o muerte de las células ciliadas, desgarros del tímpano y luxaciones de los huesosillos del oído medio. Los ruidos involucrados en este tipo de traumas son impulsivos (disparos, explosiones, etc.). Según cual sea la posición de nuestro

cuerpo respecto al ruido y dependiendo del ambiente en que nos encontremos, este tipo de daños pueden producirse en un oído o en los dos.

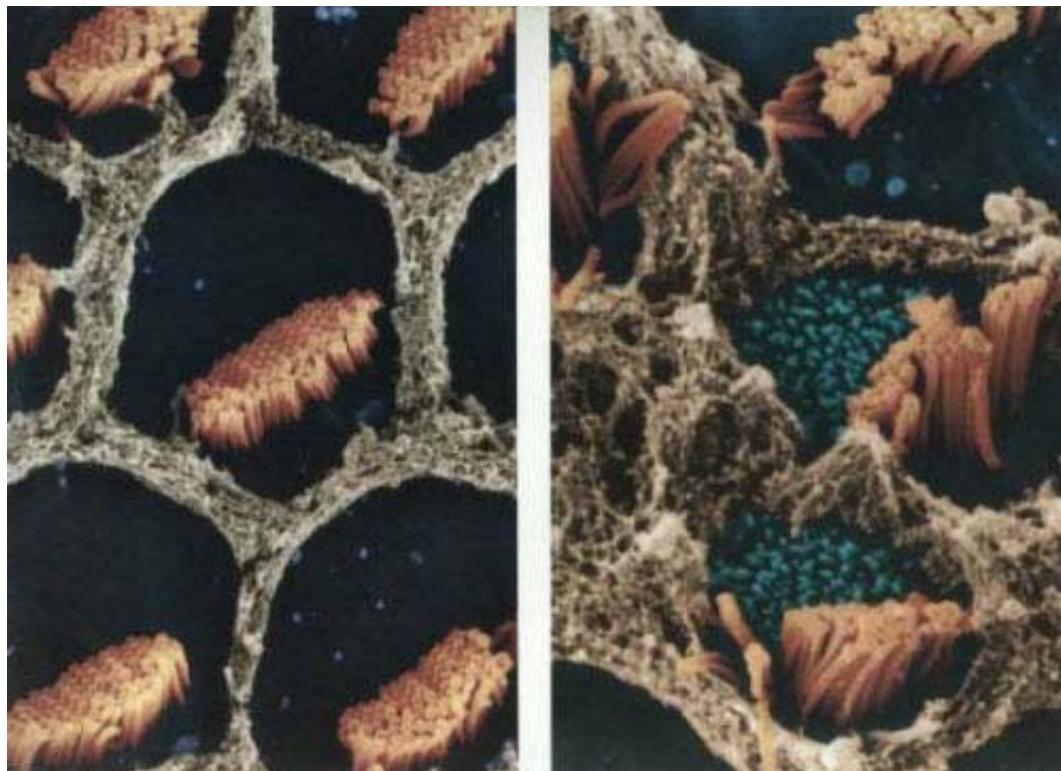


Fig. 3.2: Células ciliadas de un ave en estado normal (izquierda). Regeneración de células luego de una semana de que la exposición al ruido causó la muerte de las células ciliadas originales (derecha). En menos de un mes el ave puede recobrar su audición normal (World of Sound Calendar, ASA).

Además de la exposición al ruido, existen otras causas de pérdida auditiva, como la plesbiacusia, que es la pérdida natural de la audición con la edad (es más acentuada en hombres que en mujeres), el consumo de algunas sustancias y ciertas enfermedades. Además, existen medicamentos *ototóxicos* (tóxicos para el oído). Su consumo, acompañado de la exposición al ruido, produce un deterioro del oído interno. Algunos de éstos son: los antibióticos aminoglucosidos, cisplatino, diurético de asa, salicilato, aspirina (alta dosis en forma crónica). También existen químicos ototóxicos, como los asfixiantes químicos (monóxido de carbono, cyanide, hipoxia hipóxica); los solventes orgánicos que son ototóxicos por sí solos (tolueno, disulfuro de carbono, n-butanol y el agente de limpieza seco tricloroetileno); algunos metales (plomo, arsénico, mercurio). Algunos hábitos también son ototóxicos, como el consumo de alcohol, cigarrillo (monóxido de carbono) y oler en forma crónica el pegamento (Berglund – Lindvall, 1995).

Existen varias técnicas para evaluar el tipo y grado de pérdida auditiva. La práctica más común es la *audiometría de tonos puros*, que es una prueba de sensibilidad auditiva en función de la frecuencia. La audiometría de tonos puros da buena información general sobre la capacidad auditiva del sujeto. Consiste en estimular cada oído del paciente con tonos puros de intensidad

creciente y decreciente para cada frecuencia estudiada. El sujeto deberá indicar cuando comienza a escuchar cada tono. Los resultados son graficados automáticamente de manera que permiten compararse con el “cero audiométrico” (audición media normal).

Existen otras pruebas auditivas que se aplican en casos específicos (o cuando la audiometría tonal revela pérdidas significativas y se desea profundizar en la caracterización del daño). Algunos de estos test son: la *audiometría por potenciales evocados*, las pruebas de *otoemisiones* y la *logoaudiometría*.

### 3.2.2. DOLOR EN EL OÍDO

Cuando la presión acústica en el oído es elevada, se producen sensaciones de incomodidad. Esto suele suceder para niveles comprendidos entre los 80 dB y 100 dB. Cuando los niveles de presión sonora (NPS) son aún superiores, la incomodidad se transforma en dolor.

En determinados casos particulares, por ejemplo ante la presencia de alguna afección auditiva, los umbrales de dolor desciden. Entonces, cuando existe una inflamación en el oído, es probable que basten 80 dB para producir dolor. Las personas con prótesis auditivas amplificadoras del sonido deben tener especial cuidado frente a los ruidos de gran intensidad (existen diseños que poseen limitadores de nivel).

### 3.2.3. ENMASCARAMIENTO

Se habla de *enmascaramiento* (“masking”) cuando la presencia de un ruido oculta a otro sonido. El ruido *enmascarador* es aquel que impide o reduce la escucha del sonido *enmascarado*. El concepto de enmascaramiento está asociado a la idea del ruido que dificulta o imposibilita la audición de un mensaje que desea escucharse, por dicho motivo al enmascarante se lo suele tratar de ruido (porque es un sonido no deseado), mientras que al enmascarado nos referimos como sonido. Por ejemplo, una comunicación oral (sonido) se puede ver enmascarada por el paso de un avión (ruido). También pueden verse enmascarados sonidos que desean escucharse (aun sin contener un mensaje), por ejemplo, el canto de las aves podría ser enmascarado por el motor de un tractor.

La presencia de un ruido (enmascarador) reduce la sonoridad de los otros sonidos (enmascarados). En general, los ruidos de mayor intensidad enmascaran a los sonidos de menor intensidad.

En términos más precisos, se puede decir que el enmascaramiento consiste en el incremento del umbral de audibilidad de un determinado sonido debido a la presencia de otro sonido (o ruido). Un ejemplo simple es el siguiente. Si un sonido “X” en condiciones de silencio es detectable a tan sólo 35 dB, entonces ante la presencia de un segundo sonido “Y”, es necesario que “X” tenga al menos 60 dB para ser escuchado. La medida cuantitativa del enmascaramiento es la cantidad de decibeles que el umbral se eleva. En nuestro ejemplo, el umbral desplazado menos el umbral sin enmascaramiento nos entrega la cantidad enmascarada: 60 dB - 35 dB = 25 dB.

La magnitud del desplazamiento del umbral del sonido enmascarado depende de las propiedades físicas de ambos sonidos. En particular, de los niveles, contenido espectral y dinámica temporal. Algunas frecuencias enmascaran con mayor facilidad a otras.

El tipo de enmascaramiento descrito muchas veces es denominado *enmascaramiento directo*. Sucede cuando los receptores del oído que son estimulados por un sonido de cierta frecuencia, también son excitados por otro sonido de frecuencia coincidente o aledaña. El enmascaramiento directo (o simplemente enmascaramiento), es el más frecuente y significativo en cuanto a sus efectos, sus características espectrales serán analizadas en el Capítulo 5. Sin embargo, existen otras clases de enmascaramientos, como el enmascaramiento remoto, central y temporal (Kryter, 1985) que no serán analizados por escapar a los objetivos de este trabajo.

### 3.2.4. OTROS EFECTOS AUDITIVOS

En algunos estudios realizados, los encuestados han percibido sensaciones de acumulación de presión en el oído medio y en otros casos se ha producido cosquilleo de la membrana del tímpano (Harris, 1995).

## 3.3. EFECTOS FISIOLÓGICOS NO AUDITIVOS

Los efectos fisiológicos no auditivos involucran todas aquellas alteraciones sobre el normal funcionamiento del organismo que se producen como consecuencia de la exposición al ruido. Se han realizado múltiples estudios orientados a identificar y caracterizar los efectos fisiológicos extra-auditivos, pero los conocimientos actuales en la materia son limitados. La relación matemática causa-efecto no ha sido determinada en la mayoría de los efectos que se tratan en esta sección. No obstante, la existencia de múltiples registros sustenta la veracidad de los efectos provocados por el ruido que aún no han podido ser estrictamente demostrados.

Algunas de estas alteraciones físicas pueden ser advertidas por el individuo expuesto a ruido, como el caso de la fatiga corporal, las náuseas, la respuesta reflejo y el dolor de cabeza, entre otros. En cambio, muchas anomalías que sufre el organismo a nivel funcional pueden pasar inadvertidos por el sujeto afectado. Ejemplos de ello son los incrementos en las secreciones endocrinas, el debilitamiento del sistema inmune, las alteraciones gastrointestinales y los trastornos cardiovasculares.

Algunos de los efectos fisiológicos extra-auditivos son temporales y no dejan secuelas clínicas significativas. Este es el caso, por ejemplo, de la respuesta reflejo a un ruido de corta duración y alto nivel, las náuseas, la disfonía, etc. Sin embargo, algunos efectos no auditivos del ruido pueden tener consecuencias irreversibles; ciertos daños cardiovasculares son ejemplo de ello. La recurrencia de exposiciones sonoras es una manera probable de provocar efectos clínicos permanentes, lo cual puede transformar irregularidades pasajeras en patologías crónicas.

### 3.3.1. EFECTOS FISIOLÓGICOS CONSCIENTES

En este grupo incluiremos a los efectos del ruido que son reconocibles por el individuo en el momento de ocurrencia. Lo cual no implica necesariamente que el individuo asocie su causa al ruido, ya que el afectado podría sentir conscientemente los síntomas sin identificar su causa.

#### 3.3.1.1. Respuesta Reflejo

La respuesta reflejo consiste de una contracción involuntaria de los músculos de las extremidades y columna como consecuencia de un sonido abrupto e inesperado. Este reflejo prepara al individuo para tomar acción frente a una posible situación de peligro, la cual podría estar siendo alertada por el ruido. La respuesta reflejo también está acompañada de parpadeo o cierre momentáneo de los ojos, lo que cumple la función de protegerlos frente a un posible impacto frontal. Es frecuente que la respuesta reflejo esté seguida por un movimiento de la cabeza en dirección hacia la fuente del ruido, en búsqueda de su identificación. Además, la respiración puede verse afectada, produciéndose movimientos respiratorios más profundos y lentos (Harris, 1995).

En algunas circunstancias, el sonido repentino puede generar miedo en forma posterior a la respuesta reflejo. Si ello ocurre, habrá mayores alteraciones al sistema circulatorio y se generará transpiración. Esto último variará la resistencia galvánica de la piel. Se ha observado que si el ruido no posee un significado intrínseco de gran importancia, el individuo puede habituarse luego de algunas repeticiones del mismo, en cuyo caso la respuesta reflejo se manifestará sólo en los primeros impactos (Berglund – Lindvall, 1995). Esto nos conduce a pensar que tanto la posibilidad de predicción del ruido como del conocimiento de su causa juegan un papel fundamental en la presencia y magnitud de la respuesta reflejo.

#### 3.3.1.2. Alteración del Equilibrio

El equilibrio es regulado por el *aparato vestibular*, también conocido como “laberinto”. En él se alojan los canales semicirculares, que son tres conductos que poseen fluido en su interior y están recubiertos de células ciliadas sensibles al movimiento. Estos canales están orientados espacialmente de manera tal de registrar las aceleraciones angulares de la cabeza. Además, dentro del *vestíbulo* del oído interno se encuentran el Utrículo y el Sáculo, que son pequeños órganos que registran los movimientos lineales de la cabeza. La información es enviada al cerebro por medio del nervio vestibular. Los sistemas vestibulares izquierdo y derecho se vinculan entre sí y también se relacionan con la percepción visual. De esta manera, el cerebro puede obtener y procesar la información de orientación espacial en todos los grados de libertad.

Los canales semicirculares se encuentran dentro de la cavidad del oído interno; como consecuencia de esto son vulnerables a estímulos sonoros intensos. Cuando ello sucede, puede verse temporalmente afectado el sentido del equilibrio, lo cual a su vez puede conducir a que se experimenten deficiencias motrices, movimientos rítmicos e involuntarios de los ojos, mareos, vértigo, náuseas e incluso desmayos.

Tal como se esperaba en forma teórica, se ha observado que la estimulación mayor de un oído que del otro, provoca alteraciones más significativas en el equilibrio que una excitación similar a ambos oídos (Kryter, 1985).

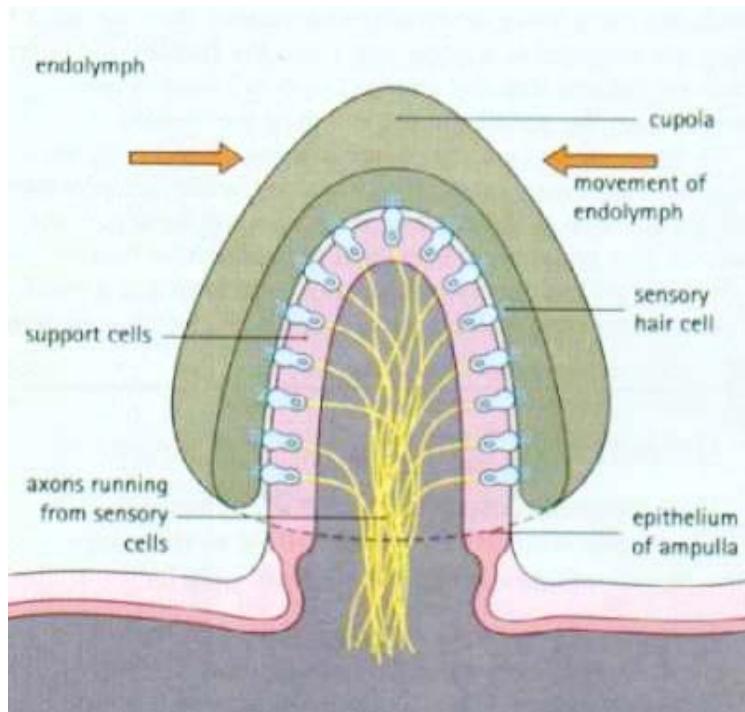


Fig.3.3: Sistema transductor mecánico-eléctrico del aparato vestibular. Las células ciliadas se excitan como producto del movimiento de la endolinfa (la que se mueve al mover la cabeza) (Stevens, 1999).

### 3.3.1.3. Fatiga Corporal

La sensación de fatiga puede ser experimentada como causa directa del ruido o bien inducida indirectamente. Existen varios reportes que indican que la fatiga puede ser una consecuencia directa de la exposición al ruido, en especial a aquellos ruidos que contienen longitudes de onda grandes, e incluso infrasonidos. Los trabajadores expuestos cotidianamente a este tipo de ruidos pueden experimentar fatiga crónica.

Por otra parte, el deterioro del sueño a causa de eventos sonoros puede ser responsable de la fatiga física como efecto posterior al descanso. Un efecto indirecto del ruido que puede provocar fatiga mental, es la realización de esfuerzos para comprender mensajes hablados en presencia de ruido. Este es el caso, por ejemplo, de clases o conferencias prolongadas que son de interés para el auditor pero se realizan en condiciones de escasa inteligibilidad.

### 3.3.1.4. Resonancias en el Organismo

Desde el punto de vista físico, el cuerpo humano puede ser analizado como un sistema mecánico complejo. Las diversas estructuras internas del cuerpo responden de diferentes maneras frente a los estímulos sonoros. La cantidad de energía acústica que ingresa al organismo depende de los cambios de impedancia que la perturbación acústica experimenta al atravesar los medios de propagación que encuentra en su camino. Existe un cambio de impedancia acústica entre el aire y la piel, lo que significa que el cuerpo humano impone cierta resistencia a que la onda sonora ingrese a él. Esta desadaptación de impedancias depende de las características físicas de ambos medios, como la densidad, la elasticidad y la viscosidad. Es decir, las características intrínsecas de la piel y los tejidos determinan la cantidad de energía acústica que se transmite al interior del cuerpo humano. Además, la energía trasmisida al organismo depende de factores relativos al estímulo sonoro, como la intensidad, la frecuencia, el ángulo de incidencia y la superficie corporal excitada. El modo más directo de excitar mecánicamente al organismo es mediante la transmisión de vibraciones. La bibliografía respecto a este tema es más extensa que para el caso de las resonancias inducidas por el ruido aéreo, incluso existen varios criterios de exposición y curvas de ponderación trazadas especialmente para las vibraciones que afectan a las personas (en distintas posiciones corporales). Este tema no será profundizado, ya que escapa a los objetivos del trabajo.

Una vez que la energía acústica ingresa al organismo, se propaga dentro de él a través de tejidos y huesos. En los tejidos, la mayor cantidad de energía acústica se propaga en forma de ondas transversales de corte y ondas superficiales. En la propagación de estos tipos de ondas se produce dispersión, ya que la rapidez de propagación de las ondas se incrementa, aproximadamente, con la raíz cuadrada de la frecuencia (von Gierke, 1997).

La cantidad de energía propagada en forma de ondas longitudinales compresibles es considerable sólo para grandes intensidades sonoras, siendo la velocidad de propagación de 1500 a 1600 m/s en los tejidos blandos y 3300 m/s en los huesos compactos. Sin embargo, la velocidad de propagación de las ondas transversales de corte es mucho menor (aproximadamente 10 m/s para 200 Hz en el caso de los tejidos) (von Gierke, 1997).

Las ondas acústicas interaccionan mecánicamente con el organismo de forma compleja. Para estudiar esta interacción se realizan aproximaciones mediante modelos. Cuando la longitud de onda de un sonido es mucho menor que una determinada cavidad, ésta se comporta en forma análoga a una gran sala en la que se producen reflexiones. Por el contrario, si la longitud de una onda es mucho mayor que la cavidad, como en el caso de un resonador de Helmholtz, las moléculas de aire vibran como un todo, produciendo compresiones y expansiones del volumen de aire interior. Este fenómeno tiene su analogía mecánica en sistemas de masas y resortes. El sistema más simple de este tipo, está compuesto por un resorte que representa una cavidad de aire compresible conectado por medio de una abertura a una masa de aire oscilante. La máxima amplitud de oscilación se produce en la frecuencia de resonancia del sistema, la cual puede ser calculada en base al volumen interior a la cavidad y a las dimensiones de su boca. Para que funcione este sistema acústico, sus dimensiones deben cumplir ciertas restricciones respecto a la longitud de la onda en resonancia.

Volviendo al caso del cuerpo humano, varias partes de su morfología han sido simplificadas utilizando modelos mecánicos como el señalado. Es decir, se han efectuado aproximaciones para los casos en que las longitudes de onda en el aire son mucho mayores o mucho menores que las dimensiones del cuerpo humano. Veremos el primer caso, donde la estructura del organismo ha sido representada como sistemas de masas, resortes y amortiguadores (los que cumplen la función de disipar energía).

Estos sistemas mecánicos tienen resonancias en frecuencias bajas e infrasónicas. Los modos de vibración de estos sistemas están influenciados por factores como la elasticidad de los órganos, las irregularidades de las formas y las discontinuidades óseas.

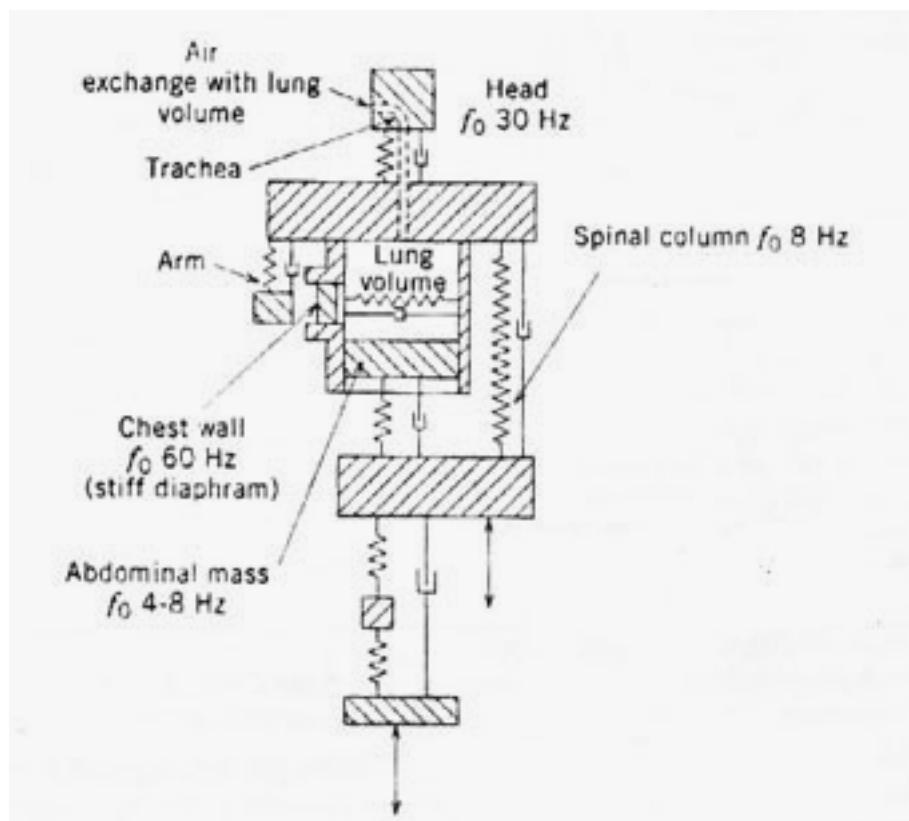


Fig.3.4: Modelo mecánico de resonancias producidas en el organismo (von Gierke, 1997).

En diversos estudios realizados, algunos de los efectos localizados relacionados con la intromisión de las ondas acústicas al organismo, que han sido percibidos, son: las vibraciones en el pecho, garganta y cavidades nasales. Algunos sujetos también manifestaron, sensación de “ensanchamiento” de la garganta, vibración de la pared abdominal, vibración del tabique nasal, gran presión bajo el esternón y molestias debajo de las costillas y de la faringe (Kryter, 1985; Harris 1995).

Debido a la desadaptación de impedancias entre el aire y el organismo antes descrita, para que estas resonancias tengan lugar se requieren niveles de excitación elevados (superiores a 125 dB). Además de las resonancias del pecho, la garganta y las cavidades nasales, se han registrado vibraciones en la pantorrilla, muslos y zona lumbar, entre otros.

El lector podrá imaginar que para las intensidades sonoras en las cuales se manifiestan las resonancias internas, existen también consecuencias auditivas críticas. Esto es en gran medida correcto; sin embargo, no debe olvidarse que las resonancias en los órganos son causadas principalmente por sonidos de frecuencia muy baja, los cuales tienen menor influencia en la generación de los efectos auditivos.

Merece ser destacado el hecho que este efecto del ruido (las resonancias internas) no depende del oído en absoluto. Es más, una persona sorda los experimenta con igual magnitud que una persona con audición normal (e incluso podría ser más consciente de ellos).

La estimulación acústica que reciben algunas estructuras corporales podría tener efectos positivos de activación o rehabilitación. Algunas culturas orientales desarrollaron disciplinas médicas alternativas basadas en la ejecución de instrumentos musicales cuyos registros están “sintonizados” con determinada estructura orgánica. También, existen disciplinas “occidentales” que emplean los sonidos terapéuticamente. Por ejemplo: la *musicoterapia*, que emplea la voz humana, algunos instrumentos y música; la *terapia vibroacústica*, que usa tonos puros de frecuencia baja generados por altavoces (Skille, 1998). Existen otras disciplinas orientales que emplean los *cuentes* sintonizados con los *chakras* como medios para la terapia, los cuencos consisten en recipientes con forma aproximada a cascarones esféricos que poseen distintos diámetros y están construidos de materiales que permiten altos tiempos de reverberación mecánica (usualmente son metálicos).

### 3.3.1.5. Deficiencias Vocales

Cuando una persona desea comunicarse oralmente en un ambiente con alto nivel de ruido de fondo, eleva involuntariamente la potencia de su voz entre 3 y 6 dB por cada 10 dB de aumento de ruido de fondo (para niveles sonoros de la voz en torno a 55 dB y a 1m de distancia) (Kryter, 1985; López, 2001).

Si la persona debe comunicarse frecuentemente en un clima de ruido, como es el caso de algunos profesores de escuela, se pueden ocasionar alteraciones crónicas en su aparato vocal. Las componentes en frecuencia de la voz en estado relajado no son las mismas que las de la voz forzada, ya que la potencia máxima de emisión se obtiene a alturas tonales mayores. Por este motivo, elevar la voz en clima de ruido no significa únicamente elevar los niveles sonoros, sino también elevar la frecuencia (a razón de 24 dB/octava) (Miyara, 2000). La ocurrencia de estos dos fenómenos involuntarios recibe el nombre de *reflejo cócleorecurrential*.

### 3.3.1.6. Dolores y Otros Efectos Localizados

El ruido que incide sobre el individuo, en determinadas condiciones, puede ocasionar dolores locales. La cefalea (dolor de cabeza en zona nasal) fue una de las respuestas del ruido en varios estudios realizados. En otros casos también se han manifestado molestias al tragar y dolor testicular (Kryter, 1985).

### 3.3.2. EFECTOS FISIOLÓGICOS INCONSCIENTES

Cuando nos referimos a los efectos fisiológicos inconscientes, estamos hablando de alteraciones funcionales involuntarias que, por lo general, pasan inadvertidas por el individuo. La mayoría de estas alteraciones son controladas por el *sistema vegetativo* (también conocido como sistema nervioso autónomo). El sistema vegetativo administra funciones necesarias para la vida sobre las cuales no tenemos control voluntario, por ejemplo los sistemas: cardiovascular, digestivo, endocrino y respiratorio. El sistema vegetativo se encarga de realizar automáticamente los ajustes necesarios para mantener el equilibrio con el entorno.

El sistema nervioso autónomo está compuesto del sistema simpático y del sistema parasimpático. El primero activa las funciones que intervienen en el ejercicio y el estrés, distribuyendo la energía de manera de favorecer las funciones necesarias para la actividad o la emergencia (por ejemplo aumentando la potencia del corazón y ensanchando los canales aéreos para respirar mayor volumen de aire). Complementariamente, el sistema parasimpático actúa en los períodos de reposo, activando las funciones necesarias para la recuperación del organismo y la digestión.

El sistema nervioso autónomo tiene su centro de operaciones en el tronco cerebral (debajo del cerebro). Una persona con daños en el cerebro, pero con su tronco cerebral intacto, vivirá en estado vegetativo (sin conciencia ni respuesta a estímulos).

***Los efectos vegetativos del ruido, llevan un gran peligro intrínseco: el individuo es víctima de ellos sin advertirlo.*** Este concepto refuerza la necesidad existente de implementar campañas preventivas sobre la contaminación acústica y sus efectos.

#### 3.3.2.1. La Causa de los Efectos Inconscientes

Como se explicó en el Capítulo 2, los estímulos acústicos son transformados por la cóclea en señales eléctricas, las que son conducidas por el nervio auditivo hacia el cerebro. En su camino, el nervio auditivo atraviesa el tronco cerebral, en el cual se encuentran los centros de control de las funciones vegetativas del cuerpo.

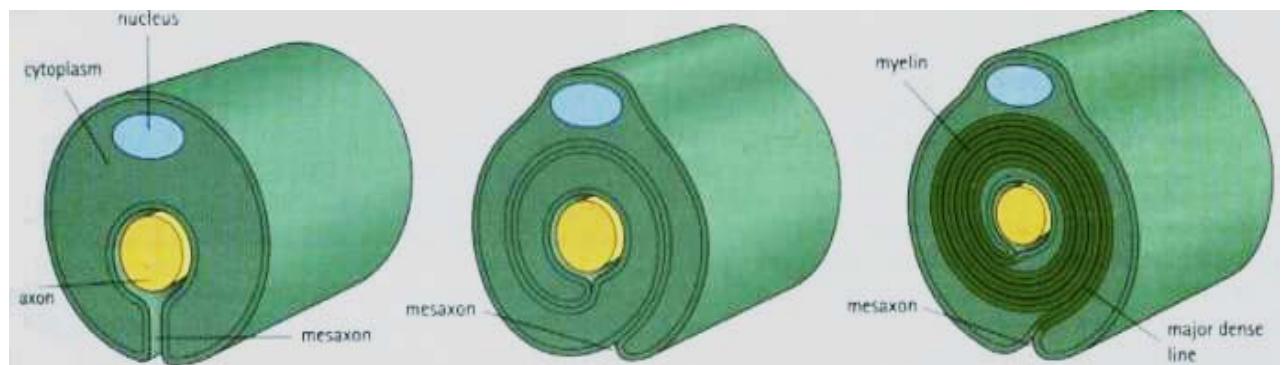


Fig.3.5: Corte transversal de fibras nerviosas. La mielina ("myelin") constituye un recubrimiento graso aislante eléctrico (Stevens, 1999).

El nervio auditivo al igual que otros nervios, conduce potenciales de acción (ver 2.4.1.4). Si se estimula el oído con un ruido de banda ancha y elevado nivel sonoro, será mucha la energía

eléctrica transmitida por el nervio auditivo, el cual, como un cable eléctrico, posee determinada aislación. Cuando la energía eléctrica que conduce el nervio auditivo es elevada, puede generarse una excitación indeseada sobre su vecindad, en especial si por ella pasan otras vías nerviosas. Este proceso es análogo al de un tendido eléctrico por el que circula mucha corriente, generando así un campo magnético en las inmediaciones e influyendo en la circulación de corriente en los conductores próximos. Esta energía radiada excitará regiones y nervios del tronco cerebral, pudiendo provocar alteraciones en las funciones vegetativas del individuo.

Esta teoría es sustentada por Griefhan y podría explicar una causa de la generación de los efectos vegetativos en condiciones de ruido ambiental elevado. (Griefahn, 1982).

### 3.3.2.2. Efectos Cardiovasculares

La exposición al ruido puede provocar diferentes disturbios y patologías cardiovasculares, como vasoconstricciones periféricas, daños isquémicos, hipertensión, aumento del colesterol en la sangre, taquicardias y cambios morfológicos del corazón.

El primer efecto cardiovascular que se hace presente durante la exposición al ruido es la vasoconstricción periférica. Esta reacción es una defensa del organismo e implica que los vasos sanguíneos externos se contraen reduciendo su espesor (usualmente este efecto se mide mediante la amplitud del pulso sanguíneo en los dedos).

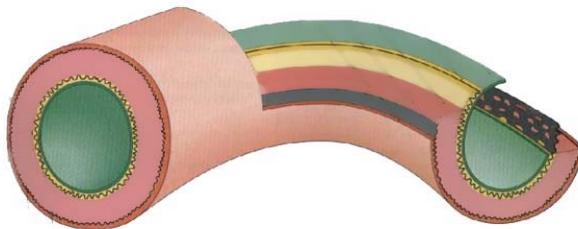


Fig.3.6: Esquema de vaso sanguíneo y sus distintas capas de recubrimiento (Stevens, 1999).

Algunos vasos sanguíneos poseen células que sensan la presión y flujo sanguíneo. Estas células se conectan con el centro cardiorrespiratorio del tronco cerebral, mediante fibras aferentes. Como se explicó en la Sección 3.3.2.1, este centro cerebral es susceptible a la sobrecarga del nervio auditivo.

Si oprimimos una manguera de agua achicando su sección transversal, en la zona contraída el agua deberá circular con mayor rapidez para mantener constante el caudal (el cual está dado por el producto de la velocidad y el área transversal). El mismo efecto se produce con los vasos sanguíneos. La presión sanguínea puede subir a causa de, un aumento en la fuerza de bombeo del corazón, o debido a un incremento en la rapidez de circulación. Esto último puede producirse como consecuencia de un estrechamiento de los vasos sanguíneos, o debido a un incremento en la frecuencia cardiaca.

Por otra parte, como la presión esta dada por la fuerza de bombeo por unidad de área, podríamos pensar que si aumenta el espesor de los vasos, el corazón requerirá de mayor fuerza para bombear el torrente sanguíneo.

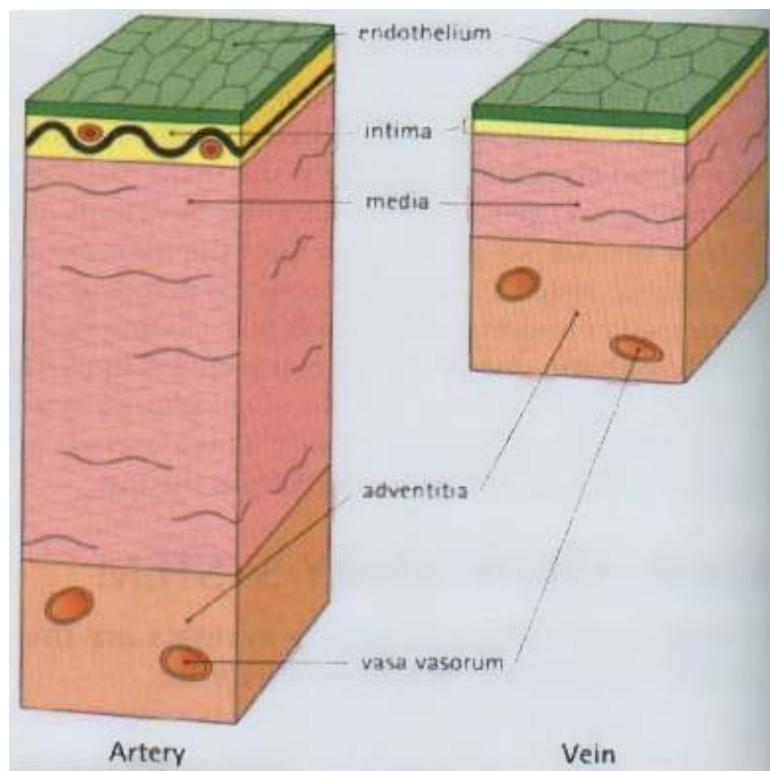


Fig.3.7: Capas de recubrimiento de arterias (izquierda) y venas (derecha) (Stevens, 1999).

Con la exposición al ruido se manifiestan algunas de estas situaciones. El estrechamiento de los vasos se puede traducir en un aumento de la presión sanguínea, pudiendo llegar hasta la hipertensión.

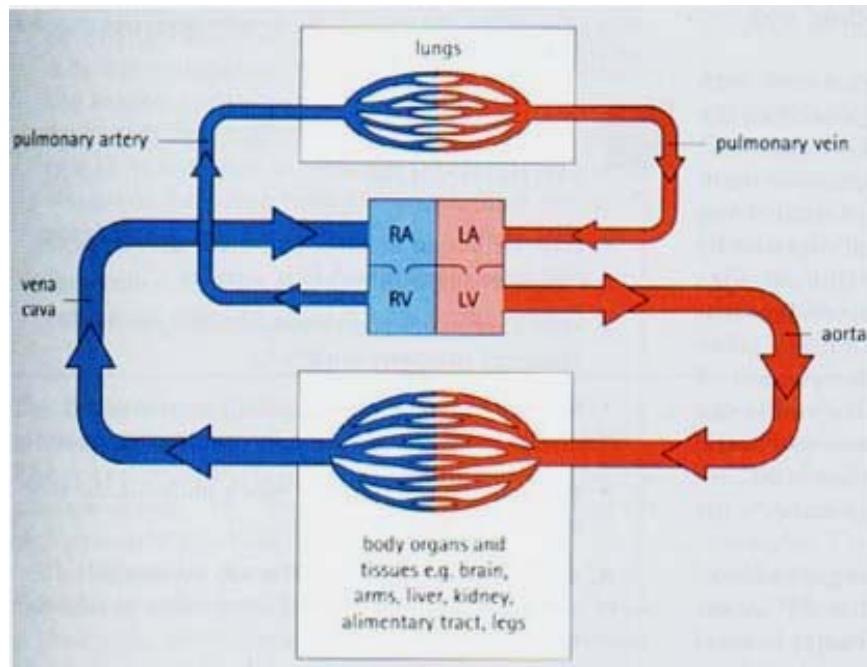


Fig.3.8: Diagrama simplificado de recorrido del flujo sanguíneo de venas (azul) y arterias (rojo)(Stevens, 1999).

En otros casos, se han producido reducciones en la tensión de los músculos de fibra lisa<sup>2</sup> (Kryter, 1985). También se han registrado disminuciones en la fuerza de bombeo del corazón (Berglund – Lindvall, 1995). Además de la fuerza ejercida en la sístole y diástole, el corazón también puede variar su frecuencia de latido como medida de acción para incrementar o disminuir la circulación sanguínea del cuerpo (cambios en el ritmo cardíaco y el pulso). Si las medidas compensatorias que realiza el corazón frente a un cambio vascular son insuficientes, se pueden provocar daños por la falta de irrigación sanguínea (lo que se conoce como *daños isquémicos*).

La patología cardiaca de naturaleza isquémica es una de las posibles consecuencias del ruido. Estudios que involucran a personas mayores de 40 años, las cuales que han estado expuestas a ruido durante varios años, hallaron que el riesgo de infarto de miocardio es mayor respecto a las personas que no han transcurrido ese tiempo en ambientes tan ruidosos (Callegari – Franchini, 2000; Recuero, 2002).

Se ha observado que existe mayor riesgo de patologías en las que se modifica la forma del corazón en las poblaciones expuestas a ruido de aviones que en barrios silenciosos (Kryter, 1985). En estas zonas cercanas a aeropuertos, también se incrementan los tratamientos y el consumo de medicamentos de acción cardiovascular.

Varios estudios epidemiológicos realizados han permitido concluir que la exposición sostenida a niveles sonoros entre 85 y 90 dB(A), crea un riesgo de una afección coronaria equivalente a una edad 10 años superior a la real (Recuero, 2002).

Algunos de los efectos cardiovasculares, como la hipertensión, la vasoconstricción y el ritmo cardíaco, han sido observados también en exposiciones sonoras que se realizan durante el sueño del individuo.

Un estudio desarrollado por Cantrell mostró que la exposición a tonos cortos de ruido reproducidos cada 22 segundos durante un mes, incrementó el nivel de colesterol en la sangre (Kryter, 1985).

A pesar del avance de la ciencia en este tema, aún no se ha determinado con claridad la relación causa-efecto de las alteraciones cardiovasculares ocasionadas por el ruido.

### 3.3.2.3. Efectos Gastrointestinales

El sistema gastrointestinal también es una función regulada por el sistema nervioso autónomo del ser humano. Algunos procesos involucrados en la digestión pueden alterar su ritmo natural en presencia de ruido.

Se ha observado una reducción de la motilidad del estómago, la cual consiste en la contracción de los músculos del estómago, que cumplen la función de amasar el alimento y traspasarlo procesado al intestino (liberando el espacio necesario para que ingresen nuevos alimentos al estómago).

Se han registrado disminuciones en la secreción de ácido del estómago (Griefahn, 1982). Las secreciones estomacales e intestinales se mezclan con el alimento durante sus movimientos y son necesarias para el proceso bioquímico involucrado en la digestión. La disminución de la motilidad del estómago y de las secreciones intestinales nos conducen a pensar que el tiempo de

<sup>2</sup> La musculatura de fibra lisa es la que se encuentra en las paredes de los vasos sanguíneos y de las vísceras.

tránsito intestinal será mayor. Sin embargo, existen autores que señalan que la exposición al ruido puede disminuir el tiempo de tránsito intestinal (Miyara, 2003). Para dilucidar esta aparente contradicción, debemos tener en cuenta que cierto tipo de estrés agudo causado por alguna situación o agente externo puede disminuir el tiempo de tránsito intestinal (un ejemplo de ello podría ser la diarrea previa a una prueba o situación importante). La frecuencia de eliminación y el peso de las heces también pueden verse afectados (Harris, 1995).

También se han observado disminuciones en la secreción de la saliva, la cual posee fermentos que comienzan la digestión rompiendo las moléculas de los hidratos de carbono (Miyara, 2003). Sin embargo, en otros casos se ha observado mayor salivación durante exposiciones a frecuencias bajas. En estos mismos casos se ha manifestado dolor al tragarse (Kryter, 1985).

Adicionalmente, estudios realizados hallaron que las personas expuestas laboralmente a ruidos intensos (más de 85 dB(A)), experimentan un incremento de hasta 5 veces en el riesgo de contraer gastritis o alguna úlcera estomacal, intestinal o duodenal (Kryter, 1985). Las úlceras estomacales pueden ser provocadas por exceso de ácidos o bien por isquemia (falta de irrigación). Debido a la disminución de las secreciones de ácido estomacal en presencia de ruido y a los cambios en la distribución de la sangre que se experimentan, es lógico adjudicar a la segunda causa el incremento en la probabilidad de úlceras.

### 3.3.2.4. Respiración

La respiración puede verse afectada en presencia del ruido como un agente externo. Se han observado cambios en el ritmo respiratorio. En algunos casos la respiración se ha hecho más lenta y profunda (Berglund – Lindvall, 1995). Esta reacción se produce especialmente luego de un ruido corto y repentino (Harris, 1995).

En determinadas condiciones de ruido (ver Capítulo 5), los encuestados han tenido dificultad para respirar, sintiendo ahogamiento y reaccionando mediante tos.

En general, la exposición al ruido ocupacional de larga data parece reducir los mecanismos de regulación respiratoria (Harris, 1995).

Algunos autores sostienen que los pulmones son uno de los órganos más sensibles a las ondas sonoras incidentes por vías no auditivas. Esta hipótesis es sostenida debido a la conexión aérea que existe entre los pulmones y el medio exterior, la cual podría tornarlos más vulnerables frente a estímulos sonoros aéreos de elevado nivel y frecuencia baja (Alves-Pereira et al., 2004). Ante este tipo de ruidos, en algunos casos se ha observado aparición de tos y ahogamientos (Kryter, 1985). A niveles sonoros aún mayores, podría inducirse respiración artificial como consecuencia de la interacción entre la onda sonora y el aire contenido en las cavidades pulmonares (Johnson, 1982). Si se sigue incrementando la energía acústica se puede llegar a producir desgarros en los alvéolos pulmonares, lo que podría causar la muerte (Recuero, 1994).

### 3.3.2.5. Alteraciones Endocrinas e Inmunológicas

Las glándulas endocrinas del cuerpo tienen la función de producir y secretar hormonas, las que son absorbidas por otras células del organismo para poder desarrollar funciones vitales, como el crecimiento, el metabolismo, la funciones sexuales, etc. Algunas de estas glándulas son: la hipófisis, la tiroides, las gónadas sexuales y la glándula suprarrenal.

Se ha observado que la exposición al ruido puede afectar la secreción de algunas de estas glándulas. La glándula suprarrenal, en presencia de ruido, segregá en mayor cantidad cortisol, adrenalina y noradrenalina. Esto se determina mediante la realización de análisis de orina (Berglund – Lindvall, 1995). El exceso de cortisol en el cuerpo provoca efectos sobre el sistema inmunológico, aumentando la glicemia (glucosa en la sangre). Ésta última podría adherirse a los fagocitos, que cumplen la importante función de engullir bacterias. La producción de glicemia en exceso puede favorecer la diabetes y la acumulación o re-localización de grasas. En situaciones de estrés se libera cortisol, por esta causa éste es comúnmente llamado “la hormona del estrés”.

Las *catecolaminas* (adrenalina y noradrenalina) son estimulantes que incrementan la actividad de funciones corporales, como el ritmo cardíaco, la presión sanguínea, etc. La adrenalina y la noradrenalina son secretadas como consecuencias del esfuerzo que debe realizar el cuerpo para mantener su rendimiento mientras existe una agresión externa, como el ruido. Si el esfuerzo es reducido permitiendo que disminuya el rendimiento, no se producirán aumentos significativos en la secreción de catecolaminas. Esto es especialmente notorio cuando se intenta realizar tareas cognitivas. Otras manifestaciones del esfuerzo que realiza el cuerpo son: la constricción de los vasos sanguíneos, el aumento del pulso y la fuerza de la contracción del corazón (Recuero, 2002). Se cree que estas sustancias liberadas en forma sostenida pueden generar daños al recubrimiento de las arterias, arritmias cardíacas, incrementos en el metabolismo lípido (grasa en la sangre) y aglutinación de plaquetas. Estos últimos dos efectos pueden provocar *trombos*; y por lo tanto aumentan el riesgo de *embolia pulmonar* (obstrucción de los vasos pulmonares). Se han registrado incrementos de adrenalina ante niveles de ruidos tan bajos como 55 dB (Recuero, 2002). Sin embargo, estos riesgos deben considerarse principalmente cuando el agente causante perdura en el tiempo (por ejemplo en trabajadores expuestos cotidianamente a ruidos excesivos) (Berglund – Lindvall, 1995).

El ruido puede incrementar las secreciones de la hipófisis. Los niveles de *HGH* (hormona del crecimiento), aumentan. También se eleva la cantidad de *ACTH*, hormona que estimula la secreción de cortisol y de *andrógenos* (hormona sexual masculina). Este incremento puede persistir incluso luego de que cesó la fuente de ruido (Recuero 2002).

Las glándulas sudoríparas también pueden alterar sus secreciones en presencia de ruido.

Altos niveles de ruido pueden producir que los *depósitos hepáticos* aumenten la liberación de glucosa a la sangre (*hiperglicemias moderadas*) (Recuero, 2002).

En algunos animales se han observado ciertas inhibiciones sobre la fertilidad, lo cual no se ha podido verificar para el caso de los humanos (Recuero, 2002).

Se han registrado cambios sobre el sistema inmune, como variaciones en la población de linfocitos “T”. Aunque un estudio con humanos mostró decrementos en la población de estos linfocitos, otros estudios con animales obtuvieron incrementos. Los linfocitos “T” cumplen una función defensiva, atacando a algunas clases de virus y deteniendo la expansión de tumores

cancerígenos (Berglund – Lindvall, 1995). Como se verá cuando se describa la enfermedad vibroacústica, existen patologías adquiridas luego de años de exposición a altos niveles sonoros, como la rinitis, esofagitis, apendicitis e infecciones bucales, entre otras. Estos cuadros clínicos podrían ser un indicador de que el sistema inmune está afectado como consecuencia del ruido (Caspers, 2004).

A pesar de los efectos nombrados y de los registros que los sustentan, hasta el día de hoy no puede concluirse en forma general que la exposición al ruido altere el sistema inmunológico.

### 3.3.2.6. Cambios en el Sistema Nervioso Central

El *ritmo alfa* se modifica cuando existen estímulos acústicos. También produce una reducción de la reacción frente a estímulo luminoso. Mediante un electroencefalograma es posible detectar los cambios en las corrientes cerebrales producidos a causa del ruido.

Una respuesta cerebral frente al ruido es la reducción del líquido cefalorraquídeo, el que facilita la coordinación del sistema nervioso central y amortigua los cambios de presión intracraneana. Este decremento se produce especialmente en el caso de ruidos sorpresivos (Recuero, 2002).

### 3.3.2.7. Efectos sobre la Piel

Como se mencionó en la Sección 3.3.1.1, durante la respuesta reflejo al ruido se produce transpiración. La transpiración es un mecanismo de pérdida de calor (mediante la evaporación el calor del cuerpo fluye hacia las moléculas de transpiración logrando energizarlas lo suficiente para que estas se volaticen liberando energía al medio). Entonces, una consecuencia de la transpiración que es producida por el ruido, podría ser el enfriamiento de la piel. Además, la transpiración produce cambios en la resistencia galvánica de la piel (Griefahn, 1982).

Para determinadas condiciones particulares de excitación sonora (como se verá en el Capítulo 5), las personas expuestas han padecido de enrojecimientos del cutis, acompañados de una sensación de hormigueo (Kryter, 1985). Además, en algunos sujetos se han producido fisuras en la piel (Harris, 1995).

### 3.3.2.8. Efectos en la Vista

La exposición sonora de ciertas características provoca la dilatación de las pupilas. Esta dilatación está acompañada de una vasoconstricción sanguínea periférica.

El ruido también puede provocar un estrechamiento del campo visual y una disminución de la percepción del color (Recuero, 2002).

Se ha observado que la exposición sonora varía la *frecuencia crítica de fusión del ojo* (Kryter, 1985). Para entender este concepto pensemos que, si un estímulo lumínico intermitente y periódico tiene una frecuencia menor que la frecuencia crítica de fusión, entonces percibiremos los cambios de luminosidad del estímulo (esto es llamado efecto “flicker”). Cuando la frecuencia de oscilación del estímulo lumínico es superior a la frecuencia crítica de fusión del ojo, la luz oscilante es captada como si fuera continua (es por esta razón que las secuencias de cuadros en el

cine debe ser reproducida a una velocidad superior a la frecuencia crítica de fusión). La frecuencia crítica de fusión varía con el individuo y también para un mismo sujeto en distintas situaciones.

Varias consecuencias del ruido sobre la vista han sido observadas en diferentes estudios realizados. Aunque no han podido ser generalizados, mencionaremos algunos resultados: decrementos de la precisión de la vista, cambios en el nivel de percepción del brillo de fondo, déficit del color rojo y de la visión nocturna, y disminución de la velocidad de movimiento del ojo para algunos ángulos. Se ha notado que si la estimulación sonora se realiza sobre un oído, se pueden producir algunas deficiencias en el ojo opuesto, tales como pérdida de sensibilidad, reducción del campo visual y cambios en la verticalidad percibida de una línea (Kryter, 1985; Recuero, 2002).

## 3.4. EFECTOS PSICOSOCIALES

### 3.4.1. INTERFERENCIA EN LA COMUNICACIÓN

Uno de los efectos psico-sociales más notorios es la interferencia de la comunicación. El mecanismo es simple: el ruido enmascara a la voz. Cuando un ruido intenso irrumpen el diálogo, éste se discontinua parcial o totalmente. En el caso que el ruido no tenga la intensidad sonora suficiente para ocultar por completo la comunicación oral, será necesario hacer un esfuerzo vocal adicional para sostener la comprensión del mensaje (en la Sección 3.3.1.5 se ha explicado el mecanismo involucrado en el esfuerzo vocal). Adicionalmente, los mensajes se tornaran más redundantes y se intensificará la gesticulación.

Cuando el ruido ambiental está presente en forma permanente o se repite frecuentemente, las consecuencias sociales pueden ser severas. En una familia que está expuesta a intenso ruido en el horario de reunión familiar, para comunicarse, sus miembros deberán esforzar su voz y posiblemente se fatiguen en forma rápida. Esta fatiga tendrá como consecuencia que sólo se transmitan los mensajes imprescindibles y que los diálogos explayados se dejen de lado. El diálogo mantiene y enriquece las buenas relaciones humanas. Si el problema del ruido sucede uno o dos días, posiblemente sólo se pierdan algunos intercambios de mensajes y esto provoque algún “desajuste” o déficit menor. En cambio, si en cada ocasión de reunión de los miembros de la familia existe ruido intenso, el déficit comunicativo se incrementará con el tiempo. Si las personas involucradas no encuentran una solución física para este asunto (detención o mitigación de la fuente de ruido, mudanza, etc.), esta pérdida de los “espacios” de encuentro posiblemente provoque daños sociales o psíquicos severos. Un ejemplo de esto último podría ser el de un niño con problemas en la escuela; por la ausencia de diálogo los padres no se enteran, el problema crece y los padres sólo lo registran cuando el niño ya perdió su año escolar. Esta situación podría haber sido evitada si se daba el apoyo psicopedagógico necesario en el momento adecuado. Como este caso, muchos otros trastornos familiares y conductuales pueden ser evitados si se dialoga más; y el ruido deprime el diálogo.

Sin embargo, el diálogo no es la única forma de comunicación. Existen señales que también cumplen un rol comunicativo. Esta forma de comunicación es frecuente en ámbitos laborales. Por lo general, estas señales están basadas en estímulos sensoriales lumínicos o sonoros. Su función podría ser el inicio o fin de un proceso, un cambio de ritmo, una alarma, etc. La presencia de ruido puede enmascarar las señales sonoras. La pérdida de la percepción de la señal sonora puede ocasionar distintas consecuencias, según sea el significado de la señal. Si la señal sonora oculta por el alto nivel de ruido de fondo se trata de una alarma, las consecuencias podrían ir desde pérdidas de la producción o deterioro de tecnología hasta daños físicos severos, o incluso la pérdida de la vida.

Las personas con déficit auditivos, aunque éste sea leve (10 dB de promedio entre ambos oídos entre 2000 Hz y 4000 Hz), tendrán dificultades para entender la comunicación hablada (Berglund et al., 1999).

### **3.4.2. RENDIMIENTO EN LA TAREAS**

Existen numerosos estudios que verifican los efectos que tiene el ruido sobre el rendimiento en las tareas. La información sonora puede provocar, según el caso, efectos negativos o positivos sobre el rendimiento. Al hablar de rendimiento en las tareas debemos considerar que existen distintos tipos de tareas, motoras e intelectuales, y ellas poseen requerimientos fisiológicos y psíquicos diferentes.

Las tareas más afectadas por el ruido son aquellas que requieren de una continua concentración en detalles, atención simultánea a múltiples señales o que emplean mucho la memoria de corto plazo. Las tareas que requieren de atención visual sostenida, ante el ruido pueden experimentar períodos de ineficiencia, aunque un estudio halló que algunos estímulos sonoros a niveles de 72 dB pueden incrementar la eficiencia de la vigilancia visual (Berglund – Lindvall, 1995).

Son varios los mecanismos por los cuales puede disminuir el rendimiento en presencia de ruido, estos mecanismos se manifiestan en distintas situaciones y algunos de ellos son excluyentes mutuamente.

El enmascaramiento producido por el ruido podría ocultar voces o señales necesarias para la realización de alguna tarea. En otras situaciones, la atención que una persona otorga al ruido podría distraerla de la tarea que realiza.

Algunos ruidos constantes pueden crear un estado monótono, el cual podría disminuir el nivel de activación y producir sueño. Por otro lado, algunos investigadores sostienen que el ruido puede sobre-activar al individuo más allá del nivel óptimo para el desempeño de cierta tarea y de esta forma perjudicarla (Kryter, 1985).

Algunos ruidos pueden tener un significado que conduzca a la persona a pensar de manera contraproducente a lo requerido por la tarea que intenta realizar. Al notar esto, el individuo puede experimentar cierta molestia por ello y afectar así su desempeño. Además, en presencia de altos niveles de ruido, la persona podría sentir que el ruido está dañando su oído o que le impide escuchar lo que desea. Estos factores también son capaces de generar molestia y así producir bajas del rendimiento. Cuando la persona no puede controlar el ruido de su ambiente, puede

sentirse vulnerable o indefensa. Sin duda algunos tipos de tareas se verían influenciadas por este estado anímico.

En general, la música y el ruido activan al individuo. Para el rendimiento en el desempeño de algunas tareas, un cierto nivel de excitación psíquica puede ser deseable, pero pasado ese límite podría ser contraproducente. La ausencia total de ruido (o niveles muy bajos), como pueden ser hallados solamente en condiciones especiales (por ejemplo en un recinto anecoico con gran aislación acústica), también reduce el rendimiento (Griefahn, 1982).

El ruido contribuye a la carga de las vías nerviosas y por lo tanto puede competir con la atención neuronal requerida para el desempeño de otras tareas. El ruido, como señal de entrada al cerebro, utiliza varias vías neuronales que también incumben a la enunciación y al ensayo de palabras que se realizan internamente. Por lo tanto, en presencia de ruido, estas vías no estarán totalmente disponibles para el desempeño de tareas que requieren de la memoria de palabras (Kryter, 1985).

Un aspecto no resuelto es la relación existente entre la caída del rendimiento en las tareas no auditivas y algunos efectos fisiológicos y psicológicos del ruido (Kryter, 1985).

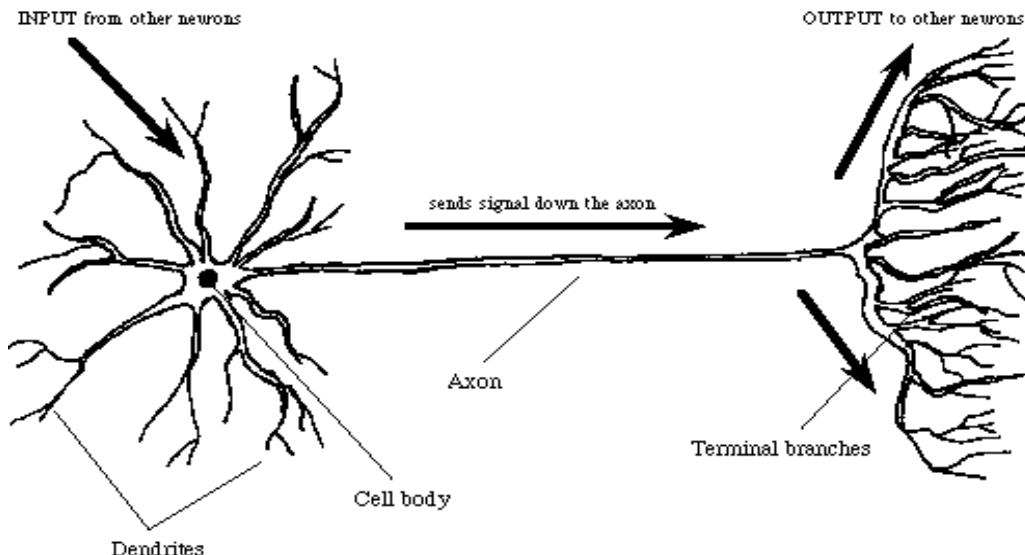


Fig.3.9: Esquema de una neurona y sus vías de conexión. (Stevens, 1999).

La pérdida del rendimiento depende básicamente del tipo de ruido y de las exigencias de la tarea. El grado de caída del rendimiento se ve afectado por la familiaridad que la persona tiene con la tarea, el tiempo transcurrido realizando la tarea, la necesidad de uso de palabras para la realización de la tarea y las variaciones de atención requeridas durante la tarea. Además, existen factores personales transitorios como el descanso y el estado de ánimo, que pueden moderar el efecto del ruido sobre el rendimiento.

La naturaleza del ruido juega un papel sustancial en la pérdida del rendimiento. Para el estudio del rendimiento en presencia de ruido se consideró pertinente distinguir entre tipos de ruidos de ruidos, ya que sus efectos pueden ser muy distintos. Si un ruido es familiar y predecible, difícilmente afectará el rendimiento. Un ruido inesperado y abrupto provocará mayores efectos sobre el rendimiento.

### 3.4.2.1. Ruido Constante

Durante la realización de muchas tareas que no requieren de gran exigencia, el ruido no representa un obstáculo. Tareas motrices y combinadas con agudeza visual son ejemplo de esta independencia del ruido (incluso por sobre los 100 dBC) (Jones - Broadbent, 1995). Las tareas donde se requiere que el sujeto responda tan rápidamente como sea posible a una señal visual precedida por un aviso, tampoco se ven afectadas por el ruido continuo. Tampoco se perjudican las tareas aritméticas simples.

Cuando se combinan actividades intelectuales y es necesario utilizar la memoria de corto plazo, la carga cognitiva es mayor y se empiezan a percibir los efectos del ruido. Si, por ejemplo, es necesario realizar una serie de operaciones matemáticas y cada una de ellas depende de resultados anteriores, la presencia de ruido puede entorpecer la tarea. También es probable que disminuya el rendimiento si el enunciado de un problema matemático es retirado de la vista antes que comience el cálculo mental. En presencia de ruido constante por encima de los 95 dB, tareas de vigilancia intensa a varias fuentes de información en búsqueda de pequeños cambios, pueden sufrir descensos en el rendimiento.

Se ha observado que el ruido modifica la seguridad de las respuestas percibidas, acentuando los casos extremos de los rangos de las variables. O sea que con ruido se registran más respuestas del tipo “seguro” de ocurrencia (o no ocurrencia) de determinado evento, que estados “dudosos” intermedios. Jones y Broadbent señalaron: “*Parece que el ruido altera la estrategia de distribución de la atención, alejándola de las fuentes de probabilidad baja hacia aquellas con probabilidad alta*” (Jones - Broadbent, 1995).

El ruido continuo puede incrementar la memoria intencional y disminuir la memoria incidental en las tareas verbales. Si una lista de palabras es pasada frente al sujeto y se le indica que las recuerde, el ruido puede provocar un incremento en el proceso de fijación de las palabras por medio de mayores repeticiones (memoria intencional). Sin embargo, si al sujeto se le pide en forma inesperada que indique algún dato complementario como podría ser la ubicación cada palabras en la pantalla, este proceso será perjudicado por el ruido (memoria incidental) (Jones - Broadbent, 1995). Una vez más, observamos que el ruido constante puede favorecer la realización de la actividad principal en detrimento de las tareas secundarias. Esto podría entenderse como una pérdida de precisión del trabajo, sin que disminuya la cantidad total de labor realizada (Berglund – Lindvall, 1995).

### 3.4.2.2. Ruido Intermitente

Los ruidos fluctuantes son distractores más potentes que los ruidos constantes. Además, se observó que ante los ruidos intermitentes, la pérdida del rendimiento se produce también en el período intermedio donde el ruido está ausente. De hecho, durante este lapso intermedio puede ser mayor el efecto sobre la concentración que durante el período activo. Incluso, el rendimiento puede decrementar a medida que pasa el tiempo luego de haber cesado el ruido. Esto podría explicarse por la sensación de intranquilidad creciente ante la inminencia repentina del ruido. Este efecto puede ser menos trascendente si la persona recibe un aviso (por ejemplo lumínico) previo a la activación de la fuente (Jones - Broadbent, 1995).

Otro aspecto que no puede pasarse por alto y que determina la profundidad de la alteración, es la capacidad de control sobre la fuente de ruido. Una fuente sobre la cual no podemos ejercer ningún control provocará efectos posteriores mucho más acentuados que los efectos posteriores provocados por ruidos “controlados”. Si la desactivación de la fuente de ruido depende de una acción que puede realizar el individuo, los efectos posteriores serán menores. De la misma manera, serán atenuados los efectos sobre el rendimiento cuando el sujeto sienta que puede predecir o gobernar el inicio del ruido.

El nivel sonoro del ruido no es un factor tan relevante como la diferencia de niveles entre el período activo y el inactivo. Solamente la alternancia sucesiva entre el silencio y un ruido (por más leve que éste sea) es capaz de perjudicar el rendimiento en algunas tareas. Este tipo de ruidos puede reducir la persistencia en problemas muy difíciles de resolver.

También se producen pérdidas de la memoria de corto plazo. Ejemplos de tareas afectadas que han sido estudiadas son: la resolución de anagramas, la memoria de algunas palabras dentro de una lista y la clasificación de cartas (en la cual aumenta el tiempo requerido).

#### **3.4.2.3. Ruido Impulsivo**

Cuando se producen ruidos de impacto inesperados, el efecto perjudicial usualmente dura 2 o 3 segundos, pero ocasionalmente puede extenderse hasta 30 segundos luego que cesó la fuente. Las tareas que requieren de la coordinación mano-ojo son especialmente sensible al sonido impulsivo (Jones - Broadbent, 1995). Se observó que el ruido de impacto afecta más la adquisición de la información visual que el procesamiento de la misma. En lo que respecta al ruido impulsivo y el rendimiento humano, existe mayor correlación con la diferencia de niveles que con el nivel absoluto. Este hecho respaldado por la semejanza de las reacciones obtenidas con protectores auditivos y sin ellos (Jones - Broadbent, 1995).

#### **3.4.2.4. Voces**

Si una persona oye voces mientras lee o durante la realización de una tarea que requiera recordar material verbal, el rendimiento declina drásticamente (Jones - Broadbent, 1995). El nivel sonoro del habla no es tan relevante para evaluar la distracción ejercida. Una reducción de 10 dB en un ruido de banda ancha puede significar una recuperación importante del rendimiento, pero la misma reducción del nivel equivalente del habla no aportará notables mejoras.

Se ha observado que el contenido del habla como ruido de fondo es importante para la comprensión y la lectura. Nuevamente, se observa que la actividad perjudicada no es la dominante sino una secundaria. Esto se refleja en el decremento en la detección de errores tipográficos de un texto, sin desmedro de la comprensión de su contenido.

Si el habla se desarrolla en otro idioma o de una manera incomprendible, la pérdida del rendimiento no será tan grande. Sin embargo, cuando se trata de aplicar la memoria a corto plazo, el habla sin significado comprensible es tan destructiva como el habla entendible. Esto podría desmejorar el desempeño de tareas dependientes de este tipo de memoria, como el razonamiento verbal, la aritmética mental y la solución de problemas (Jones - Broadbent, 1995). La música con contenido vocal produce mayores alteraciones sobre el rendimiento que la música instrumental.

El hecho que los sonidos no hablados afectan en mucho menor grado la memoria a corto plazo que las voces, sugiere que las palabras poseen cierta cualidad que permite su acceso al sistema de memoria de corto plazo.

### 3.4.2.5. Efectos Positivos sobre el Rendimiento

Además de los efectos favorables sobre la tarea principal realizada ante la presencia de ruido constante (que tiene como consecuencia la pérdida de atención sobre tareas aledañas), existen otros mecanismos por los cuales algunos sonidos podrían incrementar el rendimiento.

Algunos sonidos constantes pueden producir un efecto positivo sobre el rendimiento. Dicho efecto se produce debido a que el sonido constante enmascara los ruidos fluctuantes del ambiente, evitando así que éstos afecten el rendimiento. Esto podría explicar por qué algunas personas logran mayor concentración durante climas de lluvia constante u otros sonidos estables.

Muchas personas prefieren realizar tareas intelectuales (como el estudio) escuchando música. Es necesario distinguir entre 2 causas distintas por las cuales la música puede incrementar el rendimiento. La primera de ella es un efecto de enmascaramiento sobre los ruidos del ambiente que son capaces de distraer; lo cual es similar que en el caso de los sonidos constantes. Para producir este enmascaramiento no es requisito alguna canción o fragmento musical en particular; basta con que el nivel, contenido y dinámica de la música no interfieran con la actividad cognitiva realizada. La preferencia o necesidad de oír música para realizar ciertas tareas es un factor individual.

La segunda causa por la cual la música favorece algunas tareas intelectuales (en especial de adquisición), no tiene que ver con enmascaramientos ni con propiedades acústicas cuantificables. Se trata del contenido intrínseco de la música. Se han llevado a cabo estudios donde se encontró que ciertas melodías producen efectos estimulantes sobre la concentración, la intuición y los procesos creativos relacionados con el razonamiento espacio-temporal que tienen lugar en el hemisferio derecho del cerebro (Campbell, 1998). Según Campbell, la mejoría en la realización de tareas espaciales y temporales es mucho más duradera en niños preescolares. También se ha notado que en niños que estudian piano, estas habilidades intelectuales priman sobre las de los niños que no hacen música.

Este efecto estimulador de la música es llamado “Efecto Mozart”, ya que ha sido determinado durante la reproducción de la “Sonata para dos pianos”, en re mayor (K. 448), de Mozart. Se cree que otros conciertos de Mozart, especialmente aquellos para violín, tendrían propiedades similares.

### 3.4.3. EFECTOS SOBRE EL SUEÑO

#### 3.4.3.1. El Sueño y sus Fases

El ciclo sueño-vigilia es un ritmo *circadiano* determinado internamente en una persona, pero que está condicionado a factores exógenos. Esta función en los recién nacidos es polifásica (duermen y despiertan muchas veces en un día). Se va tornando monofásica luego de las primeras semanas posteriores al parto, donde el ciclo sueño-vigilia se adapta a la duración del día, a los ciclos luz-oscuridad, y a los estímulos sociales.

El sueño se puede caracterizar por la ausencia de conducta: el individuo está muy poco consciente de su entorno y experimenta un aumento de los umbrales perceptivos de reacción frente a estímulos externos. El sueño implica una gran reducción de la actividad motora y un incremento de la actividad del sistema parasimpático (ver Sección 3.3.2).

El sueño consiste de varias etapas y en cada una de ellas se registran distintos niveles y frecuencias de actividad cerebral. El método para medir ello es por medio de electroencefalogramas (EEG). Las primeras cuatro fases del sueño se conocen como etapas de ondas lentas. En la fase 1, el individuo relaja sus músculos y disminuye su frecuencia cardíaca. En la fase 2 existe mayor aislación del medio externo y aparece un movimiento lento y arrítmico de los ojos. En la fase 3 la musculatura sigue relajada y disminuyen aún más la frecuencia cardíaca y respiratoria. El estado 4 es el de sueño más profundo, en el cual se requieren grandes intensidades en los estímulos externos para lograr despertar.

Luego de transcurrida la secuencia de estos cuatro estados, se produce un retorno corto a la fase 2 y posteriormente tiene lugar una transición a un estado totalmente distinto. Este último estado es conocido como *REM* (“*rapid eye movements*”). En REM desaparece la tensión muscular y se llega a la insensibilidad. Como el nombre lo sugiere, se producen movimientos rápidos y rítmicos de los ojos tras los párpados. Las ondas registradas mediante el EEG son de baja amplitud, pero de frecuencia alta, en comparación con las fases anteriores (de hecho son similares a las registradas en una persona despierta). Esto indica que durante este período existe una gran actividad cerebral, y a la vez no hay tonicidad muscular. Se cree que en el estado REM se produce la recuperación psicológica, por lo cual la duración de esta fase del sueño puede depender del equilibrio psíquico del individuo, y de otros factores relativos al estado anímico, personalidad y condiciones sociales del individuo (Rosenzweig – Leiman, 2000).

El ciclo completo de las 4 etapas de sueño lento más el REM, es de aproximadamente 90 a 110 minutos y se repite varias veces en una noche (usualmente de 3 a 5). Al inicio del sueño se registran mayores duraciones de las etapas 3 y 4, mientras que al final de la noche se incrementa la duración del REM. El sueño completo es un prerequisito para la buena salud física y mental.

#### 3.4.3.2. Antes del Sueño

La presencia de ruido en el ambiente donde dormimos puede dificultar la conciliación del sueño (el ingreso a la fase 1). Esto provocará que el tiempo necesario para quedarse dormido sea mayor. Otras consecuencias de los eventos sonoros en la etapa pre-sueño son el incremento en el consumo de fármacos y el uso de protectores auditivos.

Se ha observado que la cantidad de eventos sonoros que sobresalen del ruido de fondo que se registran por minuto, tiene mayor incidencia en el tiempo requerido para conciliar el sueño que el propio nivel sonoro absoluto (Berglund – Lindvall, 1995). Un ruido constante de nivel alto puede entorpecer menos la conciliación del sueño que los eventos sonoros aislados, aunque éstos sean de bajo nivel sonoro. Un claro ejemplo de esto es una gotera.

Este efecto “menos nocivo” o inocuo que tienen los ruidos constantes, podría incluso constituir una ayuda para conciliar el sueño. Un ejemplo podría ser la lluvia estable, ésta enmascara la gotera y entonces el individuo no percibe ningún ruido intermitente. De esta manera, la persona podrá quedarse dormida con más facilidad, aún cuando los niveles sonoros de inmisión sean mayores.

### 3.4.3.3. Durante el Sueño

La sensibilidad al ruido es personal, además ésta varía en las distintas fases del sueño, con los diferentes estados de ánimo y etapas de la vida de un individuo. Existen personas que se ven afectadas ante la más mínima perturbación y hay otras que pueden dormir fácilmente en climas de mucho ruido.

Durante el sueño se producen varios efectos derivados de la exposición sonora. Por una parte se producen despertadas. Al incrementarse la cantidad de eventos sonoros durante una noche, disminuye la tendencia a despertarse con cada uno de ellos, lo cual sugiere que existe cierta *habitación*. Esta habitación también se hace presente a lo largo de las sucesivas noches, requiriéndose de al menos ocho noches para que la habitación sea considerable. Sin embargo, no hay pruebas de que se produzca una habitación total al ruido (Berglund – Lindvall, 1995). Aunque el individuo no alcance a despertar, en presencia de ruido muchas veces se produce un cambio de fase durante el sueño, pasando a estados de sueño más livianos. El indicador más sensible a los cambios de estados del sueño a causa del ruido, es la depresión de la fase REM (medida con técnicas de EEG).

Un aspecto aún más significativo que el propio nivel de presión sonora (NPS) del ruido al momento de despertar al sujeto, es la diferencia entre el NPS máximo del evento de ruido y el ruido de fondo. Esta diferencia de niveles es especialmente perjudicial tanto para las etapas 3, 4 como para el REM, mientras que el ruido constante afecta primordialmente a la fase REM. Esto significa que los ruidos fluctuantes son mayores causales de que el individuo se despierte que los ruidos constantes, aun cuando los primeros fueran de menor intensidad que los segundos. Por esta razón, al realizar mediciones nocturnas, es recomendable registrar otros indicadores sonoros como el  $L_{MAX}$  y/o algún percentil como complemento al  $Leq$  (ver 2.3.3).

Otra consecuencia del ruido durante el sueño es la aparición de movimientos corporales. La probabilidad de que se produzcan movimientos corporales es proporcional al NPS en la habitación. Sin embargo, no se observó habitación al NPS máximo, por lo menos durante las primeras 14 noches. Por el contrario, al incrementar el número de eventos sonoros durante la noche, la tendencia a despertarse por cada uno de ellos disminuye, con lo cual podemos decir que sí existe cierta habitación de la respuesta corporal respecto al número de eventos sonoros.

La presencia de ruido durante el sueño, provoca también reacciones vegetativas (ver 3.3.2), como variaciones del ritmo cardíaco, presión sanguínea periférica, frecuencia respiratoria

y secreción de adrenalina y cortisol (Griefahn, 1985). Para este tipo de efectos, nuevamente es más importante tener en cuenta la diferencia entre el NPS máximo y el ruido de fondo, que los indicadores energéticos como el Leq. Las respuestas cardíacas se producen incluso a niveles máximos muy bajos (como 32 dB de  $L_{MAX(A)}$ ), y no necesariamente aumentan al incrementarse el NPS máximo. Una reducción de los niveles sonoros no implica necesariamente un descenso de los niveles de reacción, pero un decremento del número de eventos sí conduce a un nivel menor de respuesta del organismo (Berglund – Lindvall, 1995). Sin embargo, existen investigadores que sostienen que los cambios cardíacos, así como las demás reacciones vegetativas, no son susceptibles a habituación (Griefahn, 1985).

#### 3.4.3.4. Después del sueño

Si los eventos de ruido perturban repetidamente un período de sueño, no se producirá el descanso saludablemente necesario. Cuando despertamos tenemos cierta percepción de la calidad del sueño pasado. El desarrollo natural de la etapa REM es lo que juega el papel más crítico en dicha percepción.

Una mala calidad del sueño trae como consecuencia el cansancio y la tendencia al mal humor. Entonces, si dormimos “mal” a causa del ruido, el día siguiente bajará nuestro rendimiento en el desempeño de tareas psíquicas y motoras, debido al cansancio y “mal humor”.

Existen resultados que asocian el incremento de 10 dB de ruido vehicular a una disminución apreciable del rendimiento (Berglund – Lindvall, 1995). En lo que respecta a los indicadores, en el caso de la calidad del sueño nuevamente se produce mayor correlación con los niveles sonoros máximos que con los niveles equivalentes.

La privación a corto plazo del sueño puede ser compensada, pero si ésta se prolonga por varias noches, el déficit de sueño se acumula y pasado cierto punto ya no puede ser compensado, produciéndose consecuencias más severas, como efectos sicolíticos y las alucinaciones. Si persiste aun más la privación del sueño, además del decremento del rendimiento psíquico y psicomotor, se producirán alteraciones funcionales. Posteriormente a ello comenzarán a manifestarse daños orgánicos irreversibles (Griefahn, 1985).

Cuando al individuo que fue privado del sueño se le permite dormir nuevamente, éste lo hace durante más tiempo de lo habitual, registrándose períodos más extensos de sueño en etapas profundas.

La etapa 4 de sueño profundo y el REM son las fases del sueño mas significativas, y a la vez las más difíciles de alcanzar en presencia de estímulos sonoros intermitentes. Se ha observado que cuando se priva a un individuo de la etapa REM por 14 a 16 días, se producen efectos similares a los registrados frente a una total privación del sueño durante el mismo período (Griefahn, 1985). Esto confirma la importancia que la fase REM tiene para la salud.

### 3.4.4. ESTRÉS

El ruido es un factor generador de estrés. Esto implica que todos los síntomas y signos propios del estrés pueden hacerse presentes cuando estamos expuestos al ruido. El estrés es una respuesta inespecífica del organismo ante cualquier estímulo físico o psíquico que provoque una necesidad de ajuste. Un estrés moderado no es perjudicial para el organismo. Se dice que se sufre de estrés cuando el organismo requiere sobre-esfuerzos que superan su resistencia. El desequilibrio entre las demandas psíquicas o del entorno y la capacidad del sujeto para responder a ellas, produce un exceso de tensión nerviosa.

Como se mencionó en la Sección 3.3.2.5, bajo estado de estrés se producen algunas activaciones glandulares y cambios en la secreción endocrina. El cortisol es conocido como “la hormona del estrés”, ya que es liberado en mayores cantidades bajo este estado. El estrés también produce una activación general del sistema nervioso autónomo (ver 3.3.2).

Los síntomas del estrés pueden involucrar fatiga, cefaleas, problemas gástricos, alteraciones cardio-circulatorias y trastornos psicopatológicos.

### 3.4.5. MOLESTIA

¿Quién no se ha sentido molesto ante la presencia de ruido? El ruido es un intruso que invade nuestra privacidad, al cual generalmente no podemos echar con sólo cerrarle las puertas y ventanas. La intromisión de este agente externo en nuestros dormitorios, oficinas y, en general en nuestras vidas, nos torna vulnerables a él. Las defensas que podemos adoptar para evitar este contaminante muchas veces son insuficientes y debemos optar por abandonar el ambiente contaminado o padecer sus consecuencias.

La *molestia* está asociada a sensaciones de desagrado, incomodidad o aversión al ruido. En el documento “Community Noise”, publicado por la Organización Mundial de la Salud, se cita que la molestia por ruido es “*una sensación de incomodidad asociada a un agente o condición que un individuo o grupo de ellos sabe o cree que los afecta adversamente*” (Berglund – Lindvall, 1995).

La forma en que cada persona experimenta estas sensaciones, su sensibilidad y el grado de tolerancia al ruido son factores intrínsecos a cada uno. Además, están moderados por el estado de ánimo y las condiciones físicas y fisiológicas en que cada uno se encuentra. Algunos trastornos psíquicos, como la neurosis, provocan que el juicio emitido sobre el ruido sea aún más (Griefahn, 1982).

Los grupos de trabajo sobre ruido de la Comisión de las Comunidades Europeas han definido la molestia como “*la expresión científica de las perturbaciones no específicas producidas por el ruido*” (European Commission, 2000). Esto significa que la molestia no es una variable objetivamente mesurable. Lo cual se desprende de que no necesariamente está correlacionada con una magnitud fisiológica ni con una conducta específica. La forma más directa de evaluar la molestia es mediante la aplicación de encuestas. Aunque existen metodologías científicas para realizar esta labor, no se puede eludir su esencial condición subjetiva. El encuestado debe entender la consigna, ser consciente de su percepción, y luego traducir ésta para dar respuesta en la forma preguntada en la encuesta. El éxito de este proceso

depende en buena parte de las aptitudes y de la voluntad del individuo, condicionantes ausentes en una medición científica objetiva.

La molestia causada por el ruido está fuertemente influenciada por la personalidad y la historia del individuo. Adicionalmente, un mismo individuo puede experimentar variaciones abruptas en su sensibilidad según el tipo de ruido escuchado. Un ejemplo de ello es la escasa tolerancia que algunas personas tienen frente a ruidos específicos, los cuales han estado involucrados en algún evento traumático de su pasado. Por ejemplo, una persona que perdió un ser querido en un accidente de motocicletas podría experimentar muy poca tolerancia al ruido generado por las mismas. También puede darse el caso opuesto de que ciertos “ruidos” no sean molestos o incluso sean agradables para algunas personas, como consecuencia de experiencias o recuerdos placenteros (según se definió en 3.1 en este caso no debería hablarse de “ruido”).

La molestia es un efecto del ruido particularmente relevante en los ámbitos de distensión y descanso. Como se ha dicho, el ruido es capaz de invadir la paz del hogar, influyendo negativamente en la calidad de vida. Por esta razón, la legislación que regula la inmisión sonora en las viviendas debería considerar los límites de la molestia. Esta labor no es simple, ya que el rango de sensibilidades individuales es amplio y para legislar es necesario fijar límites objetivos y generales. Los resultados de los estudios han verificado el incremento de la molestia con los niveles sonoros, pero no han encontrado discontinuidades importantes que puedan constituir la base para el trazado límites. No debe pasarse por alto que la molestia no es el único efecto a considerar al momento de confeccionar normativas que protejan el bienestar de las personas respecto al ruido.

Cómo se halló en estudios poblacionales, tanto el nivel de presión máximo que emite la fuente como el número de eventos de ruido incrementan la molestia. Sin embargo, estas variables muchas veces provocan menor reacción que lo que puede producir en una persona el significado intrínseco de la fuente y la sensibilidad al ruido. Desde un punto de vista práctico, para evaluar la molestia se utilizan solamente indicadores sonoros que miden la cantidad de energía acústica o los niveles máximos emitidos ( $Leq$ ,  $L_{MAX}$ , etc.). Este tipo de indicadores puede resultar inadecuado para evaluar la molestia producida por algunas fuentes de bajo nivel sonoro, que muchas veces resultan poco tolerables para muchas personas. Algunos ejemplos típicos de este tipo de fuentes, son: una mosca que revolotea sobre nuestra cabeza mientras intentamos dormir, una gotera, una tiza rallando una pizarra, un tenedor raspando una olla, etc.

### 3.4.6. ESTADO DE ÁNIMO

Debido a que el ruido es un agente externo indeseado que muchas veces no podemos controlar, frecuentemente provoca cambios en el estado de ánimo. Si una persona intenta llevar a cabo una tarea y la presencia de un ruido le dificulta labor, probablemente experimente cambios en el humor por ver frustrada su intención.

El ruido puede causar estados de ánimo “activos”, como por ejemplo: irritabilidad, enojo, ansiedad, fastidio, nerviosismo, exaltación, entre otros. Algunas personas manifiestan su descontento, mientras que otras lo padecen sin expresarlo. Ejemplo de esto son los estados de

mayor reserva que algunas personas tienen cuando están expuestas a ruido: incomodidad, inestabilidad, depresión, frustración, fatiga, depresión, impotencia (por no poder evitar la situación), entre otros. La interacción de estas sensaciones es muy compleja y depende de factores propios de cada individuo, así como de su relación con el entorno. Los estados citados son sólo piezas “discretas” del estado de ánimo global que puede experimentar una persona como consecuencia de la exposición al ruido. Esta materia es tan vasta y rica que las definiciones del lenguaje muchas veces pueden resultar insuficientes para describir los estados y sensaciones de una persona.

Como se ha descrito cuando se habló de la respuesta reflejo (Sección 3.3.1.1), un ruido súbito puede generar intranquilidad y miedo, sumiendo al afectado en un estado de alerta general.

Cuando la persistencia del ruido reduce la posibilidad de comunicación oral, las personas deben hacer esfuerzos adicionales para comunicarse. Esta situación impuesta por el ruido puede provocar que el sujeto se sienta “no escuchado” y quizás adopte una actitud agresiva o indiferente hacia su receptor.

Algunos tipos de ruidos repetidos día a día pueden desembocar en problemas psiquiátricos, como la locura leve (Recuero, 1994).

Además, el ruido puede inducir a ciertas inhibiciones fisiológicas como la pérdida del apetito y la disminución del deseo sexual. Sin duda, estas alteraciones pueden conducir a más cambios de ánimo.

Demás está decir que también existen sonidos que mejoran el humor, claro que en este caso ya no hablamos de ruido.

#### **3.4.6.1. El Efecto de la Música**

Los efectos psicológicos que la música causa sobre el individuo conforman todo un universo de sensaciones y sentimientos. Éstos están ligados a factores complejos relacionados con el individuo: su psiquis, historia, estado actual, experiencia musical, entorno, etc. El estudio de este campo excede los objetivos y el alcance de este trabajo. Este tema no pudo ser abordado completamente sólo desde el punto de vista de la acústica, y menos aún desde el análisis espectral (que es el punto focal de la presente investigación). Prueba de ello, es que un mismo espectro sonoro podría representar tanto a un ruido como a varios tipos de fragmentos musicales. Aunque dos temas musicales posean el mismo espectro sonoro a largo plazo, una podría producir un estado de relajación mientras que la otra un estado de exaltación.

La música constituye un poderoso instrumento de manipulación psicológica de los individuos. Este proceso puede ser autoinducido conscientemente o ser pasivo e involuntario. Mediante la música se pueden lograr estados de calma, relajación, sentimiento afectivos, abstracciones de la realidad, exaltación, éxtasis, deseos sexuales, agresividad, alegría, melancolía, etc.

### 3.5. ENFERMEDAD VIBROACÚSTICA

La *enfermedad vibroacústica (VAD)* es una patología de naturaleza sistémica que afecta al cuerpo en su conjunto y que es causada por la exposición prolongada al ruido de frecuencia baja y de alta intensidad. La enfermedad vibroacústica posee consecuencias devastadoras y fue hallada en forma relativamente reciente<sup>3</sup>.

Se detectó en base a estudios psico-fisiológicos realizados sobre una población de técnicos aeronáuticos, a partir de que más de un 10 % de ellos fueron diagnosticados con epilepsia tardía, cuando el índice de esta enfermedad en el país donde se realizó el estudio (Portugal) es tan sólo de 0,2% (Alves-Pereira et al., 2004).

El VAD se caracteriza por el crecimiento anormal de la matriz extracelular, la cual está formada por las sustancias que producen las células y que son excretadas al espacio entre ellas. Este crecimiento, entre otros efectos, provoca que las paredes de las estructuras cardiovasculares aumenten su espesor. Según estudios realizados, este ensanchamiento se produce en la totalidad de los pacientes en algún momento u otro dentro del avance del VAD (Castelo Branco et al., 1999). Una de las estructuras más afectadas por esta expansión anormal es el pericardio. Esta patología es aún más frecuente que los desplazamientos del umbral auditivo en los pacientes que padecen de VAD. La pérdida de la audición es más pronunciada en frecuencias bajas (a diferencia de los déficit principalmente alrededor de 4000 Hz que se producen en personas expuestas a ruidos de banda ancha).

Existen varias patologías severas que, en presencia de ruido de frecuencia baja y de alta intensidad, incrementan considerablemente su probabilidad de aparición. Es el caso, por ejemplo, de los tumores malignos de células escamosas del pulmón y del tracto respiratorio.

Por otro lado, el ruido de frecuencia baja produce un efecto genotóxico, lo que fue confirmado mediante el estudio de la frecuencia de *intercambio de cromátides hermanas* (Castelo Branco, 1999). Con el correr de los años de exposición, se pueden desencadenar otros cuadros clínicos de gravedad, como infartos cardíacos, accidentes cerebro-vasculares, cáncer, epilepsia, reacciones sociales violentas, e incluso suicidio (Alves-Pereira – Castelo Branco, 2000).

Algunas de las ocupaciones donde ha sido identificado el VAD fue en: pilotos militares, pilotos de helicópteros, técnicos aeronáuticos, tripulación de cabina de aviones comerciales, conductores de algunos tipos de vehículos pesados y disc-jockeys (Alves-Pereira – Castelo Branco, 2000). Debido a que el VAD se trata de una enfermedad de largo desarrollo y fue hallada recién en los últimos años, la cantidad de grupos poblacionales que han sido estudiados no es muy extensa. Esto es una de las razones principales por las cuales el VAD, aunque ya ha sido identificado, aún no se ha reconocido formalmente como una enfermedad ocupacional.

<sup>3</sup> Se le dio la denominación de enfermedad vibroacústica (“vibroacoustic disease”) por el Dr. J. Guignard en el cierre del III Congreso Internacional de Biodinámica, en Oeiras, Portugal, en 1992, previo a lo cual era denominada enfermedad vibracional sistémica y antes de 1991 se la llamaba enfermedad de ruido y vibración de cuerpo completo (Bento Coelho et al., 1999).

El VAD puede hacerse presente también fuera del ámbito laboral, como en espacios públicos o recreativos. Algunas de las actividades que provocan vulnerabilidad a los ruidos de frecuencia baja son: la conducción de ciertos tipos de motocicletas, motos de agua (“jet-ski”), transportes de pasajeros, etc.

### 3.5.1. DESARROLLO DE LA ENFERMEDAD VIBROACÚSTICA

La enfermedad vibroacústica está compuesta de tres fases. La primera de ellas es la *fase leve*, que está comprendida entre el primer y el cuarto año de exposición. Luego sigue la *fase moderada* entre los 4 y 10 años, y por último, la *fase severa* de la enfermedad (a partir de los 10 años de exposición). Esta clasificación, así como los resultados que se describirán, surgieron a partir de un estudio realizado con técnicos aeronáuticos expuestos a ruidos de frecuencia baja y alto nivel sonoro, en Portugal (Castelo Branco, 1999). Se revisaron los archivos médicos de los empleados con que la empresa estudiada (OGMA S.A.) cuenta desde su fundación, en 1918. Adicionalmente, se investigaron las reacciones de los empleados nuevos durante 10 años. Para ello, se realizaron una serie de test médicos. Para la selección de la población de 140 hombres, fue preciso descartar un número aún mayor de empleados, debido a que sus antecedentes médicos iniciales podrían restarle validez a los resultados (adictos al tabaco, alcohol, drogas, enfermedades cardiovasculares, etc.).

#### Fase Leve (1<sup>er</sup> al 3<sup>er</sup> año)

Los primeros síntomas habitualmente son ciertos comportamientos sociales anormales en el individuo y algunos cambios de humor. El sujeto comienza a evitar la permanencia en ámbitos ruidosos, como discotecas, fiestas y bares. Los reportes de familiares y amigos indican mayores grados de irritabilidad, tendencia al auto-aislamiento y existencia de lapsos de pérdida de memoria.

Posteriormente, comienzan las quejas de dolores estomacales no específicos, flatulencia y cólicos. Alrededor de los 2 años de avance, la mitad de la población mantiene consultas médicas regulares y padecen de infecciones en la orofaringe y bronquitis.

#### Fase Moderada (4<sup>to</sup> al 9º año)

Luego de 5 años de exposición, la mitad de la población estudiada manifestó dolores en el pecho, con predominancia en el lado izquierdo. Luego del sexto año de exposición, los cambios de comportamiento se hacen más notables. Se incrementa la tendencia al aislamiento social, convirtiéndose en un proceso activo. La pérdida auditiva contribuye a este aislamiento y la intolerancia al ruido priva al individuo de estar en muchos ámbitos comunes. El dolor de espalda también es un síntoma muy frecuente en esta etapa. Luego del séptimo año, es muy común que se manifiesten fatigas de causas aparentemente inexplicables, en muchos casos acompañadas de anorexia. Las probabilidades de infecciones de piel son muy elevadas, siendo entre ellas muy comunes las infecciones bucales micóticas y virales. Comúnmente se registran lesiones e inflamaciones del estómago y el duodeno.

A los 8 años, se manifiestan problemas urinarios, que incluyen *disuria* (dolor al orinar) y cónicos renales. Usualmente estos dolores desaparecen con el descanso o en períodos de vacaciones. También se ha encontrado sangre en la orina (*hematuria microscópica*) luego de una exposición continua de más de 2 h, en muchos casos sin una infección asociada. La probabilidad de tener cálculos renales durante esta etapa es de un 23 %.

Cerca de los 9 años de exposición, la conjuntivitis presenta un 50 % de probabilidades de aparición, pero el tratamiento convencional no resulta efectivo. Son frecuentes las reacciones alérgicas, como las erupciones cutáneas y la *rinitis* (inflamación de la mucosa de las fosas nasales).

La mayoría de estos síntomas se detienen temporalmente en un receso ocupacional y desaparecen en forma permanente al cambiar de trabajo.

### Fase Severa (luego del 10º año)

En esta etapa, más de la mitad de la población ha realizado consultas psiquiátricas. Algunos de los diagnósticos más comunes son ansiedad y depresión, también existen tendencias suicidas. En varios individuos se registraron intentos de suicidio, siendo común que posteriormente no recuerden que sucedió durante el incidente. Además, muchos individuos en esta fase experimentan reacciones violentas ante algunos estímulos, en especial los ruidos intensos y repentinos. También se producen algunos déficit cognitivos debido a lapsos de perdida de la memoria.

A los 12 años de exposición, en muchos individuos aparecen hemorragias nasales, digestivas o en la *mucosa conjuntiva* (membrana protectora del ojo). Simultáneamente, más de la mitad de la población afectada manifiesta várices o hemorroides. Por otro lado, comienzan a aparecer patologías gastrointestinales más serias, como úlceras duodenales, colitis espástica, esofagitis, apendicitis, divertículos de esófago o de colon y alteraciones en los movimientos de la vesícula biliar.

La vista también se ve afectada. A los 13 años de exposición, la mitad de los sujetos mostraron decaimientos anormales en la precisión visual. Durante igual período, un número similar de empleados padece de dolores de cabeza en forma habitual, síntoma no mitigado por los tratamientos regulares. Además, se manifiestan dolores osteo-articulares severos en la rodilla, el codo y el hombro. Cabe mencionarse que en el estudio más numeroso realizado, todos los individuos tenían afectada la articulación del lado hábil (Castelo Branco, 1999).

Alrededor del catorceavo año de exposición, en más de la mitad de los individuos se han manifestado dolores musculares intensos, y en gran parte de los sujetos se hicieron presentes algunos cambios neurológicos. El más común fue el *reflejo palmo-mental*, que es un antiguo reflejo que consiste en la contracción del mentón cuando se toca la palma de la mano. En forma más escasa, se halló *disquinesia facial* desencadenada por estímulos sonoros (los tics son un tipo de disquinesia). En el 15% de la población se ha detectado epilepsia tardía. Los efectos sobre el equilibrio son muy frecuentes, y van desde mareos hasta vértigo severo. En unos pocos individuos se observó un déficit neurológico único y repentino, diagnosticado como *accidente cerebral vascular isquémico*.

En un 17 % de la población apareció algún tipo de deficiencia respiratoria y en un número aún mayor de personas se produjeron cambios endocrinos. La mayoría fueron disfunciones de la glándula tiroides y diabetes. La tasa de disfunciones en la tiroides en la población estudiada fue 12,8 %, mientras que para la misma edad media la tasa general es 0,97 % (Castelo Branco, 1999).

Por último, a 20 % de los trabajadores en esta fase del VAD, se le han diagnosticado tumores malignos de características peculiares. Se ha registrado un caso de fallecimiento, cuya causa fue un taponamiento cardíaco debido a la ruptura del miocardio provocada por un infarto (Castelo Branco, 1999).

### 3.6. GRUPOS ESPECIALMENTE VULNERABLES

Existen grupos de personas especialmente sensibles al ruido, las cuales merecen un análisis diferenciado. La mayor parte de los límites sonoros fijados por las legislaciones están basados en estudios de campo realizados que suponen audición y sensibilidad al ruido dentro de rangos "normales". A pesar de ello, los rangos normales son muy amplios y variables. Esto, sin duda dificulta el trazado de límites. Por esta razón, no sería realista esperar que la legislación general proteja adecuadamente a algunas personas especialmente sensibles al ruido.

En algunos grupos humanos de determinadas características, pueden encontrarse mayor cantidad de personas más sensibles al ruido que la media. Entre los grupos especialmente vulnerables se encuentran: los niños y bebés en general, los bebés en incubadora, los aún no nacidos, los ancianos, los niños y adultos en proceso de lectura o aprendizaje, los neuróticos, las personas con problemas auditivos, los ciegos y los enfermos en general. Existen muchas personas con una sensibilidad más aguda frente al ruido, tanto dentro como fuera de los grupos mencionados. Se ha intentado relacionar la sensibilidad al ruido con variaciones fisiológicas cuantificables. En algunos casos han sido establecidas correlaciones entre la sensibilidad al ruido y el pulso dactilar, la presión sanguínea y el umbral auditivo en 12 kHz (Harris, 1995).

Cada uno de estos grupos humanos especialmente vulnerables, requiere de un análisis diferenciado de acuerdo a sus características particulares. Uno de los frutos de dicho análisis, debería ser el establecimiento de normas y leyes que regulen las condiciones acústicas a que cada uno de estos grupos puede estar expuesto. En algunos casos, esta reglamentación diferenciada es muy difícil de implementar, en especial cuando las personas que integran el grupo vulnerable se encuentran distribuidas en ámbitos comunes a toda la sociedad. Los grupos que poseen su propio ámbito de inmisión facilitan la tarea de reglamentación de niveles aceptados. Entre éstos se encuentran: los niños y jóvenes en clase, los bebés en incubadora, las salas de parto (y otros ámbitos médicos y educativos que las mujeres embarazadas frecuentan), los enfermos en hospitalares, los ciegos en establecimientos especiales y los ancianos en asilos.

# CAPÍTULO 4

## EL DECIBEL “A”

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA PONDERACIÓN “A”

El  $dB(A)$  (también llamado  $dBA$ ,  $dB_A$ , *decibel “A”*, ó *decibel ponderado A*), constituye la forma de expresar el nivel de presión sonora en decibeles, de un sonido cuyo espectro ha sido ponderado con el *filtro “A”* (también llamado *ponderación “A” o curva “A”*). El filtro “A” es una curva que simula la respuesta del oído humano en determinadas condiciones. Una vez que el nivel de presión sonora de un ruido es medido como una magnitud física, el filtro “A” corrige cada banda del espectro medido de acuerdo a la respuesta en frecuencia del oído humano. O sea, otorga mayor importancia a las bandas de frecuencia para las cuales el oído tiene mayor sensibilidad y resta relevancia a las bandas del espectro audible que requieren de mayores valores energéticos para ser oídas. Este proceso se realiza simplemente sumando y restando decibeles a los niveles sonoros medidos, según cual sea su banda de frecuencia.

Banda de Frecuencia [Hz]	Ponderación “A” [dB]	Banda de Frecuencia [Hz]	Ponderación “A” [dB]
10	-70,4	500	- 3,2
12,5	-63,4	630	- 1,9 .
16	-56,7	800	- 0,8
20	-50,5	1.000	- 0
25	-44,7	1.250	+ 0,6
31,5	-39,4	1.600	+ 1,0
40	-34,6	2.000	+ 1,2
50	-30,2	2.500	+ 1,3
63	-26,2	3.150	+ 1,2
80	-22,5	4.000	+ 1,0
100	-19,1	5.000	+ 0,5
125	-16,1	6.300	- 0,1
160	-13,4	8.000	- 1,1
200	-10,9	10.000	- 2,5
250	- 8,6	12.500	-4,3
315	- 6,6	16.000	-6,6
400	- 4,8	20.000	-9,3

Tabla 4.1: Corrección realizada por la ponderación “A” en cada banda de tercio de octava desde 10 Hz hasta 20 KHz.

La curva "A" pondera con mayor nivel las frecuencias medias, luego las altas y, por último, las frecuencias bajas (para las cuales nuestro oído tiene menor sensibilidad). La banda de frecuencia más ponderada por la curva "A", es el tercio de octava centrado en 2,5 KHz. En la Tabla 4.1 y la Fig. 4.1, se indican las correcciones realizadas por la ponderación "A".

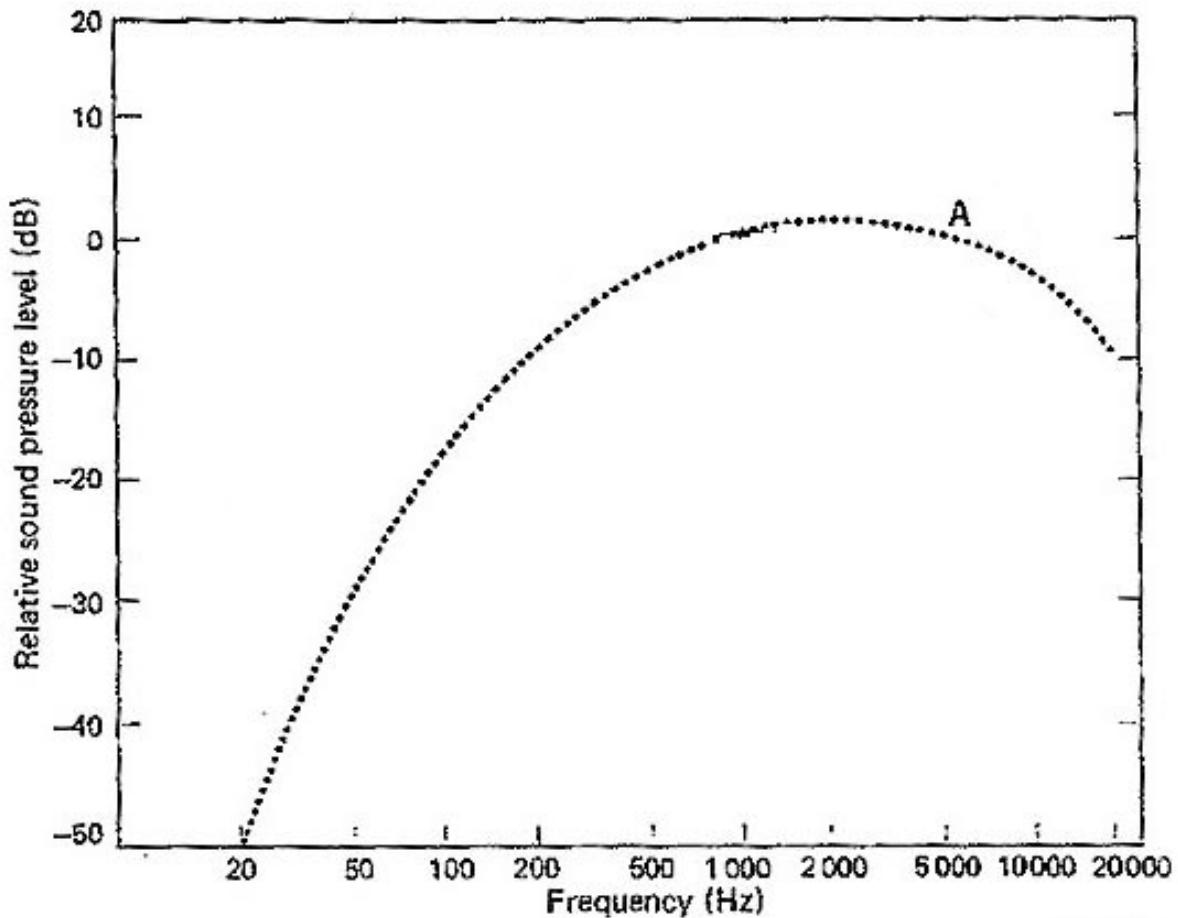


Fig. 4.1: Curva "A".

Cuando se mide un ruido cuyo contenido espectral está repartido en varias bandas (ya sea de octava o de tercio de octava), cada una de ellas es ponderada según la curva "A". Todas las bandas de frecuencia presentes en el ruido pueden sumarse energéticamente (ver Sección 2.3.4), dando como resultado un valor único expresado en "dB(A)".

## 4.2. LA UTILIDAD DE UN VALOR ÚNICO

El dB(A) constituye un *valor único* (llamado también *número único*, *baremo único*, *nivel global*, *nivel total* o a veces simplemente *nivel sonoro*). Esto significa que un ruido complejo con energía acústica distribuida en muchas bandas de frecuencia del espectro audible, puede ser expresado mediante un solo valor numérico en dB(A).

La posibilidad de expresar una gran cantidad de valores de un ruido complejo mediante un único valor, es atractiva y muy práctico. Esta es una de las razones por las cuales el dB(A) ha sido ampliamente adoptado en el ámbito normativo y jurídico. Sin embargo, como hemos visto anteriormente, la ponderación “A” es un filtro que, antes de proporcionar un valor único le da énfasis a algunas bandas de frecuencia y se lo resta a otras. Luego de realizado este proceso, es obtenido un nivel global y ya no es posible volver atrás para reconstruir el nivel sonoro original de cada banda del espectro.

Se supone que la ponderación que se le realiza a cada banda del espectro para obtener el nivel global en dB(A), está dada por la respuesta auditiva del oído humano. Sin embargo, como se verá más adelante, esto es válido sólo bajo ciertas condiciones.

## 4.3. ORIGEN DEL dB(A)

### 4.3.1. UN POCO DE HISTORIA

En el año 1929 en la Ciudad de Nueva York, aparecieron las primeras publicidades de instrumentos medidores de ruido. Cuando se diseñó el primer sonómetro, se pensó que si al amplificador incluido en el equipo se le daba una respuesta en frecuencia que coincidía con los contornos de igual sonoridad, se cumpliría el objetivo buscado de que el instrumento lea directamente el nivel de sonoridad. Bajo esta premisa, fueron incluidos originalmente los filtros “A” y “B” en los equipos.

En 1932, con el apoyo de la *Acoustical Society of America*, se forma el “Committee Z24-W-18” en la *American Standards Association* (sobre acústica). En 1936 ya se contaba con el borrador de una norma para medidores de presión sonora (Scott, 1957). Este borrador constituyó la base de lo que hoy es la estandarización de sonómetros e incluía los filtros de ponderación espectral “A”, “B” y “C”.

En 1944 la norma es revisada y aprobada bajo la denominación *American Standard Z24.3-1944, “Sound Level Meters for Measurement of Noise and Other Sounds”*. También fue creado el Comité Internacional “Technical Committee 29” of the *International Electrotechnical Commission*, el cual discutió incumbencias y ajustes de la norma en forma posterior a su publicación. Parte de este análisis estaba centrado en la aplicación de las ponderaciones “A”, “B” y “C” y su relación con las curvas de igual sonoridad. Sin embargo, estos tres filtros originales no han sido modificados sustancialmente desde la confección del primer borrador en 1936. En general, el Comité Internacional optó por continuar la misma línea de las normas estadounidense y alemana, que ya habían sido elaboradas.

En 1957 el comité de análisis de la *Internacional Electrotechnical Commission* sugirió la posibilidad de que los sonómetros realicen una selección automática de la ponderación espectral a utilizar, en función de los niveles sonoros medidos. Otra recomendación que se realizó fue respecto a la nomenclatura de los decibeles (dB). Se propuso que si la ponderación no estaba expresada explícitamente en el nivel sonoro (como por ejemplo dB(A), dB(B), etc.), se asumiría que para niveles inferiores a 55 dB se utilizaba el filtro "A", para niveles comprendidos entre 55 y 85 dB el filtro "B", y para valores superiores la ponderación "C". Esta propuesta no fue aceptada (Young, 1957). Este mismo comité también rechazó la propuesta de Alemania de utilizar el DIN-phon como unidad de nivel sonoro. Tampoco favoreció la sugerencia de Francia de emplear el Sonodecibel<sub>A</sub>, ni la de Estados Unidos que propuso el dB(A) por medio del Dr. Robert W. Young, que fue el representante de E.E.U.U. ante el comité internacional (Hardy, 1957).

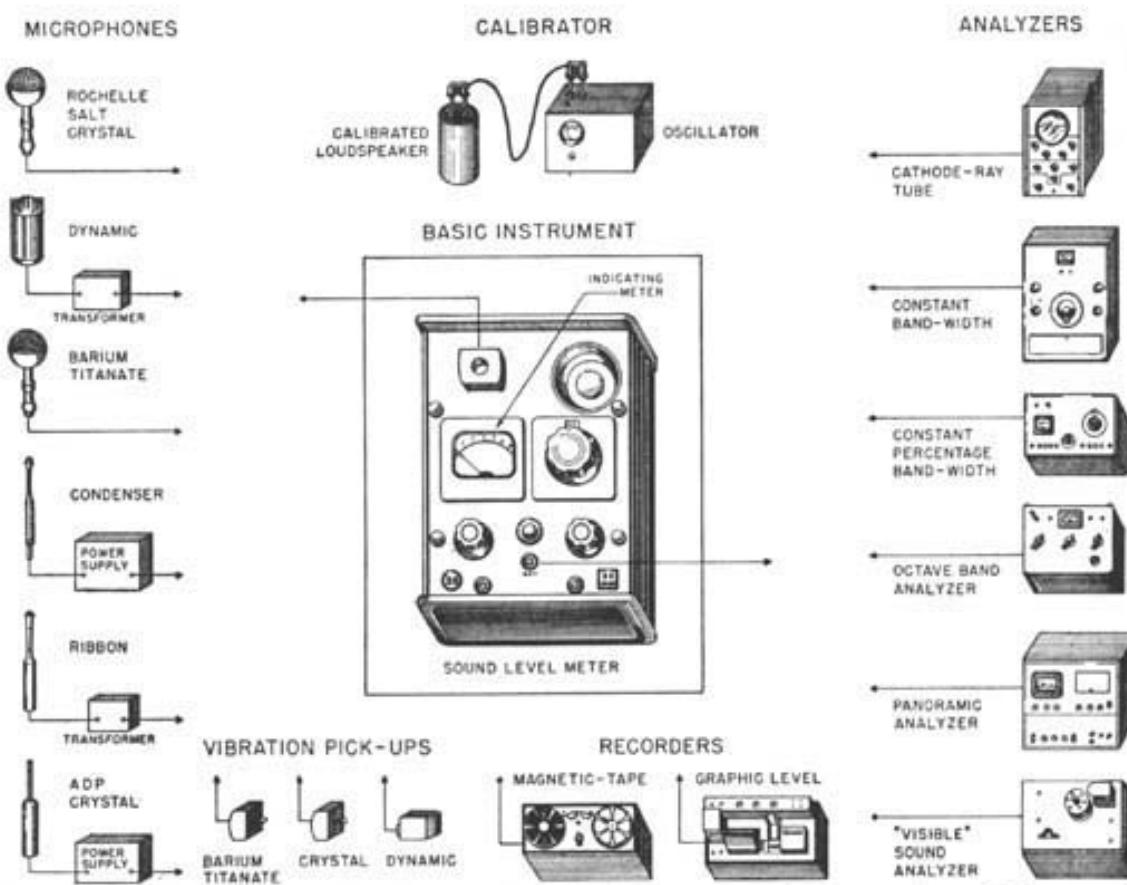


Fig. 4.2: Esquema de primeros instrumentos para mediciones acústicas (Beranek, 1996).

La norma mencionada (*American Standard Z24.3-1944*) define el *Nivel Sonoro ("Sound Level")* como sigue:

"El nivel sonoro de un ruido es, por definición, la lectura de un medidor de nivel sonoro fabricado para satisfacer los requerimientos de la American Standard Association y operado de la siguiente manera: uso del filtro "A" si las lecturas están comprendidas entre 24 y 55 dB, el "B" si se encuentran entre 55 y 85 dB y el "C" sobre 85 dB." (Beranek, 1996).

A los pocos años de la creación de las curvas de sonoridad, se ha verificado que su efectividad se limita a la medición de tonos puros y sólo cuando éstos no están demasiado separados en el espectro. Sin embargo, la utilización de los filtros de 1/1, 1/2 y 1/3 de octava colaboraron en el acercamiento de las mediciones con la sonoridad percibida por el oído humano.

En el año 1953, la norma original publicada en 1944 fue ampliada y denominada Z24.10-1953. Desde sus orígenes y hasta la actualidad, la norma que contiene las especificaciones sobre los medidores de nivel sonoro, ha sufrido varias actualizaciones, pero las curvas de ponderación espectral no han sido sustituidas.

#### 4.3.2. NACIMIENTO DE LA CURVA "A"

La curva "A" surgió a partir de los contornos de igual sonoridad, al igual que las curvas "B" y "C". Los contornos de igual sonoridad ó *curvas isofónicas* (ver 2.4.5) fueron hallados por primera vez por Fletcher y Munson en Inglaterra, en el año 1933 (Fletcher, 1933). Estos estudios dieron paso a la creación de las ponderaciones "A", "B" y "C", plasmadas en el borrador de la norma "Sound Level Meters for Measurement of Noise and Other Sounds", publicado por la *American Standard Association*, en 1936.

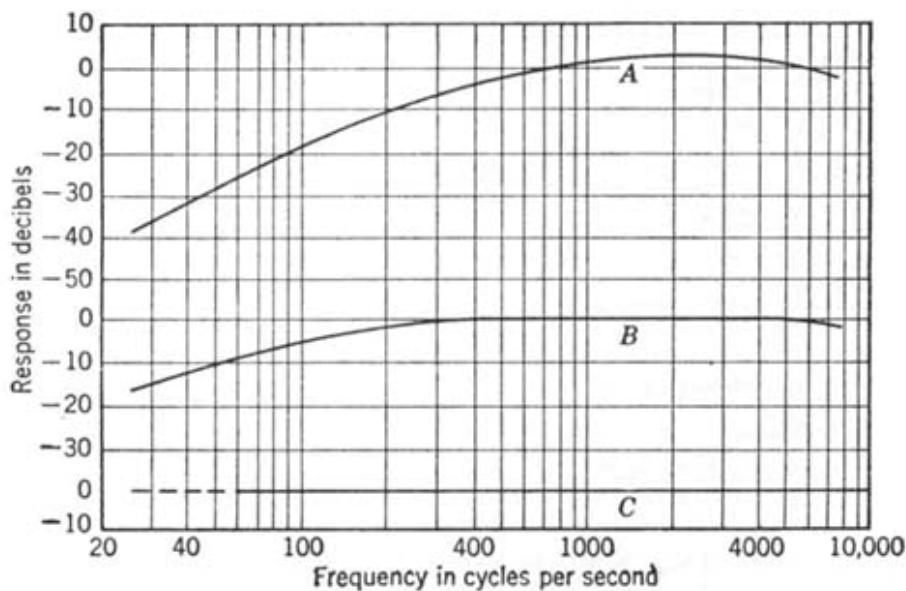


Fig. 4.3: Primer gráfico de las curvas "A", "B" y "C", incluido en la norma original "American Standard for Sound Level Meters", Z24.3-1944 (Beranek, 1996).

La ponderación "A" fue obtenida a partir de la curva de sonoridad de 40 fonos (ver Fig. 2.18). Si invertimos dicha curva, obtendremos la forma aproximada del filtro "A", lo que puede verse en la Figura 4.4. Aunque el dB(A) surgió de la inversión de la curva de 40 fonos, para su trazado se han simplificado considerablemente la dinámica que poseen las curvas isofónicas en frecuencias altas. Lo mismo puede decirse para las ponderaciones "B" y "C", que surgen de la simplificación de los contornos de 70 fonos y 100 fonos, respectivamente.

Se debe enfatizar que los contornos de igual sonoridad fueron hallados para tonos puros. Por dicho motivo, al elaborar curvas de ponderación a partir de estos contornos, se está asumiendo implícitamente que estas ponderaciones serán válidas únicamente para tonos puros.

Resumiendo, podríamos decir *que la ponderación "A" es una curva de corrección espectral que surge a partir del contorno de igual sonoridad para tonos puros correspondiente a 40 fonos y que fue definida originalmente para ponderar niveles de presión sonora comprendidos entre 24 dB y 55 dB.*

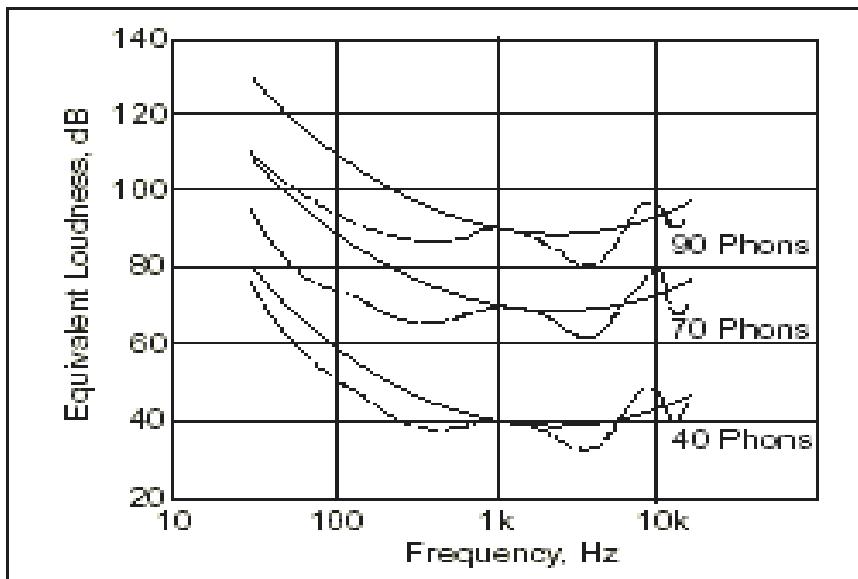


Fig. 4.4: Comparación de la ponderación "A" (invertida) con las curvas isofónicas de 40, 70 y 90 fonos (Masciale, 2002).

#### 4.4. APLICACIONES DEL dB(A)

La medición del nivel de presión sonora "A" es utilizada en un gran número de aplicaciones. Comenzando por los instrumentos acústicos como sonómetros y analizadores de espectro que todos ellos incluyen la ponderación "A" como modo de medición. La presencia de la curva "A" en los instrumentos responde a las exigencias normativa y legales sobre procedimientos de medición del ruido. La gran mayoría de la legislación que protege a las personas de la exposición al ruido en todo el mundo, ya sea en el ámbito laboral o comunitario, exige medir el ruido utilizando el filtro "A".

En muchos casos, la redacción técnica de las leyes que establecen los límites permisibles de ruido se origina en procedimientos normativos nacionales o internacionales. Algunos de los organismos encargados de la elaboración y publicación de normas técnicas (incluyendo las normas de acústica) en el mundo son citados como: *ISO (Internacional Standard Association)*, *EN (Comunidad Europea)*, *INN (Chile)*, *ANSI (USA)*, *UNI (Italia)*, *UNE (España)*, *IRAM (Argentina)*, etc. La mayor parte de las normas de acústica publicadas por estas instituciones y que especifican procedimientos de medición del ruido para distintos fines, requieren ponderar el

NPS con la curva “A”. En especial, esto es aún más notorio en los procedimientos donde lo que se busca normar tiene relación directa o indirecta con el impacto del ruido sobre las personas.

Entonces, podemos decir que el dB(A) fue exigido originalmente en la normativa que reguló la construcción de sonómetros en la primera mitad del siglo XX, luego invocado en las normas que establecen procedimientos acústicos y, por último, su uso se volvió obligatorio por medio de mecanismos jurídicos y de control fiscal (que a su vez han sido confeccionados en base a normativas técnicas). Estas exigencias legales, junto con la “inercia” de los procedimientos técnicos y el acostumbramiento a su uso, han provocado que se sigan fabricando más y más instrumentos que incluyen esta ponderación.

# CAPÍTULO 5

## LOS ESPECTROS SONOROS QUE AFECTAN LA SALUD

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizarán las frecuencias sonoras que son causantes de los distintos efectos del ruido en el ser humano. En el Capítulo 3 se estudiaron las consecuencias fisiológicas, psicológicas y sociales de la exposición al ruido, pero no se ha profundizado sobre el tipo de estímulo sonoro capaz de producir dichas consecuencias. En este capítulo se pondrá el énfasis en el tipo de ruido que es potencialmente causante de los distintos efectos. Debido a que el objetivo de esta tesis es evaluar la eficiencia de una curva de ponderación espectral, se centrará la atención en el análisis en frecuencia del ruido. Las otras variables objetivas del ruido, tales como su carácter temporal y su nivel sonoro, serán abordadas sólo en forma complementaria.

Sin embargo, las fuentes bibliográficas que entregan esta información espectral acerca de los efectos adversos, son escasas y limitadas. Más aún, como se mencionó en el Capítulo 3, muchos de los efectos del ruido aún no han sido demostrados con rigurosidad. En los casos que se brinda información espectral, muchas veces ésta es insuficiente y no incluye una relación dosis-respuesta en función de la frecuencia.

En muchos casos se ha intentado establecer niveles sonoros límites, sobre los cuales pueden tener lugar reacciones específicas. En algunos de estos estudios se ha cuantificado la energía sonora de inmisión en decibeles “A” solamente, con lo cual se puede estar cometiendo el error de detectar reacciones a niveles sonoros distintos de los niveles a los cuales se podría hallar la misma reacción ante ruidos de igual dB(A) pero distinto contenido espectral. Esto se debe a que, como se presentará, la mayoría de las respuestas humanas frente al ruido tienen dependencia de la frecuencia sonora.

A pesar de estas grandes limitaciones bibliográficas que se tiene hasta el día de hoy, en esta investigación se ha hecho un gran esfuerzo por conseguir gran parte del escaso y disperso material existente. En los casos en que la información bibliográfica es incompleta o contradictoria, se han realizado análisis asociativos. Este análisis es útil para el trabajo planteado, pero está sujeto a verificación empírica para poder generalizarse.

En este capítulo se omiten algunos efectos del ruido que han sido estudiados en el Capítulo 3. La causa de esto es simplemente que no se ha hallado información espectral de ellos.

## 5.2. FRECUENCIAS DE IMPORTANCIA PARA EL SISTEMA AUDITIVO

### 5.2.1. EL ESPECTRO AUDITIVO

Se suele decir que el espectro auditivo humano está comprendido entre 20 Hz y 20000 Hz. En efecto, muy pocos individuos escuchan sobre 20 kHz o bajo 20 Hz. La mayoría de las personas poseen su límite superior por debajo los 20 kHz y su límite inferior por sobre los 20 Hz. Por ejemplo, un individuo sano auditivamente podría ser sensible a estímulos sonoros comprendidos entre 40 Hz y 18 kHz, mientras que otro sujeto con audición normal podría escuchar sonidos entre 20 Hz y 16 kHz. Es usual que los niños escuchen hasta frecuencias cercana a los 20 kHz, pero para la mayoría de los adultos el límite superior se encuentra en torno a los 15 kHz (Moore, 2003).

En la Figura 5.1 se presentan los mínimos niveles audibles MAF y MAP que se estudiaron en el Capítulo 2 (Sección 2.4.3) y los umbrales máximos correspondientes a las sensaciones de molestia, cosquilleo o punzación en el oído.

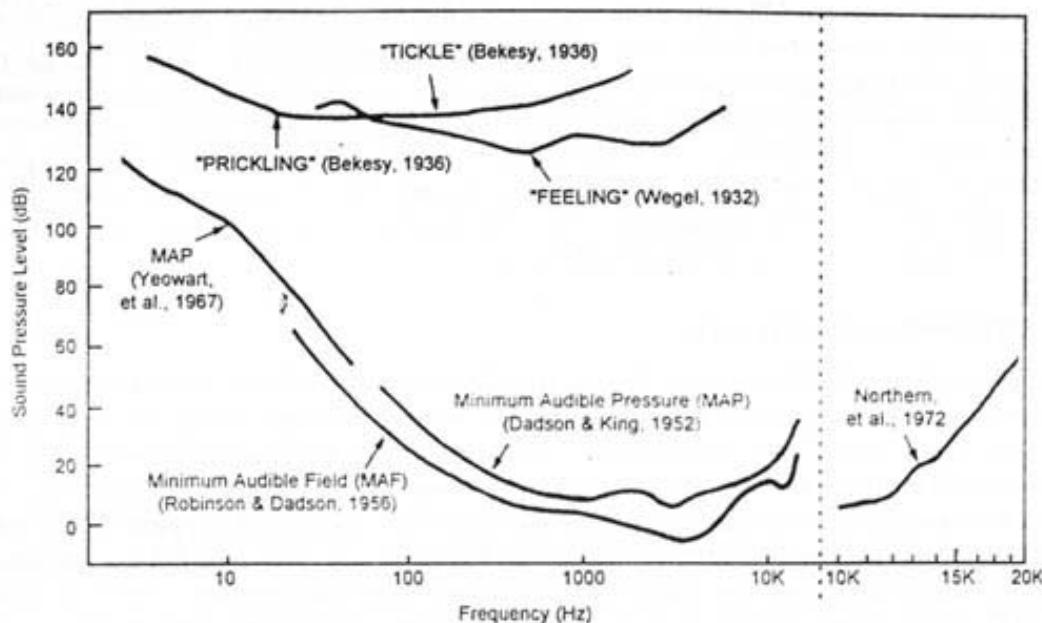


Fig. 5.1: Umbrales auditivos inferiores: binaural en campo libre (MAF), monoaural con audífonos (MAP) y binaural en campo libre para alta frecuencia (derecha). Umbrales superiores de molestia ("feeling") y de sensación de punzación o cosquilleo ("prickling" y "tickle"). (Gelfand, 1998)

La sensibilidad auditiva varía con la frecuencia pero también con los distintos niveles sonoros. Esto se observa claramente en las curvas de igual sonoridad (Figura 5.2). Estas curvas fueron halladas por Robinson y Dadson (Gelfand, 1998) en el año 1956 (posteriores a las curvas de Fletcher y Munson que han sido presentadas en el Capítulo 2).

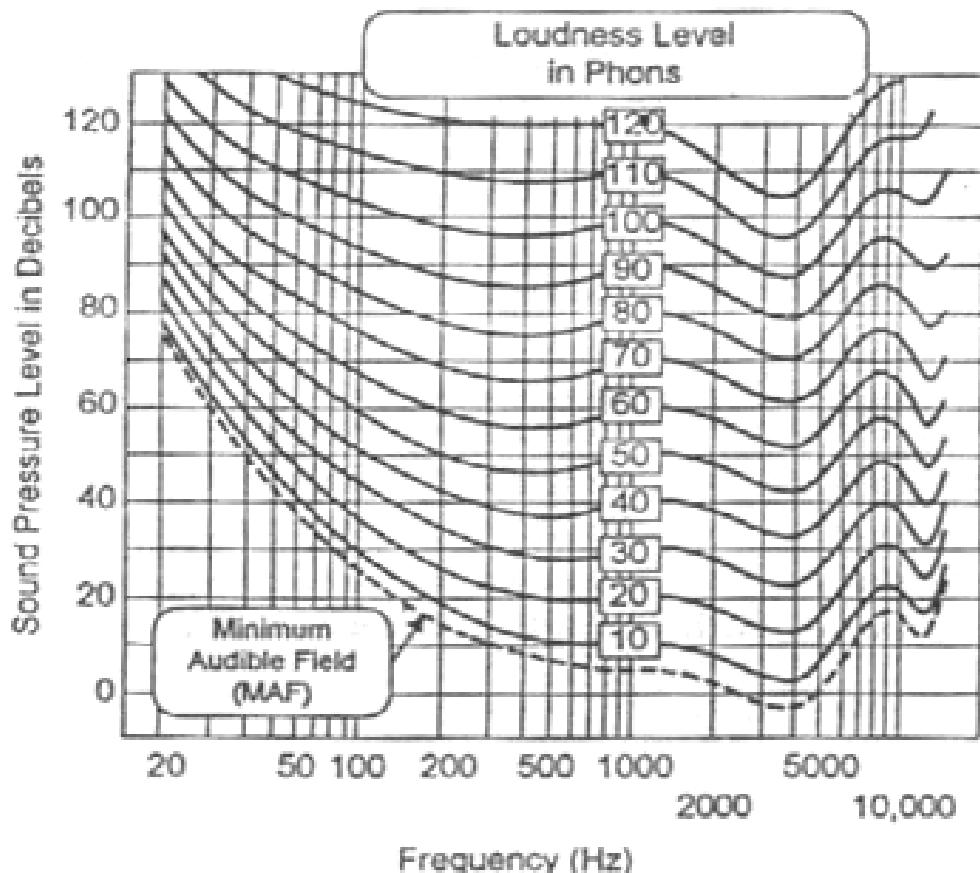


Fig. 5.2: Curvas de igual sonoridad halladas por Robinson y Dadson en 1956 (Gelfand, 1998).

### 5.2.2. RESONANCIAS EN EL OÍDO

Ciertas frecuencias particulares que presenta el oído son dignas de ser consideradas. Algunas de ellas son resonancias propias de su anatomía. Parte de estas resonancias son la causa del incremento o decremento de la sensibilidad auditiva en distintas zonas del espectro auditivo.

#### Canal auditivo externo

El canal auditivo externo se comporta de manera similar a un tubo abierto en un extremo, el cual resuena a la frecuencia cuya longitud de onda es 4 veces la longitud del conducto:

$$f_0 = \frac{c}{4L} \quad (5.1)$$

La longitud del canal auditivo en un adulto es de aproximadamente 23 mm (Gelfand, 1998), lo cual implica que la resonancia se encontraría alrededor de los 3,7 kHz. Esta frecuencia coincide con la zona de mayor sensibilidad auditiva en la curva de umbrales auditivos (ver Figura 5.1) y en las curvas isofónicas (tanto las de Fletcher y Munson como las de Robinson y Dadson).

(ver Figuras 2.16 y 5.1). Otros autores consideran que la resonancia del canal auditivo está situada en 3000 Hz (Recuero, 1994), 3500 Hz (Miyara, 2003) y 4000 Hz (Kryter, 1985; Arenas, 1988).

Debido a que la resonancia del canal auditivo es dependiente de su longitud, es esperable que la frecuencia de máxima sensibilidad de cada individuo dependa de su anatomía. También sería natural que en los niños esta frecuencia sea superior (debido a que su canal auditivo es más corto).

La Figura 5.3 muestra la *función de transferencia del canal auditivo*. Se observa que la zona de mayor transmisión está comprendida entre 2 kHz y 5 kHz. La resonancia no es tan selectiva en frecuencia como la de un tubo rígido. Esto se debe a que el canal auditivo es irregular y, además, tanto sus paredes como la membrana timpánica no son superficies rígidas. Éstos son factores que otorgan amortiguamiento en torno a la frecuencia de resonancia.

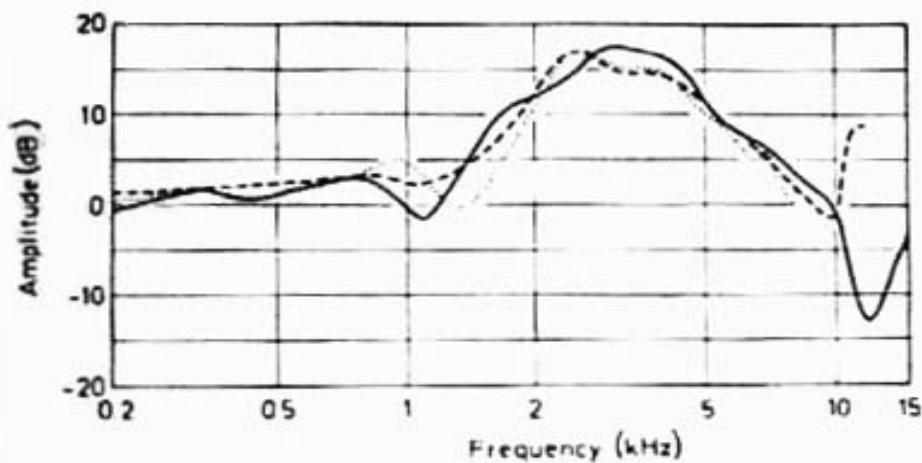


Fig. 5.3: Función de transferencia del canal auditivo a 0° de azimuth (de frente al sujeto) según distintos estudios: Mehrgardt, 1977 (línea sólida) y Shaw, 1974 (línea segmentada) (Gelfand, 1998).

La amplificación que proporciona el canal auditivo en las frecuencias medias–altas, puede alcanzar los 15 dB. La curva de transferencia del canal auditivo refleja su comportamiento de amplificador (o atenuador) en función de la frecuencia. La amplitud de la curva para una frecuencia dada depende del ángulo de incidencia del sonido, sin embargo la máxima amplificación se encuentra en torno a 3500 kHz para todo ángulo de incidencia (Moore, 2003).

### Pabellón Auditivo

El pabellón auditivo (u oreja), contribuye a la detección de la procedencia del sonido en frecuencias altas. Debido a que su dimensión lineal más grande es de 6 cm aproximadamente, la oreja “coloreará” el sonido incidente recién a partir de los 1500 Hz o 2000 Hz. La habilidad para la localización sonora (ver Sección 2.4.7), es incrementada cuando la señal acústica contiene componentes sobre 4000 Hz o 5000 Hz (Blauert, 2001).

La función de transferencia del pabellón auditivo depende del ángulo de incidencia. Por lo cual, para analizar las frecuencias de resonancia es necesario conocer los ángulos de incidencia

del sonido. Además, pueden registrarse fluctuaciones significativas en la respuesta de diferentes individuos debido a la morfología del pabellón auditivo. Estas diferencias son máximas **sobre 6 kHz** (Moore, 2003).

### Membrana Timpánica

El tímpano se comporta como una membrana rígida aproximadamente hasta 2400 Hz, sobre esta frecuencia comienza a deflectarse en distintos modos de vibración (Díaz, 2002). Adicionalmente, Moore indica que los sonidos que llegan al tímpano se encuentran resaltados en el rango de 1,5 kHz a 6 kHz, como resultado de la corrección espectral realizada por las estructuras que alteran el sonido en forma previa (canal auditivo externo, pabellón auditivo, cabeza y hombros) (Moore, 2003).

### Oído Medio

Éste ofrece una mayor eficiencia para frecuencias medias, comprendidas entre 500 Hz y 4000 Hz (Moore, 2003). La frecuencia de resonancia del oído medio (incluyendo la membrana timpánica y la cadena de huesosillos), aunque existen algunas pequeñas discrepancias, este valor estaría comprendido entre 800 Hz y 1200 Hz (Gelfand, 1998; Arenas, 1988; Recuero, 1994;).

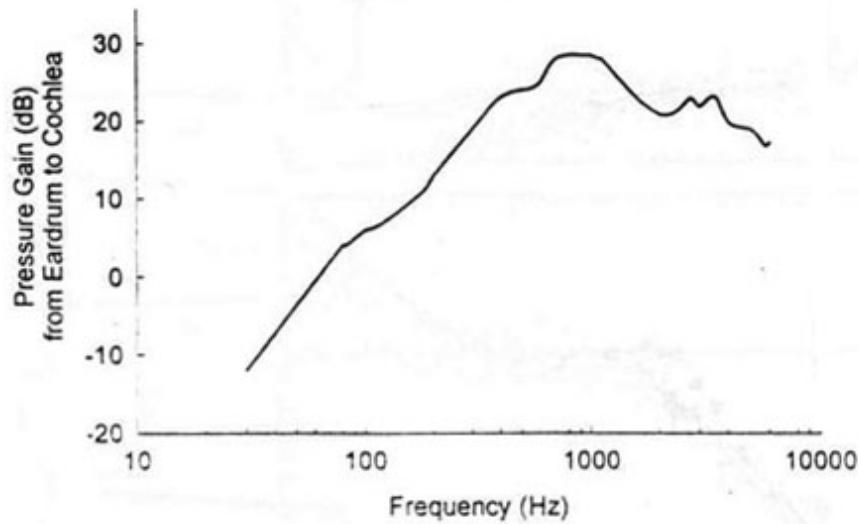


Fig. 5.4: Función de transferencia del oído medio, desde la membrana timpánica hasta el ingreso a la cóclea (Gelfand, 1998).

### Cabeza y Hombros

La Figura 5.5 muestra las ganancias parciales en función de la frecuencia, correspondientes a las componentes anatómicas capaces de alterar las ondas sonoras incidentes sobre el oído.

Si consideramos el diámetro aproximado de la cabeza (cerca de 18,5 cm), podemos deducir que se producirá una alteración considerable sobre las ondas sonoras de

longitud de onda menores que 4 veces éste diámetro. Esto implica que el efecto de la cabeza se produce a partir de aproximadamente 500 Hz.. En la Figura 5.5 se grafica este efecto, así como el de las demás partes del cuerpo cercanas al oído. También está trazada la suma de todas estas funciones de respuesta espectral. Como se ha mencionado, estas “coloraciones” sobre las ondas que produce la parte superior de cuerpo, dependen de los ángulos de incidencia del sonido. Las curvas de la Figura 5 corresponden a una fuente situada a la misma altura de los oídos pero a 45° del frente del sujeto.

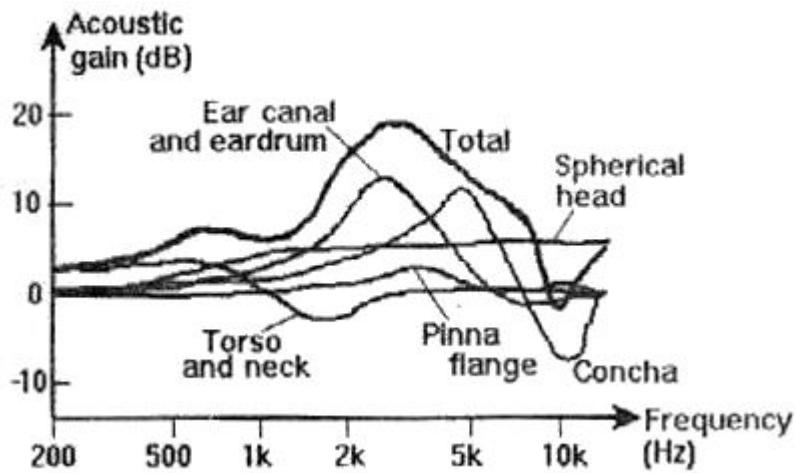


Fig. 5.5: Funciones de transferencia (a 45° al frente del individuo) del canal auditivo y tímpano (“ear canal and eardrum”), de una cabeza esférica (“spherical head”), pabellón auditivo (“pinna flange”), torso y cuello (“torso and neck”) y suma de todas las respuestas en frecuencia nombradas (Cook, 1999).

Se puede observar que el efecto total de las correcciones parciales es más significativo entre 2000 Hz y 5000 Hz. Para el ángulo de incidencia utilizado, tiene su máximo en 2500 Hz, aproximadamente. El patrón de corrección resultante puede variar entre individuos, especialmente en las frecuencias superiores a 1000 Hz (Moore, 2003).

### 5.2.3. MECANISMOS DE AUTOPROTECCIÓN DEL OÍDO

Los mecanismos de autoprotección del oído (ver Sección 2.4.2) también poseen una respuesta espectral. En general, la rigidización de un sistema vibrante reduce la transmisión de las bajas frecuencias, mientras que la inercia que ofrece el sistema es lo que limita la propagación de las altas frecuencias. El reflejo estapedial constituye un mecanismo del primer tipo, ya que se basa en una rigidización ósea, brindando eficiencia en la protección respecto a las frecuencias bajas. Una vez alcanzado el nivel sonoro y el tiempo necesario para activar este mecanismo, la reducción de la transmisión sonora tendrá lugar, pero sólo a frecuencias inferiores a 2000 Hz. Este reflejo auditivo se puede interpretar como un filtro pasa-altos que es activado luego un lapso comprendido entre 20 ms y 150 ms (luego de que un sonido con alto contenido energético es recibido). El tiempo necesario para ser activado también depende del espectro del estímulo, aparentemente éste es mayor para los ruidos que también tienen contenido de frecuencias altas, por ejemplo el ruido blanco (Avan, 1987).

Una vez activada la protección, la atenuación proporcionada está comprendida entre 6 dB y 20 dB (en el rango de frecuencia mencionado) (Avan, 1987).

La Figura 5.6 muestra los resultados de un estudio realizado por Hung y Dallos en 1972 (Gelfand, 1998), donde se observa la dependencia de la frecuencia que posee la magnitud del reflejo auditivo, para distintos niveles de estímulos sonoros.

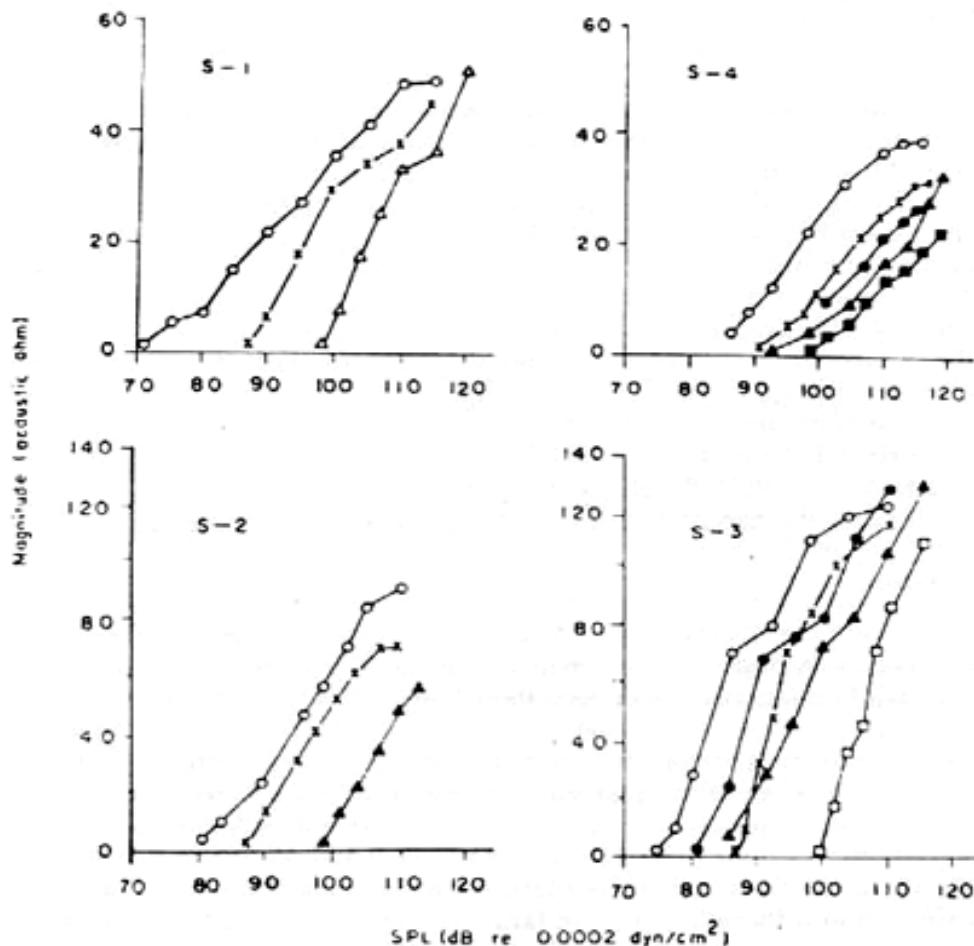


Fig. 5.6: Magnitud del reflejo auditivo de cuatro sujetos en función del nivel sonoro, para ruido de banda ancha (círculos huecos), tonos puros de 250 Hz (cuadrados huecos), 300 Hz (cuadrados llenos), 500 Hz (triángulos llenos), 600 Hz (triángulos huecos), 1000 Hz (cruces) y 1500 Hz (círculos llenos). (Gelfand, 1998).

El rango de frecuencias (medias y bajas) del cual protege el reflejo estapedial, proporciona resguardo frente a ruidos impulsivos de alto nivel, los que suelen tener contenido energético en este rango de frecuencias. Por otra parte, la zona del espectro en donde el oído medio es más susceptible, está comprendida entre 300 Hz y 1500 Hz, quedando dentro de la zona de protección del reflejo auditivo (Kryter, 1985).

El cerumen que se acumula en el canal auditivo tiene un efecto protector frente a los agentes externos (ver 2.4.2). Si su acumulación es excesiva se produce una atenuación en la intensidad sonora incidente al tímpano. Este efecto es mayor en altas frecuencias, por lo cual una

persona con el oído “tapado” percibirá el sonido “ecualizado” con deficiencias especialmente en la parte superior del espectro audible.

#### 5.2.4. OTRAS FRECUENCIAS AUDITIVAS A CONSIDERAR

##### Localización Binaural

Existe una frecuencia de transición donde la información de diferencia de fase con que el sonido alcanza ambos oídos empieza a ser ambigua. Esto se debe a que la distancia interaural comienza a ser mayor que media longitud de onda (ver Sección 2.4.7). Esta frecuencia depende de la distancia entre los dos oídos de cada persona, pero en general se encuentra en torno a 1500 Hz (Moore, 2003). Por encima de esta frecuencia, para localizar los sonidos es más fiable la diferencia de niveles en ambos oídos que la diferencia de fase. Esta diferencia de niveles se produce debido a la *sombra acústica* provocada por la cabeza.

##### Mecanismos de Detección de la Altura

En frecuencias bajas, el oído percibe la altura de los sonidos principalmente contando los ciclos de los sonidos periódicos. El otro mecanismo de detección de la altura es mediante la región de la cóclea donde es absorbida la onda acústica (ver 2.4.4). Cuanto más agudos son los sonidos menos distancia recorren dentro de la cóclea hasta ser transducidos por las células ciliadas. Este último mecanismo es el dominante sobre 1600 Hz. En la región de frecuencia intermedia entre la predominancia de cada uno de los dos mecanismos, ambos operan simultáneamente (Cook, 1999).

##### Conducción Ósea

El sonido llega al oído medio por medio de dos vías: aérea y ósea. Ambas vías generan los mismos patrones de vibración de la membrana basilar. La energía que llega al tímpano por vía ósea se incrementa al ocluir la conducción aérea del canal auditivo externo. Esto se puede lograr fácilmente mediante el empleo de un protector de inserción (tapón auditivo). La causa de este descenso de los umbrales de conducción ósea es el incremento de presión en el canal auditivo debido a la compresión de sus paredes cuando no hay conexión aérea con el exterior. Este fenómeno sucede especialmente bajo los 1000 Hz (Harris, 1995). Es importante notar que el empleo de tapones lo suficientemente ajustados podría reducir el umbral óseo incluso en 20 dB, mientras que un protector auditivo de circunscripción del pabellón auditivo sólo provoca leves incrementos en la conducción ósea (del orden de los 3 dB).

Este incremento de la conducción ósea podría redundar en una mayor vulnerabilidad del oído en situaciones que provoquen una elevada transmisión ósea de vibraciones. Es más, en casos en que la vibración del cráneo sea lo suficientemente alta y el ruido aéreo lo suficientemente bajo, el empleo de tapones auditivos podría ser contraproducente.

## Presión de Equilibrio del Oído Medio

En el caso que la presión al interior del oído medio no pueda ser equilibrada correctamente respecto a la presión ambiental, el tímpano no retornará adecuadamente a su posición de reposo, operando desplazado de su centro (ver 2.4.1). Esta deficiencia mecánica en la membrana timpánica producirá una caída en la eficiencia de la transducción de frecuencias altas.

Algunas de las causas por las que esto podría suceder, son que las trompas de eustaquio estuvieran obstruidas (por ejemplo por una congestión nasal) o que se produzca una cambio repentino en la presión ambiental, antes de que pueda ser debidamente compensado por el oído medio (por ejemplo al despegar en un avión, al cambiar de profundidad durante el buceo, al subirse a un ascensor veloz, etc.).

## Bandas Críticas

En el Capítulo 2 se ha explicado el significado de las bandas críticas y de los filtros auditivos. También se graficó la dependencia de la frecuencia que tienen sus anchos de banda, en dicho gráfico (Fig. 2.25) se observa que el ancho de banda de los filtros auditivos permanece aproximadamente constante hasta 500 Hz, a partir de donde empieza a aumentar con mayor pendiente. Sin embargo, en el Capítulo 2 no se ha hablado de la *relación señal ruido (S/R)* de los filtros auditivos respecto a la frecuencia.

La Figura 5.7 muestra que las frecuencias bajas tienen relaciones S/R más pequeñas. Esto implica que la energía acústica dentro de los filtros inferiores deberá ser mayor que la de los filtros superiores para tener igual S/R (como se vio en 2.4.10, la energía es sumada dentro de cada filtro auditivo). En otras palabras, podríamos decir que el oído tiene mayor ruido de fondo en frecuencias bajas que a las frecuencias superiores a 2000 Hz, por lo que se puede decir que es levemente más sensible a éstas últimas.

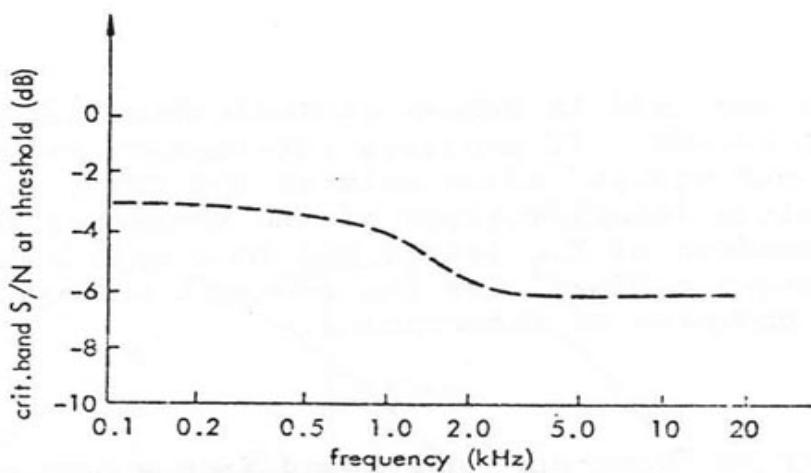


Fig. 5.7: Relación S/R de las bandas críticas auditivas, en función de la frecuencia.

### 5.3. PÉRDIDA AUDITIVA

La banda de frecuencia más susceptible a sufrir desplazamientos permanentes del umbral auditivo (PTS) es la octava centrada en 4000 Hz. Luego, los déficit se extienden a las frecuencias cercanas a 2000 Hz (Recuero, 2002). Posteriormente, la pérdida auditiva se extiende a las bandas inferiores (1000 Hz y luego 500 Hz), y por último a las demás bandas del espectro que habitualmente se evalúan en una audiometría (ver Figura 5.8).

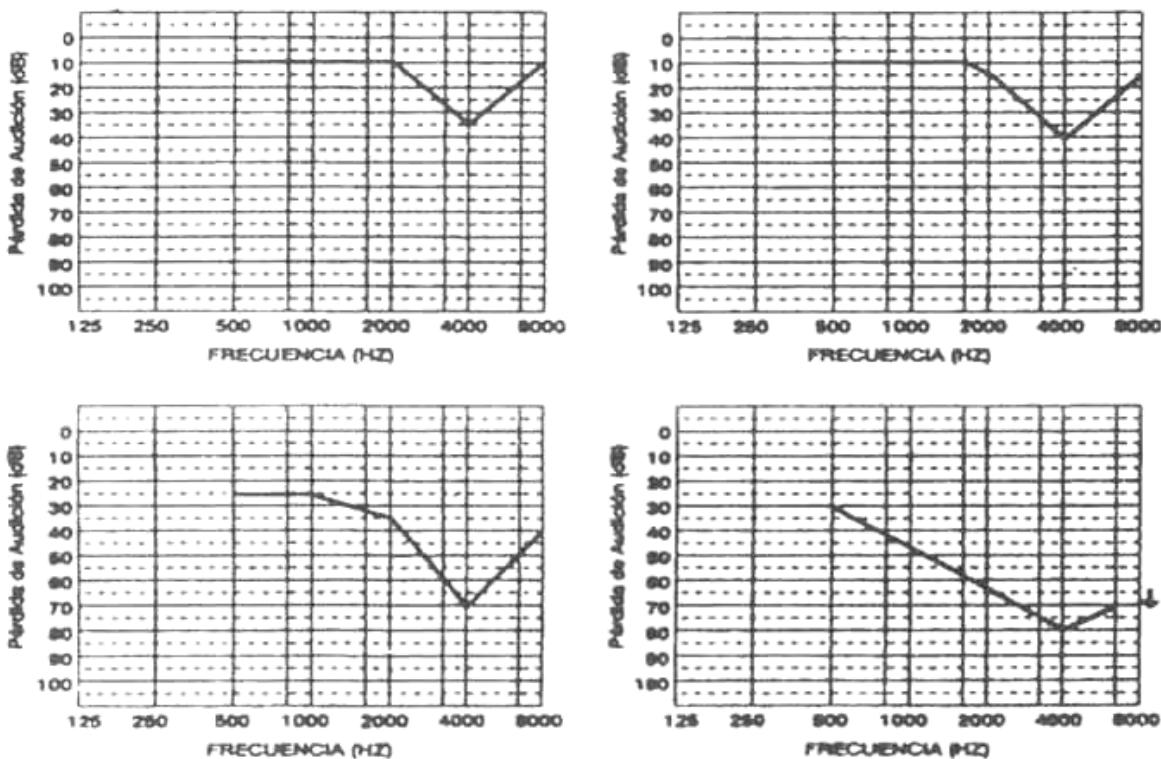


Fig. 5.8: Progresión de una pérdida auditiva normal ( Recuero, 2002).

Para los objetivos de este trabajo, es importante conocer las frecuencias de los estímulos causantes de la pérdida auditiva (las cuales no necesariamente coinciden con las frecuencias en las que tienen lugar los desplazamientos de umbrales).

*Las frecuencias más efectivas para producir desplazamientos de los umbrales, tanto temporales (TTS) como permanentes, son aquellas comprendidas entre media octava y una octava o más por debajo de la banda auditiva afectada* (Kryter, 1985). Esto es válido para tonos puros y para bandas estrechas de ruido.

En el caso de exposiciones a ruidos de banda ancha y relativamente plana, la pérdida máxima se produce en el rango de 3000 Hz a 6000 Hz (Harris, 1995). Las diferencias en el contenido espectral del ruido de banda ancha influyen en la extensión de la pérdida auditiva. La Figura 5.9 muestra la efectividad que tienen las distintas bandas (presentes en el ruido de banda ancha) para producir desplazamientos de los umbrales. Cuanto más bandas contenidas en el ruido alcancen el contorno trazado en la Figura 5.9, mayor será la extensión espectral de la pérdida auditiva (Kryter, 1985). La tabla contenida en la Figura 5.9 señala el TTS producido en las

frecuencias de 1000, 1500, 3500 y 6000 Hz, como consecuencia de una exposición de 15 minutos a ruidos de banda estrecha que están comprendidos cerca de una octava por debajo de la frecuencia del test. También se indica el TTS producido en las mismas frecuencias debido a la exposición al ruido de banda ancha.

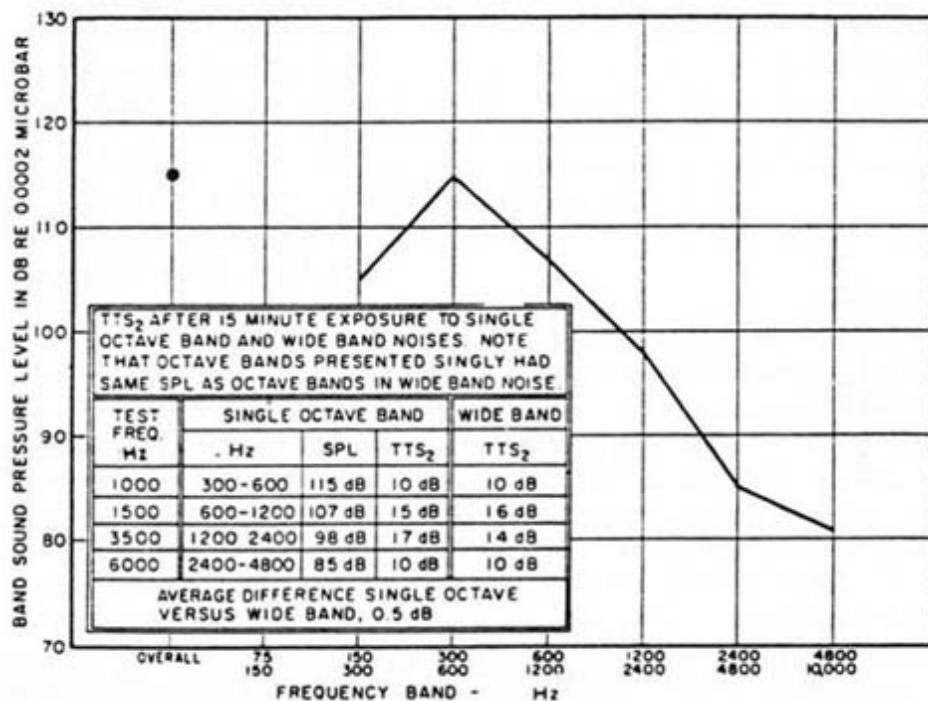


Fig. 5.9: Distribución espectral en bandas de octavas que produce el máximo desplazamiento temporal de los umbrales. En la tabla se indican los TTS producidos en cada frecuencia del test audiométrico, debido a 15 minutos de exposición a las bandas de ruido y los niveles señalados (Kryter, 1985).

Se puede observar que las octavas más agudas presentes en el ruido de banda ancha requieren de menores niveles sonoros para producir TTS que las octavas inferiores del espectro.

La Figura 5.10 muestra un ejemplo de desplazamientos de los umbrales debido a ruidos de 80 y 85 dB centrados en 425 Hz y 4000 Hz.

Si el ruido al que está expuesto una persona tiene una duración de unos pocos segundos o bien su nivel es inferior a 70 dB, el TTS que se pueda producir tendrá una duración menor a dos minutos (Harris, 1995). ***El TTS de corta duración se producirá en la misma frecuencia sonora del ruido que lo causó y los desplazamientos de los umbrales tendrán una distribución simétrica a ambos lados de la frecuencia central.***

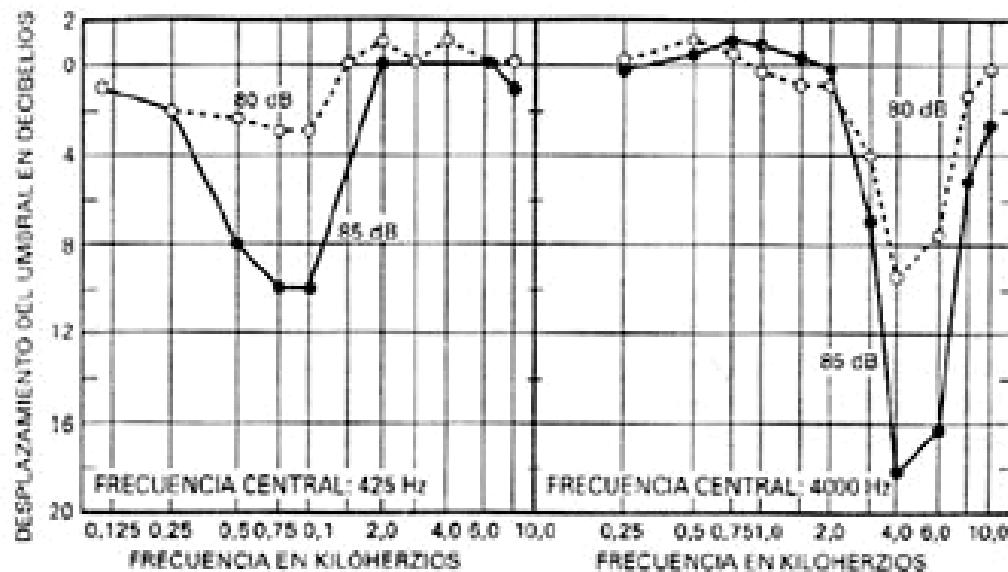


Fig. 5.10: Desplazamiento de umbrales auditivos debido a la exposición al ruido. Izquierda: 16 hrs. de exposición a banda de octava de ruido centrado en 425 Hz. Derecha: 24 hrs. de exposición a banda de octava de ruido centrado en 4000 Hz (Harris, 1995).

En cambio, si las condiciones de exposición son tales que el TTS producido tiene una duración mayor a aproximadamente 2 minutos, los desplazamientos máximos se producen en frecuencias superiores a las del estímulo, como se explicó anteriormente. Este tipo de situaciones se da frecuentemente en exposiciones de varias horas a más de 80 dB. En la Figura 5.11 se observa que un tono puro de 700 Hz con un nivel de 125 dB produce el desplazamiento centrado en 1000 Hz, luego de cinco minutos de exposición (Harris, 1995).



Fig. 5.11: Desplazamiento de umbrales auditivos luego de 5' de exposición a un tono de 700 Hz con un NPS de 125 dB ( Harris, 1995 ).

Otros estudios han demostrado que la energía en 425 Hz tiene correlación con los desplazamientos permanentes (PTS) en las bandas de 1000 Hz y 2000 Hz y las pérdidas permanentes en 4000 Hz tienen relación con la exposición a 1700 Hz (Harris, 1995).

El infrasonido de alta intensidad también puede causar TTS, y el tiempo de recuperación del oído podría ser mayor que el requerido ante la exposición a ruidos de frecuencias audibles. Además, valores extremadamente altos de infrasonido pueden provocar daños en el tímpano y en el oído interno (Berglund – Lindvall, 1995).

#### 5.4. DOLORES Y MOLESTIAS EN EL OÍDO

En general, los sonidos de nivel elevado pueden causar molestias y dolores en el oído. En el rango de 50 a 8000 Hz se producen molestias al superarse los 110 dB, cosquilleo sobre los 132 dB y arriba de 140 dB se manifiesta dolor (Beranek, 1996).

El ruido de frecuencia baja intenso puede producir dolor en el oído (Berglund – Lindvall, 1995). En algunos de los sujetos expuestos a bandas estrechas de ruido centradas entre 15 Hz y 50 Hz de 140 dB se han producido dolores en el oído medio en lapsos breves en los que se ha retirado la protección auditiva.

En individuos expuestos a bandas de ruidos estrechas centradas entre 2 Hz y 10 Hz de niveles sonoros comprendidos entre 142 dB y 153 dB, se han registrado molestias en el oído medio debido a la acumulación de presión. Para aliviar tal sensación, se debió realizar con frecuencia la *Maniobra de Valsalva*. Algunos sujetos notaron que estas mismas frecuencias les producían una sensación de cosquilleo en la membrana timpánica. La molestia debida a la acumulación de presión en el oído medio también se ha producido en frecuencias discretas entre 3 Hz y 30 Hz.

Estas reacciones desaparecían casi por completo cuando los sujetos utilizaban protectores auditivos de inserción. Todas estos efectos en el oído fueron hallados en estudios realizados en la U.S. Air Force y la NASA, publicados posteriormente por Mohr et al. (Kryter, 1985).

Algunos estudios han registrado que se produce sensación de cosquilleo en la membrana timpánica ante la presencia de ruido de frecuencia baja de banda estrecha (Harris, 1995).

El infrasonido de 7 Hz recibido con un nivel sonoro de 142 dB ha causado una sensación de alta presión en el oído (Johnson, 1982).

#### 5.5. BANDAS DE ENMASCARAMIENTO

En el Capítulo 3 se abordó el concepto de enmascaramiento, en esta sección se analizarán sus características espectrales. De manera simplificada y hasta cierto punto imprecisa, se podría decir que el enmascaramiento de un sonido se produce debido a un ruido de su misma frecuencia. Y debido a que esta última frecuencia podría ser cualquiera dentro del espectro audible, en apariencia no existirían frecuencias capaces de producir mayor enmascaramiento que otras. Sin embargo esta afirmación es errónea. La razón de ello tiene origen en la fisiología del oído.

Como se describió en el Capítulo 2, la energía acústica de cada frecuencia es absorbida por una zona particular de la membrana basilar. Cuanto más baja es la frecuencia de la onda que se propaga por la endolinfa, más avanza la onda hacia el extremo de la cóclea (helicotrema). Y en su avance, cada frecuencia sonora va excitando la membrana basilar hasta el punto donde es absorbida. En ese punto, la amplitud de la onda es máximo y su energía sonora es captada por el

sistema transductor del oído interno (ver Figura 2.8 del Capítulo 2). Por lo tanto, las frecuencias bajas en su camino al interior de la cóclea excitarán las zonas de frecuencias altas y medias hasta llegar a su zona de absorción. Cuanto más cerca de este punto se encuentre la onda, más amplitud tendrá y mayor será el enmascaramiento producido. La energía de los sonidos de frecuencia alta nunca llega a las zonas de la cóclea donde se transducen las frecuencias medias y bajas. Esta es la razón por la cual los sonidos graves enmascaran a los sonidos agudos pero no sucede lo contrario (ver Sección 2.4.4 para más detalles).

Los desplazamientos del umbral auditivo no se producen exclusivamente en la frecuencia del ruido, sino que se extienden hacia ambos lados del espectro. Sin embargo, como consecuencia de la distribución de las frecuencias sonoras en el oído interno que se mencionó recientemente, el esparcimiento lateral de los desplazamientos no es simétrico respecto a la frecuencia del ruido enmascarante. Los umbrales de las frecuencias superiores a la del ruido enmascarante son desplazados en mayor magnitud que los umbrales de las frecuencias inferiores. Esto significa que ***un ruido enmascara más a sus frecuencias superiores que a sus inferiores***. Este fenómeno se denomina *esparcimiento superior del enmascaramiento*.

En la Figura 5.12 se observa como una banda estrecha de ruido (90 Hz) centrado en 410 Hz eleva los umbrales en torno a esta frecuencia. Se puede observar la asimetría de los desplazamientos producidos.

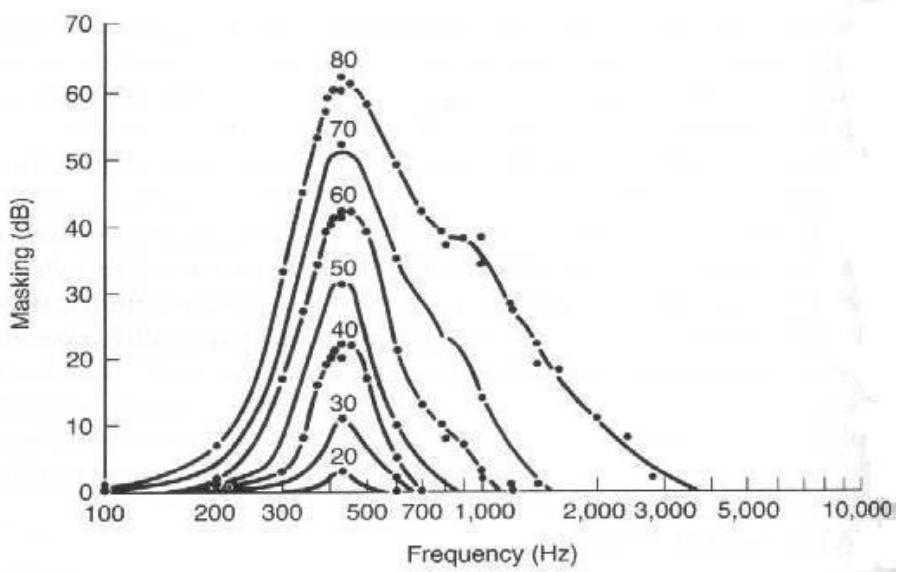


Fig. 5.12: Enmascaramiento producido debido a una banda de ruido de 90 Hz de ancho y centrado en 410 Hz (Moore, 2003).

Por otra parte, la extensión del esparcimiento lateral en torno a la frecuencia central depende de la selectividad en frecuencia del mismo. Las bandas de ruido producen mayores esparcimientos laterales que los tonos puros. La explicación de esto reside en el fenómeno de las bandas críticas descrito en el Capítulo 2 (Sección 2.4.10). ***Al incrementar el ancho de banda del ruido dentro de la banda crítica, será mayor el enmascaramiento*** producido sobre un tono

situado en el centro de esta banda, pero un aumento del ancho de banda por sobre los límites de la banda crítica no redundará en un incremento del umbral de dicho tono (Gelfand, 1998).

La magnitud de los niveles sonoros también produce un efecto en la simetría del enmascaramiento. ***Los ruidos de niveles elevados generan mayor asimetría en el esparcimiento lateral que los ruidos de bajo nivel.*** Esto implica que, a niveles altos los umbrales sonoros de la zona del espectro situada a la derecha de la frecuencia central son incrementados en mayor medida respecto al lado izquierdo que para niveles bajos (Kryter, 1985).

Según estudios que se han estado realizando, el decaimiento del umbral sonoro hacia la izquierda de la frecuencia del ruido enmascarante tiene una pendiente que está comprendida entre 80 a 240 dB por octava para el caso de tonos puros, y entre 55 y 190 dB por octava para bandas estrechas de ruido (Moore, 2003). La pendiente hacia el lado derecho del espectro es menor y depende de los parámetros antes mencionados.

Moore, en su reciente publicación “Psychology of Hearing” (Moore, 2003) explica el fenómeno de la asimetríapectral del enmascaramiento mediante la idea de que el espectro audible está dividido en filtros pasa – banda (ver Sección 2.4.10). La Figura 2.22 del Capítulo 2 muestra como puede ser obtenido el patrón de enmascaramiento para un tono de 1000 Hz mediante la superposición de filtros auditivos.

Debido a que el ancho de banda de estos filtros se incrementa con la frecuencia, un determinado tono enmascarante posee más energía contenida en los filtros de la derecha de la frecuencia del tono que en los de la izquierda. Para exemplificar el incremento de la asimetríapectral con los niveles, se muestra un gráfico con las curvas de enmascaramiento calculadas para un tono de 1000 Hz a distintos valores de presión sonora.

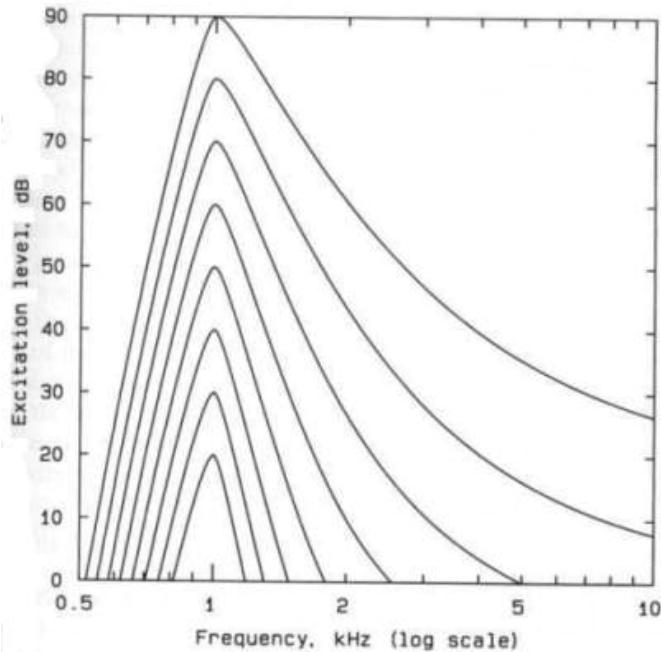


Fig. 5.13: Enmascaramiento calculado para un tono puro de 1000 Hz a distintos NPS (Moore, 2003).

Otras curvas experimentales halladas representan el enmascaramiento producido sobre el espectro por tonos de distintos niveles sonoros comprendidos entre 250 Hz hasta 2000 Hz (Figura 5.14).

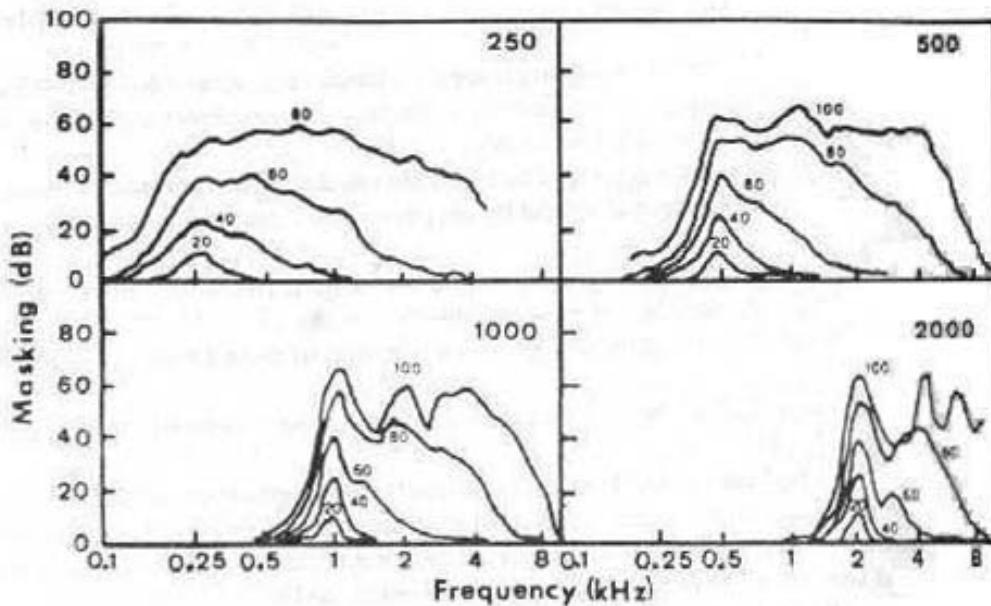


Fig. 5.14: Enmascaramiento producido por tonos puros de 150, 500, 1000 y 2000 Hz de niveles de 20, 40, 60, 80 y 100 dB (Gelfand, 1998) .

Entonces, si se tienen estímulos de frecuencia baja y alto nivel sonoro se producirá un enmascaramiento considerable en frecuencias bajas y medias. La Figura 5.15 muestra los desplazamientos de los umbrales producidos en presencia de tonos puros de frecuencia baja. Se puede observar que los tonos de niveles superiores causan mayor enmascaramiento de las frecuencias medias e incluso altas respecto a los tonos de menor nivel sonoro. Por ejemplo, un tono de 25 Hz recibido a 130 dB produce desplazamientos de los umbrales hasta frecuencias superiores a 4000 Hz (Kryter, 1985).

En la Figura 5.16 se compara el enmascaramiento producido por un tono puro de 400 Hz con otro tono de 2000 Hz, se observa claramente que el tono puro más grave produce enmascaramiento de una zona más grande del espectro que el más agudo (Recuero, 2002).

Es posible concluir entonces, que *los sonidos de frecuencia baja e incluso los infrasonidos, son estímulos potencialmente enmascadores. Este enmascaramiento no se produce solamente en las bajas frecuencias, sino en las medias y altas si su nivel es lo suficientemente elevado.*

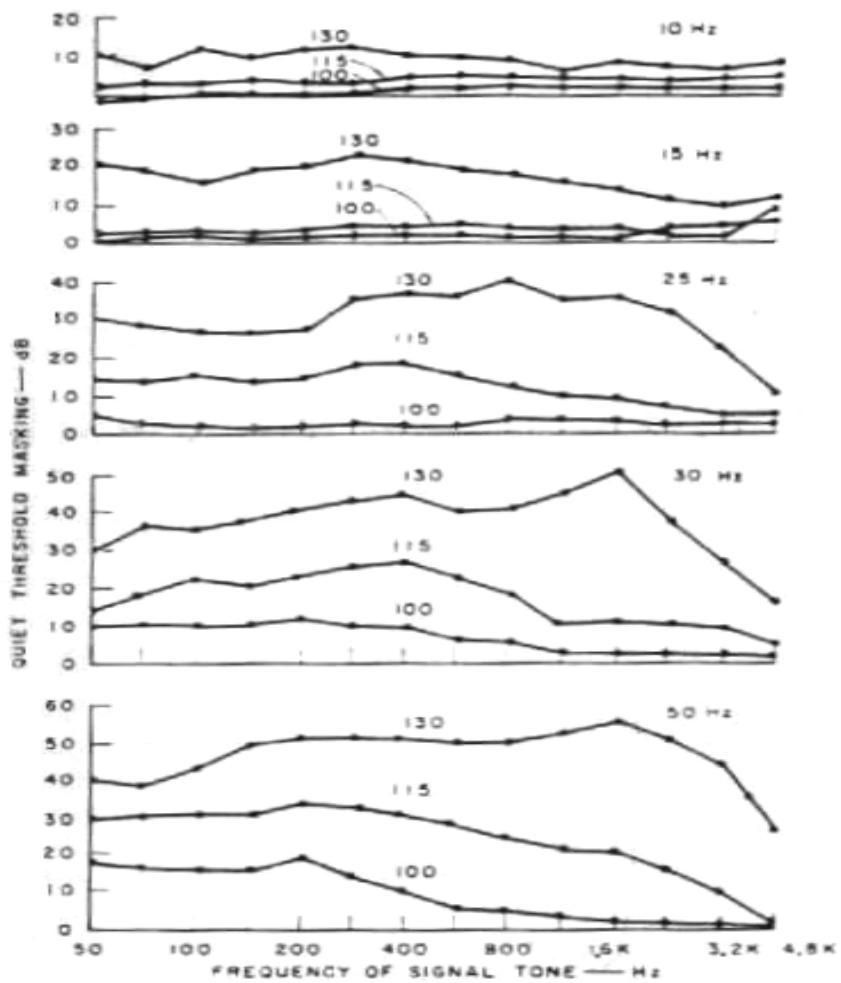


Fig. 5.15: Enmascaramiento producido debido a tonos puros de frecuencia baja: 10, 15, 25, 30 y 50 Hz (Kryter, 1985).

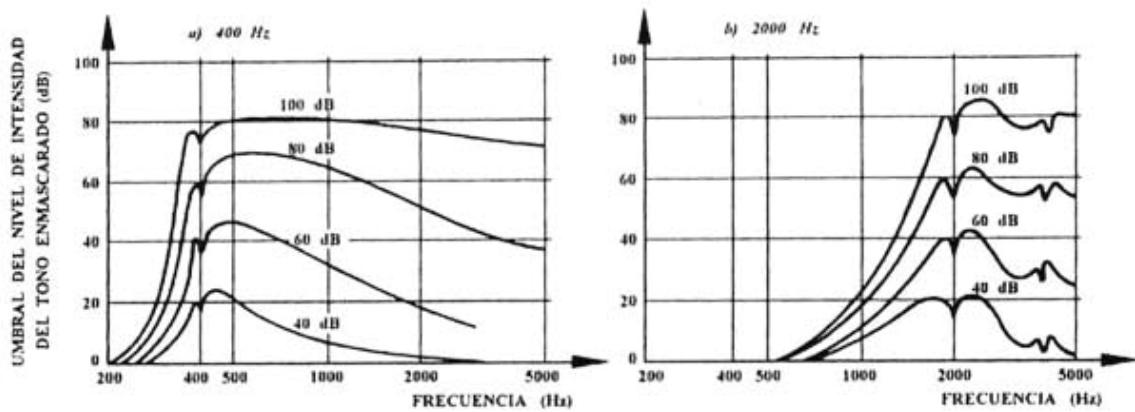


Fig. 5.16: Comparación del enmascaramiento producido debido a un tono de 400 Hz y uno de 2000 Hz, para distintos niveles (Recuero, 2002).

## 5.6. EL ESPECTRO DE LA COMUNICACIÓN

No tiene las mismas consecuencias enmascarar cualquier rango del espectro audible. Por ejemplo, seguramente sería más grave que un ruido enmascare la voz de una persona que nos pide auxilio a que enmascare el canto de los grillos. De esta manera, el enmascaramiento de la zona del espectro donde se encuentra la comunicación humana podría considerarse de mayor adversidad para el bienestar, o al menos podríamos decir que tiene mayores consecuencias sociales. Podría ser nocivo también, el enmascaramiento de señales de alerta o sonidos que nos advierten del peligro, los cuales no se encuentran necesariamente en el rango de la voz humana (ruido de un vehículo que no vemos acercándose, alarmas de seguridad, etc.).

Estos factores podrían tornar más serio el enmascaramiento de las frecuencias contenidas en estas señales que en las contenidas en aquellos sonidos que simplemente conforman el paisaje sonoro. Sin embargo, muchas de estas señales sonoras son ricas en espectro u ocupan distintos rangos del mismo, según cual sea su naturaleza, por lo cual se torna difícil realizar generalizaciones acerca de su contenido espectral.

A continuación revisaremos los rangos de frecuencia de la voz humana. En la Figura 5.17 se observan los espectros característicos de la voz masculina y femenina para distintos grados de esfuerzo vocal (medidos a 1 m de distancia).

Para ambos sexos, la energía acústica se encuentra concentrada principalmente entre 250 Hz y 4000 Hz, sin embargo en todo el rango de 100 Hz a 8000 Hz puede encontrarse información del habla. Se puede observar con claridad que el espectro masculino posee mayores componentes de frecuencia baja que el femenino. Este hecho tiene un reflejo fisiológico, ya que las cuerdas vocales masculinas se tornan más gruesas y largas luego de la pubertad (debido a cambios hormonales). En ambos sexos se puede observar que el máximo nivel sonoro se encuentra en frecuencias progresivamente mayores a medida que aumenta el esfuerzo vocal. Para los esfuerzos vocales de bajos a medios, el máximo se encuentra entre las bandas de 400 Hz y 500 Hz para ambos sexos. Para el caso de los gritos, el máximo masculino se halla en la banda de 1250 Hz, y el de la mujer se encuentra en la banda de 1600 Hz. El espectro de la voz también varía con la edad de los individuos.

Los niveles sonoros de la palabra son estadísticamente mayores para el varón que para la mujer, oscilando entre 2 y 7 dB de diferencia según cuál sea el esfuerzo vocal realizado (el mayor esfuerzo incrementa la diferencia de niveles).

La Figura 5.18 muestra el espectro sonoro correspondiente a la voz masculina sin mayor esfuerzo vocal. El espectro corresponde a valores *rms* integrados en 1/8 s, se grafica también el espectro a largo plazo calculado (Kryter, 1985).

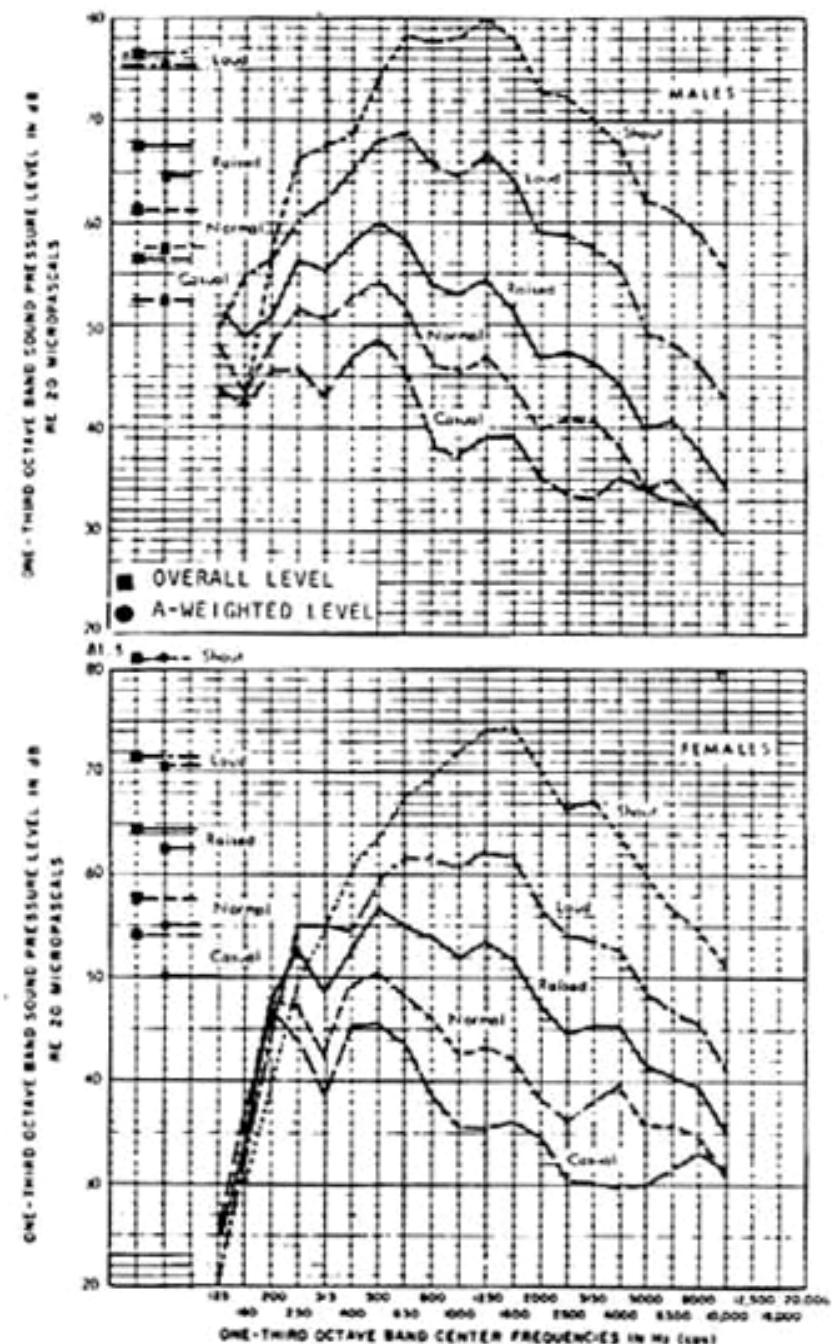


FIGURE 4.2. Average speech spectra for five vocal efforts. (From ref. 4.)

Fig. 5.17: Espectro de la voz femenina (abajo) y masculina (arriba) para distintos esfuerzos vocales: susurro, normal, alzada, alta y grito (Kryter, 1985).

En la curva de espectral a largo plazo se puede observar que máximo nivel sonoro se encuentra alrededor de 400 Hz, y a partir de los 500 Hz la pendiente de la curva decrece aproximadamente 8 dB/octava.

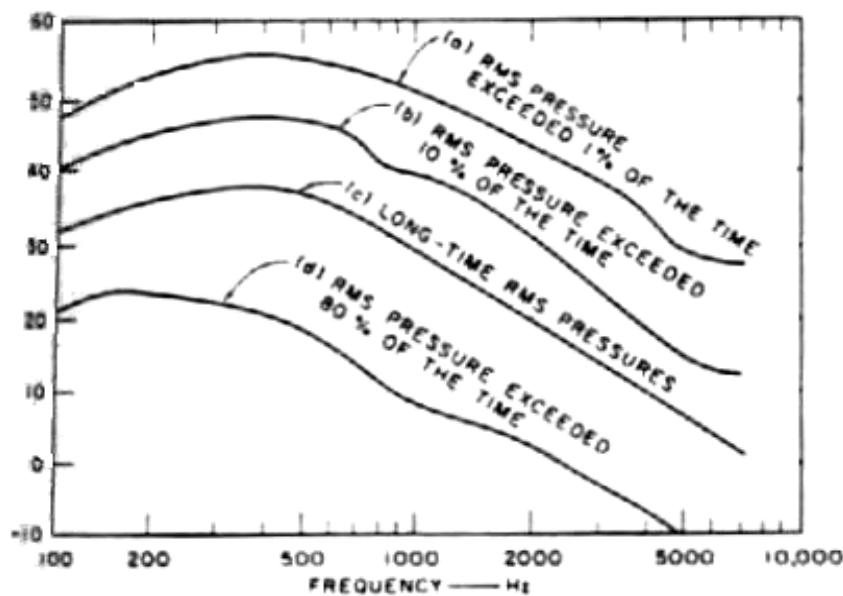


Fig. 5.18: Espectro de la voz masculina superado el 80% (d), 10 % (b) y 1 % (a) del tiempo medido. Espectro integrado a largo plazo (c) (Kryter, 1985).

En base a los espectros del habla, a los anchos de banda críticos para la palabra y a las características psicoacústicas del enmascaramiento, es posible trazar las curvas que se indican en la Figura 5.19. Éstas muestran qué bandas de ruido son las que producen mayor pérdida de la inteligibilidad de la palabra.

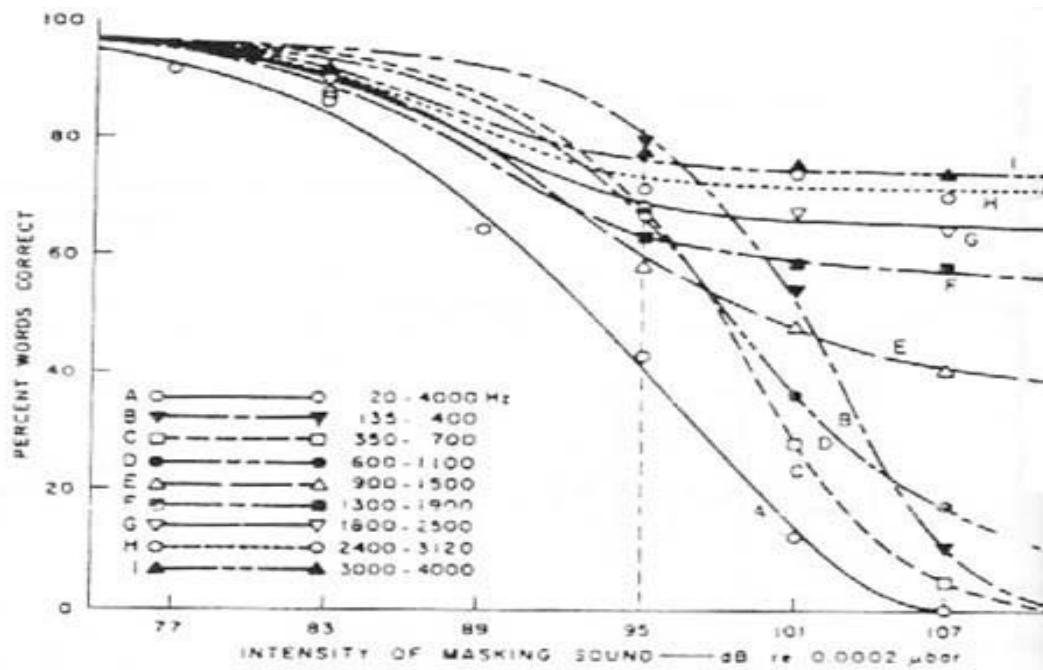


Fig. 5.19: Porcentaje de palabras correctas en función del nivel sonoro del ruido enmascarador, para distintas bandas de ruido (Kryter, 1985).

Se puede observar que para niveles sonoros menores que el del mensaje ( $S/R > 1$ ), el enmascaramiento producido por las distintas bandas no difiere tanto como lo hace para niveles superiores ( $S/R < 1$ ), en cuyo caso las bandas que contienen bajas frecuencias reducen más la inteligibilidad que las bandas medias.

### 5.7. MOLESTIA Y RUIDOSIDAD

En el Capítulo 3 se ha hablado de la molestia producida por el ruido. Para estudiar el espectro asociado a esta molestia, en principio recurriremos a las *curvas de ruidosidad* (el término “ruidosidad” fue introducido del Inglés “noisiness”) (Harris, 1995). Las curvas de ruidosidad fueron creadas originalmente por Kryter en 1959, para evaluar el ruido de aviones jet por observadores en tierra. La Fuerza Aérea de Estados Unidos Norteamericana utiliza la ruidosidad como herramienta para la certificación aeronáutica. El concepto de ruidosidad percibida (“perceived noise level”) y su procedimiento de cálculo, son similares a los correspondientes a la sonoridad que se ha estudiado en el Capítulo 2. La ruidosidad percibida sobre todos los puntos de cada uno de los contornos de ruidosidad es la misma y corresponde a un valor determinado de *noys*. La diferencia con las curvas de sonoridad es que la ruidosidad considera bandas de ruido y las curvas de sonoridad están trazadas en base a tonos puros.

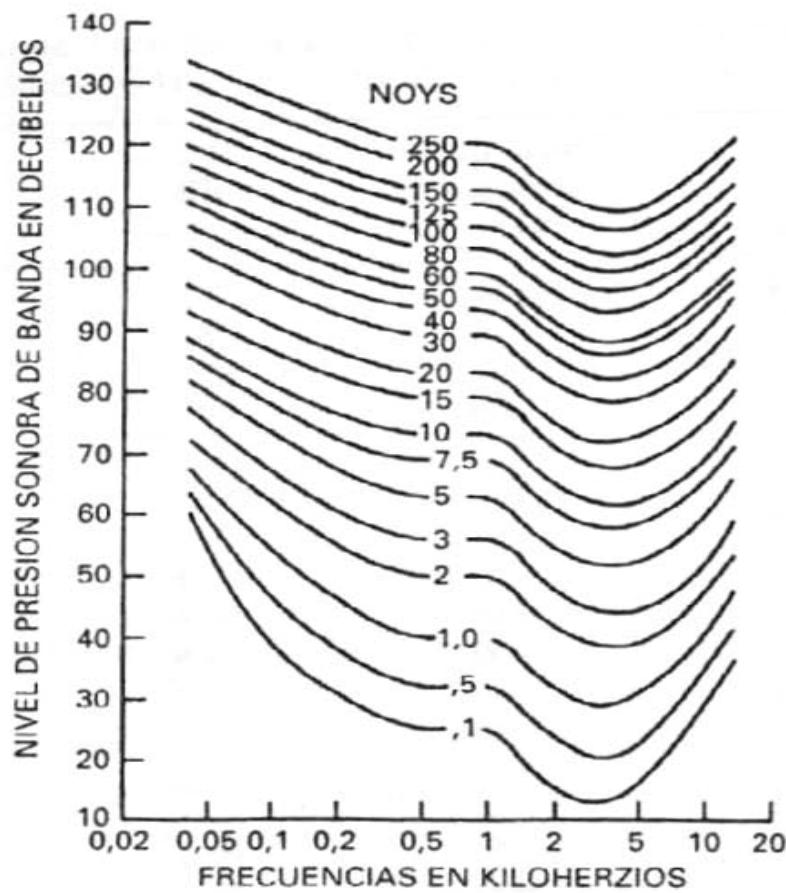


Fig. 5.20: Curvas de Ruidosidad (Harris, 1995).

Las curvas de ruidosidad están relacionadas con un indicador denominado *perceived noise level (PNL)*, cuya unidad es el *PNdB*. La relación entre los noys (*N*) y los PNdB está dada por:

$$Noys = 2^{\frac{PNL-40}{10}} \quad . \quad 5.2$$

Se puede observar que esta expresión es similar a la ecuación 2.14 de la sonoridad.

En las curvas de ruidosidad se observa que ***las frecuencias más altas producen mayor molestia que las más bajas, inclusive para iguales niveles de sonoridad*** (Kryter, 1985).

En lo que respecta al ruido de aviones, al reducir la energía entre 800 Hz a 1600 Hz, se produce más reducción de la molestia que en cualquier otra octava (Berglund – Lindvall, 1995).

Kryter señala “Ruidosidad es sinónimo de lo que con frecuencia implica el término molestia.” (Kryter, 1985), sin embargo la validez de las curva de ruidosidad no es universal, no sólo por su origen de ruido aeronáutico sino también porque el concepto de molestia posee una fuerte carga subjetiva difícil de reflejar en un conjunto de curvas. Esto implica que factores tales como el significado del ruido y la experiencia personal pueden tener mayor efecto en la molestia que la frecuencia sonora en sí. Es decir, es más importante la información que transmite el ruido que el ruido en si (por ejemplo el llanto de un bebé que se encuentra lejos para su madre).

Por otra parte, aún si no existe un contenido semántico asociado al ruido, los distintos grupos sociales pueden experimentar reacciones muy diversas a la frecuencia del ruido en función de sus hábitos sonoros y musicales. Este tema es abordado con mayor profundidad en la discusión del trabajo “Molestia Generada por Ruidos con Igual Nivel Sonoro “A” y Distinto Contenido Espectral” (Kogan – Rosales, 2003), cuya síntesis se incluye en el Anexo.

Por otra parte, y remitiéndonos exclusivamente al carácter espectral de la molestia, existen varios trabajos que indican que en ciertas condiciones las bajas frecuencias producen molestias considerablemente superiores a lo esperable de acuerdo a las curvas de ruidosidad (este tema se abordará en el siguiente capítulo). Sin embargo, se puede decir en términos generales que los ruidos con mayor proporción de bajas frecuencias son más tolerados que los ruidos con mayor proporción de frecuencias altas. A pesar de ello un espectro prominente en frecuencias bajas puede producir mayor molestia que un espectro uniforme (Berglund – Lindvall, 1995). El documento “Guías para el Ruido Urbano” de la Organización Mundial de la Salud señala “*Reacciones mayores han sido observadas cuando el ruido es acompañado por vibraciones y contiene frecuencias bajas*” (Berglund et al., 1999).

Cuando varía el espectro de un ruido, la molestia puede cambiar sin seguir los patrones dados por la sonoridad. Además, ***la molestia suele incrementarse cuando el ruido contiene altas concentraciones energéticas en bandas estrechas o tonos puros*** (Kryter, 1985).

Las personas más sensibles al ruido suelen experimentar mayores grados de molestia. Un resultado curioso que se ha hallado es que el umbral auditivo en 12000 Hz es un buen predictor de la sensibilidad individual al ruido (Harris, 1995).

## 5.8. DESCENSO DEL RENDIMIENTO

**Cuanto más agudo es el ruido y más estrecho su ancho de banda, el efecto sobre el rendimiento será mayor** (Griefahn, 1982). Pero según Recuero, el rango de 2 Hz a 2000 Hz es el que provoca una caída del rendimiento en el trabajo (Recuero, 1994). Como se revisó en el Capítulo 3, tanto el carácter temporal como el significado del ruido juegan un papel de importancia en el rendimiento humano (ver Sección 3.4.2).

Según el estudio realizado por Barredon en 1972, el infrasonido de 7,5 Hz presente durante 50 minutos aumenta el tiempo de reacción frente a estímulos (Johnson, 1982). Johnson, a partir de sus experimentos, señaló que el infrasonido de 7 Hz recibido con 142 dB producía un efecto distractor y reducía la habilidad de concentrarse en la realización de tareas cognitivas (Johnson, 1982). También se ha sugerido que el infrasonido reduce el rendimiento en el trabajo. Algunos fenómenos naturales con contenido de frecuencias infrasónicas, como tormentas y tornados lejanos, también podrían ser causa de bajos rendimientos (Recuero, 1994).

## 5.9. ENFERMEDAD VIBROACÚSTICA

En la Sección 3.5. se ha detallado el cuadro clínico que presentan los individuos que padecen la enfermedad vibroacústica (SVA), así como las etapas de evolución de la enfermedad. El conjunto de las patologías y alteraciones tratadas en 3.5 son consecuencia de la exposición sostenida a altos niveles (sobre 90 dB) de ruido de frecuencia baja, principalmente menor a los 500 Hz. El estudio base para la caracterización de la enfermedad se realizó con técnicos aeronáuticos (Bento Coelho et al., 1999) expuestos cotidianamente a niveles superiores a 100 dB(A) (hasta del orden de los 130 dB(A)). En la Figura 5.21 se presenta uno de los espectros emitidos por las aeronaves sobre las que trabaja el personal en los talleres donde se realizó el estudio.

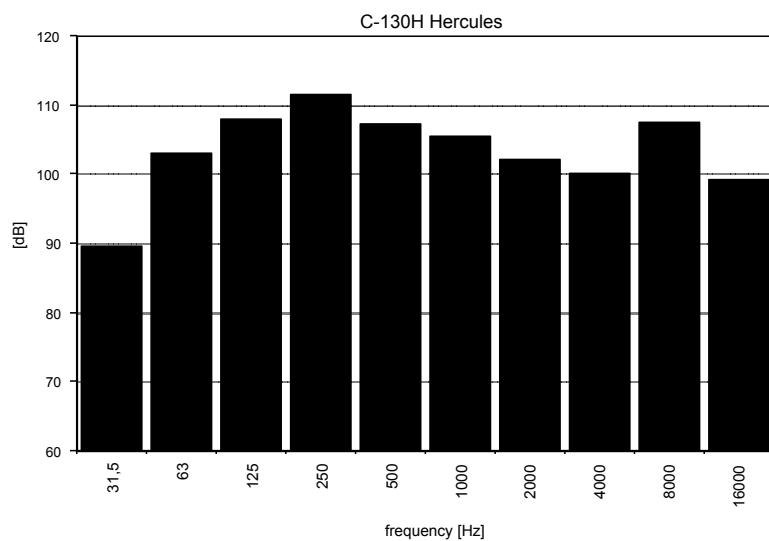


Fig. 5.21: Espectro típico al que están expuestos cotidianamente técnicos aeronáuticos que padecen la enfermedad vibroacústica (Bento Coelho et al., 1999).

Los técnicos utilizan protectores auditivos, pero éstos son efectivos en frecuencias medias y altas, por lo cual actúan como un filtro pasa-bajos permitiendo que las bajas frecuencias lleguen con altos niveles sonoros al oído (además del impacto aéreo directo sobre el organismo que estas frecuencias provocan). Este filtro espectral característico de los protectores auditivos tiene consecuencias negativas en muchos ámbitos laborales donde también existen frecuencias bajas emitidas a altos niveles.

## 5.10. FATIGA CORPORAL

Se han reportado síntomas de extrema fatiga corporal en personas expuestas a ruido infrasónico. Sin embargo, no se han podido establecer relaciones directas entre niveles sonoros y sensaciones de fatiga (Berglund – Lindvall, 1995). Recuero indica que los fenómenos de fatiga pueden aparecer después de varias horas de exposición a infrasonidos comprendidos entre 120 dB y 140 dB. A estos niveles podrían estar expuestos los automovilistas y los aviadores (Recuero, 1994). A niveles de exposición superiores a 140 dB se registran otros efectos de mayor gravedad.

En un estudio realizado donde los sujetos estuvieron expuestos a bandas estrechas de ruido centrado entre 15 Hz y 50 Hz, se obtuvieron síntomas de fatiga corporal al segundo día de exposición en la mayoría de los casos (Kryter, 1985).

Según Kryter, los infrasonidos y las bajas frecuencias en general actúan como un estresante no específico que produce una tendencia ligera al cansancio, entre otros efectos (Kryter, 1995).

La fatiga corporal ha sido descrita como uno de los síntomas de la enfermedad vibroacústica (ver 3.5), que son hallados bajo 500 Hz.

## 5.11. MAREOS, NAUSEAS Y DESMAYOS

En algunos casos de exposición a frecuencia baja se han registrado mareos. En los estudios llevados a cabo por la U.S. Air Force y la Nasa, se halló que los tonos puros de 60 Hz (154 dB), 73 Hz (150 dB) y 100 Hz (153 dB) causaron mareo en varios sujetos (Kryter, 1985). Algunos autores sugieren que el infrasonido puede causar un estado semejante al de ebriedad (Johnson, 1982), mientras que Recuero asigna el rango de 0,1 Hz a 10 Hz a las deficiencias motrices (Recuero, 1994).

Un estudio realizado con personas que se encontraban al interior una habitación con paredes móviles que oscilaban generando infrasonidos entre 2 y 16 Hz reveló que los primeros signos de que sucedía algo inusual se registraron en torno a 10 Hz. Kryter indica que “Claramente, algunas sensaciones no-auditivas pueden aparecer ante una exposición prolongada a altas intensidades en la banda estrecha en torno a los 10 Hz”. Además, se halló que los 12 Hz produjeron una sensación súbita de que un cambio en el ambiente tenía lugar (Kryter, 1985). La Figura 5.22 reproduce los resultados hallados.

En algunas personas especialmente sensibles a las bajas frecuencias e infrasonidos se han observado tendencia a realizar episodios de desmayos (Harris, 1995).

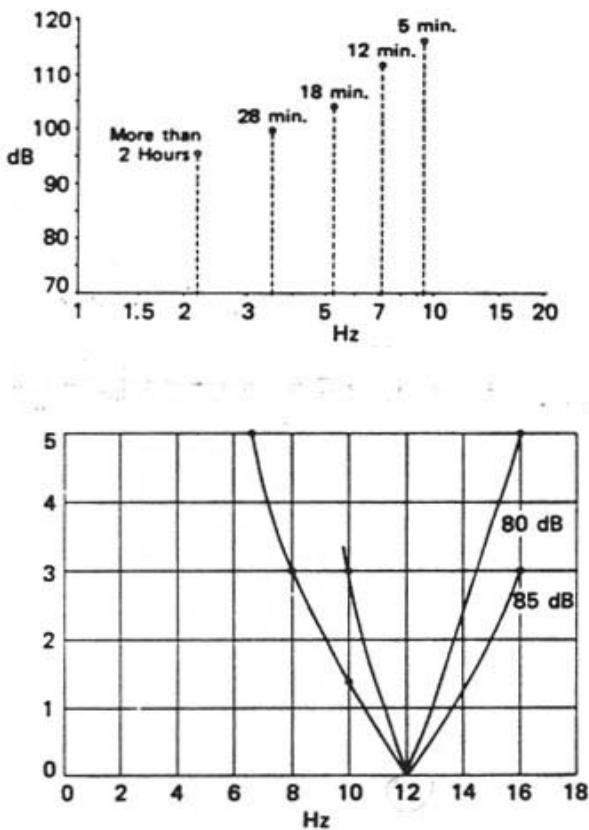


Fig. 5.22 Tiempos necesarios para tener los primeros signos de sensación inusual debido a tonos infrasónicos (arriba). Umbral de sensaciones inusuales en torno a la frecuencia de mayor sensibilidad, para distintas exposiciones (abajo) (Kryter, 1985)

Los tonos puros de 100 Hz reproducidos a 153 dB provocaron náuseas leves en algunas personas (Kryter, 1985). Algunos resultados indican que el infrasonido puede provocar náuseas (Johnson, 1982).

En el otro extremo del espectro también se han observado mareos y pérdidas del equilibrio. Éstos síntomas tuvieron lugar ante exposiciones a frecuencias muy altas (del orden de 20 kHz) y ultrasonidos comprendidas entre 160 y 165 dB (Harris, 1995).

## 5.12. FRECUENCIA Y SUEÑO

No se han hallado frecuencias sonoras que en particular perturben el sueño, como se explicó en el Capítulo 3 tiene mayor importancia el carácter temporal y el número de eventos de ruido por sobre el valor de fondo que el propio NPS.

Por otra parte, el cerebro emite ondas de varias frecuencias durante las distintas etapas del sueño y la vigilia, estas ondas pueden ser visualizadas mediante en electroencefalograma (ver Sección 3.4.3.3). En la etapa 1 de sueño liviano se emite lo que se conoce como el ritmo alfa de frecuencias comprendidas entre 9 a 12 Hz. En la etapa 2 las ondas están comprendidas entre 14 y

18 Hz. En la etapa 3 de sueño profundo la frecuencia disminuye a 1 Hz aproximadamente, mientras que durante la vigilia se registran frecuencias superiores a 15-20 Hz (Rosenzweig, 2000).

### 5.13. EFECTOS VEGETATIVOS

En el Capítulo 3 se ha tratado el tema de los efectos en el sistema vegetativo (o nervioso autónomo) que el ruido provoca. Según Griefahn, la magnitud de la vasoconstricción periférica es un indicador del grado de afección del sistema vegetativo en general ante la exposición al ruido (Griefahn, 1982). Ella sostiene que la extensión temporal de la vasoconstricción periférica aumenta con el incremento del nivel sonoro y con el ancho de banda del ruido (ver Secciones 3.3.2.1 y 2.4.1.4 para más detalles). Griefahn realizó una serie de experiencias en las que trazó curvas de respuesta vegetativa en función de la frecuencia.

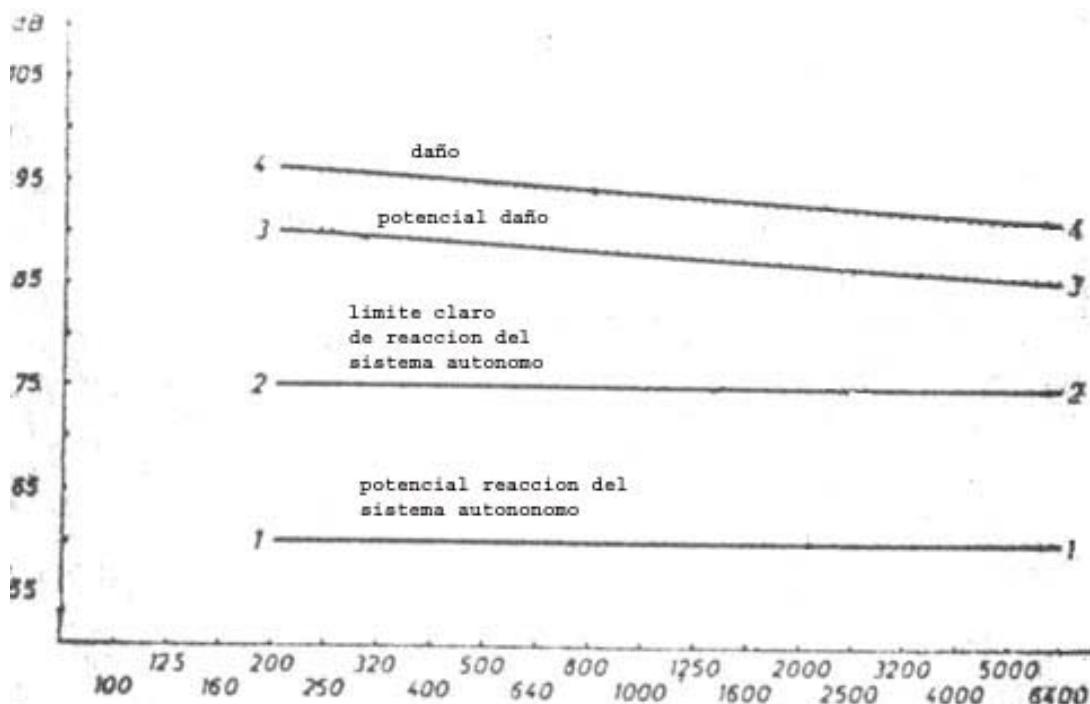


Fig. 5.23 Umbrales de los efectos vegetativos en función de la frecuencia: potencial reacción del sistema autónomo (1), límite de reacción vegetativa (2), potencial daño (3), daño seguro(4) (Griefahn, 1982).

Las distintas rectas de la Figura 5.23 indican los niveles sonoros que deben ser superados en cada frecuencia para causar en el sistema nervioso autónomo: una potencial reacción (1), una reacción clara (2), un potencial daño (3) y un daño seguro (4). La curva (3) es la sugerida por la autora a tomar como referencia. En ella se indica el nivel sonoro que no debe ser superado por cada uno de las bandas de tercio de octava de un ruido de banda ancha. La curva presenta un decaimiento de 1 dB por octava, por lo cual aparentemente las bandas superiores son las que producen mayor efecto, sin embargo la autora señala que esto se debe a que las bandas agudas son más anchas que las bandas graves. La suma ponderada de todas las bandas de esta curva

entrega un valor de 99 dB(A) y en el trabajo se señala que los efectos vegetativos pueden ser obviados sólo si éste valor es superado menos del 1% del período de exposición (Griefahn, 1982).

### 5.13.1. Variación del Pulso

Se han registrado incrementos de entre un 10 % y un 40 % del pulso en individuos expuestos a ruido de banda ancha con su máximo de 128 dB en 50 Hz a niveles (Kryter, 1985).

### 5.3.2. Efectos Sobre la Respiración

Las bajas frecuencias y los infrasonidos en general actúan como un estresante no específico que, entre otros efectos, produce un descenso de la frecuencia respiratoria (Harris, 1995). Mohr et al. han publicado que observaron interferencias “soportables” en el ritmo respiratorio normal producido por el ruido de frecuencia baja de banda ancha a niveles de 128 dB (Kryter, 1985). Berglund y Lindvall indican que el ruido de frecuencia baja de elevado nivel puede producir claros daños al sistema respiratorio (Berglund – Lindvall, 1995), mientras que Recuero indica que, en general, el rango de 1 a 100 Hz puede producir dificultades respiratorias y en el habla (Recuero, 1994).

Los infrasonidos producen alteraciones considerables en la respiración a partir de los 166 dB. En el rango comprendido entre 0,5 Hz y 8 Hz a niveles superiores a 172 dB o 173 dB puede producirse un efecto de “respiración artificial” inducida por el sonido debido a las compresiones y expansiones sobre el volumen de aire pulmonar que producen las longitudes de ondas infrasónicas (Johnson, 1982).

Los infrasonidos superiores a 180 o 190 dB pueden desgarrar los alvéolos pulmonares provocando la muerte (Recuero, 1994).

### 5.13.3. Alteraciones en el Sistema Digestivo

En un estudio realizado se reprodujeron periódicamente tonos puros de 800 Hz con un nivel sonoro de 80 dB durante 10 segundos cada uno (Kryter, 1985). Un grupo de personas podía apagar el tono mediante un interruptor y el otro grupo no tenía control. En el segundo grupo se observó un incremento en la motilidad del estómago (ver Sección 3.3.2.3).

Se ha observado que los tonos puros de 60 Hz (154 dB) y de 73 Hz (150 dB) algunos individuos ha causado exceso de salivación y en otros casos dolor al deglutar (o ambas) (Kryter, 1985).

### 5.13.4. Cambios Endocrinos

Uno de los pocos estudios que investigan las alteraciones endocrinas provocadas por el ruido en las personas, halló que el ruido de 2000 Hz administrado durante 30 minutos a un nivel sonoro de 90 dB provocó un incremento de adrenalina y noradrenalina en la orina. El mismo efecto se halló en niños expuestos cotidianamente a ruido de aviones (Berglund – Lindvall, 1995).

Ante exposiciones a tonos de 0,66 seg. de duración, comprendidos entre 3000 Hz y 4000 Hz y reproducidos cada 22 seg. durante un mes (10 días a 80 dB, 10 días a 85 dB y los últimos 10 días a 90 dB), se registraron incrementos de cortisol y colesterol en la sangre. Al cesar la exposición se restablecieron los valores normales (Kryter, 1985).

### 5.13.5. Tensión Muscular

Los músculos de fibra lisa que recubren los vasos sanguíneos y la pared de las vísceras sufren una reducción en su tensión ante exposiciones de muy alta intensidad (sobre 170 dB) a ruidos de frecuencia baja (Kryter, 1985).

## 5.14. EFECTOS SOBRE LA PIEL

Las ondas sonoras inferiores a 100 Hz (desde aproximadamente 2 Hz) son percibidas como sensación táctil (Berglund – Lindvall, 1995).

La exposición a ruidos de frecuencia alta y ultrasonidos puede provocar calentamientos leves de la superficie corporal y fisuras en la piel. Este efecto fue registrado para niveles sonoros comprendidos entre 140 dB y 150 dB (Harris, 1995). Cabe destacar que esta reacción ante el ultrasonido es utilizada con fines terapéuticos en situaciones controladas, por ejemplo en tratamientos kinésicos que requieren de la estimulación de los tejidos musculares externos del organismo.

### 5.14.1. Efectos Sobre el Rostro

Los tonos puros de 100 Hz han provocado enrojecimiento del rostro y sensación de “hormigueo”. Esto se ha registrado a 153 dB de intensidad sonora (Kryter, 1985). Uno de los sujetos que manifestaron esta reacción permaneció con su rostro enrojecido durante las cuatro horas posteriores a la exposición.

## 5.15. VARIACIONES SOBRE EL HABLA

Sin duda el espectro de la comunicación descrito en la Sección 5.6 puede producir fatigas o lesiones sobre la voz debido a la realización de esfuerzos excesivos por comunicarse en un clima de ruido. Si embargo, existe otro efecto sobre el habla que es la modulación de la voz emitida. Este fenómeno se debe a la suma de la señal emitida por las cuerdas vocales con la del ruido recibido. Esta interacción es notoria sólo para altas intensidades de ruido de bajas frecuencias. Se ha grabado la voz de sujetos expuestos a bandas de ruido en el rango de 15 Hz a 50 Hz por sobre 125 dB y en ellos se ha observado modulaciones producto de la interacción de la voz emitida con la onda sonora de frecuencia baja. Esta modulación también se registró frente a tonos puros de niveles cercanos a 150 dB en frecuencias comprendidas entre 43 Hz y 100 Hz (Kryter, 1985).

Según Recuero (Recuero, 1994), las dificultades en el habla así como en la respiración se producen en el rango de 1 a 100 Hz de ruido aéreo, mientras que Berglund y Lindvall indican

que las modulaciones de las cuerdas vocales se producen en torno a 10 Hz, y estas pueden provocar molestias (Berglund – Lindvall, 1995).

### 5.16. TOS Y AHOGAMIENTO

Los tonos puros de 60 Hz (154 dB) y de 73 Hz (150 dB) han producido tos en algunos sujetos estudiados. En algunos sujetos las mismas frecuencias produjeron sensación de ahogamiento (Kryter, 1985). Una de las personas estudiadas permaneció tosiendo por 20 minutos luego de cesado el estímulo sonoro.

### 5.17. EFECTOS EN LA VISTA

Sujetos expuestos a bandas estrechas de ruido de frecuencia baja entre 15 Hz y 50 Hz, a niveles de 140 dB, han percibido una vibración del campo visual (Kryter, 1985). Este efecto también fue hallado para tonos puros de 145 dB a 153 dB dentro del mismo rango espectral.

Se ha registrado un decremento considerable de la precisión visual en individuos sometidos a tonos de 43 Hz, 50 Hz y 73 Hz, de niveles comprendidos entre 150 dB y 155 dB (Kryter, 1985).

A diferencia de las frecuencias indicadas por Rasmussen (ver Figura 5.24), von Gierke sugiere que las frecuencias mecánicas de resonancia del ojo se encuentran sobre los 90 Hz (von Gierke, 1997).

Sin embargo, Recuero indica que en términos generales el rango de frecuencias peligroso para la visión es entre 4 Hz y 800 Hz (Recuero, 1994).

### 5.18. VIBRACIONES LOCALIZADAS

Las ondas sonoras comprendidas entre 4 Hz y 100 Hz son capaces de producir resonancias en el cuerpo humano (Recuero, 1994).

Se ha observado que algunas personas expuestas a infrasonidos de 5 Hz a 10 Hz han experimentado pequeñas vibración en su pared abdominal (Harris, 1995). Este efecto también se ha registrado para el ruido de banda ancha con su nivel máximo de 128 dB en 50 Hz (Kryter, 1985) y para tonos puros infrasónicos superiores a 10 Hz reproducidos durante 90 segundos a un nivel comprendido entre 145 dB y 151 dB (Johnson, 1982).

Las vibraciones del tórax y el abdomen, en general, están situadas entre 40 Hz y 60 Hz y han podido ser medidas a partir de los 105 dB. En el rango infrasónico entre 4 Hz y 20 Hz las vibraciones en pecho y abdomen comienzan a ser perceptibles a partir de los 132 dB (Johnson, 1982).

Se ha registrado vibración moderada del pecho en el caso de bandas de ruido de frecuencia baja centradas entre 15 Hz y 50 Hz, de 140 dB. Este efecto también fue hallado para tonos puros de 145 dB a 153 dB dentro del mismo rango espectral (Kryter, 1985). Johnson indica que el pecho resuena en la región comprendida entre los 50 Hz y 60 Hz (Johnson, 1982). El mismo autor indica que la vibración del pecho ha sido percibida ante 90 segundos de exposición

a tonos puros infrasónicos superiores a 10 Hz de más de 145 dB, siendo de 150 dB a 153 dB el límite de tolerancia (Johnson, 1982).

Los tonos puros de 100 Hz han producido molestias debajo de las costillas (Kryter, 1985). Los tonos puros de 60 Hz (154 dB) y de 73 Hz (150 dB) han provocado gran presión bajo el esternón (Kryter, 1985). Algunos sujetos también manifestaron percibir una vibración en el tabique nasal frente al rango de infrasonidos comprendidos entre 4 y 20 Hz sobre los 132 dB (Johnson, 1982), lo que también fue producido en exposiciones a ruido de bandas estrechas centradas entre 2 Hz y 10 Hz a niveles de 142 dB a 153 dB.

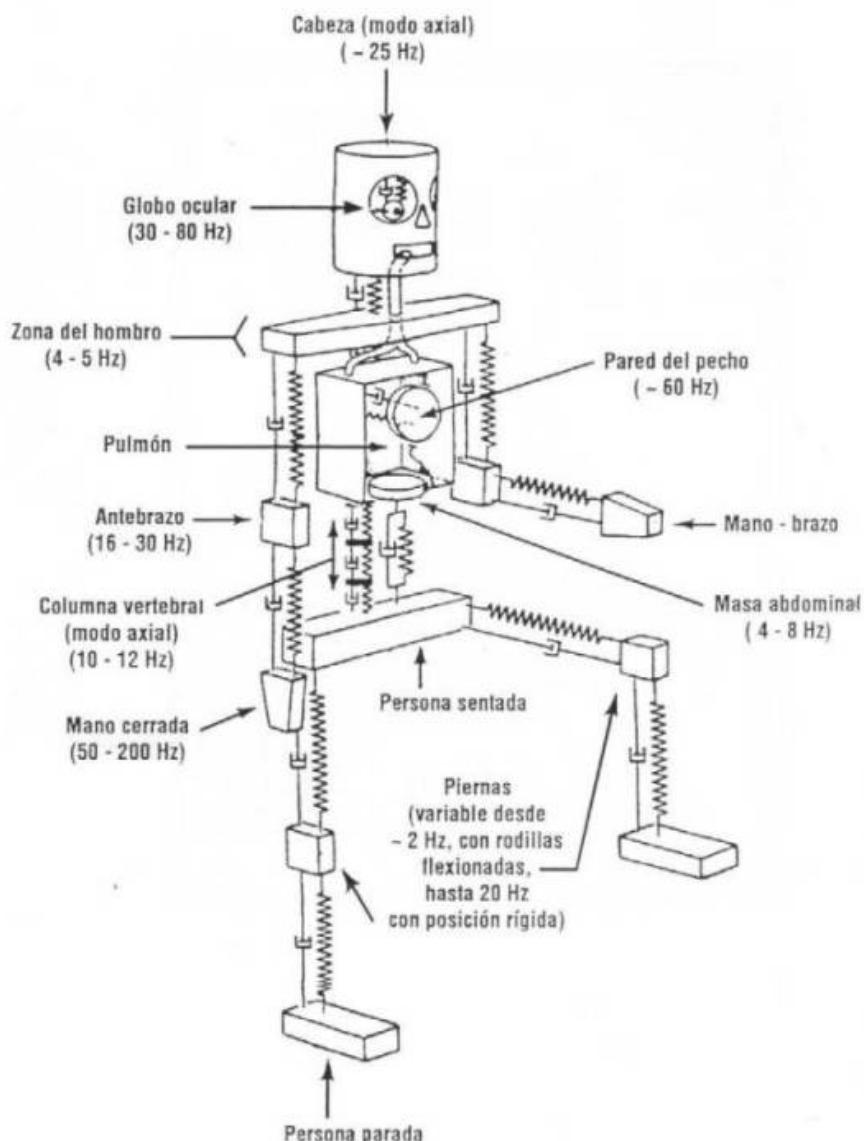


Fig. 5.24: Modelo mecánico del cuerpo humano y frecuencias de resonancia de distintas partes de él (Rasmussen, 1982).

Algunos sujetos percibieron una sensación de “ensanchamiento” de la garganta cuando se encontraban expuestas a ruido de banda ancha con su máximo en 50 Hz, a ruido de frecuencia baja de banda ancha de niveles similares y a tonos puros entre 3 Hz y 40 Hz (Kryter, 1985).

Algunas personas expuestas a bandas estrechas de ruido de frecuencia bajas, centradas entre 15 Hz y 50 Hz, con niveles de 140 dB sintieron una sensación de gran presión bajo la faringe. Esta sensación también se manifestó frente a tonos puros de 60 Hz (154 dB) y de 73 Hz (150 dB) (Kryter, 1985).

En un estudio realizado con 39 sujetos expuestos a distintos tonos puros de frecuencia baja de 20 Hz hasta 70 Hz con 10 Hz de separación entre ellos, 26 individuos han percibido vibraciones en la pantorrilla frente a tonos de 40 Hz, 18 sujetos percibieron vibración en el tórax ante tonos de 60 Hz, 15 en los muslos con tonos de 20 Hz, 15 en el sacro con 50 Hz y 11 percibieron vibraciones en la zona lumbar con tonos de 50 Hz. En general, la frecuencia que produjo mayores reacciones fue 40 Hz (Skille, 1998 ).

La Figura 5.24 representa al organismo como un sistema mecánico, que se ha descrito en el Capítulo 3. En ella se indican las frecuencias de resonancias calculadas para las distintas partes de la anatomía humana. Este esquema ha sido desarrollado para una persona parada sobre una plataforma que vibra en sentido vertical, y no para ruido aéreo. Por este motivo, al considerarse el efecto del ruido aéreo, las frecuencias indicadas deben aplicarse con cautela. Sin embargo, éstas sirven como referencia para comparar los resultados experimentales con los teóricos.

También ha sido calculado que el globo ocular resuena entre 60 Hz y 90 Hz. Por otra parte, la zona ósea inferior del cráneo, bajo la mandíbula, posee su frecuencia natural entre 100 Hz y 200 Hz. El cráneo en general, posee su modo principal de vibración entre 300 Hz y 400 Hz, con modos superiores en el rango de 600 Hz a 900 Hz (Rasmussen, 1982).

En algún caso entre los sujetos expuestos a tonos puros de frecuencia baja se ha manifestado sentir dolor de cabeza frente a un tono de 50 Hz (153 dB) y dolor testicular en presencia de uno de 73 Hz (150 dB).

## 5.19. EFECTOS POSITIVOS

Existen sonidos de determinadas cualidades espectrales y tímbricas que son utilizados para producir efectos positivos. Los instrumentos musicales, la voz y otros sonidos son empleados por algunas ramas de la medicina alternativa con fines terapéuticos. La *Terapia Vibroacústica* emplea la emisión aérea de tonos puros comprendidos entre 30 Hz y 120 Hz para tratar diversas patologías, sin embargo el rango comprendido entre 40 Hz y 80 Hz es el de mayor aplicación en dicha terapia, la que a su vez es acompañada con música. En base a la experiencia adquirida, la Terapia Vibroacústica provee tablas con las frecuencias y los tiempos de exposición necesarios para tratar cada enfermedad o alteración sufrida. Esta disciplina también emplea como herramienta de recuperación los batidos producidos por sinusoidales próximas (Skille, 1998).

Una rama de la Musicoterapia denominada *Medicina Vibracional* emplea diapasones con fines terapéuticos. Los diapasones se sitúan en distintas partes del cuerpo para obtener el efecto

deseado, algunos de ellos están sintonizados en 32 Hz, 64 Hz, 128 Hz y 256 Hz. También se emplean diapasones muy agudos (superiores a 8000 Hz) y en algunos casos son usados pares de diapasones, uno de 256 Hz y otro de frecuencia variable cercana a ésta para que la diferencia de ambas frecuencias entre en simpatía con algunas frecuencias cerebrales.

Se ha observado que algunos estímulos acústicos favorecen la actividad de la corteza cerebral en cobayos. Entre 10 y 20 minutos de exposición a ruido blanco constante puede producir el efecto positivo mencionado, el que también puede ser obtenido mediante secuencias de pulsos con determinada amplitud y duración (Dian-hua et al., 1987).

## 5.20. ESTRÉS

Como se explicó en el Capítulo 3, el ruido en general es un factor generador de estrés. Sin embargo se ha observado que sobre 105 dB el ultrasonido causa también los mismos signos del estrés (Berglund – Lindvall, 1995). Por otra parte, Harris indica que el ruido infrasónico actúa como un estresante no específico (Harris, 1995).

## 5.21. CUADROS PSIQUIÁTRICOS

Se ha observado la aparición de una débil locura en sujetos expuestos cotidianamente a la misma frecuencia infrasónica con un alto NPS (Recuero, 1994).

## 5.22. SÍNTESIS DE EFECTOS DEL RUIDO Y SUS ESPECTROS

En la Tabla 5.1 se presenta una síntesis de los distintos efectos del ruido en el ser humano, las frecuencias sonoras capaces de causarlos y los niveles a los cuales éstos pueden tener lugar. Para confeccionar este resumen, la base fundamental del análisis que se realizó fue el contenido espectral del ruido que provoca las distintas alteraciones. Se incluyeron las frecuencias que han sido identificadas como principales causantes de cada efecto, aunque en muchos casos es necesario ampliar la investigación sobre las probables reacciones en el resto del espectro. Además, no se descarta que en muchos casos puedan producirse los mismos efectos frente a otras frecuencias sonoras a niveles sonoros mayores que los indicados.

También, en la Tabla 5.1 se indica la existencia o no de otras frecuencias sonoras potencialmente causantes de cada uno de los efectos. Debe tenerse en cuenta que no todos los espectros considerados surgen de estudios que arrojen resultados concluyentes, sino que en muchos casos se trata simplemente de registros de casos producidos. Esto convierte a los estímulos acústicos descritos como potenciales causantes de los efectos sobre la salud que se mencionan.

Los niveles sonoros que se incluyen en la Tabla 5.1 son valores de referencia sobre los cuales pueden tener lugar los efectos del ruido para las frecuencias dadas. Estos niveles pueden variar según cuál sea el ámbito de inmisión y las condiciones generales de los sujetos expuestos. Los tiempos de exposición indicados en la Tabla 5.1 indican esencialmente si se trata de efectos adversos inmediatos, a mediano o a largo plazo. Su valor no debe ser leído con precisión cuantitativa, ya que su período exacto es muy variable dependiendo de condiciones endógenas y exógenas de cada individuo.

	<b>EFFECTO</b>	<b>FRECUENCIAS CAUSANTES</b>	<b>Nivel de Presión Sonora</b>	<b>Tiempo de exposición</b>	<b>Otras frecuencias causantes</b>	<b>Fuentes de información</b>
1	<b>Desplazamiento de Umbrales Auditivos y Pérdida Auditiva</b>	Agudos – medios Frecc. aprox 1 oct. < freq. desplazamientos	80 dB  Leq > 70 dBA	meses	En frecc. bajas se requiere mayores niveles	(Kryter, 1985) (Harris, 1995) (Berglund et al., 1999)
2	<b>Dolores en el Oído</b>	2 a 50 Hz 50 a 8000 Hz 50 a 8000 Hz	140 dB dolor 110 dB molestia 140 dB dolor	segundos	Si	(Berglund – Lindvall, 1995) (Kryter, 1985) (Beranek, 1996)
3	<b>Enmascaramiento</b>	Bajas y medias Frecc. menores que freq. señal Bandas mas anchas producen más enmasc.	Mayor nivel mayor enmasc. de frecc superiores al ruido.	segundos	No	(Gelfand, 1998) (Moore, 2003)
4	<b>Interferencia en la Comunicación</b>	100 a 4000 Hz 30 a 100 Hz	> 50 dB > 90 dB Leq > 35 dB(A)	Minutos  Hora/s	Difícilmente	(Kryter, 1985)  (Berglund et al., 1999)
5	<b>Molestia</b>	Agudos especialmente (ver curvas ruidosidad) tonos puros y bandas estrechas muy subjetivo (significado del ruido)	Subjetivo (sobre 30 dB)	segundos	Si	(Kryter, 1985) (Berglund – Lindvall, 1995) (Kogan – Rosales, 2003)

6	<b>Reducción del Rendimiento</b>	Agudos banda estrecha 2 a 2000 Hz 7 Hz	140 dB	minutos	SI	(Griefahn, 1982) (Recuero, 1994) (Johnson, 1982)
7	<b>Enfermedad vibroacústica</b>	< 500 Hz	Sobre 90 dB	años	Proba-ble	(Alves-Pereira – Castelo Branco, 2000)
8	<b>Efectos Vegetativos en General (VAD)</b>	Aumentan con el ancho de banda  Aumentan con la frec. 1 dB/oct. en el rango de 200 Hz a 6000 Hz  < 500 Hz (VAD)	>60 dB  90 dB	Segundos a años	Proba-ble	(Griefahn, 1982)  (Castelo Branco, 1999)
9	<b>Incremento del Pulso</b>	Banda ancha con máximo en 50 Hz	$L_{MAX} = 128$ dB	1 a 2 seg.	Si	(Kryter, 1985)
10	<b>Efectos Cardiovasculares</b>	Desc.  < 500 Hz (VAD)	Leq > 65 dBA  90 dB	24 h  años	Muy probable	(Berglund et al., 1999) (Castelo Branco et al., 1999)
11	<b>Variación de Frecuencia Respiratoria</b>	Banda ancha con máximo en 50 Hz 0,5 a 100 Hz ruidos impulsivos	$L_{MAX} = 128$ dB >125 dB 70 dB	1 a 2 seg.	Si	(Kryter, 1985) (Berglund – Lindvall, 1995) (Harris, 1995)
12	<b>Respiración Artificial Inducida</b>	0,5 Hz a 8 Hz	172 dB	Desc.	Difícil-mente	(Johnson, 1982).
13	<b>Desgarros Alveolares (Muerte)</b>	Infrasonidos	> 180 dB	Desc.	Difícil-mente	(Recuero, 1994)
14	<b>Alteración de la Motilidad del Estómago</b>	800 Hz	80 dB	segundos	Si	(Harris, 1995)

15	<b>Exceso de Salivación / Dolor al Deglutir</b>	60 a 73 Hz	150 dB	1 a 2 seg.	Si	(Kryter, 1985)
16	<b>Cambios Endocrinos</b>	2000 Hz 3000 – 4000 Hz	90 dB 80 dB	30 seg. Días	Si	(Berglund – Lindvall, 1995) (Kryter, 1985)
17	<b>Reducción de Tensión en Músculos de Fibra Lisa</b>	Frecuencia baja	170 dB	Desc.	Proba-ble	(Kryter, 1985)
18	<b>Efectos sobre el Sistema Nervioso Central</b>	Desconocido	Desconocido	Milisegs.	Descon.	(Recuero, 2002)
19	<b>Fatiga Corporal</b>	Infrasonidos Frecuencia baja	> 120 dB	Horas	No	(Kryter, 1985) (Recuero, 1994)
20	<b>Mareos</b>	Tonos puros 60 a 100 Hz ultrasonidos	150 dB 160 dB	1 a 2 seg.	Si	(Kryter, 1985) (Harris, 1995)
21	<b>Nauseas</b>	Infrasonido y bajas Tonos 100 Hz	153 dB	1 a 2 seg.	Proba-ble	(Johnson, 1982) (Kryter, 1985)
22	<b>Deficiencias Motrices y Pérdida del Equilibrio</b>	0,1 a 10 Hz ultrasonidos	140 dB 160 dB	Minutos - horas	Proba-ble	(Recuero, 1994) (Harris, 1995)
23	<b>Desmayos</b>	Infrasonidos Frecuencias bajas	altos	Horas	Difícil-mente	(Harris, 1995)
24	<b>Respuesta reflejo</b>	Desconocido	Diferencia de NPS respecto a ruido fonfo.	Milise-gundos	Desc..	(Harris, 1995) (Berglund – Lindvall, 1995)
25	<b>Respuesta Sensorial No-auditiva (sensación táctil)</b>	10 Hz 7 Hz 5 Hz 3,5 Hz 2,2 Hz 2 a 100 Hz	> 115 dB > 110 dB > 102 dB > 100 dB > 95 dB	5 seg. 12 seg. 18 seg. 28 seg. > 2 h	Difícil-mente	(Kryter, 1985)  (Berglund – Lindvall, 1995)

26	<b>Calentamiento y Fisuras en la Piel</b>	Frecuencia alta y ultrasonidos	140 a 150 dB	Desc.	Difícilmente	(Harris, 1995)
27	<b>Enrojecimiento del Rostro</b>	Tonos puros de 100 Hz	153 dB	1 a 2 seg.	Si	(Kryter, 1985)
28	<b>Sensación de Cambio Inusual en el Ambiente</b>	12 Hz	> 80 dB	segundos	Probable	(Kryter, 1985)
29	<b>Tos y Ahogamiento</b>	60 a 73 Hz	150 dB	1 a 2 seg.	Muy probable	(Kryter, 1985)
30	<b>Variaciones sobre las Cuerdas Vocales y el Habla</b>	Bandas entre 15 y 50 Hz Tonos puros entre 43 y 100 Hz 1 a 100 Hz 10 Hz	>125 dB  150 dB	1 a 2 seg.	Probable	(Kryter, 1985) (Recuero, 1994) (Berglund – Lindvall, 1995)
31	<b>Efectos en la Vista</b>	4 a 800 Hz Tonos puros de 43 a 73 Hz	110 dB 150 dB	1 a 2 seg.	Probablemente	(Recuero, 1994) (Recuero, 2002) (Kryter, 1985)
32	<b>Vibraciones Localizadas en el Cuerpo</b>	4 a 100 Hz	Sobre 105 dB	Segundos	Probablemente	(Recuero, 1994)
33	<b>Vibración Pared Abdominal</b>	5 a 10 Hz banda ancha con máximo en 50 Hz tonos infrasónicos superiores a 10 Hz 40 a 60 Hz 4 a 20 Hz	128 dB 145 dB 105 dB 132 dB	90 seg.	Difícilmente	(Harris, 1995) (Kryter, 1985) (Johnson, 1982)
34	<b>Vibración dentro del Tórax</b>	40 a 60 Hz 4 a 20 Hz tonos infrasónicos superiores a 10 Hz entre 15 y 50 Hz tonos 60 y 73 Hz	105 dB 132 dB 145 dB 140 dB 150 dB	90 seg. 1 a 2 seg. 1 a 2 seg.	Probablemente	(Johnson, 1982) (Kryter, 1985) (Skille, 1998)

35	<b>Vibración Tabique Nasal</b>	Bandas estrechas entre 2 y 10 Hz 4 a 20 Hz	142 dB 132 dB	1 a 2 seg.	Difícilmente	(Kryter, 1985) (Johnson, 1982)
36	<b>Presión y Molestia en la Garganta</b>	Banda ancha con máximo en 50 Hz Tonos entre 3 y 40 Hz Bandas estrechas centradas entre 15 y 50 Hz Tonos de 60 Hz y de 73 Hz	140 dB 140 dB 150 dB	1 a 2 seg. 1 a 2 seg. 1 a 2 seg.	Difícilmente	(Kryter, 1985)
37	<b>Vibración en la Pantorrilla</b>	Tonos de 40 Hz	Desc.	Segundos	Muy probable	(Skille, 1998)
38	<b>Vibración en los Muslos</b>	Tonos de 20 Hz	Desc.	Segundos	Muy probable	(Skille, 1998)
39	<b>Vibración en zona Lumbar y Sacro</b>	Tonos de 50 Hz	Desc.	Segundos	Muy probable	(Skille, 1998)
40	<b>Efectos Positivos</b>	Tonos puros con altavoces de 30 a 120 Hz Tonos de diapasones de 32, 64, 128 y 256 Hz y superiores a 8000 Hz Algunos tipos de música	Desc.	Minutos	Probablemente	(Skille, 1998) (Campbell, 1998)
41	<b>Estrés</b>	Ultrasonido Infrasonido Todo el espectro en general	105 dB	Milisegundos a horas	Si	(Berglund – Lindvall, 1995) (Harris, 1995)

42	<b>“Débil Locura”</b>	Infrasonido de frecuencia fija	altos	Cotidianamente	Probablemente	(Recuero, 1994)
43	<b>Alteración del Sueño</b>	Desconocido (ver efectos vegetativos también presentes durante sueño)	$L_{MAX} = 45$ dB(A) $Leq > 30$ dB(A)	10-15 veces/noc he	Si	(Berglund et al., 1999)
44	<b>Comportamiento Agresivo</b>	Desconocido	$Leq > 80$ dB(A)	Desc.	Desc.	(Berglund et al., 1999)
45	<b>Otros Cambios de Estado de Ánimo.</b>	Desconocido	Desconocido	Desc.	Desc.	(Berglund – Lindvall, 1995)

TABLA 5.1 : Efectos del ruido en el ser humano, espectros que los causan, niveles sobre los cuales pueden tener lugar, tiempos de exposición necesarios para provocarlos y fuentes bibliográficas.

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### 6.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha visto durante el transcurso del Capítulo 3, los efectos del ruido en el ser humano son muchos y de distinta índole. Algunos de estos efectos son producidos directamente en el oído, mientras que otros van aún más allá. Incluso algunos efectos del ruido no son causados por la recepción de ondas por parte de nuestro oído, sino que ingresan al organismo de forma estructural (por ejemplo las vibraciones de algunos órganos). Como se ha descrito, la gravedad de algunos de los efectos no-auditivos del ruido es realmente considerable, poniendo en serio riesgo la salud física y mental. Esto conduce a pensar que el ruido debería ser ponderado de acuerdo a su impacto global sobre la salud. *Las curvas de ponderación actual, en particular la curva “A”, consideran exclusivamente la recepción del ruido por parte del oído. La evidencia bibliográfica sobre las consecuencias extra-auditivas que ha sido recopilada es suficiente para comprender que el daño que el ruido provoca sobre la salud humana no puede ser juzgado sólo con criterios basados en el sistema auditivo humano.*

En este capítulo se analizan y discuten los resultados hallados a partir de la recopilación bibliográfica. Para dicho fin, se han clasificado los efectos del ruido en distintas categorías: a) de acuerdo a la zona del espectro que los causa, b) de acuerdo al nivel sonoro sobre el cual se producen, y c) de acuerdo a al tiempo de exposición necesario para producirlos. Para el análisis de la eficiencia de la ponderación “A” se han combinado estas categorías y se han considerado otros aspectos como el ancho de banda del ruido, la presencia de tonos puros, el significado del ruido y el uso de protectores auditivos. En función de la información analizada se discuten también las ventajas y desventajas de la ponderación “A” en distintos ámbitos de recepción, como viviendas, ámbitos laborales, vía pública, el transporte de pasajeros, etc. También se repasan las principales ventajas del empleo del dB(A) y se han incluido una serie de antecedentes negativos sobre su uso, los que han sido transcritos a partir de distintas fuentes bibliográficas. Por último, se estudian los caminos futuros a seguir para progresar en la materia.

#### 6.1.1. La Dificultad de las Fuentes Bibliográficas

Para realizar este trabajo fue necesario recolectar y analizar un gran número de fuentes bibliográficas. Los estudios publicados sobre los efectos del ruido en el ser humano no abundan pero son suficientes para realizar un estado del arte en forma satisfactoria. El presente trabajo, además de hacer una revisión de la materia, estudia la eficiencia de un descriptor de ruido (el dBA) desde el punto de vista de la salud. *El problema que surge, es que gran parte de los estudios sobre el impacto del ruido en la salud utilizan el mismo dB(A) como descriptor de la*

*energía acústica a que están expuestos los individuos. Esto constituye una suerte de paradoja, ya que no es posible evaluar correctamente una herramienta utilizando la misma herramienta.* A causa de esta contradicción, fue necesario desechar un gran número de fuentes bibliográficas para realizar el análisis.

### 6.1.2. La Legislación sobre Ruido

La mayor parte de la legislación que protege a las personas del ruido indica que el ruido debe ser ponderado mediante el filtro “A”. Por esta razón, *podríamos decir que dicha legislación persigue el objetivo tácito de proteger sólo los oídos de las personas. Para proteger íntegramente a las personas del ruido, se deberían conocer las frecuencias que causan los efectos extra-auditivos.* En el caso que estas frecuencias no coincidan con las que causan los efectos auditivos, el empleo de una ponderación auditiva no sería apropiado para evaluar todos los efectos del ruido. El desarrollo del Capítulo 5 demostró que efectivamente, las frecuencias del ruido que causan muchos de los efectos fisiológicos no auditivos son distintas a las frecuencias de mayor sensibilidad del oído. Por esta causa, no podemos afirmar que la legislación sobre ruido proteja íntegramente la salud de las personas. *El dB(A) nació de criterios auditivos y por lo tanto su incumbencia es para efectos auditivos.*

## 6.2. ANÁLISIS ESPECTRAL GENERAL

### 6.2.1. DIVISIÓN DEL ESPECTRO

Para facilitar el análisis, se dividió el espectro sonoro en tres rangos: a) frecuencias bajas e infrasónicas (*LIF*), b) frecuencias medias (*MF*); y c) frecuencias altas y ultrasonido (*HUF*). Existen varios efectos del ruido cuyo espectro causante no posee límites claros al día de hoy, sin embargo todos se han distribuido según estos tres rangos (algunos efectos están presentes en más de un rango). En este trabajo estos tres rangos se definen como:

- LIF: Frecuencias bajas e infrasónicas son las inferiores a 500 Hz
- MF : Frecuencias medias son las comprendidas entre 500 Hz y 4000 Hz
- HUF: Frecuencias altas y ultrasónicas son las superiores a 4000 Hz

### 6.2.2. FRECUENCIAS BAJAS E INFRASÓNICAS (LIF)

La exposición a ruidos con componentes de frecuencias bajas e infrasónicas pueden causar muchos efectos adversos sobre la salud. Algunas de estas alteraciones tienen lugar luego de largos tiempos de exposición y otros de ellos son producidos a corto plazo. También, existen grandes diferencias de niveles sonoros a los cuales se producen estos efectos. Sin considerar los niveles sonoros ni los tiempos de exposición, los efectos que podrían producirse debido a la exposición a ruidos con frecuencias bajas e infrasónicas, son:

- Enfermedad vibroacústica
- Enmascaramiento e interferencia con la comunicación
- Molestia
- Reducción del rendimiento
- Efectos vegetativos
- Variación del pulso y la frecuencia respiratoria
- Respiración artificial inducida
- Desgarros alveolares
- Exceso de salivación y dolor al deglutar
- Reducción de la tensión de los músculos de fibra lisa (vasos y pared vísceras)
- Fatiga corporal
- Mareos, náuseas, deficiencias motrices, pérdida del equilibrio y desmayos
- Sensación inusual de percepción del ambiente
- Tos, ahogamiento
- Variaciones sobre el habla
- Decremento de la precisión visual
- Dolores y molestias en el oído
- Enrojecimiento del rostro
- Vibraciones y molestias en la pared abdominal, tórax, garganta y tabique nasal
- Estrés y estados psíquicos alterados (débil locura).

Algunas personas son especialmente sensibles a las frecuencias bajas. Este tipo de ruido a bajos niveles sonoros altera notablemente a algunas individuos, mientras que otros apenas lo notan. En las personas más sensibles, los ruidos graves pueden producir reacciones psicosomáticas, malestares, molestias e incluso desmayos (Harris, 1995). Además, en estas personas la alteración del equilibrio se produce a niveles inferiores que en las demás personas. Esta inestabilidad podría ser un factor de riesgo en algunas situaciones, como al conducir vehículos (que en general poseen gran contenido de frecuencias bajas). Otras fuentes sonoras de con frecuencias muy bajas e infrasónicas y de frecuencias bajas son: los camiones y colectivos, los trenes, trenes subterráneos, aviones, el viento en los edificios altos, las cámaras de combustión, algunos motores, los sistemas de calefacción, los cohetes, y algunos fenómenos naturales como terremotos, tormentas, tornados, etc.

En general, las reacciones fisiológicas y psicológicas frente a las infrasónicas, comienzan a ser perceptibles recién a niveles superiores a 125 dB, y por sobre 145 dB la intensidad de las respuestas empieza a crecer muy rápidamente (Kryter, 1985). Sin embargo, Harris señala que el umbral de los efectos infrasónicos es 120 dB (Harris, 1995).

### 6.2.3. FRECUENCIAS MEDIAS (MF)

Los efectos en el ser humano que podrían ser causados por la exposición a ruidos con fuertes componentes de frecuencias medias son:

- Daño y pérdida auditiva
- Molestia
- Enmascaramiento e interferencia con la comunicación
- Dolores y molestias en el oído
- Reducción del rendimiento
- Efectos vegetativos en general
- Alteración de la motilidad estomacal
- Cambios endocrinos
- Efectos en la vista
- Estrés.

Algunos de estos efectos son producidos a niveles sonoros más elevados, mientras que otros efectos se generan a bajos niveles (más adelante se analizarán los distintos rangos de niveles sonoros). De la misma manera, algunas deficiencias son producidas luego de períodos cortos mientras que otros efectos son ocasionados sólo a largo plazo. El oído es particularmente sensible a las frecuencias medias-altas, por lo que en este rango tendrán mucha importancia los efectos relacionados con la percepción auditiva (daño y pérdida auditiva, dolor en el oído, molestia).

### 6.2.4. FRECUENCIAS ALTAS y ULTRASÓNICAS (HUF)

En presencia de ruido de frecuencias altas pueden manifestarse los siguientes efectos sobre la salud:

- Daño y pérdida auditiva
- Molestia
- Decremento del rendimiento
- Efectos vegetativos
- Estrés
- Dolores y molestias en el oído
- Mareos
- Calentamiento y fisuras en la piel.

Nuevamente, no todos estos efectos son producidos en los mismos rangos de niveles sonoros. También varía el período de exposición que es necesario para provocar cada uno de los efectos. En las secciones siguientes se dividirán los efectos del ruido según el nivel sonoro y el período de exposición necesarios para causarlos.

### 6.3. ANÁLISIS ESPECTRAL POR RANGOS DE NIVELES SONOROS

Sin considerar los niveles sonoros a los que se producen los distintos efectos sobre las personas, no es muy apropiado comparar sus espectros causantes. En la Tabla 5.1 del capítulo anterior, se ha indicado los niveles sonoros sobre los cuales es posible encontrar cada efecto para las frecuencias indicadas en cada caso. El rango dinámico del ruido en el cual se producen efectos adversos sobre el ser humano, es del orden de 160 dB (aproximadamente entre 30 dB a 190 dB). Este rango es demasiado amplio, por lo cual, para el análisis, se optó por dividirlo en tres:

Rango I : menos de 60 dB

Rango II : entre 60 dB y 90 dB

Rango III : más de 90 dB.

De esta forma, se clasifican todos los efectos del ruido dentro de estas 3 categorías. Los efectos que se manifiestan con los niveles sonoros del Rango I, por lo general también estarán presentes durante exposiciones a los niveles del Rango II y III. De igual forma, los efectos del Rango II muy probablemente estén presentes en el Rango III. En la Tabla 6.1, se dividieron los efectos correspondientes los tres rangos descritos.

En la sección siguiente se combinan los resultados del análisispectral general realizado en 6.3 con el análisis por rangos de niveles que se realizó en esta sección. Los efectos que se incluyen con letra *italica* en cada tabla, son aquellos que también están presentes en la misma zona del espectro del rango inferior de niveles (efectos del Rango II que también se incluyeron en el Rango I y efectos del Rango III que también se manifiestan en el Rango II). En las tablas siguientes se omitieron los efectos del ruido sobre los que no se ha encontrado ningún tipo de información espectral asociada.

<b>RANGO I</b> ( < 60 dB )	<b>RANGO II</b> ( > 60 dB ; < 90 dB )	<b>RANGO III</b> ( > 90 dB )
Enmascaramiento e interferencia en la comunicación	Daño y pérdida auditiva	Enfermedad vibroacústica
Molestia	Efectos vegetativos en general	Dolores y molestias en el oído
Reducción del rendimiento	Efectos cardiovasculares	Respiración artificial inducida
Alteración del sueño	Cambio ritmo respiratorio	Desgarros alveolares
	Reducción de la motilidad estomacal	Reducción tensión músculos fibra lisa
	cambios endocrinos	Fatiga corporal
	Cambios de estado de ánimo (agresividad, irritabilidad, fastidio, enojo, ansiedad, nerviosismo, etc.)	Mareos y pérdida del equilibrio
	<i>Efectos Rango I</i>	Nauseas
		Deficiencias motrices y desmayos
		Respuestas sensoriales no-auditivas
		Tos y ahogamiento
		Modulación del habla
		Efectos sobre la vista
		Calentamiento, enrojecimiento y fisuras piel
		Vibraciones localizadas en el cuerpo
		<i>Efectos Rangos I y II</i>

Tabla 6.1: Efectos del Ruido que se producen dentro de los Rangos I, II y III. Cada rango contiene también a los efectos producidos en los rangos anteriores.

### 6.3.1. RANGO I ( $< 60$ dB)

Frecuencias bajas e infrasónicas (LIF)	Frecuencias medias (MF)	Frecuencias altas y ultrasonido (HUF)
Enmascaramiento e interferencia en la comunicación	Enmascaramiento e interferencia en la comunicación	Molestia
Molestia	Molestia	Reducción del rendimiento
	Reducción del rendimiento	

Tabla 6.2: Efectos del Ruido que se producen dentro del Rango I, en las tres zonas del espectro: LIF, MF y HUF.

En la Tabla 6.2, se observa que no existen grandes diferencias entre los efectos causados por las tres zonas del espectro dentro del Rango I. El enmascaramiento y la interferencia con la comunicación están presentes principalmente en MF y LIF, mientras que la reducción del rendimiento está distribuida especialmente en frecuencias medias y altas (MF y HUF).

Como se ha explicado, la molestia posee un fuerte componente subjetivo. Sin embargo, de acuerdo a las curvas de ruidosidad (ver Fig. 5.19) y a los contornos de igual sonoridad (ver Fig. 5.2), puede decirse que en el Rango I el oído posee una sensibilidad significativamente mayor el MF y HUF, respecto a las frecuencias bajas. Esto es especialmente notorio en torno a las frecuencias de intersección entre MF y HUF (cerca de 4000 Hz).

Bajo 60 dB, la molestia por ruido es uno de los principales efectos a considerar, o quizás el principal. Esto se manifiesta especialmente en el ruido comunitario de zonas habitacionales.

La perturbación del sueño también es muy relevante en este rango de niveles, pero lamentablemente no se ha encontrado informaciónpectral concluyente asociada a este efecto.

Si bien el enmascaramiento y la interferencia de la comunicación tienen una distribución espectral que considera frecuencias bajas, su magnitud no es crítica dentro del Rango I.

En cambio, la reducción del rendimiento se produce con mayor énfasis en la zona media y superior del espectro, sin embargo también se han encontrado efectos en el rango LIF (en especial ruidos infrasónicos). No se han hallado estudios que indiquen que el carácter espectral en este efecto tenga un rol tan importante como lo tienen la dinámica temporal y el significado del ruido. En lo que respecta al espectro sonoro de disminución del rendimiento, los resultados hallados son algo ambiguos e incompletos. Sin embargo, en muchos casos la reducción del rendimiento y la molestia son efectos que están íntimamente ligados.

Debido a que la ponderación “A” nació a partir de los contornos de igual sonoridad comprendidos en el Rango I de niveles (ver 4.3.2), no podría afirmarse que esta ponderación es inadecuada para evaluar la molestia dentro de este rango de niveles, al menos en forma teórica.

La falta de información espectral fiable respecto a los efectos del ruido que se presentan dentro del Rango I, junto con el origen para bajos niveles de la curva “A” (ver 4.3.2), *no dan indicio alguno de que la ponderación “A” sea inadecuada para evaluar los efectos adversos que el ruido de niveles sonoros inferiores a 60 dB causa en el hombre.*

### 6.3.2. RANGO II ( $> 60$ dB ; $< 90$ dB )

Frecuencias bajas e infrasónicas (LIF)	Frecuencias medias (MF)	Frecuencias altas y ultrasonido (HUF)
<i>Enmascaramiento e interferencia en la comunicación</i>	<i>Enmascaramiento e interferencia en la comunicación</i>	Pérdida temporal de la audición (TTS)
<i>Molestia</i>	<i>Molestia</i>	<i>Molestia</i>
Efectos vegetativos en general	<i>Reducción del rendimiento</i>	<i>Reducción del rendimiento</i>
	TTS y daño auditivo	Efectos vegetativos en general
	Efectos vegetativos en general	
	Reducción motilidad estomacal	
	Cambios endocrinos	

Tabla 6.3: Efectos del Ruido que se producen dentro del Rango II, en las tres zonas del espectro: LIF, MF y HUF. Los efectos en itálica también están presentes en el Rango I.

En el Rango II de niveles se producen más efectos adversos que en el Rango I. El TTS y el PTS son considerables en este rango (cuando la exposición es lo suficientemente prolongada). La zona del espectro de mayor relevancia para generar desplazamientos de los umbrales es la de frecuencias medias y altas (MF y HUF).

La distribuciónpectral de la molestia, el enmascaramiento y la interferencia con la comunicación son similares a lo presentado en el Rango I, pero con un mayor peso en las frecuencias bajas debido a la mayor sensibilidad del oído a frecuencias bajas (ver curvas de sonoridad Fig. 2.18).

En este rango de niveles también están presentes la reducción del rendimiento y el sueño. Además, comienzan a hacerse presentes los efectos sobre el sistema nervioso autónomo (ó vegetativo) y también las alteraciones psiquiátricas. Los cambios que se producen sobre el sistema vegetativo, responden a estímulos en los tres rangos de frecuencia, según se estudió en la Sección 5.13. En cuanto a las alteraciones en el humor o de carácter psiquiátrico, no se ha encontrado informaciónpectral asociada. Sin embargo, los cambios sobre el humor que tienen lugar en el Rango II pueden tener una fuerte ligazón con la molestia, la interferencia en la comunicación, la alteración del sueño y la reducción del rendimiento.

La presencia de TTS y posible PTS en este rango justifican el mayor peso en frecuencias medias y altas que se le da a la evaluación del ruido al utilizar el dB(A). A pesar de ello, **debe ponerse atención al enmascaramiento producido por frecuencias bajas en este rango de niveles, ya que éste podría ser significativo bajo la zona de mayor ponderación del dB(A). Se podría causar una interferencia en la palabra debido a la presencia de ruidos de frecuencias medias o bajas, que el dB(A) podría no considerar adecuadamente.**

### 6.3.3. Rango III ( $> 90$ dB)

Frecuencias bajas e infrasónicas (LIF)	Frecuencias medias (MF)	Frecuencias altas y ultrasonido (HUF)
Enfermedad vibroacústica	Dolores y molestias en el oído	<i>Pérdida auditiva temporal (TTS) y permanente (PTS)</i>
<i>Efectos vegetativos en general</i>	<i>Pérdida auditiva temporal (TTS) y permanente (PTS)</i>	Dolores y molestias en el oído
Desgarros alveolares	<i>Efectos vegetativos en general</i>	<i>Efectos vegetativos en general</i>
Reducción de la tensión de músculos fibra lisa	<i>Reducción motilidad estomacal</i>	Mareos y pérdida del equilibrio
Desplazamiento temporal de umbrales auditivos.	<i>cambios endocrinos</i>	Calentamiento, enrojecimiento y fisuras piel
Dolores y molestias en el oído	Efectos sobre la vista	<i>Molestia</i>
Respiración artificial inducida	<i>Enmascaramiento e interferencia en la comunicación</i>	<i>Reducción del rendimiento</i>
Vibraciones localizadas en el cuerpo	<i>Molestia</i>	
Fatiga corporal	<i>Reducción del rendimiento</i>	
Mareos y pérdida del equilibrio		
Nauseas		
Deficiencias motrices y desmayos		
Respuestas sensoriales no-auditivas		
Tos y ahogamiento		
Modulación del habla		
Efectos sobre la vista		
Enrojecimiento del rostro		
Débil locura		
<i>Molestia</i>		
<i>Enmascaramiento e interferencia en la comunicación</i>		

Tabla 6.4: Efectos del Ruido que se producen dentro del Rango III, en las tres zonas del espectro: LIF, MF y HUF. Los efectos en *italica* también están presentes en el Rango II.

En exposiciones al ruido que superan los 90 dB comienzan a manifestarse severos efectos adversos en el organismo.

Si bien la pérdida auditiva puede ser importante a estos niveles, ésta podría ser prevenida total o parcialmente mediante el correcto uso de protectores auditivos. Sin embargo, en este rango de niveles pueden aparecer sensaciones de molestias y dolores en el oído frente a exposiciones de frecuencia baja e infrasónica (que difícilmente pueden ser evitados mediante el uso de protectores, los que brindan escasa atenuación sonora en esta zona del espectro).

Como puede observarse en la Tabla 6.4, en este rango de niveles existen muchos efectos sobre la salud causados por la exposición al ruido de frecuencia baja.

Por supuesto que los efectos producidos en frecuencias medias y altas en el Rango II, también estarán presentes en el Rango III. Sin embargo, estos efectos (TTS, molestia y enmascaramiento) no son tan críticos sobre la salud como los que se manifiestan en el Rango III de niveles.

Uno de los problemas más graves que se producen en este rango, es la enfermedad vibroacústica (ver Sección 3.5), el cual es causado debido a la exposición durante años a ruidos de frecuencia baja (< 500 Hz) a niveles sonoros superiores a 90dB.

Otro efecto cuya magnitud se vuelve considerable en el Rango III, es la aparición de vibraciones localizadas en el organismo, las que se producen en distintas frecuencias bajas, la gran mayoría de ellas menores a 100 Hz.

También frente al ruido de frecuencia baja e infrasónica de altos niveles, aparecen síntomas relacionados con la movilidad del cuerpo, como fatiga, deficiencias motrices, mareos, náuseas y pérdida del equilibrio. Curiosamente, algunos de estos síntomas también se pueden hacer presentes ante los ultrasonidos (mareos, deficiencias motrices y pérdida del equilibrio). Sin embargo, los registros hallados con ultrasonidos son escasos. En HUF también pueden manifestarse calentamientos y fisuras en la piel.

Otras consecuencias fisiológicas que se pueden hallar debido a ruidos de frecuencia baja e infrasónica de altos niveles, son: la modulación de las cuerdas vocales, la reducción de la tensión de la musculatura de fibra lisa, tos, ahogamiento, salivación, dolor al tragiar y efectos sobre la vista. Este tipo de ruido (LIF), podría tener un efecto letal a muy altos niveles, ya que los alvéolos pulmonares pueden sufrir desgarros. En el rango infrasónico (en condiciones particulares de exposición), también pueden producirse alteraciones psiquiátricos, como locuras leves.

*La cantidad y gravedad de los efectos que se producen a causa de la exposición a altos niveles de ruido de frecuencia baja e infrasónica, torna evidente que esta clase de ruidos debe ser considerada como un potencial agente agresor de la salud humana. La ponderación “A” no representa adecuadamente esto, ya que resta importancia a las bajas frecuencias. Por este motivo, se puede decir que la ponderación “A” no es adecuada para evaluar los efectos del ruido en el ser humano a niveles sonoros superiores a 90 dB.*

## 6.4. ANÁLISIS SEGÚN EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

A fin de estudiar el comportamiento temporal de los espectros sonoros que producen los efectos del ruido más relevantes, se los ha clasificado en efectos producidos en el corto y en el largo plazo. Por este motivo, se define:

*Corto Plazo*: Efectos producidos por exposiciones inferiores a 1 h.

*Largo Plazo*: Efectos producidos por exposiciones superiores a 1 h.

En la Tabla 6.5 se incluyen los efectos que se producen como consecuencia de exposiciones a corto y a largo plazo. Los efectos del ruido de los cuales no se tiene información sobre el tiempo de exposición requerido para producirlos, han sido omitidos (ver Tabla 5.1 para más detalles). En la columna de efectos a largo plazo no se incluyeron los efectos que también son producidos a corto plazo.

CORTO PLAZO (< 1 h)	LARGO PLAZO (> 1 h)
Desplazamiento temporal de umbrales	Desplazamiento temporal de umbrales
Pérdida auditiva por ruido impulsivo	Pérdida auditiva
Dolores y molestias en el oído	Enfermedad vibroacústica
Enmascaramiento	Efectos vegetativos severos
Interferencia con la comunicación	Fatiga corporal
Molestia	“débil locura”
Reducción del rendimiento	Efectos cardiovasculares sostenidos
Incremento del pulso	
Variación de frecuencia respiratoria	
Alteración de la motilidad del estómago	
Exceso de salivación / dolor al deglutar	
Cambios endocrinos	
Reducción de tensión en músculos de fibra lisa	
Mareos	
Nauseas	
Respuesta sensorial no-auditiva	
Sensación de cambio inusual en el ambiente	
Tos y ahogamiento	
Efectos en la vista	
Enrojecimiento del rostro	
Vibraciones localizadas en el cuerpo	
Presión y molestia en la garganta	
Estrés	
Alteración del Sueño	

Tabla 6.5: Efectos del Ruido que se producen a corto plazo (< 1 h) y a largo plazo (> 1 h).

La distribución de los efectos del ruido según el tiempo de exposición no parece tener relación con los espectros de los ruidos. Tanto en los efectos producidos a corto plazo como a largo plazo se registran estímulos de espectros muy variados. **Por dicho motivo, no se pueden formular conclusiones respecto a la eficiencia de la ponderación “A” en la evaluación de los efectos en función de la duración del estímulo causante.**

## 6.5. VENTAJAS DEL USO DEL dB(A)

Las principales ventajas de la utilización de la ponderación “A” son:

- Permite adaptar una medición sonora objetiva a la respuesta aproximada en frecuencia que tiene un oído humano normal a bajos niveles sonoros.
- Representa un número único y por lo tanto facilita la manipulación de datos y reduce los tiempos de medición y de procesamiento de datos.
- Está presente en la mayoría de los instrumentos de medición del ruido y su uso es accesible y simple.
- Gran parte de los procedimientos de medición de la acústica se realizan con esta ponderación, por lo que es factible comparar resultados (aunque con ciertas limitantes como se discutirá más adelante).

## 6.6. ANTECEDENTES NEGATIVOS SOBRE EL USO DEL dB(A)

Se ha realizado una recopilación de los trabajos en los que se mencionan inconvenientes acerca de la aplicación de la ponderación “A” en distintos casos. A continuación se realizan citas textuales halladas en la bibliografía.

### 6.6.1. SONORIDAD Y RUIDOSIDAD

La ponderación “A” nació de las curvas de igual sonoridad, sin embargo existen críticas a su aplicación respecto a la representatividad que el dB(A) tiene sobre la sonoridad. El dB(A) se originó a partir de la curva isofónica de 40 fonos (equivalente a 40 dB en 1000 Hz) para tonos puros (ver 2.4.5), y fue definido inicialmente para ser empleado en ruidos comprendidos entre 24 dB y 55 dB (ver 4.3.2). La globalización de su uso y la extrapolación a su empleo a niveles superiores a 55 dB, que no responden a la condición inicial de ser tonos puros, sin duda son factores que influyen en su rendimiento como indicador de la sonoridad. Esto se refleja en los siguientes comentarios:

*“El filtro A no es representativo de la sonoridad cuando los sonidos contienen una mezcla de ruido y tonos puros. En esos casos, la ponderación “A” es menos apropiada para la predicción de la sonoridad o la molestia. Esto es también cierto para el ruido que contiene la mayoría de su energía en el rango de baja frecuencia 15-400 Hz. En este caso la sonoridad percibida relativa a 1000 Hz puede ser subestimada en 7 u 8 dBA. La razón de esto es que la sonoridad aumenta al incrementarse el ancho de banda y la forma espectral no es cuantificada por el filtro “A” en grado suficiente. Un decremento en el nivel sonoro “A” puede corresponder a un incremento de la sonoridad o molestia. Esto revela claramente la limitación de usar un valor único de nivel de presión sonora como indicador de la sonoridad y la molestia, ya sea un valor no ponderado o con ponderación “A”. ” (Berglund – Lindvall, 1995).*

*“... la ponderación “A” en los sonómetros puede ser un problema en la evaluación de la sonoridad y la ruidosidad de ruidos con ciertos espectros.” (Kryter, 1985).*

*“...Buena parte del trabajo publicado por Zwicker indica que la simple corrección en frecuencias bajas que realiza la ponderación “A” representa en forma inadecuada la manera en que la gente escucha el sonido” (Smith et al., 1989).*

*“ Para ruidos de banda estrecha, las ponderaciones “D” y “E” pueden ser entre 0 y 10 dB mejores que la ponderación “A” para predecir la sonoridad y ruidosidad percibidas” (Kryter, 1985).*

*“En la mayoría de la circunstancias, no es realista esperar que las mediciones ponderadas “A” tengan una buena correlación con la evaluación subjetiva de la sonoridad” (Masciale, 2002).*

Si la ruidosidad se ajusta mejor que la sonoridad para evaluar los efectos adversos (Berglund – Lindvall, 1995; Kryter, 1985), sería adecuado suponer que tendrá mayor éxito en la evaluación de dichos efectos un indicador relacionado con la ruidosidad que uno que nació de la sonoridad, como lo es el dB(A). Esto puede notarse en el comentario de Kryter:

*“... La ponderación “A” no es tan apropiada como la “D” o el PNdB para la medida de la sonoridad y ruidosidad percibidas” (Kryter, 1985).*

### 6.6.2. MOLESTIA

El dB(A) no nació para evaluar la molestia causada por el ruido, sin embargo frecuentemente se utiliza para ello. El trabajo incluido en el Anexo muestra que distintos espectros que poseen igual dB(A) pueden ocasionar grados de molestia muy distintos. En ese estudio, un espectro grave resultó menos molesto que otros espectros de igual nivel “A” pero con mayor contenido de frecuencias medias y altas (Kogan – Rosales, 2003). Este resultado parece ir en dirección opuesta a aquellos que manifiestan mayores reacciones debido a las frecuencias bajas que lo que la ponderación “A” representa. Sin embargo, el hecho de que una población adolescente (como la estudiada) no manifieste molestia significativa ante ruidos de frecuencia

baja recibidos a niveles altos, puede constituir un problema. Esto se debe a que en los jóvenes podrían producirse efectos fisiológicos inconscientes (ver 3.3.2), aún cuando el ruido no les produzca molestia.

Otros comentarios respecto a la relación de la ponderación “A” y la molestia, son:

*“...tanto en laboratorio como en terreno se ha acumulado evidencia que indica que el dB(A) predice la sonoridad y la molestia del ruido comunitario en forma más bien pobre.” (Berglund – Lindvall, 1995).*

*“Respecto a la molestia causada por el ruido, los datos de la investigación epidemiológica de grupos no son inconsistentes con la teoría simple de la energía equivalente que está basada en la física, la cual es representada por el índice Leq frecuentemente medido en dB(A), pero la variabilidad ha sido grande. Las críticas han sido dirigidas tanto al modo de integración temporal como al uso de mediciones con ponderación “A”. ” (Berglund – Lindvall, 1995).*

### 6.6.3. FRECUENCIAS BAJAS

La ponderación “A” resta importancia a las frecuencias bajas. Esto se debe a la poca sensibilidad que el oído tiene en esta zona del espectro para bajos niveles de sonoridad, los que dieron origen a la curva “A” (ver 4.3.2). La generalización del uso dB(A) para niveles sonoros y aplicaciones ajenas a las que le dieron vida, ha sido motivo de innumerables críticas. A continuación se transcriben sólo algunos pasajes en que se pone en tela de juicio (implícita o explícitamente), la subestimación de las frecuencias bajas que realiza la ponderación “A”.

El texto “Community Noise” de la Organización Mundial de la Salud (OMS) señala: *“El ruido intenso de frecuencia baja puede producir síntomas claros, incluyendo daños respiratorios y dolor en la audición. A pesar de que los efectos de las frecuencias bajas de menor intensidad son difíciles de establecer por razones metodológicas, la evidencia sugiere que el número de efectos adversos puede ser mayor para ruido de frecuencia baja que para ruidos con igual cantidad de energía pero contenida en frecuencias más altas. Las reacciones manifestadas respecto a la sonoridad y la molestia son mayores para frecuencias bajas que para otros ruidos del mismo nivel sonoro, independientemente de cual ponderación es empleada; la molestia es incrementada por el traqueteo y las vibraciones inducidas por el ruido de frecuencia baja; la inteligibilidad de la palabra se puede reducir en mayor medida por ruidos de frecuencias bajas que por otros ruidos (excepto aquellos en el rango de frecuencia del habla, a causa de la asimetríapectral del enmascaramiento). ” (Berglund – Lindvall, 1995).*

*“El dB(A) subestima el impacto de las componentes de frecuencias bajas del ruido...”*

*“El uso general del filtro de la ponderación “A” atenúa las frecuencias bajas, por lo tanto el nivel sonoro ponderado “A” no refleja el impacto real del contenido del ruido”. (Berglund – Lindvall, 1995).*

En cuanto al ruido de helicópteros, Schomer señala:

*“Podemos concluir que la ponderación “A” no funciona para estas fuentes (ruidos con frecuencia bajas de gran amplitud) porque:*

*(1) El SEL(A) subestima en 20 dB o más la molestia producida por el ruido de helicópteros cuando existen muchas agitaciones y vibraciones producidas por el ruido, (2) existe una interacción estructura-sonido por la cual el SEL(A) subestima en 8 a 10 dB la molestia del ruido de helicópteros en interiores.” (Schomer, 1989).*

#### 6.6.4. ENMASCARAMIENTO

El enmascaramiento producido por un ruido se incrementa al aumentar el ancho de banda dentro de una banda crítica. Además, los sonidos son enmascarados en mayor medida por ruido de frecuencias inferiores que superiores a estos (ver 5.5). Estos efectos del enmascaramientos no se ven reflejados en la operación de la ponderación “A”. El texto “Community Noise” de la OMS indica:

*“...Para sonidos que exceden los 60 dB, la fiabilidad de la ponderación “A” decrece. Mas aún, el nivel de presión sonora con ponderación “A” no considera ni los efectos del enmascaramiento mutuo entre componentes de un sonido complejo ni la asimetría del patrón de enmascaramiento producido en el sistema auditivo.” (Berglund – Lindvall, 1995).*

#### 6.6.5. ANCHO DE BANDA, FORMA ESPECTRAL y COMPONENTES TONALES

A pesar de su origen tonal, la ponderación “A” se utiliza cotidianamente para la evaluación de ruidos complejos

En el caso de las frecuencias muy bajas e infrasónicas, las reacciones objetivas y subjetivas del ruido que han sido registradas, son las mismas para el caso de bandas estrechas de ruido que para frecuencias discretas (Kryter, 1985). Sin embargo, la presencia de tonos puros en el ruido de banda ancha puede incrementar la molestia causada.

Debido a la forma espectral de la curva “A”, cuando se comparan los niveles sonoros “A” de ruidos de frecuencia baja (como por ejemplo explosiones, ruido de helicópteros, etc.), se obtendrán diferencias pequeñas de niveles. Por ejemplo, para el ruido de explosiones donde se han hallado diferencias de niveles de más de 13 dB sin ponderación, las diferencias con ponderación “A” fueron tan sólo de 1 dB (Schomer – Hoover, 1989). También es posible toparse con el caso opuesto: obtener grandes diferencias de nivel “A” en espectros que tienen similares cuotas de energía en frecuencias bajas, pero distinta composición de frecuencias medias y altas. En este sentido, Kryter señala:

*“Debido a que la curva “A” proporciona tales ponderaciones negativas en frecuencias bajas (por ejemplo -20dB en 100 Hz y -30 dB en 50 Hz), es posible tener grandes diferencias en la energía ponderada “A” en diferentes espectros, incluso cuando estos poseen similar energía en frecuencias bajas.” (Kryter, 1985).*

La OMS también se pronuncia respecto a las distintas formas espectrales:

*“...comisiones internacionales han estado alertando por muchos años que el dB(A) es un valor único el cual que no da cuenta ni de la selectividadpectral de la audición humana ni de su relación no lineal respecto a la intensidad sonora. Por lo tanto, si son comparados sonidos con distintas envolventes espectrales (por ejemplo varios tipos de ruidos comunitarios), el valor en dB(A) obtenido puede ser un indicador impreciso de la respuesta subjetiva humana” (Berglund – Lindvall, 1995).*

En cuanto al ancho de banda, existen críticas al dB(A) cuando se quiere estimar la sonoridad, ruidosidad o molestia que producen las bandas estrechas de ruido:

*“La ponderación “A” no concuerda bien con las opiniones de la sonoridad y la ruidosidad relativas de las bandas de muy baja y alta frecuencia de sonido o ruido, aunque con ruidos de banda muy ancha estas imprecisiones tienden a compensarse entre sí y pasan a ser relativamente insignificantes. Sin embargo, ocasionalmente en comunidades pueden ser encontrados sonidos o ruidos que contienen la mayor parte de su energía en bandas de frecuencia estrechas. En estos casos las mediciones ponderadas “A” pueden no ser válidas para dar cuenta de la sonoridad, ruidosidad o molestia relativa a las personas de la comunidad”. (Kryter, 1985).*

En 1957, Stevens señaló que se ha trabajado mucho por encontrar expresiones matemáticas aplicables para relacionar las lecturas de nivel de presión sonora “A” y “B” con los niveles de sonoridad, y expresa: *“Todos los esfuerzos han resultado en esencialmente en los mismos resultados: que las lecturas pueden ser útiles sólo cuando los ruidos medidos son sonidos simples de una sola frecuencia predominante.”* (Stevens, 1957).

Beranek, en su libro “Acoustics”, editado por primera vez en 1954, realiza una aseveración similar: *“Debe ser enfatizado que a pesar de que estas curvas de ponderación son útiles para entregar la sonoridad de los tonos puros, no son adecuadas para brindar la sonoridad de los ruidos complejos.”* (Beranek, 1996).

En la misma década, Stevens recuerda que R. J. Wells escribió una carta al comité de ruido Z24-W-18 (ver Sección 4.3.1) de la “American Standard Association”, destacando lo inadecuado que resultan las ponderaciones “A”, “B” y “C” para evaluar la sonoridad de dos o más tonos, especialmente cuando éstos están muy separados dentro del espectro (Stevens, 1957).

#### 6.6.6. RUIDOS IMPULSIVOS

Los ruidos impulsivos de corta duración en general poseen un espectro ancho. Algunos ruidos impulsivos en particular poseen alto contenido de frecuencias bajas, como es el caso de los truenos y los estampidos sónicos (“sonic boom”). En estos casos de presencia de frecuencias bajas, la ponderación “A” cuantificará de manera escasa la real magnitud de la energía acústica contenida en estos eventos. Esto se traslucce en los siguientes párrafos de Kryter:

*“Las mediciones físicas de exposiciones al ruido impulsivo y ruido de frecuencia baja deben ser corregidas a causa del efecto sobre la molestia de la impulsividad y de las vibraciones en las casas, para poder luego calcular los niveles equivalentes de exposición con ponderación “A” y los valores  $L_{DN}$ .” (Kryter, 1985).*

*“La ponderación “D” es generalmente superior que la “A” para la evaluación de sonidos impulsivos” (Kryter, 1985).*

#### 6.6.7. OTROS ANTECEDENTES

Ya en el año 1957, Hardy señaló: *“Las ponderaciones A y B no pueden seguir considerándose inequívocas en la evaluación de la reacción humana”* (Hardy, 1957).

En el mismo año, Stevens citó: *“La eficiencia que se tiene sólo en algunos casos no es suficiente”* y *“Las simples curvas “A” y “B” no son suficientes para todos nuestros propósitos”* (Stevens, 1957).

Respecto a los niveles sonoros en los que se emplea el dB(A), Masciale señala: *“En una sala silenciosa, las mediciones con ponderación “A” podrían tener una buena precisión. Pero, para cualquier medición de presión sonora de niveles de una conversación o superiores esto puede conducir a mediciones que tiene poca relación con los niveles de ruido percibido.”* (Masciale, 2002).

Respecto al daño que el ruido puede causar en las personas, la OMS señala: *“La ponderación “A” no cuantifica perfectamente la diferencia de sensibilidades de la audición humana”. En efecto, distintos tipos de sonidos de frecuencia alta y baja pueden ser más molestos o potencialmente más dañinos que lo que una simple medición ponderada “A” puede indicar”* (Berglund – Lindvall, 1995).

Kryter se refiere a la ponderación “A” en el ámbito comunitario: *“...el uso de la ponderación “D” o una similar implicaría una corrección en frecuencia general más precisa que el uso del filtro “A” para propósitos de evaluación del ruido comunitario.”* (Kryter, 1985).

La OMS recomienda la comparación de las ponderaciones “A” y “C” como medida “ parche” en las situaciones donde el espectro del ruido no es considerado adecuadamente por la curva “A”:

*“Desafortunadamente, mientras se siga acordando internacionalmente la utilización de la red de ponderación “A”, no existen especificaciones similares para el rango de frecuencia y tolerancias para mediciones de nivel sonoro lineales o sin ponderación. Por lo tanto, en mediciones donde existen frecuencias muy altas y muy bajas es necesario recomendar el uso de la ponderación “C” adicionalmente a la ponderación “A”. Esta práctica debería ser adoptada hasta que las normas internacionales para mediciones lineales o no ponderadas sean acordadas.”* (Berglund – Lindvall, 1995).

La existencia de este tipo de recomendaciones hace evidente que la red “A” presenta serios inconvenientes. Una ponderación espectral que se utiliza para medir el ruido que afecta a las personas debería ser suficiente para “pesar” cada banda del espectro. Si es necesario emplear correcciones adicionales luego de haber aplicado la ponderación, esto refleja que dicha ponderación es deficiente.

## 6.7. ÁMBITOS DE INMISIÓN

El mismo ruido no nos afecta de la misma forma mientras intentamos dormir la siesta que mientras estamos realizando una tarea física pesada. Cada ámbito posee características acústicas propias y nuestra sensibilidad también varía en función de las condiciones y el entorno.

En la legislación acústica se suele distinguir entre dos ámbitos básicos: el *ruido comunitario* y el ruido en ambientes de trabajo (*ruido laboral*). Esta distinción está relacionada con la ocupación que las personas dan al tiempo y su contexto social. El ruido comunitario es el que nos afecta en nuestras viviendas, en la vía pública y en nuestro tiempo libre. Mientras que el ruido laboral es aquel que tiene lugar mientras se cumple una jornada de trabajo. La forma de evaluar el ruido y los límites aceptables son distintos para estos dos ámbitos.

Además, existen otros ámbitos que merecen un estudio diferenciado, como es el caso de la vía pública y espacios comunes, los medios de transporte, los locales bailables, conciertos, salones de juego, etc.

En general, las exigencias son mayores en cuanto a los niveles sonoros permitidos para la inmisión comunitaria que para el ruido laboral. En las situaciones de descanso y de distensión es esperable que el entorno acústico sea más agradable que el que se encuentra en el ámbito laboral. En éste último, la propia naturaleza de la actividad en muchos casos es la generadora del ruido (industrias, comercio, etc.). Sin embargo, en el caso del ruido comunitario, éste es generado en su mayoría por terceros, o sea que difícilmente tenemos algún control sobre la fuente de ruido.

Debido a las diferencias en los campos acústicos que se encuentran en los distintos ámbitos, y a causa la variación en la predisposición de las personas en cada uno de ellos, los efectos producidos no son los mismos. A continuación se discutirá acerca de la eficiencia de la ponderación “A” en algunos de los ámbitos más comunes.

### 6.7.1. Viviendas

En las viviendas, la población por lo general posee mayor sensibilidad al ruido que en los ámbitos laborales. Entonces, se producen efectos adversos a considerar, incluso a bajos niveles sonoros. Los principales efectos del ruido que se producen en el ámbito residencial son: molestia, alteración del sueño, enmascaramiento e interferencia con la comunicación, estrés y en algunos casos la reducción del rendimiento y otros efectos psico-sociales que involucran cambios de humor y de comportamiento. En general, en las viviendas pueden presentarse los efectos incluidos en el Rango I de niveles (ver 6.3.1) y ocasionalmente algunos de los efectos del Rango II.

***El dB(A) presenta algunas dificultades al ser utilizado para medir el ruido que afecta a las personas al interior de sus viviendas.*** La razón principal de esto es que la aislación acústica de las paredes de las casas depende de la frecuencia. Las frecuencias bajas son las menos atenuadas por los tabiques y muros. Entonces, se puede decir que las paredes de una vivienda se comportan como filtros pasa-bajos respecto a las frecuencias de las ondas acústicas. Por lo tanto, al otro lado del tabique (interior de la vivienda) se obtendrá una ecualización de la señal original del ruido, conteniendo menos energía en frecuencias medias y altas que el espectro original.

***Si a la medición de ruido que se realiza al interior de la vivienda, se le aplica el filtro “A” (que considera con mucho mayor énfasis las frecuencias medias y altas que las bajas), el resultado será un nivel sonoro “A” muy inferior al nivel sonoro que se tendría sin correcciones espectrales. Esto se debe a que la energía acústica que atraviesa los muros está compuesta principalmente por frecuencias bajas, mientras que las frecuencias más consideradas por el dB(A) son las medias y las altas.***

La principal fuente de ruido en las ciudades es el tránsito automotor. Este tipo de fuente sonora posee gran contenido de frecuencias bajas. Si, a este espectro de emisión vehicular se le aplica la corrección espectral realizada por las fachadas de las viviendas, entonces la proporción de bajas frecuencias al interior de las casas será aún mayor. Cuando adicionalmente aplicamos la corrección espectral producida por el dB(A), el resultado puede ser un nivel sonoro “A” muy pequeño al interior de las casas. A pesar de ello, podría existir gran cantidad de energía en frecuencias bajas al interior del hogar.

***Este fenómeno descrito podría ser aún más acentuado cuando las viviendas se encuentran cerca de una avenida o vía de circulación de tránsito pesado, y la perdida por inserción que brindan sus paredes es escasa. En este caso los niveles sonoros al interior de los hogares será más elevado, por lo tanto la ruidosidad de las frecuencias bajas será mayor.***

Al interponer más tabiques entre la fuente y el receptor, se lograrán mayores atenuaciones y se mejorará el confort acústico. Sin embargo, si estos muros no brindan buena atenuación de las frecuencias bajas, la medición podría entregar una relación aún menor entre el nivel sonoro “A” y el nivel sonoro lineal, respecto al caso en que exista un sólo tabique.

Actualmente, existe mucha legislación vigente en la que se indica que el ruido generado al exterior de las viviendas y que se mide al interior, debe realizarse empleando la ponderación “A”. En Chile, el Decreto Supremo 146 indica que las mediciones de ruidos provenientes de fuentes fijas deben realizarse en dB(A), tanto al exterior de las casas como en sus interiores (D.S. 146, 1997). Por otra parte, la recientemente editada Norma Chilena NCh 2803-2002 “Verificación de la Calidad Acústica de las Construcciones”, en una de sus partes señala que la medición de la aislación frente a ruidos externos que se realizan al interior de los recintos, debe realizarse en dB(A) (NCh 2803, 2002).

### **6.7.2. Exposición Laboral**

En el ámbito laboral pueden producirse efectos más severos sobre la salud. Los criterios de exposición al ruido permitida que son adoptados por la legislación laboral suelen despreciar algunos efectos que sí son considerados en el ámbito comunitario, como la molestia. Estos criterios usualmente se basan en la pérdida auditiva exclusivamente. La cuantificación de la

exposición, por lo general se realiza mediante la *dosis* de ruido (para más detalles ver 2.3.3 y 3.2.1), según lo establecen las distintas reglamentaciones concernientes al ruido en los ambientes de trabajo.

Sin embargo, como ha sido estudiado, existen otros efectos del ruido distintos de la pérdida auditiva y que pueden producir un gran impacto negativo sobre la salud.

De acuerdo al análisis realizado en la Sección 6.3.3, *cuando en los ámbitos de trabajo existen inmisiones superiores a 90 dB, el uso de la ponderación “A” presenta serios inconvenientes*. Esto se debe a la importancia que tienen las frecuencias bajas en la generación de efectos adversos. Entre estos efectos, debe destacarse la enfermedad vibroacústica, que posee consecuencias muy severas para el organismo (ver Sección 3.5). *Este resultado es válido para todos los ámbitos donde se superen estos niveles, aún cuando la dosis de ruido de la jornada de trabajo sea inferior al 100 %.*

### 6.7.3. Uso de Protectores Auditivos

Se deben realizar algunas consideraciones respecto a los protectores auditivos. En primer término, los protectores auditivos en general son más efectivos en frecuencias medias y altas que en frecuencias bajas (existen algunas diferencias según cual sea el diseño de los protectores). Por esta razón, al igual que los muros (ver 6.7.1), ofician de filtro pasa-bajos respecto al sonido.

El correcto uso de protectores auditivos puede prevenir (o disminuir) los efectos del ruido que se producen por vía auditiva y que son causados por frecuencias medias y altas (la pérdida auditiva y la molestia por ejemplo). Pero, su uso no brinda protección significativa respecto a los efectos del ruido provocados por frecuencias bajas mediante la vía auditiva. Además, aunque parezca una obviedad, es necesario mencionar que los protectores auditivos no protegen en absoluto a las personas de los efectos extra-auditivos del ruido (como las resonancias del organismo y los efectos en la piel).

*La separación del espectro producida por los protectores auditivos (filtrando la zona media y superior del espectro y dejando pasar las frecuencias bajas) torna difícil el empleo de la curva “A”. Cuando se utilizan protectores auditivos, la energía acústica que alcanza el oído tendrá mayor proporción de frecuencias bajas. El nivel sonoro “A” es menos sensible a la variación de las frecuencias bajas que a la variación de las medias y altas. Entonces, la atenuación de éstas últimas (que producen los protectores auditivos) redundará en una caída drástica del nivel sonoro “A”.*

Esta disminución del nivel ponderado “A”, podría representar la diferencia entre la aceptación o rechazo de la exposición al ruido según la normativa o la legislación. Sin embargo, la energía acústica de frecuencias bajas que ingresa al oído continuará siendo elevada. *Por lo tanto, el empleo de la ponderación “A” en situaciones en que se utilizan protectores auditivos, virtualmente podría acentuar el déficit que la curva “A” tiene en frecuencias bajas.*

Para escoger adecuadamente protectores auditivos es necesario aplicar criterios de evaluación que consideren todo el espectro audible.

#### 6.7.4. Discotecas, Locales de Entretenimiento y Eventos

En la mayoría de las discotecas, los niveles sonoros alcanzan valores elevados (superiores a 90 dB e incluso en algunos casos sobrepasan los 100 dB). La legislación que regula el ruido generado en discotecas y locales de entretenimiento (pubs, casinos, conciertos, etc.), por lo general se ocupa más de la inmisión que se tiene en lugares externos al local (por ejemplo molestia de los vecinos) que de los niveles sonoros en su interior.

Aunque no es posible generalizar, las reglamentaciones de niveles máximos registrados al interior de los locales no están muy desarrolladas, o no son cumplidas. En algunos municipios de ciertos países se advierte al cliente antes de ingresar (generalmente mediante carteles), que los niveles sonoros al interior del recinto exceden los límites saludables y cada persona ingresa al recinto bajo su propia responsabilidad.

Con frecuencia, los clientes que asisten a un local bailable desean escuchar la música a los niveles sonoros elevados en que son presentados. En este caso no podemos referirnos a la sonidos “no deseados”. Sin embargo, debido a los efectos adversos inconscientes que este estímulo acústico causa, según se definió en 3.1 podemos clasificarlo como *ruido*. Algunos de los principales efectos sobre la salud que pueden producirse ante esta clase de exposición, son: desplazamientos de los umbrales auditivos (temporales o luego de muchas repeticiones, permanentes), dolores y molestias en los oídos, algunos cambios en el normal funcionamiento del sistema vegetativo, cambios endocrinos, respuestas sensoriales no auditivas (táctiles) y vibraciones en el organismo. Todos estos efectos, a excepción de la pérdida auditiva, pueden ser producidos por la exposición a frecuencias bajas. La mayoría de ellos también se produce frente al ruido de frecuencias medias y algunos también debido a frecuencias altas. Sin embargo, las vibraciones localizadas se producen exclusivamente debido a la exposición a frecuencias bajas. Esto puede constituir un riesgo, muchas veces imperceptible para la salud, debido a que en ocasiones los jóvenes sienten agrado por los sonidos de frecuencias bajas de altos niveles sonoros (ver Anexo).

No se debe olvidar que las curvas de igual sonoridad son más planas en los rangos de niveles sonoros que se encuentran al interior de los recintos bailables, que para niveles bajos (ver Fig. 2.18). *Como se vio en el Capítulo 4, el dB(A) representa sólo a las curvas de bajo nivel sonoro (donde el oído tiene menor sensibilidad para escuchar sonido graves) y esto podría ser una fuente de error en la medición de niveles elevados. Este hecho sumado a los efectos del ruido producidos en frecuencias bajas, podrían ser causal de algún grado de déficit en las mediciones de nivel de presión sonora con ponderación “A” al interior de las discotecas. Sin embargo, este tema debe ser profundizado.*

La exposición al ruido a la que están expuestos los empleados de los locales de entretenimiento, debería ser tratada desde el punto de vista del ruido laboral. Los niveles sonoros y la periodicidad de esta exposición, junto con los contratos de dependencia laboral de los cuales dependen estas personas, requieren un análisis cauteloso.

### 6.7.5. Vía Pública

En la vía pública estamos expuestos cotidianamente a muchas fuentes de ruido. Algunas de las zonas urbanas donde la exposición al ruido es mayor son: las avenidas, las áreas con gran actividad comercial, zonas industriales, calles de gran flujo vehicular, áreas colindantes con vías del tren, cercanías de los aeropuertos y áreas bajo las rutas aéreas de despegue y aterrizaje, las calles con locales de entretenimiento nocturno, las veredas cercanas a construcciones, las reparaciones en áreas públicas, etc.

En materia legislativa, la protección frente al ruido al que están expuestas las personas que transitan día a día por estas zonas, es escasa y nula. No se debe olvidar que hay muchas personas que trabajan en la calle y (aunque no estén al interior de una industria) recibirán una dosis de ruido en su jornada laboral.

Los principales efectos del ruido a los que son vulnerables los transeúntes, vendedores ambulantes y demás ocupantes de la vía pública son: molestia, interferencia con la comunicación, desplazamiento temporal de los umbrales auditivos (o en casos de gran exposición podrían también producirse desplazamientos permanentes), respuesta reflejo, estrés y alteraciones en el sistema nervioso autónomo, irritabilidad, agresividad, tensión y demás cambios de humor.

En esta materia, la prioridad es reglamentar el ruido ambiental permitido, considerando la exposición individual y colectiva aceptable desde el punto de vista de la salud. Una adecuada reglamentación en este sentido, sin duda deberá involucrar cierto grado de redistribución de las actividades urbanas generadoras de ruido (como por ejemplo el tránsito vehicular); y posiblemente deba considerar un reordenamiento territorial.

*No se cuenta con argumentos sólidos, distintos a los generales expuestos anteriormente, que indiquen que la ponderación “A” no sería adecuada en particular para medir el ruido que afecta a las personas en la vía pública.*

### 6.7.6. Transporte Público de Pasajeros

El transporte público es un gran emisor de frecuencias bajas y vibraciones. A menudo, estas emisiones son recibidas por los pasajeros que se encuentran al interior de microbuses urbanos e interurbanos, colectivos, trenes en superficie y subterráneos, etc. No es común que la legislación ambiental en materia de ruido considere estos ámbitos de exposición. A nivel internacional, es un más abundante la legislación que protege a los ciudadanos del ruido al interior de sus casas y en sus lugares de trabajo, que dentro de los medios de transporte y en la vía pública.

El dB(A) no es aplicable a la evaluación de vibraciones, para ello se deben aplicar criterios de exposición a vibraciones (de cuerpo entero, manos, sentado o parado según corresponda) (Griffin, 1990). Algunas vibraciones pueden ser provocadas indirectamente debido al ruido de frecuencias bajas que se transmite en forma aérea. En ciertos casos, esta vibración puede re-radiar ruido de mayor frecuencia (esto es común en dispositivos antiguos o desajustados).

En algunos medios de transporte se puede producir un fenómeno similar al descrito para el aislamiento y los protectores auditivos. ***La propia estructura del vehículo puede atenuar las***

*frecuencias más altas, dejando pasar a la cabina de los pasajeros un ruido con gran dosis de frecuencias bajas. En tal caso, el empleo de la ponderación “A” podría arrojar niveles relativamente bajos y aún así el contenido energético en la zona inferior del espectroaría ser excesivamente alto.* Los conductores y otros trabajadores que desarrollan su jornada diaria al interior de estos medios de transportes, podrían estar expuestos a dosis peligrosamente grandes de frecuencias bajas (ver 3.5).

#### 6.7.7. Hospitales, Escuelas y Otros Ámbitos Vulnerables

Cada uno de éstos ámbitos debe ser estudiado cuidadosamente y en forma independiente. Varios de éstos ámbitos cobijan a subgrupos especialmente vulnerables al ruido (ver Sección 3.6). En la bibliografía acústica existen curvas tabuladas que indican los niveles sonoros sugeridos al interior de cada tipo de recinto (curvas NC, NCB, RC, etc.), de acuerdo a su función (Harris, 1995).

Los hospitales son espacios donde deben existir niveles sonoros tan bajos que no afecten a la delicada salud de los enfermos. **Si el hospital está ubicado en una zona ruidosa, el empleo del dB(A) para medir el ruido de fondo en las habitaciones linderas con la vía pública, podría ser deficiente.** Esto se debe a la corrección espectral que realizan las estructuras edilicias (ver Sección 6.7.1). Los mismo puede decirse si las habitaciones de los enfermos se ven afectadas por ruidos externos a éstas, generados en otras áreas del mismo hospital (en especial ruido de equipos y máquinas).

Además, existen zonas de los hospitales donde se concentran grupos de pacientes con características similares, como bebés en incubadora, madres en proceso de parto, pacientes con trastornos psiquiátricos, etc. Estas zonas podrían requerir de niveles y espectros sonoros distintos de los que pueden recibir el resto de los enfermos. *Antes de juzgar si el dB(A) es apropiado para evaluar el ruido en estas áreas, es necesario estudiar la tolerancia que cada uno de estos grupos vulnerables tiene frente a los distintos tipos de ruidos.*

Tanto los hospitales como las escuelas, deben estudiarse con especial precaución, ya que los dos ámbitos son potenciales generadores de ruido pero al mismo tiempo ambos requieren de bastante silencio en su interior.

Para evaluar el ruido de la mejor manera en cada uno de los ámbitos donde existen grupos vulnerables (hospitales, escuelas, asilos de ancianos, etc.), es necesario estudiar las reacciones de cada uno de ellos ante las distintas clases y niveles de estímulos sonoros.

## 6.8. INVESTIGACIÓN FUTURA

*Es necesario intensificar la investigación respecto a los efectos del ruido en el ser humano. Esta clase de estudios deberían constituir el principal fundamento para el análisis de los indicadores de ruido existentes y para la creación futuros descriptores, ya que la salud de la población debe constituir el fin perseguido en la reglamentación sobre ruido.*

### 6.8.1. Necesidad de Complementar el Número Único

En el futuro, los estudios que involucran reacciones fisiológicas y psicológicas frente al ruido deberían considerar una plena caracterización del estímulo acústico utilizado. Hasta el momento, dicha caracterización ha sido realizada sólo en algunos trabajos. *La mayoría de la investigación realizada en esta materia considera exclusivamente el nivel sonoro global (en decibeles lineales o en decibeles “A”) que se ha utilizado como estímulo, pero no brinda información sobre el contenido espectral. Esto impide analizar la eficiencia de las ponderaciones. Pero, lo que es más grave, es que puede conducir a que el trazado de límites permisibles de ruido sea realizado en forma errónea.* La causa es que los niveles sonoros globales indicados en los estudios pueden ser hallados mediante un gran número de espectros distintos. Solamente en base al nivel global no existe manera de reconstruir la información espectral. Por otra parte, de acuerdo a lo estudiado en el Capítulo 5, cada efecto del ruido posee distintas frecuencias que lo originan. Esto podría provocar que algún efecto del ruido que la literatura señala que se produce a un determinado nivel global (ya sea en dB o dB(A)), no sea reproducible en otra experiencia.

O sea, *el empleo del nivel sonoro global en estudios de dosis-respuesta, sin el correspondiente registro del espectro, puede afectar la validez de la reproducibilidad del trabajo.* Este concepto queda plasmado en la reciente publicación sobre la enfermedad vibroacústica (ver 3.5):

*“Los sistemas de tejidos y órganos poseen distintas propiedades acústicas. La impedancia acústica del hígado es distinta a la de los pulmones. Paralelamente, la frecuencia de resonancia del cráneo es distinta a la de la cavidad abdominal. Esto significa que las distintas frecuencias acústicas conducirán a distintas respuestas de los tipos de sistemas de tejidos y órganos.*

*Asumiendo que los ambientes acústicos son comparables sólo porque su nivel sonoro es comparable, un error es introducido en los estudios. Como se ha visto, ambientes con similares niveles sonoros pueden tener distribuciones en frecuencia totalmente distintas. Por lo tanto, puede esperarse que los ambientes acústicos con distintas distribuciones de las bandas de frecuencia induzcan los mismos efectos. Sin embargo, debido a que la distribución en frecuencia generalmente es desconocida (porque no es requerida por la legislación), estudios biomédicos “iguales” que utilizan ambientes acústicos con niveles globales similares inesperadamente pueden arrojar resultados distintos (debido a las diferencias en la distribución en frecuencia). Consecuentemente, el tema de la contaminación por ruido de frecuencia baja no es trivial debido a que no está siendo valorada (particularmente el rango no audible, bajo 20 Hz). Entonces los estudios biomédicos que atribuyen algún resultado a una causa concreta, pueden ser erróneos.*

*Como consecuencia del descuido de proveer información respecto del contenido en frecuencia, en la literatura científica emergen estudios paralelos pero no comparables.” (Alves-Pereira et al., 2004).*

La falta de coherencia entre muchos estudios científicos sobre el mismo tema, es una de las principales causas por las cuales la investigación de los efectos extra-auditivos difícilmente entrega resultados concluyentes. Sin duda, esto debe ser revertido en el futuro.

Resumiendo, se puede decir que el número único simplifica los cálculos y reduce los tiempos de medición en algunas aplicaciones de la acústica. Pero no es recomendable que sea utilizado (al menos en forma exclusiva) en los estudios que analizan las alteraciones en la salud provocadas por el ruido. En dicho caso, estos estudios sólo darán información válida en cuanto a la reacción humana, pero no entregarán valores fiables respecto a la relación dosis-respuesta. Para ajustar mejor esta relación, se deben registrar los niveles sonoros correspondientes a cada frecuencia (o banda) de los ruidos empleados.

A fines de poder diseñar y emplear indicadores de ruido más eficientes desde el punto de vista de la salud, es necesario conocer más acabadamente las frecuencias del ruido que causan cada una de las respuestas del ser humano ante el ruido. Para lo cual, se requiere estudiar las relaciones dosis-respuesta en función de la frecuencia para distintos rangos de niveles sonoros.

### **6.8.2. Prácticas Sugeridas en las Mediciones de Ruido**

Debido a que el número único no es fiable en muchos casos, ***una práctica recomendable en las mediciones es el registro del espectro del ruido.*** Contando con el nivel de cada banda de frecuencia, en el futuro es posible realizar cualquier tipo de ponderación espectral sobre los datos guardados sin necesidad de volver a medir. En cambio, si sólo contamos con el nivel total en decibeles “A” de un evento de ruido, será inevitable tener que medirlo nuevamente si queremos ponderar de otra manera el espectro. En los eventos de ruido únicos, esto constituye una pérdida definitiva de la información medida.

Otra práctica recomendable que con el progreso de la tecnología puede ser cada vez más viable, es la grabación del ruido. La reducción de los costos de los instrumentos y medios de grabación, como el DAT, el compact disc y los discos duros portátiles, hacen cada vez más posible grabar el ruido. La grabación ofrece la gran ventaja que luego el ruido puede ser analizado espectralmente y además escuchado. Esta posibilidad de oírlo puede minimizar errores debido a la presencia de ruidos indeseados, que habitualmente existen durante una medición.

La grabación del ruido plantea la dificultad de la cuantificación de los niveles de presión sonora globales, los que una medición entrega sin mayores dificultades. Para solucionar este problema, es necesario conocer en detalle las respuestas y sensibilidades de todos los elementos incluidos en la cadena electroacústica y aplicar un procedimiento de calibración acústico y eléctrico de mucha precisión. Debe ponerse cuidado en la elección del formato de registro, debido a que algunos de ellos realizan ciertos procesos en la dinámica de la señal (como es el caso del *minidisc*).

Otra posibilidad consiste en la utilización de un instrumento de medición y uno de grabación en forma simultánea. De esta forma, para contar con toda la información útil bastaría

con grabar el ruido (con micrófonos y equipos adecuados) y registrar el nivel sonoro global. Este último procedimiento es el más recomendable para el correcto almacenamiento y análisis del ruido, en su carácter espectral, en su nivel sonoro global y en sus características cualitativas.

### 6.8.3. ¿Puede el Ruido Evaluarse Solamente en Términos Físicos?

Muchas críticas y ajustes se pueden realizar sobre la ponderación “A”. Esta curva de corrección espectral, como tal, debe otorgar mayor peso a algunas bandas de frecuencia y restarle a otras. Este proceso podría ser adecuado o inadecuado desde el punto de vista del espectro auditivo y de los espectros que causan los demás efectos del ruido en el ser humano. Este trabajo estuvo abocado esencialmente a intentar responder la pregunta *¿Estamos ponderando el espectro del ruido de la manera más adecuada desde el punto de vista de la salud?* Esta pregunta es válida y se ha respondido parcialmente mediante el análisis realizado.

Sin embargo, existe un interrogante fundamental que no suele ser atendido lo suficiente: *¿Basta con caracterizar el nivel, espectro y dinámica temporal del ruido para evaluar su posible efecto sobre la salud?* La respuesta es NO. Los seres humanos somos bastante más que un instrumental con un micrófono. Nuestro sistema auditivo es solamente un medio para la comunicación, la relajación, el placer, los recuerdos y los sentimientos.

En este texto hemos estudiado los efectos adversos del ruido, el que se definió como un sonido no deseado. Esto acota la amplitud del tema, dejando parcialmente de lado las demás funciones de los sonidos. Sin embargo, el ruido proviene de una fuente. Esta fuente puede tener una razón de ser, un significado, una importancia. ¿Nos afecta igual una fuente de ruido cuyo propósito consideramos necesaria que una que no lo es? Ciertamente no. Aunque ambas posean similares características físicas, el significado de la fuente será crítico en el efecto que ésta nos provoque.

Otros factores de importancia en cómo nos afecta un ruido, es la posibilidad de control sobre la fuente, y su predecibilidad. Si aspiramos nuestra alfombra generaremos un campo sonoro de altos niveles. Sin embargo, el ruido tiene un fin (limpieza), es predecible (nosotros sabemos cuando se escuchará) y tenemos el control sobre la fuente (podemos silenciarla cuando lo deseemos). Estos factores reducen significativamente el conjunto de efectos adversos sobre la salud. Un ejemplo opuesto sería que nuestro vecino, con el cual no mantenemos buenas relaciones, repentinamente empieza a taladrar nuestra pared lindera. Los niveles percibidos podrían ser similares que en el caso de la aspiradora (e incluso menores). Sin embargo, este ruido nos afectará mucho más. Esto se debe a que: a) la fuente de ruido no responde a un fin nos beneficie directa o indirectamente, b) no es predecible (el vecino no taladra periódicamente), y c) no tenemos control sobre la fuente sonora.

Estos factores son claves en las respuestas psicológicas y fisiológicas que se manifiestan ante una situación de ruido (se verifica que si el ruido posee gran importancia para una persona, se producen mayores quejas, cansancio e irritabilidad, aumenta la respuesta galvánica del piel, la circulación de linfocitos y neutrófilos y disminuye la reacción adrenocortical (Berglund – Lindvall, 1995)).

Ninguna curva de ponderación espectral basta para considerar estas variables subjetivas. Ponderar mejor el espectro del ruido en las distintas situaciones puede entregar un mejor ajuste

respecto a las reacciones humanas, pero esto es válido sólo para situaciones en que los factores subjetivos mencionados son comparables. Por este motivo, *para comprender y poder evaluar en forma más completa el efecto global que el ruido causa en las personas, además de ponderar adecuadamente las frecuencias del ruido, debemos considerar el significado del ruido, su predecibilidad y el control que se tiene sobre la fuente.*

#### 6.8.4. Otros Aspectos a Considerar

- Además de la respuesta en frecuencia de cada efecto del ruido, es necesario investigar de qué manera influye el ancho de banda en las reacciones que se producen. Un mayor ancho de banda implica un incremento en la cantidad de vías nerviosas que se excitan. Esto podría constituir un factor fundamental en la magnitud de las respuestas vegetativas del cuerpo (ver 3.3.2.1).
- Se han realizado muchos estudios acerca de la reacción humana ante el ruido de tránsito (especialmente la molestia). Sin embargo, los resultados hallados son válidos sólo para la clase de ruido utilizado y en las condiciones en que se han obtenido. Para poder extrapolar resultados acerca de las relaciones dosis-respuesta halladas en los estudios, es preciso realizar una caracterización social de las poblaciones estudiadas. Como se discutió, los hábitos, historia e idiosincrasia de los individuos juegan un papel de importancia en el tipo y magnitud de las reacciones. Por ejemplo, no es de esperar que el ruido de tránsito afecte de la misma manera a un campesino que a un ejecutivo que trabaja en el centro de una ciudad. Para lograr generalizar resultados en esta materia, se debe poner especial atención en las técnicas de muestreo empleadas.
- Se requiere investigar la interrelación que se produce entre los distintos efectos del ruido. En especial, comprender los reflejos fisiológicos que tienen los efectos psicológicos, y viceversa. Aunque muchas veces, para estudiar una reacción específica deben aislarse las demás variables que intervienen, no debe perderse la visión global. El ser humano es “un todo”, por lo tanto toda respuesta específica tendrá cierta influencia en el resto del cuerpo, mente y emociones.
- Como se ha revisado anteriormente, tanto para el caso de la inmisión de ruido en locales debido a fuentes externas al mismo, como en el caso de protectores auditivos, se produce una corrección espectral entre la fuente y el oído humano. Esta corrección provoca que el ruido que llega al oído tenga mayor proporción de frecuencias bajas. Este hecho conduce al interrogante respecto a la necesidad o no de considerar con mayor énfasis la zona baja del espectro en las mediciones correspondientes a estos dos casos. ¿Es válida la misma curva de ponderación cuando se mide antes y después de un filtro espectral acústico, como lo son las paredes y los protectores auditivos?

### 6.8.5. Estudios Futuros

Algunos de los caminos específicos que se requiere investigar para poder lograr una base técnica más completa, que vele por la protección de la salud respecto a la contaminación acústica, son los siguientes:

- Estudiar la relación dosis-respuesta de los efectos vegetativos en función de la frecuencia, ancho de banda y nivel sonoro.
- Caracterizar íntegramente los ambientes acústicos causantes de la enfermedad vibroacústica.
- Cuantificar la influencia de las frecuencias bajas e infrasónicas en las deficiencias motrices, náuseas y fatiga corporal. Determinar las frecuencias sonoras, los niveles y los períodos de exposición.
- Estudiar la influencia del infrasonido en las respuestas humanas, en especial la enfermedad vibroacústica, los efectos vegetativos, la vista, las resonancias del organismo y el estrés.
- Estudiar las dosis de ultrasonido aéreo causante de fisuras en la piel, cambios moleculares en los tejidos, estrés y cambios psíquicos.
- Profundizar en la comprensión de las causas fisiológicas de las alteraciones sistemáticas del ruido, en especial en lo que respecta a los procesos moleculares y neuronales involucrados.
- Estudiar la influencia de la frecuencia sonora del ruido constante en la alteración de las etapas y la pérdida de la calidad del sueño.
- Investigar los efectos cardiovasculares del ruido en pro del trazado de relaciones dosis – respuesta en función de la frecuencia.
- Estudiar los efectos del ruido sobre el sistema nervioso central.
- Caracterizar los cambios producidos en el ojo y la visión en función de la frecuencia, para ruidos de niveles altos.
- Profundizar en la comprensión del contenido semántico de distintos tipos de ruidos y su influencia sobre la molestia y sobre el rendimiento, para distintos estratos y características de grupos humanos.
- Investigar los espectros y niveles límites de exposición tolerables para los distintos grupos vulnerables al ruido (ver Secciones 3.6 y 6.7.7).

- Estudiar las variables involucradas en la generación de efectos adversos y efectos positivos sobre la salud, cuando éstos son ocasionados por las mismas frecuencias sonoras. (ver Secciones 3.3.1.4 y 5.19).
- Estudiar los límites del espectro (infrasónico y ultrasónico) hasta donde debería ser ponderado el ruido que afecta al hombre.
- Ajustar los modelos teóricos mecánicos del cuerpo humano, mediante trabajos empíricos que generen resonancias en diferentes partes del organismo por medio de distintas frecuencias sonoras.

#### 6.8.6. Palabras Finales

Mucho se ha publicado sobre los indicadores de ruido y su eficiencia. Se han realizado numerosos trabajos que buscan correlaciones entre los niveles sonoros y distintos tipos de reacción de las personas, en especial la molestia por ruido. Estos estudios son relevantes y útiles. Sin embargo, la presente investigación va un paso más atrás respecto a discusión sobre el mejor ajuste de los indicadores. Este trabajo pone en tela de juicio la propia “materia prima” de la que se componen la mayoría de los indicadores de ruido: el dB(A).

A pesar que en la bibliografía acústica pueden hallarse algunos estudios que hacen explícitos ciertos problemas que ocasiona medir en dB(A), estos trabajos por lo general abordan en tema desde una aplicación en particular y no indagan mucho acerca de la naturaleza intrínseca de los indicadores. Para ser más gráficos en este sentido, veamos una analogía con la construcción de casas. Pueden discutirse muchas configuraciones de viviendas, pero seguramente son muy pocos son los constructores que se dedican a averiguar si los ladrillos que se consiguen el mercado son los más adecuados, o podrían fabricarse mejores. Por supuesto, sería impráctico que cada constructor se de el trabajo de realizar este análisis. Sin embargo, el hecho de que se hayan construido innumerables casas con el ladrillo que no es el más adecuado, no es suficiente argumento para seguir construyéndolas de esta manera una vez que somos conscientes de ello.

Son muchísimas las normas, los procedimientos legales, los trabajos realizados y los instrumentos construidos que se basan en la ponderación “A” para la medición y evaluación del ruido. Sin duda, el dB(A) ofrece ventajas y comodidades. Esto se debe en parte a su carácter de número único (ver 4.2) y en parte a su “aceptable” ajuste frente a algunas situaciones de ruido comunitario de bajo nivel sonoro. Pero, la mayor comodidad del empleo de la ponderación “A” se debe a su propia “inercia”. Muchas décadas de aplicación de metodologías acústicas, fabricación innumerables equipos y cientos de miles de mediciones realizadas aplicando el filtro “A” no son en vano y dejan secuelas: costumbre y comodidad.

En este trabajo se demostró que el dB(A) no es adecuado para utilizarse en todas las situaciones en que el ruido nos afecta. El amplio estudio sobre la problemática asociada a la ponderación “A” que ha sido realizado, podría constituir una base para la búsqueda de una solución. A pesar de la inercia mencionada de todos los sistemas profesionales, tecnológicos, institucionales y económicos en torno al uso del dB(A), es necesario que la ciencia siga buscando

mejores maneras de medir el ruido y de evaluar su efecto integral sobre el ser humano. Este esfuerzo científico debe realizarse, a pesar de la inercia, la comodidad y los intereses económicos. ¿El por qué? Nuestra Salud.

# CONCLUSIONES

1. Se ha realizado un estado del arte en materia de efectos adversos del ruido en el ser humano. Esta recopilación mostró que los efectos no-auditivos del ruido se presentaron en mayor cantidad y mayor gravedad de lo que habitualmente se considera.
2. Para varios de los efectos del ruido en las personas, ha sido hallada información espectral relacionada. Sin embargo, en el caso de la alteración del sueño y de otros efectos psicosociales, esta información es escasa o nula.
3. Se verificó que las frecuencias sonoras que causan algunos de los efectos no-auditivos del ruido no coinciden con las frecuencias de mayor sensibilidad del oído, por lo tanto tampoco con la curva “A”.
4. La ponderación “A” no brinda un buen ajuste para evaluar los siguientes efectos del ruido en el ser humano que tienen lugar debido a frecuencias bajas: enfermedad vibroacústica, vibraciones en el organismo, fatiga corporal, nauseas, mareos, pérdida del equilibrio, enmascaramiento, tos y ahogamiento, variaciones sobre el habla, efectos sobre la vista, desgarros alveolares y respiración artificial inducida.
5. La ponderación “A” no es adecuada para evaluar los efectos nocivos del ruido en el ser humano cuando los niveles sonoros superan los 90 dB, debido a la cantidad y gravedad de los efectos del ruido que se producen a causa de frecuencias bajas por sobre este nivel.
6. En industrias y otros ámbitos laborales en los que se emiten ruidos con contenido de frecuencias inferiores a 500 Hz y de niveles sonoros superiores a 90 dB, en los trabajadores puede manifestarse la enfermedad vibroacústica. A causa de esto, las mediciones con ponderación “A” de los niveles sonoros y dosis de ruido resultan inadecuadas, ya que podrían arrojar valores permisibles aún cuando se manifiesten patologías severas (ver Sección 3.5).
7. No se ha hallado alguna relación entre el tiempo de exposición necesario para producir cada efecto del ruido y la eficiencia del dB(A).
8. Las mediciones de niveles sonoros “A” realizadas al interior de las viviendas, debido a ruidos provenientes del exterior que poseen contenido de frecuencias bajas, podrían subestimar la energía acústica de inmisión. Esta situación debe considerarse primordialmente en los ambientes que poseen escasa aislación acústica y que son linderos con vías por las que circula tránsito pesado.

9. Diversos autores señalan algunos inconvenientes encontrados en la aplicación del dB(A) para evaluar: sonoridad, ruidosidad, molestia, enmascaramiento, ruidos complejos, ruidos de bandas estrechas, ruidos con componentes de frecuencias bajas, ruidos de muy alta frecuencia, ruidos de niveles elevados, ruido comunitario, ruidos impulsivos, y para comparar ruidos de formas espectrales distintas.
10. El análisis de los espectros causantes de cada efecto del ruido que fue realizado en este trabajo, es lo que condujo a la Conclusión 5. Sin embargo, bajo los 90 dB, este análisis no entregó resultados concluyentes respecto a la eficiencia global de la ponderación “A”, la que está determinada principalmente por los antecedentes negativos recopilados de la bibliografía.
11. Es necesario incrementar los estudios científicos sobre los efectos adversos que el ruido provoca en el ser humano. En ellos se debe describir objetiva y subjetivamente el ruido empleado, de manera que este proceso pueda representar la base para el trazado de límites saludables de exposición sonora.
12. Se sugiere que en las mediciones de ruido se registre y almacene la información espectral. Esto permitirá aplicar posibles futuras ponderaciones, que tengan mejor ajuste que el dB(A).
13. El decibel “A” no puede ser utilizado como única caracterización del estímulo acústico en los estudios biomédicos de dosis-respuesta, debido a que no permite conocer el espectro del ruido. Esto puede afectar la validez de la reproducibilidad de las experiencias.

## AGRADECIMIENTOS

Cerrar esta etapa no es sencillo. El camino universitario es extenso y contiene sabores dulces y también terrenos áridos. Difícil es llegar al final íntegro y erguido, luego de tantos años sentado... Pero, con voluntad y fe, se puede.

En esta aventura torrencial que tuvo lugar en la ciudad del agua, muchos son los que me han acompañado.

Los que siempre están y estarán: mi madre, primero que todo, mi apoyo incondicional, mi “plataforma de lanzamiento”. Mi familia, mi hermana tan querida. Mi hermanita, que se hizo mujer lejos de mí... Mi padre, aunque no veo tras tus ramas, siento tu afecto papá. Toda mi familia ha sido un apoyo vital. Mis primas queridas, Vale, Juli, Gaby, Fer y Mer. Mis tíos y mis flamantes sobrinitas, con las cuales deseo compartir hermosos momentos. Le deseo a toda la nueva generación de la familia tanto amor y unidad como nosotros tuvimos, aunque vivamos en lugares distantes. Quiero dedicar especialmente mi titulación a mi nono, que me ayudó a concretar este sueño. A él le hubiese encantado vivir el día en que me hago Ingeniero, me esfuerzo por transmitírselo.... Donde quiera que esté (con su amada la nona seguramente...).

A ustedes, mis amigos, mis mayores tesoros hallados y espero cuidados, durante esta vida. Mis amigos verdaderos están presentes en cada acto mío, simplemente porque son parte de lo que soy. La distancia con muchos de ellos sólo me da más ganas de abrazarlos y decirles cuánto los extraño, pero también cuánto me gusta extrañarlos! Ari, Ari, Juanqui, Christine, Chunz, Juampi, Lau, Mire, Sandra, Jessica, Lucho, Jeanneth, Karla, Julissa, Wini. También debo agradecer a aquella persona que me condujo al Todo.

Mis nuevos amigos del sitio donde las chimeneas ya comienzan a hablar el lenguaje de la nostalgia... Imprescindibles. Sin ellos simplemente no hubiera llegado hasta el final, o hubiera llegado alguien que no soy yo... Dejo con ustedes una semilla mágica que tenía guardada. Vuestra es el agua. Gracias Lisette, Anita, Mario, Caro y Mauro, Yyyirleska, Claudio, Amanda, Richi, Dani, Ingrid; y todas aquellas almas danzantes que me regalaron un abrazo, una mano o una leal mirada. Gracias Vivi. Tu inquieta compañía condimentó (y coloreó) este final, me llevo estos colores tuyos entre mis manos. Te deseo paz y certeza. Desde donde esté voy a cuidar de ti.

Mis amigos que hallé en el transcurso de estos años y que aún me siguen acompañando bajo la justa venganza del profanado viento: la incondicional y eterna Cinthia, Mario galletero, gracias por acompañarme con tu amistad y aguantar mis manías, Chavy, Lilo, Benja, Betty, Ximena.

Es hora de pensar en los que formaron parte de esta tesis y de mi vida académica en este final de carrera... Los agradecimientos son para todos los que creyeron en mí y me apoyaron, permitiendo dar vida a mis ideas.

En primer término mi profesor patrocinante, Jorge Arenas, que me ha dado luz verde y me ha despejado la pista para un despegue exitoso. Gracias Jorge por confiar en mí y sin titubeos apoyarme, gracias por tu instrucción y tu eficiencia.

George, tu confianza ha sido fundamental en mi tesis. Gracias por abrir las puertas que toqué. Hay mucho por hacer, afuera y también adentro. La vida te ha golpeado mucho, pero sé que tienes lo que se necesita para construir una fantástica sinfonía. Me hubiese encantado compartir más contigo, sin notas ni cálculos de por medio. Creo en ti George.

José Luis, tus charlas fueron música en el Instituto. Sigue creyendo en los estudiantes, te mantendrán vivo, como tu bella familia. Gracias por tu buena onda y predisposición.

Gracias a todos los profesores del Instituto de Acústica. Enrique, valoro tus consejos y estoy muy agradecido porque hayas compartido tu pequeño espacio conmigo. Sigue luchando por devolver a nuestros hijos lo que nos prestaron... Yo estaré ahí. Gracias Víctor Poblete, Alfio y Jorge Cárdenas.

Gracias Victor Cumián por tus bromas, tu buena onda y tu disposición. Gracias Hilda, María y Sara. Gracias a todos los que me apoyaron y gracias también a los que no lo hicieron, ambos me hicieron crecer.

Gracias a todos las personas que colaboraron con mi tesis, en especial a mi amiga, la Dra. Karla Caspers, su ayuda fue esencial para el trabajo. Gracias a su apoyo profesional me animó a incursionar en terrenos del conocimiento desconocidos para mí. Gracias a Federico Miyara por revisarme la tesis y por siempre estar generando acústica y abriendo caminos. Tu opinión trasciende Federico. Gracias a la gente de decibel por abrirme las puertas, en especial a Juan Cruz, quién me dio el primer libro para la tesis. Gracias a los amigos y amiga de la acústica de Gonnet y La Plata. A Mariana Alves-Pereira, por sus siempre esperados mails y por su investigación, que resultó de mucha importancia para mi tesis. Al Prof. Manuel Recuero, por su gentileza y buena disposición. A Susana Somer, al Prof. Luis Vidal.

Gracias a los profesores que formaron parte de la primer parte de mi carrera, en especial a aquellos que dieron vida a los números con su humanidad: la Prof. San Martín, la Prof. Paulina Schuller, la Prof. Charlotte, el Prof. Videla, el Prof. Conrado Bustos, el Prof. Ignacio Moreno, la Prof. María Eugenia Darwich, la Prof. Isabel del Río, el Prof. Santamarina. Gracias también al Instituto de Física y su secretaria.

A mis compañeros y todas aquellas personas que me acompañaron durante mi estadía en Valdivia y en esta Universidad. A las familias que me abrieron las puertas lejos de casa. La familia Sánchez: Mónica, Lalo, Sergio y Loreto. La familia Zenteno, incluidos la preciosa Amancay y mi compañero de aventuras “el Bob”. La familia de Lau, la familia de Mario, la calidez maternal de Ana Hodges y la Sra. Magali. La flia. Norambuena. A Amapola, Alexandra, Graciela Carrizo, Benja, Longa, Leandro, Esteban, Daniel, Ivan Osorio, Coto, Harold, Javier, el amigo gato y todos aquellos personajes que formaron parte de esta etapa.

Por último, agradezco a este país y en especial a la ciudad de Valdivia, que me ha brindado grandes oportunidades y fuertes desafíos.

## REFERENCIAS

1. ALVES-PEREIRA M., CASTELO BRANCO M., MOTYLEWSKI J., PEDROSA A., CASTELO BRANCO N., "Airflow-Induced Infrasound in Commercial Aircraft", Proceedings Internoise 2001, The Hague, 2001.
2. ALVES-PEREIRA M., CASTELO BRANCO N., "Vibroacoustic Disease: The Need for a New Attitude Towards Noise", CITIDEP & DCEA-FCT-UNL, Lisboa, 2000.
3. ALVES-PEREIRA M, REIS FERREIRA J, JOANAZ DE MELO J, MOTYLEWSKI J, KOTLICKA E, CASTELO BRANCO N, "Noise and the Respiratory System", Revista Portuguesa Pneumologia, 2004 (In press).
4. ARAUJO A., PAIS F., LOPO TUNA J.M.C., ALVES-PEREIRA M., CASTELO BRANCO N., "Echocardiography in noise-exposed flight crew", Proc. Internoise 2001, The Hague, 2001.
5. ARENAS J., "Métodos Acústicos para el Análisis de Hipofuncionalidad de la Trompa de Eustaquio", Tesis de Ingeniería Acústica, Escuela de Acústica, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 1988.
6. AVAN P., LOTCH D., BISARO F., MENGUY C., TEYSSOU M., "Acoustic Reflex and Protection Against Intense Sounds: Quantitative Analysis" ", Internoise 87, Pekin, 1987.
7. BENTO COELHO J., FERREIRA A., SERRANO J., CASTELO BRANCO N., "Noise Assessment during Aircraft Run-Up Procedures.", Aviation Space & Environmental Medicine, Vol. 70, N° 3 (supplement), 1999.
8. BERANEK, "Acoustics", 5<sup>th</sup> Edition, Acoustical Society of America, New York, 1996.
9. BERGLUND B., LINDVALL T., "Community Noise", document prepared for the World Health Organization (WHO), Center for Sensory Research, Stockholm, 1995.
10. BERGLUND B., LINDVALL T., SCHWELA D., "Guidelines for Community Noise", World Health Organization, Cluster of Sustainable Development and Healthy Environment, Department of the Protection of the Human Environment, Occupational and Environmental Health, Geneva, 1999.
11. BLAUERT J., "Spatial Hearing, The Psychophysics of Human Sound Localization", third printing, The MIT Press, Cambridge, 2001.
12. CALLEGARI A., FRANCHINI A., "Resegna degli effetti derivanti dall' esposizione al rumore", Agenzia Nazionale per la Protezione dell' Ambiente, Roma, 2000.
13. CAMPBELL D., "El Efecto Mozart", Ediciones Urano, Miami, 1998.
14. CASPERS K., Médico, Universidad Witten/Herdecke, comunicación privada, 2004.

15. CASTELO BRANCO N.A.A., "The Clinical Stages of Vibroacoustic Disease", Aviation Space & Environmental Medicine, Vol. 70, Nº 3 (supplement), pp. A32-9, 1999.
16. CASTELO BRANCO N.A.A., ÁGUAS A.P., SOUSA PEREIRA A., GRANDE N.R., MONTEIRO E., FRAGATA J.I.G., "The Pericardium in Vibroacoustic Disease", Aviation Space & Environmental Medicine, Vol. 70 , Nº3 (supplement), pp. A54-A62, 1999.
17. CROCKER M., "Encyclopedia of Acoustics", Wiley and Sons, New York, 1997.
18. DANCER A., HENDERSON, D., SALVI, R., HAMERNIK, R., "Noise- Induced Hearing Loss", Mosby Year Book, St. Louis, 1992.
19. Decreto Supremo Nº 594 (*D.S. 594*), "Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo", Ministerio de Salud, Santiago, 1999.
20. Decreto Supremo Nº 146 (*D.S. 146* ), "Norma de Emisión de Ruidos Molestos por Fuentes Fijas", MINSEGPRES, Santiago, 1997.
21. DIAN-HUA S., HUA-YING L., ZHI-AN L., "Facilitation of the Brain Cortex Activities after Exposure to an Intense Noise", Internoise 87, Pekin, 1987.
22. DIAZ R., "Técnicas Audiometrías en la Infancia", Tesis de Ingeniería Acústica, Escuela de Ingeniería Acústica, UACh, Valdivia, 2003.
23. DIXON WARD, "Effects of High Intensity Sound", Encyclopedia of Acoustics, Chapter 119, Malcolm Cocker, Wiley and Sons, New York, 1997.
24. EUROPEAN COMMISSION, "The Noise Policy of the European Union, Year 2", Office of Official Publications of the European Communities", Luxemburg, 2000.
25. FLETCHER H., MUNSON W., "Loudness, It's Definition, Measurement and Calculation", JASA, Vol. 5 Nº 2, pp. 82-108, 1933.
26. GELFAND S., "Hearing", third edition, Marcel Dekker, New York, 1998.
27. GERGES S., "Ruido, Fundamentos y Control", Edición en Español, NR Editora, Florianópolis, 1998.
28. GIL-CARCEDO L., GIL-CARCEDO E., "Enfermedades Producidas por el Ruido", Tecniacústica, Valladolid, 1993.
29. GRIEFAHN B, "Psycho-Physiological Effects of Noise", Seminario Latinoamericano de Acústica, Volumen II, Córdoba, 1982.
30. GRIFFIN M., "Handbook of Human Vibration", Academic Press, California, 1990.
31. HARDY H., "Symposium: Background Information on the Activities of Committee Z24-W-18, Sound Level Meters, JASA, Vol. 29 Nº 12, pp. 1330, 1957.

32. HARRIS C., "Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido", tercera edición, Mc Graw Hill, Madrid, 1995.
33. HERRERA O., GRABB, M., "Diccionario Médico" Inglés/Español, Little, Brown and Company, Boston, 1992.
34. HOMBRADOS M., LÓPEZ B., MORAL T., "Estrés y Salud", Promolibro, Valencia, 1997.
35. IRAM 4066, Proyecto de Norma "Curvas Normales de Igual Sonoridad", Comité de Acústica, Instituto Argentino de Normalización, Buenos Aires, 1996.
36. JOHNSON D., "Infrasound, It's Sources and Effects", Seminario Latinoamericano de Acústica, Volumen I, Córdoba, 1982.
37. JOHNSON D., "Quantifiable Effects of Noise on Humans", Seminario Latinoamericano de Acústica, Volúmen I, Córdoba, 1982.
38. JONES D., BROADBENT D., "Rendimiento Humano y Ruido", Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido (Harris, 1995), Capítulo 24, Mc Graw Hill, Madrid, 1995.
39. KOGAN P., ROSALES E., "Molestia Generada por Ruidos con Igual Nivel Sonoro "A" y Distinto Contenido Espectral", Presentado en Segundo Congreso Argentino del Nuevo Milenio y Segundas Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas, Buenos Aires, 2003.
40. KRYTER K., "The Effects of Noise on Man", second edition, Academic Press, Londres, 1985.
41. LÓPEZ M., "Evaluación de Alteraciones Vocales en Profesores de Educación Básica-Media de la Provincia de Valdivia", Tesis de Ingeniería Acústica, Escuela de Acústica, UACH, Valdivia, 2001.
42. MASCIALE J., "The Difficulties in Evaluating A-Weighted Sound Level Measurements", Sound and Vibration, April 2002.
43. McELROR W., SWANSON C., BUFFALOE N., GALSTON A., MACEY R., "Fundations of Biology", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1968.
44. MIYARA, F., "Control de Ruido", Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica, Editorial ASOLOFAL, Rosario, 2000.
45. MOORE B., "Psychology of Hearing", Fifth Edition, Academic Press, San Diego, 2003.
46. MUÑOZ R., "Ruido: Principios-Clasificación-Control", Tesis de Ingeniería Acústica, Escuela de Acústica, UACH, Valdivia, 1995.
47. Norma Chilena NCh 2803-2002, "Verificación de la Calidad Acústica de las Construcciones", Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, 2002.

48. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, “Guías para el Ruido Urbano”, SDE, PHE, OEH, Ginebra, 1999.
49. POLLACK I., PICKETT J., “Cocktail Party Effects”, JASA, Vol. 29, pp. 1262, 1957.
50. RASMUSSEN G., “Human Body Vibration Exposure and its Measurement”, Technical Review, 1982 N°1, Brüel & Kjaer, Denmark.
51. RECUERO M., “Contaminación Acústica”, Licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2002.
52. RECUERO M., “Ingeniería Acústica”, Editorial Paraninfo, Madrid, 1994.
53. ROSENZWEIG M., LEIMAN A., “Psicología Fisiológica”, McGraw-Hill, Madrid, 2000.
54. SCHOMER P., HOOVER B., “A-weighting – It does not Work Indoors for Helicopter or Large Gun Noises; Noises with Low Frequencies and Large Amplitude”, Internoise 89, Newport Beach, 1989.
55. SCHULTZ T., “Community Noise Rating”, second edition, Applied Science Publishers Ltd., Essex, 1982.
56. SCOTT H. H., “Historical Development of the Sound Level Meter”, JASA, Vol. 29 N° 12, pp. 1331-1333, 1957.
57. SKILLE O., “Manual of Vibroacoustics”, unpublished, Kirkegaten 12 N-7600, Levanger, 1998.
58. SMITH S., QUINLAN D., JENG P., PRASAD M., “Evaluation of Fan Noise Loudness using A-weighted Sound Level and Zwicker’s Model”, Internoise 89, Newport Beach, 1989.
59. SOCIEDAD OFTALMOLÓGICA ESPAÑOLA, “Semiología y Exploración de la Función Visual y los Anejos Oculares”, Anales de la Sociedad Oftalmológica Española (1-2), 1998.
60. STEVENS A., LOWE J., “Human Histology”, Second Edition, Mosby, Harcourt Publishers Limited, UK, reprinted by Grafos S.A., Barcelona, 1999.
61. STEVENS C. L., “Filter Networks”, JASA, Vol. 29 N° 12, pp. 1335, 1957.
62. UNIVERSIDAD DE NAVARRA, “Diccionario Espasa de Medicina”, Instituto Científico y Tecnológico de la Universidad de Navarra, Espasa Calpe, Navarra, 2000.
63. von GIERKE H., “Effects of Vibration and Shock on People”, Encyclopedia of Acoustics (Crocker, 1997), Chapter 145, Wiley and Sons, New York, 1997.
64. YOUNG R., “Status of International Standards on Sound Level Meters”, JASA, Vol. 29 N° 12, pp. 1340, 1957.

# **ANEXO**

## **MOLESTIA GENERADA POR RUIDOS CON IGUAL NIVEL SONORO “A” y DISTINTO CONTENIDO ESPECTRAL**

Pablo Kogan<sup>1</sup> y Enrique Rosales

*Escuela de Ingeniería de Acústica  
Universidad Austral de Chile*

*Casilla de Correo 567*

*Valdivia, Chile.*

<sup>1</sup> *pablokogan@uach.cl*

*Diciembre de 2002.*

## **INTRODUCCIÓN**

A partir del procedimiento para hallar el número único “dB(A)”, se puede pensar lo siguiente: es posible hallar distintos tipos de sonidos que tengan el mismo nivel sonoro “A”, incluso sin modificar la posición de los puntos de emisión y de recepción. La variedad de ruidos que pueden cumplir esta condición es innumerable.

En virtud de que los decibeles “A” se utilizan frecuentemente como herramienta técnica y legal para “determinar” si un ruido es considerado “molesto” o no, cabe formular la siguiente pregunta: ¿Es el dB(A) un buen indicador de la molestia? O en forma más específica: ¿Existen ruidos que aún teniendo idéntico nivel en dB(A) causen grados de molestia distintos?

Ante la sospecha de una respuesta afirmativa a esta pregunta, se realizó el presente trabajo, como un primer intento de búsqueda de una respuesta. El estudio consistió en la reproducción aérea de distintos espectros de ruido, todos ellos con igual nivel sonoro “A”. Se aplicó una encuesta en la que los oyentes clasificaban el grado de molestia provocado por cada ruido.

## **OBJETIVOS**

- Estudiar el comportamiento del decibel “A” para la evaluación de la molestia causada por ruidos constantes sobre una población adolescente.
- Identificar, si los hubiera, espectros de ruido complejo y constante que, teniendo igual nivel sonoro con ponderación “A”, provoquen distintos grados de molestia.
- Diseñar y crear un entorno social y técnico que permita realizar adecuadamente exposiciones a ruidos generados en laboratorio, y estudiar la molestia provocada por los mismos.
- Comparar la sensibilidad manifestada por mujeres y varones adolescentes a ruidos complejos y constantes.

## METODOLOGÍA

Para que la experiencia pueda llevarse a cabo respondiendo a los objetivos planteados, fue necesario realizar una importante etapa previa. A continuación se enumeran los procesos realizados para el desarrollo del trabajo.

### Preparación del Experimento

Se grabaron 5 espectros de ruido complejo. Todos ellos fueron obtenidos a partir de ruidos de banda ancha filtrados (tanto blanco como rosado). El proceso de filtrado se realizó con el programa Samplitude 2496. Cada uno de los espectros recibió un nombre para su posterior identificación. A continuación se muestran las formas espetrales que fueron generadas.

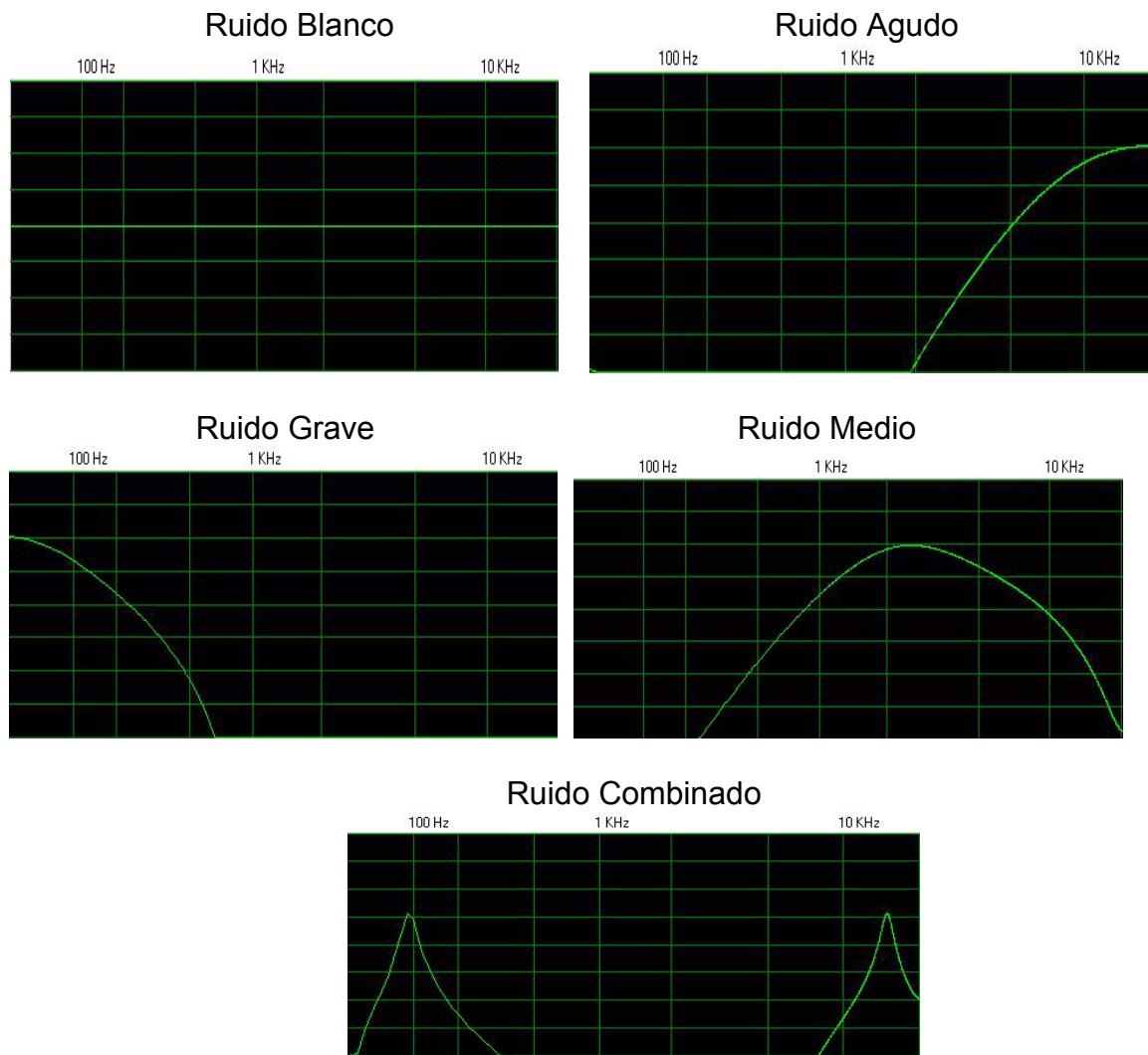


Figura 2: Espectros de ruido diseñados para el experimento.

Para la determinación de los niveles de grabación de cada espectro, éstos se reprodujeron mientras se medía el nivel de presión sonora “A” con un sonómetro Quest 2900. Se ajustó la amplitud de cada espectro hasta obtener igual valor en dB(A) en todos ellos. Cada uno de los espectros tiene una duración de 20 segundos.

En forma intercalada con los espectros sonoros grabados en CD, se incluyeron instrucciones orales para el desarrollo del experimento. Las instrucciones oficiaban de introducción e indicaban cómo contestar la encuesta escrita. En la grabación se contemplaron los tiempos necesarios para contestar la encuesta. Luego de cada espectro, se dejaron 10 segundos libres para que los jóvenes marquen el grado de molestia causado. La duración total de la grabación fue de 6 minutos (incluyendo los espectros y las instrucciones).

## La Población

Consistió de 49 estudiantes secundarios del Colegio Alemán de Valdivia, 26 varones y 23 mujeres. Las edades de los jóvenes estaban comprendidas entre 15 y 19 años, y en su mayoría provenían de familias con un nivel socioeconómico medio-alto.

## La Reproducción de los Ruidos

La reproducción de los espectros se realizó en el Estudio de Grabación de la Universidad Austral de Chile, siendo el estudio dirigido y monitoreado desde la sala de control.

Previamente al comienzo del experimento, se ajustaron cuidadosamente los niveles de cada espectro y las posiciones de las sillas para obtener niveles sonoros “A” homogéneos (tanto entre los distintos puestos de escucha como entre los cinco espectros reproducidos). El nivel sonoro a la altura de los oídos de una persona sentada sobre cada silla fue fijado en 81 dB(A). Una vez conseguido esto, no se alteró ninguna condición de la fuente sonora ni de los puestos de recepción.

La fuente sonora consistió en un sistema de cajas acústicas Bose 302 y Bose 802, amplificando en forma independiente las dos vías del sistema.

Las sillas fueron situadas en forma aproximada de “abánico”, enfrentando a la fuente sonora (ver Figura 3). A pesar de las características acústicas de la sala de grabación que incluyen cierta difusidad y absorción, se detectaron puntos de mayor nivel sonoro, producto de los modos normales del recinto (lo cual fue notorio en los espectros con contenido de bajas frecuencias). Estas zonas fueron evitadas en la recepción.



Figura 3: Fotos del montaje, se observa la posición de la fuente, los receptores y la sala de control.

Para realizar la experiencia, los jóvenes ingresaban al recinto en grupos de cinco. Se les explicaba la idea del trabajo, se les entregaba la encuesta y luego se hacía correr el CD con las instrucciones orales y los espectros grabados.

Por medio del vidrio que separa ambas salas se verificaba que los jóvenes no muevan sus sillas y no miren las encuestas de sus compañeros.

Fue necesario efectuar dos sesiones para desarrollar el test con la totalidad de la población. En ambos casos, la experiencia se realizó en la mañana a fin de minimizar las posibilidades de desplazamientos temporales del umbral auditivo en los encuestados.

Para el desarrollo de la segunda sesión, se modificó el orden en la reproducción de los espectros, a fin de reducir las influencias que esto pudiera ocasionar.

## Monitoreo de Niveles, Registro y Análisis de los Espectros Recibidos

Durante las reproducciones, los niveles sonoros fueron monitoreados permanentemente. Se registraron los niveles continuos equivalentes ( $L_{eq}$ ) y los percentiles  $L_{10}$  y  $L_{90}$ , durante 15 seg. de los 20 seg. de duración de cada ruido. Tanto el  $L_{eq}$ , el  $L_{10}$  y el  $L_{90}$  fueron obtenidos con ponderación “A”.

Adicionalmente, los espectros recibidos en las posiciones de inmisión fueron registrados en DAT, utilizando el micrófono y pre-amplificador del sonómetro Quest 2900 (ver figura 4).



Figura 4: Posición de micrófono y sistema de registro (DAT).

## La encuesta

La encuesta aplicada perseguía dos objetivos. Por un lado, en ella se volcaron las respuestas de la percepción de cada ruido según la siguiente escala: *i) agradable, ii) no agradable ni molesto, iii) un poco molesto, iv) molesto, v) muy molesto, vi) insopportable*. Además, se preguntaba por el ruido más molesto de todos. Para ello, luego de las 5 exposiciones de 20 seg., se repitió un fragmento de 3 seg. de cada ruido en el mismo orden. Esta última pregunta funcionaba como una segunda entrada de respuesta a la misma problemática, lo cual nos permitió analizar la coherencia de los resultados.

El otro objetivo de la encuesta fue obtener información acerca de los antecedentes auditivos y otros datos particulares de cada sujeto (a fin de poder identificar posibles déficit en la audición).

## Instrumental utilizado

- Grabador DAT portátil Tascam DA-P1
- Computador PC con tarjeta de audio Prodif Pro
- Programas computacionales Samplitude 2496 y Spectrum Analyzer PAS pro Live 3.5
- Sonómetro Quest 2900
- Micrófono de condensador Quest  $\frac{1}{2}$  pulgada
- Pistófono calibrador Quest QC-10
- Grabador de CD
- Reproductor de CD H/K
- Cajas acústicas Bose 302 y 802 con controlador Bose
- Consola analógica Tascam M-512
- Amplificador de potencia Crest CA 9
- Amplificador para monitores Ashly SRA-120
- Monitores Yamaha NS-10M
- Monitores JBL Control 5
- Micrófono Shure Beta 58

## RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 5 se muestran los niveles sonoros medidos durante la prueba en los puntos de recepción.

**NIVELES SONOROS EN POSICIÓN DE OYENTES**

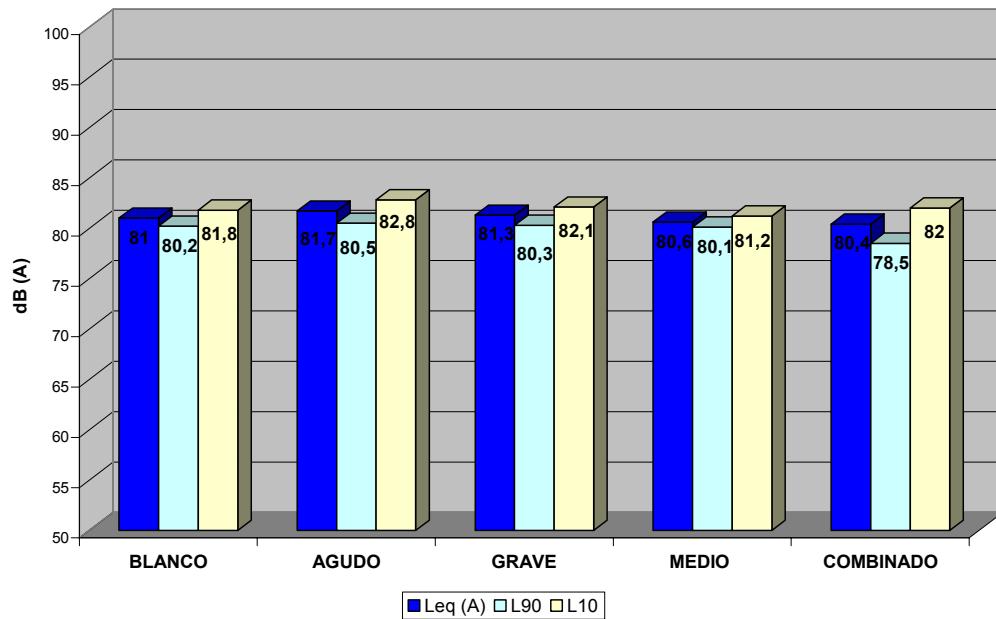


Figura 5: Niveles sonoros (A) medidas durante la prueba en los puntos de recepción ( $T = 15$  s)

En la figura 6 se muestran los resultados a la pregunta de la encuesta en la que se pidió indicar cual de los 5 espectros de ruido es considerado “el más molesto”.

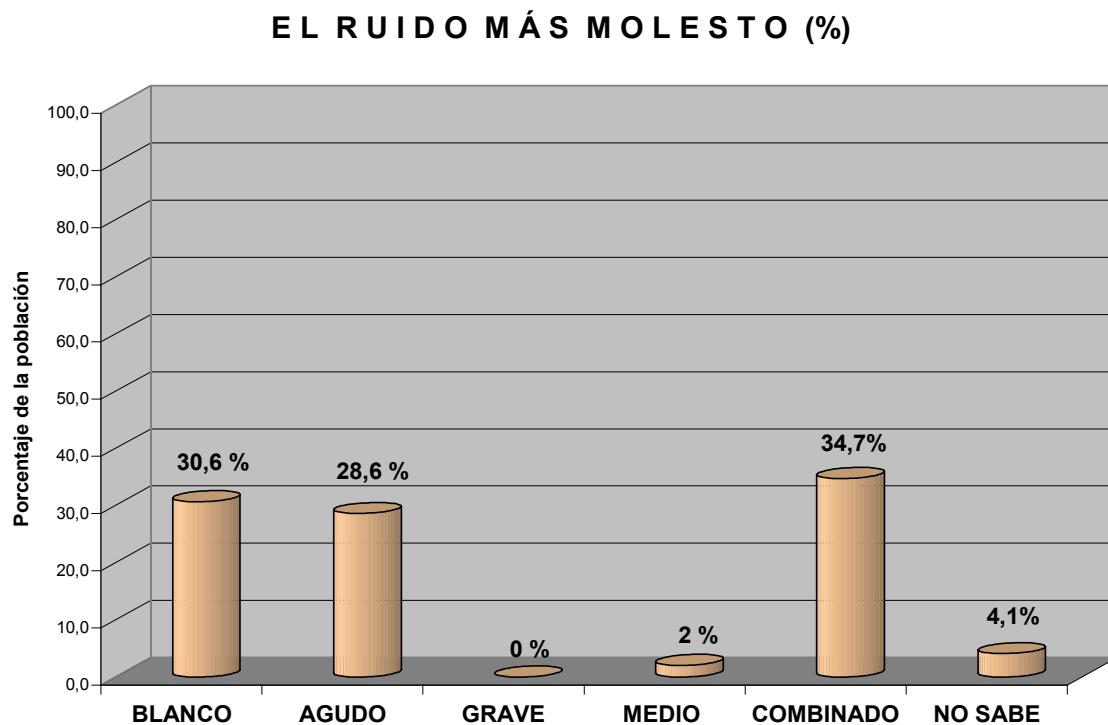


Figura 6: Respuestas a la pregunta de la encuesta: “¿Cuál de los ruidos le pareció el más molesto? ”.

A efectos de obtener un gráfico que considere todos las respuestas sobre la molestia de cada ruido en una categoría única que permita compararlos entre si, se realizó el siguiente análisis. A cada una de las 6 categorías de percepción de la molestia se le otorgó un valor numérico entre 1 y 6 (1=agradable, 6=insopportable). Para cada ruido, se sumó el producto del número de respuestas en cada categoría por el valor numérico asignado a la categoría. A ese resultado se lo dividió por el número total de encuestados (49). Este procedimiento nos permitió obtener una suerte de media o valor único cualitativo para “el grado de molestia” causada por cada ruido.

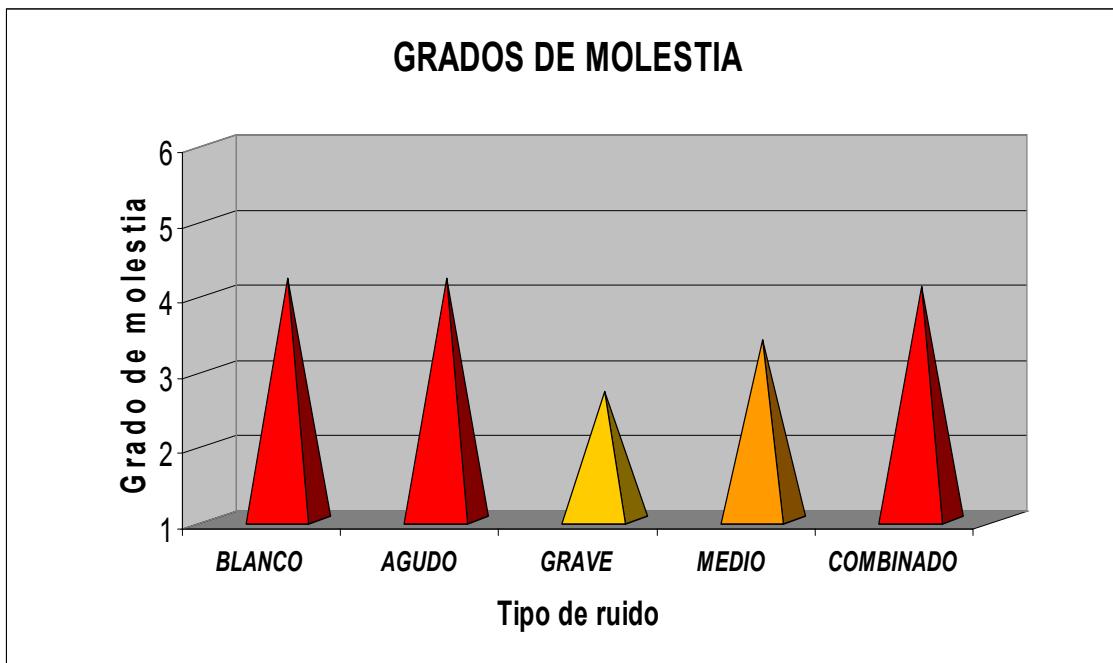


Figura 10: Grado de molestia total de cada ruido: 1= Agradable; 2= Ni agradable ni molesto; 3= Un poco molesto; 4= Molesto; 5= Muy molesto; 6= Insoportable

## DISCUSIÓN

Si una persona escucha un ruido familiar sin ver la fuente sonora, probablemente la identificará. Por el contrario, si el individuo no conoce el ruido que escucha, podría imaginar cual es su fuente. Estas asociaciones que realiza cada sujeto dependen de procesos internos relacionados con su experiencia de vida y con su estado psicológico. En conversaciones informales mantenidas con los encuestados luego de la prueba, algunos han manifestado que ciertos espectros emitidos les recordaban sonidos conocidos. Algunas de estas asociaciones podrían ser agradables y otras no. Por ejemplo, más de un joven asoció uno de los espectros percibidos con el ruido de un avión. Si alguno de estos jóvenes tuvo una mala experiencia con aviones, esto sin duda influirá en la respuesta que brinde. Del mismo modo influirá, que alguno de los encuestados se haya imaginado la lluvia o una cascada al escuchar otro de los espectros. Esto podría explicar parte de la dispersión obtenida en los datos, o el por qué algunos espectros han sido considerados agradables, aún recibiendo con el elevado nivel de 81 dB(A).

Sin duda, estas relaciones que realizan intrínsecamente los individuos, pueden tener un impacto significativo en la percepción de la molestia que acusan. Este factor no ha sido considerado en el diseño de los espectros, pero a pesar de ello no le resta validez a los resultados. No obstante, nos recuerda que el contenido semántico del ruido puede ser una fuerte influencia en la percepción de la molestia. Actualmente, ningún indicador utilizado para la evaluación del ruido considera dicha variable.

Por otra parte, la tolerancia al ruido depende también del estado de ánimo de una persona. Sin embargo, es esperable que este factor produzca similar influencia sobre la totalidad de los espectros escuchados. Esto último debiera imponer un desplazamiento ascendente o descendente de los grados de molestia de todos los ruidos por igual (aunque no se descarta que estudios

venideros puedan demostrar que el incremento o decremento de la tolerancia al ruido con el estado de ánimo provoca mayores niveles de aceptación a ciertas frecuencias que a otras). El objetivo de la escala confeccionada no fue la obtención de valores absolutos de molestia, sino que fue la comparación de los grados de molestia entre los distintos espectros reproducidos. Por este motivo, se espera que el estado de ánimo no sea un factor de peso en la molestia relativa de un espectro respecto a los demás.

La diferencia de sensibilidades al ruido acusada por mujeres y varones resulta llamativa. Se observa que esta diferencia se mantiene aproximadamente constante en todos los espectros, por lo cual estamos ante otro caso de “desplazamiento global”, tal como el que se describió para el estado de ánimo. Por otra parte, el hecho que las mujeres hayan manifestado mayores grados de molestia, no implica que experimenten más reacciones fisiológicas al ruido que los varones. Podría haber factores sociales condicionando las respuestas brindadas. En ciertas culturas, un varón adolescente puede asociar el hecho de resistir más a cierto agente agresor con el concepto de “ser más hombre”. Mientras que muchas veces son las mujeres las que manifiestan más los factores ambientales que condicionan su bienestar. No obstante, es posible que la perturbación psicológica causada por el ruido efectivamente sea mayor en las adolescentes que en los varones. Existen estudios que indican que las mujeres tienen mayor sensibilidad al ruido durante el sueño respecto a los hombres (Berglund –Lindvall, 1995).

El ruido “grave” ha provocado grados de molestia inferiores a los demás ruidos. Este resultado fue inesperado. Debido a la fuerte resta de niveles que realiza el dB(A) en frecuencias bajas, el ruido “grave” tuvo que ser reproducido con altos niveles de potencia para obtener el nivel ponderado buscado. Como consecuencia de esta carga energética, y en base a estudios que indican que el dB(A) subestima el impacto de las bajas frecuencias sobre las personas (Berglund –Lindvall, 1995), se esperaba que el espectro “grave” sea al menos tan molesto como los otros.

Una posible explicación para este resultado, reside en el análisis de los hábitos y preferencias del tipo de población estudiada. Por lo general, los estudios empíricos sobre molestia consideran poblaciones heterogéneas, en especial respecto a la edad de las personas. Los adolescentes, en su mayoría, consumen música con mayor contenido de bajas frecuencias que los adultos, debido a los géneros musicales escuchados (rock, techno, etc.) y al “realce” electroacústico que muchas veces se le da a esta zona del espectro. Esto podría causar en los jóvenes preferencias por este tipo de sonidos. Debido a los elevados niveles sonoros lineales con que el espectro “grave” fue emitido, la recepción de la onda aérea generaba vibraciones perceptibles en el organismo. Se ha observado que este efecto era atrayente para algunos jóvenes, produciendo en varios de ellos sensaciones de “poder”, de activación, de diversión, de curiosidad, etc.

Possiblemente, el tiempo empleado en la reproducción de cada ruido haya tenido alguna incidencia sobre las molestias relativas. Cabe hacerse la pregunta: ¿Hubiéramos obtenido la cantidad de respuestas que obtuvimos clasificando como “agradable” al ruido “grave” si el tiempo de reproducción de cada espectro hubiera sido de 10 minutos en lugar de 20 segundos...?

Otro condicionante de los resultados y de la extrapolación que pudiese realizarse, lo constituyen los niveles de inmisión. Se escogió 81 dB(A) como nivel de inmisión, ya que es un valor que se puede encontrar fácilmente en una zona ruidosa o industria, y en muchos casos está dentro de los márgenes permitidos. Por otro lado, este valor permitía un grado de eficiencia aceptable en las condiciones de reproducción e inmisión.

La sensibilidad a la frecuencia depende de los niveles sonoros. Por lo cual, no esperaríamos los mismos resultados si los niveles de inmisión hubiesen sido mucho menores o mucho mayores a 81dB(A).

En el caso del ruido “medio”, éste causó menor molestia que los demás ruidos (a excepción del “grave”). Pero el comportamiento respecto a la energía emitida fue muy distinto. El ruido “medio” se diseñó con una forma espectral muy similar a la propia de la ponderación “A”, por lo que para obtener los 81 dB(A) buscados se debió emitir una pequeña dosis de energía acústica respecto de los otros espectros. La ponderación “A” surgió a partir de los contornos de igual sonoridad trazados por Fletcher y Munson, específicamente de las curvas en torno a 40 fones (40 dB en 1000 Hz). Para niveles mayores la forma de las curvas de sonoridad es más plana respecto a la frecuencia. Por lo cual, podemos pensar que para los niveles empleados en este caso, la ponderación positiva que realiza el dB(A) en las frecuencias medias respecto a las demás bandas del espectro podría resultar excesiva. Esto constituye una posible explicación para la baja molestia causada por el espectro “medio”.

El orden de la reproducción de los ruidos también puede ser un factor condicionante en las respuestas. ¿Molesta tanto el segundo o tercer ruido como el primero que escuchamos? Si bien se intercaló el orden de reproducción para el segundo día de exposición, todos los ruidos no ocuparon con igual probabilidad cada una de las posiciones en el orden de reproducción (como hubiese sido deseado).

Evidentemente, un estudio de este tipo tiene muchas limitaciones que no permiten extrapolar los resultados directamente. Sin embargo, cabe destacar que, sin perjuicio de las limitaciones mencionadas ni de las cotas propias de un estudio “de laboratorio”, se han obtenido grados significativamente distintos de molestia para ruidos recibidos con el mismo nivel sonoro “A”.

Para continuar dando forma a una respuesta completa a la pregunta planteada en la introducción, sería provechoso profundizar el tema realizando estudios que involucren otras poblaciones, entornos ambientales, tipos de ruido, tiempos de exposición y niveles sonoros.

## Conclusiones

- El ruido grave y el ruido medio fueron los menos molestos.
- Los ruidos considerados insoportables por algunos de los entrevistados fueron el agudo, el blanco y el combinado.
- En general, las mujeres manifestaron menor tolerancia al ruido, hecho bien notorio en el caso de los ruidos blanco, grave y combinado.
- Debido a que todos los ruidos fueron recibidos por los oyentes con niveles sonoros “A” muy similares, pero han causado grados de molestia considerablemente disímiles, se puede decir que: para la clase, el tiempo y nivel de ruido empleado, en las condiciones de realización de la prueba y sobre el tipo de población estudiada; el dB(A) no fue un buen indicador del grado de molestia causada por el ruido.

## Agradecimientos

Se agradece a todos los jóvenes encuestados por su participación, a la directora del Colegio Alemán de Valdivia y a los profesores José Luis Barros, Jorge Arenas, Víctor Poblete y Jorge Cárdenas por su colaboración.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BERGLUND B., LINDVALL T., "Community Noise", document prepared for the World Health Organization (WHO), Center for Sensory Research, Stockholm, 1995.
2. KRYTER K, "The Effects of Noise on Human", second edition, Academic Press, London, 1985.
3. MOORE B., "Psychology of Hearing", Fifth Edition, Academic Press, Elsevier Science, California, 2003.
4. SCHULTZ T., "Community Noise Rating", Second Edition, Applied Science Publishers Ltd, Essex, 1982.

## GLOSARIO

AFERENTE	: Vía o impulso nervioso que se dirige hacia el centro nervioso central (antónimo del eferente).
AMORTIGUAMIENTO	: Moderación que provee un sistema sobre la caída de una señal en torno a la frecuencia de resonancia, produciendo disipación de energía.
AUDIOMETRÍA	: Técnica de diagnóstico auditivo en que el resultado es una gráfica de sensibilidad auditiva en función de la frecuencia.
CEFALEA	: Dolor de cabeza.
CHAKRAS	: Centros energéticos del cuerpo humano estudiados por varias disciplinas y culturas orientales.
COBAYOS	: Roedores frecuentemente utilizados para pruebas médicas ("Guinea Pigs").
CÓLICO	: Dolor abdominal agudo, intenso, inesperado y fluctuante. lumbar. Cólico renal: cuadro clínico que consiste en un dolor lumbar de gran intensidad, como consecuencia de una obstrucción aguda de la uretra.
COLOREAR	: En la acústica emplea este término cuando un sistema produce leves modificaciones espectrales sobre una señal sonora.
CORONARIO	: Relativo a las arterias que irrigan el corazón.
CROMÁTIDES HERMANAS	: Filamentos idénticos de ADN que se observan en los cromosomas durante la división celular. Las cromátides hermanas intercambian material genético por sobre-cruzamiento que se produce durante la meiosis o la mitosis.
DIABETES	: Enfermedad que se manifiesta por excesiva emisión de orina.
DIFRACCIÓN	: Cambio de dirección de las ondas acústica que se produce en torno a un objeto.
DISPERSIÓN	: Fenómeno que tiene lugar en un medio en el cual la velocidad de propagación de las ondas acústicas depende de la frecuencia, provocando una disgregación de las componentes espectrales de un sonido durante su propagación (los sólidos son medios dispersivos).
DIVERTÍCULOS	: Sacos o bolsas que se originan en la cavidad de un órgano o estructura.
DUODENAL	: Relativo al duodeno (primera porción del intestino delgado).

EEG (electroencefalograma)	: Técnica de registro de la actividad bioeléctrica del cerebro realizada mediante electrodos colocados en el cuero cabelludo.
EFERENTE	: Vía o impulso nervioso que proviene del cerebro y se dirige hacia la periferia del sistema nerviosos (antónimo del aferente).
EMBOLIA PULMONAR	: Oclusión aguda de una arteria pulmonar o de una de sus ramas.
ENDÓGENO	: Interno.
ENMASCARAMIENTO	: Ocultamiento en la percepción de un sonido como consecuencia de otro sonido o ruido.
ESTAMPIDO SÓNICO	: Ruido de gran intensidad con gran contenido de frecuencias bajas que es producido cuando un avión atraviesa la velocidad del sonido (régimen supersónico) ("sonic boom").
EXÓGENO	: Externo.
FAGOCITOS	: Célula que es capaz de rodear, engullir y digerir microorganismos y restos celulares.
FLATULENCIA	: Distensión y molestias abdominales por exceso de gas en el tracto gastrointestinal.
FUNCIONAL (medicina)	: Se dice de los trastornos que no tienen una base anatómica. Que afectan a la función pero no a la estructura.
HEMORROIDES	: Masa de venas dilatadas en la pared rectal.
HEPÁTICO	: Relativo al hígado.
HIPERTENSIÓN	: Aumento mantenido de las cifras de tensión arterial por encima de los valores normales.
INFARTO DE MIOCARDIO	: Destrucción rápida y localizada del miocardio, como consecuencia de un déficit suficientemente prolongado del aporte sanguíneo.
INMISIÓN	: Recepción del sonido o ruido (antónimo de emisión).
MANIOBRA DE VALSALVA	: Consigue un aumento de la presión intra-torácica intentando expulsar el aire pulmonar mientras se mantiene cerrada la glotis.
METABOLISMO	: Conjunto de procesos químicos y físicos que tiene lugar en los seres vivos.
MIOCARDIO	: Capa muscular del corazón, revestido exteriormente por el pericardio e interiormente por el endocardio.

NIVEL SONORO EQUIVALENTE	: Descriptor para medir el ruido que entrega el nivel que éste tendría si fuese constante durante el mismo lapso de tiempo, de manera de contener igual cantidad de energía. Su denominación completa es <i>nivel de presión sonora continua equivalente (L<sub>eq</sub>)</i> .
NPS	: Nivel de presión sonora, medido en decibeles.
OROFARINJE	: Porción de la faringe que se encuentra detrás de la cavidad bucal.
PROCESO COGNITIVO	: Conjunto de acciones que se llevan al conocimiento de las cosas u uso de la razón: la percepción, la memoria, la imaginación, el pensamiento, el lenguaje, etc.
PSICOPATOLÓGICO	: Patología psíquica que conduce a un comportamiento “anormal”.
PTS	: Desplazamiento permanente del umbral auditivo (“ <i>permanent threshold shift</i> ”).
RESISTENCIA GALVÁNICA ( <i>de la piel</i> ):	Resistencia a la circulación de la corriente eléctrica que ofrece la piel. Ésta generalmente está comprendida entre 100 kΩ y 1 MΩ, varía de acuerdo a la humedad de la piel y el estado emocional.
RITMO CIRCADIANO	: Ciclo que tiene una duración aproximada de un día.
RUIDO BLANCO	: Ruido aleatorio de banda ancha que posee igual nivel de presión sonora en todo el espectro.
RUIDO ROSADO	: Ruido aleatorio de banda ancha que posee el mismo contenido energético en todas las bandas de octava del espectro. Su NPS decrece 3 dB por octava.
S/R (relación señal ruido)	: Diferencia de nivel existente entre la señal útil y el ruido de fondo de un sistema.
SEMÁNTICO	: Relativo al significado. Contenido semántico de un sonido se refiere a su significado, importancia o mensaje.
SIGNO ( <i>medicina</i> )	: Manifestación objetiva o física de una alteración orgánica o enfermedad.
SÍNDROME	: Conjunto de síntomas y signos que configuran una enfermedad.
SÍNTOMA	: Dato subjetivo de enfermedad o situación del paciente.
SISTÉMICO ( <i>medicina</i> )	: Que afecta a todo el sistema.

---

SÍSTOLE	: Contracción de las cavidades cardíacas, aurículas y ventrículos.
SOMBRA ACÚSTICA	: Porción del espacio detrás de un objeto, en el cual la energía acústica se ve atenuada. La sombra acústica depende de la frecuencia y está relacionada con la difracción sonora.
TAPONAMIENTO CARDÍACO	: Compresión aguda del corazón causada por un exceso de sangre acumulada en el pericardio.
TAQUICARDIAS	: Incremento sostenido en la frecuencia cardiaca por encima de 100 latidos minuto.
TAREAS COGNITIVAS	: Ver procesos cognitivos.
TROMBO	: Cúmulo de plaquetas, factores de coagulación y elementos celulares de la sangre en el interior de un vaso sanguíneo que puede producir occlusiones vasculares.
TROMBOSIS	: Situación vascular anormal en la que se desarrolla un trombo en el interior de un vaso sanguíneo.
TTS	: Desplazamiento temporal del umbral auditivo (“ <i>temporal threshold shift</i> ”).
VAD	: Enfermedad vibroacústica. Patología de naturaleza sistémica que afecta al cuerpo en su conjunto y que es causada por la exposición prolongada al ruido de frecuencia baja y alta intensidad.
VÁRICES	: Alargamiento y dilatación con forma flexuosa de las venas, generalmente del sistema superficial de los miembros inferiores.
VASO SANGUÍNEO	: Conducto de la sangre, venas y arterias.

Contacto con el autor:

*[acoustics@eudoramail.com](mailto:acoustics@eudoramail.com)*

*[pkoganm@yahoo.com](mailto:pkoganm@yahoo.com)*