



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A032

Cálculo revisado del nivel sonoro A a partir del espectro de bandas

Pasch, Vivian Irene^(a), Yanitelli, Marta^(b), Miyara, Federico^(c),
Cabanellas, Susana^(d), Miechi, Pablo^(e).

Grupo Ruido, Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño, Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 220 bis, 2000 Rosario, Argentina, Tel: +54 341 4808531

(a) E-mail: pasch@fceia.unr.edu.ar

(b) E-mail: myanitel@fceia.unr.edu.ar

(c) E-mail: fmiyara@fceia.unr.edu.ar

(d) E-mail: scabanel@fceia.unr.edu.ar

(e) E-mail: pmiechi@gmail.com

Abstract

The usual method to compute the A-weighted sound pressure level from an octave or one third of an octave band spectrum consists in weighting each band with the A frequency response at the central frequency of that band. Such a method does not take into account that the equivalent weighting when the spectral density is an increasing function of frequency differs from the case when it is a decreasing function. Even if the spectral density cannot be determined uniquely from the band spectrum, under some assumptions it can be estimated, allowing a better approximation. In this paper the theoretical solution is given and its results are compared to those of the traditional method for some typical noise spectra.

Resumen

El método habitual para calcular el nivel sonoro A a partir del espectro de bandas de octava o de tercio de octava consiste en ponderar cada banda con el valor de la curva A en la frecuencia central de la banda. Dicho método no tiene en cuenta que la ponderación equivalente no es la misma si la densidad espectral es creciente o decreciente en la banda. Si bien la densidad espectral no puede determinarse en forma exacta y unívoca a partir del espectro de bandas, bajo ciertas hipótesis es posible aproximarla a partir de la tendencia general de dicho espectro, con lo cual es posible obtener una mejor aproximación. En este trabajo se plantea la solución teórica y se comparan sus resultados con los del método tradicional para algunos ruidos de espectro típico.

1 Introducción

Para obtener niveles sonoros que tengan una relación más estrecha con la sonoridad percibida que los niveles de presión sonora, la medición de los mismos se corrige a través de una curva de ponderación que actúa como un filtro con una respuesta en frecuencia determinada.

Numerosas investigaciones han demostrado que los valores medidos intercalando la ponderación A se correlacionan muy bien con el daño auditivo experimentado por las personas expuestas a ruidos intensos durante períodos considerables de tiempo, como generalmente ocurre en los ambientes de trabajo en la industria. Por este motivo, se adoptó dicha curva en un importante número de normas y legislaciones nacionales e internacionales.

En la Argentina, el Decreto 351/79 reglamentario de la Ley 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo, en su Anexo V correspondiente al Capítulo 13 Ruido y vibraciones, artículos 85 a 94, adopta la red de ponderación A en las mediciones del nivel sonoro continuo equivalente NSCE y lo hace explícito en los distintos procedimientos de cálculo.

El nivel sonoro con ponderación A permite, también, predecir las distancias máximas recomendables entre hablante y oyente para una comunicación verbal fiable en presencia de ruido (Beranek, 1988; Lord et al., 1980), así como el porcentaje de personas altamente molestas frente al ruido de diversos medios de transporte (Miedema, 1998).

Aunque en general el nivel sonoro A se mide directamente, en muchos casos se presenta la necesidad de calcularlo a partir del espectro, por ejemplo cuando se conoce el espectro de emisión y se desea obtener el nivel A luego de aplicada una medida de control aún en proyecto (protección auditiva, encapsulamiento, apantallamiento). En este caso es posible conocer el espectro en el punto de inmisión pero no se puede realizar la medición directa.

El método habitual para calcular el nivel sonoro A a partir del espectro de bandas de octava (o de tercio de octava) consiste en ponderar cada banda con el valor de la curva A correspondiente a la frecuencia central de la banda. Si llamamos $A(f)$ a la ponderación a aplicar al nivel de presión sonora de una banda centrada en la frecuencia f , resulta

$$L_{pA} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_p(f_i) + A(f_i)}{10}} \right]. \quad (1)$$

La sumatoria representa la superposición energética, es decir, en presión eficaz al cuadrado (previamente corregida por la curva A).

Este método sería válido si tanto la densidad espectral $\overline{p^2}(f)$ como $A(f)$ fueran constantes en cada banda. Si la densidad espectral (valor cuadrático medio por unidad de ancho de banda) no es constante, la ponderación equivalente para toda la banda depende sensiblemente de la pendiente de la densidad espectral. Así, por ejemplo, si la densidad espectral crece dentro de la banda de 125 Hz, al multiplicarla por la respuesta en frecuencia de la ponderación A, que también es creciente en esa banda, se obtendrá una densidad espectral que crece más rápidamente cerca del límite superior de la banda. En cambio, si la densidad espectral fuera decreciente, al aplicar la ponderación A la densidad resultante tiende a ser más constante. En el primer caso la ponderación equivalente es mayor que en el segundo.

Si bien la densidad espectral no puede determinarse en forma exacta y unívoca a partir del espectro de bandas, bajo ciertas hipótesis es posible aproximarla a partir de la tendencia general de dicho espectro, con lo cual se puede obtener una mejor aproximación del nivel corregido por la ponderación. En este trabajo se propone una posible solución teórica y se comparan sus resultados con los del método tradicional para algunos ruidos de espectro típico.

2 Metodología

Si suponemos conocido el nivel de presión sonora en la frecuencia central f_k de la k -ésima banda, $L_p(f_k)$, se puede estimar la densidad espectral partiendo de la siguiente expresión

$$P_{ef}^2(f_k) = P_{ref}^2 \cdot 10^{\frac{L_p(f_k)}{10}}. \quad (1)$$

Por otra parte, P_{ef}^2 está relacionada con la densidad espectral $\overline{p^2}(f)$ a través de la ecuación

$$P_{ef,k}^2 = \int_{f_i}^{f_s} \overline{p^2}(f) \cdot df. \quad (2)$$

Suponiendo que $\overline{p^2}(f)$ es constante en la banda $[f_{ik}, f_{sk}]$ considerada, resulta que $\overline{p^2}(f) = \overline{p_k^2}$, y, reemplazando en la expresión anterior,

$$P_{ef,k}^2 = \int_{f_{ik}}^{f_{sk}} \overline{p^2}(f_k) \cdot df = \overline{p_k^2} \cdot (f_{sk} - f_{ik}). \quad (3)$$

De aquí se puede despejar la densidad espectral promedio en cada banda:

$$\overline{p_k^2} = \frac{P_{ef,k}^2}{f_{sk} - f_{ik}} = \frac{P_{ref}^2 \cdot 10^{\frac{L_{p,k}}{10}}}{f_{sk} - f_{ik}}. \quad (4)$$

La idea es, a partir de los valores de la densidad espectral en las diferentes bandas, interpolar en forma segmento-lineal bajo la restricción adicional de que la integral en cada banda mantenga su valor original deducido del nivel de presión sonora de la banda (figura 1).

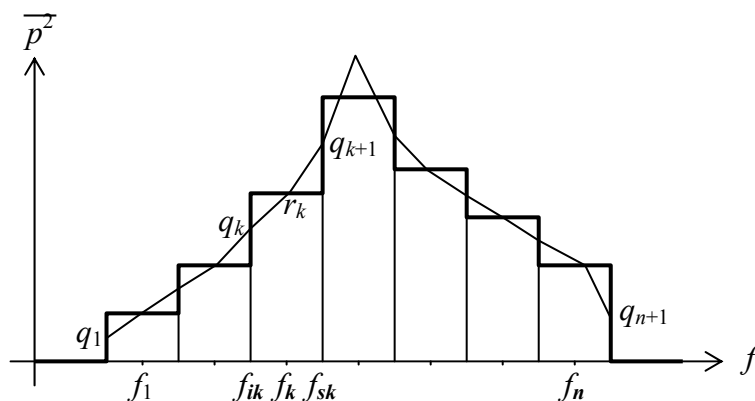


Figura 1. Interpolación segmento-lineal de una función constante a intervalos que preserva el área en cada intervalo. Nota: Para claridad del dibujo se supuso que todos los intervalos son iguales.

Aunque no hay una única manera de hacerlo, el espectro así resultante será una función continua, lo cual condice más con la distribución espectral a largo plazo de los ruidos de banda ancha habituales que un espectro seccionalmente constante.

El procedimiento propuesto para obtener la densidad espectral interpolada a partir de las bandas de octava (o de tercio de octava) se ilustra en la figura 2. Para cada flanco entre las bandas $k-1$ y k se obtiene un valor de paso q_k de la densidad espectral igual al promedio entre los valores de las dos bandas:

$$q_k = \frac{\overline{p_{k-1}^2} + \overline{p_k^2}}{2}. \quad (5)$$

Para los flancos extremos, la selección de q_1 y q_{n+1} sigue diferentes criterios según la densidad espectral en esa banda sea máxima o mínima. Si es mínima, entonces

$$q_1 = \frac{\overline{p_1^2}}{2} \quad (6a)$$

$$q_{n+1} = \frac{\overline{p_{n+1}^2}}{2} \quad (6b)$$

Si, en cambio, es máxima,

$$q_1 = \overline{p_1^2} + \frac{\overline{p_1^2} - \overline{p_2^2}}{2} \quad (7a)$$

$$q_{n+1} = \overline{p_n^2} + \frac{\overline{p_n^2} - \overline{p_{n-1}^2}}{2} \quad (7b)$$

Los valores así obtenidos proporcionan algunos extremos de los segmentos de interpolación, cuyas coordenadas son (f_{ik}, q_k) y (f_{sk}, q_{k+1}) . En general no es posible unir simplemente estos dos puntos, dado que ello no garantiza la condición de que la integral en la banda coincida con la integral de la versión constante a trozos. Para lograr esto debemos agregar uno o dos valores intermedios según el comportamiento del espectro en las inmediaciones de la banda considerada. Hay cuatro casos, ilustrados en la figura 2: que el espectro sea monótono, que tenga un máximo local, que tenga un mínimo local o que tenga un máximo en uno de los extremos del espectro.

Si el espectro es monótono en la banda k (figura 2a), se agrega un punto $(r_k, \overline{p_k^2})$ cuya coordenada horizontal se calcula de manera que las áreas por encima y por debajo de $\overline{p_k^2}$ sean iguales. Resulta:

$$r_k = \frac{f_{sk} \cdot (q_{k+1} - \overline{p_k^2}) + f_{ik} \cdot (\overline{p_k^2} - q_k)}{q_{k+1} - q_k}. \quad (8)$$

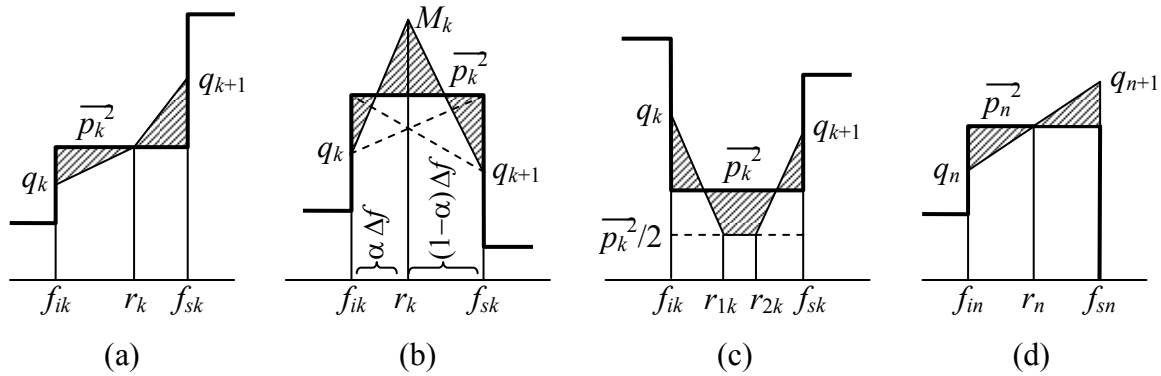


Figura 2. Detalles de la interpolación segmento-lineal de una función constante a intervalos que preserva el área. (a) Caso de función monótona (en el ejemplo, creciente). (b) Caso de máximo relativo. (c) Caso de mínimo relativo. (d) Caso de máximo en un extremo del espectro (en el ejemplo, en alta frecuencia)

Si el espectro alcanza un máximo en la banda k (figura 2b), se agrega un punto intermedio (r_k, M_k) correspondiente a la máxima densidad espectral estimada. La coordenada horizontal r_k se elige de modo que se encuentre más cerca del flanco que menos difiere de la banda vecina, lo cual se logra mediante la construcción geométrica indicada en línea de trazos. Resulta:

$$r_k = f_{ik} + \frac{\overline{p_k^2} - q_k}{2\overline{p_k^2} - q_k - q_{k+1}} (f_{sk} - f_{ik}) \quad (9)$$

La coordenada vertical se determina, igual que en el caso anterior, de modo que las áreas arriba y abajo de $\overline{p_k^2}$ sean iguales, resultando

$$M_k = 2\overline{p_k^2} - q_{k+1} + \frac{(\overline{p_k^2} - q_k)(q_{k+1} - q_k)}{2\overline{p_k^2} - q_k - q_{k+1}}. \quad (10)$$

Si el espectro alcanza un mínimo, en principio podría usarse el mismo esquema, pero se corre el riesgo de que resulte $M_k < 0$, por lo cual se optó por acotar el mínimo a un valor $\overline{p_k^2}/2$. La densidad espectral interpolada tomará un valor 3 dB menor que el promedio. En este caso se requieren dos valores r_{1k} y r_{2k} a los que por conveniencia se impone la condición de que su media geométrica sea igual a la de f_{ik} y f_{sk} . Nuevamente se parte de la igualdad de las áreas superior e inferior. Los valores de r_{1k} y r_{2k} resultan

$$r_{1k}, r_{2k} = -B \pm \sqrt{B^2 - 4C}, \quad (11)$$

donde

$$B = f_{sk} \frac{q_{k+1}}{q_k} - f_{ik} - \frac{2\overline{p_k^2}}{q_k} (f_{sk} - f_{ik}), \tag{12a}$$

$$C = f_{ik} f_{sk} \frac{q_{k+1}}{q_k} \tag{12b}$$

Si el espectro alcanza un máximo en alguno de los extremos de baja o alta frecuencia, entonces r_k está exactamente en el centro de la banda, por ejemplo.:

$$r_1 = \frac{f_{i1} + f_{s1}}{2} \tag{13}$$

Los puntos obtenidos se unen con segmentos de recta, con lo cual se obtiene la densidad espectral interpolada que buscábamos, que tiene la propiedad de ser continua y que su integral en cada banda es la misma que la de la densidad espectral media.

Es importante aclarar que la densidad espectral así obtenida no necesariamente coincide con la del ruido analizado por bandas, pero constituye un modelo más verosímil.

Una vez determinada la densidad espectral interpolada se la afecta de la ponderación A y se la integra en la banda audible para obtener la presión eficaz ponderada A. Este proceso se lleva a cabo numéricamente.

3 Resultados obtenidos

Se han estudiado varios ruidos característicos para los cuales se midió el espectro así como el nivel A con un sonómetro integrador Brüel & Kjaer 2250. Entre ellos: ruido de tránsito, ruido de una lijadora manual, ruido de una sierra de mano.

En las figuras 3 a 5 se muestran los respectivos espectros de bandas de octavas con ponderación A calculados en la forma habitual ($L_p + A$) y con la metodología propuesta en este trabajo (L_A) a partir de los valores medidos sin ponderación.

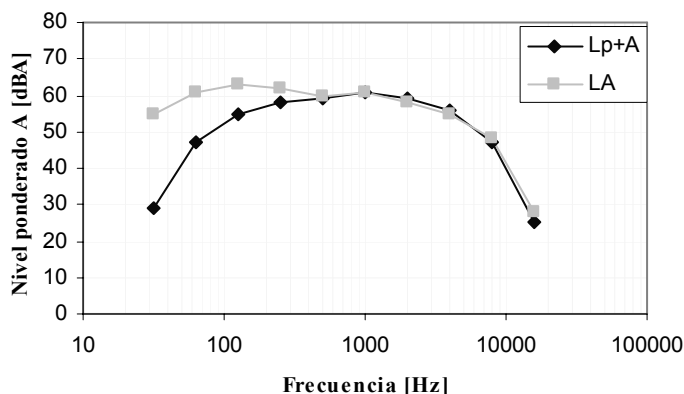


Figura 3. Espectro en bandas de octava para ruidos de tránsito. El nivel sonoro calculado en la forma habitual es $L_{AH} = 66,3$ dBA y el calculado con la metodología propuesta en este trabajo es $L_{AM} = 69,0$ dBA.

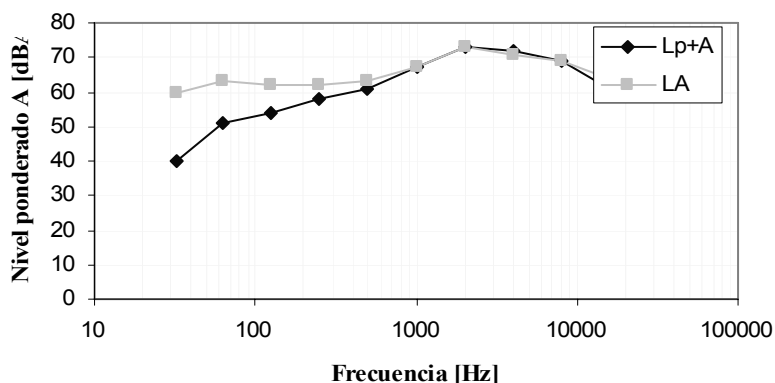


Figura 4. Espectro en bandas de octava para ruidos de una lijadora. El nivel sonoro calculado en la forma habitual es $L_{AH} = 77,2$ dBA y el calculado con la metodología propuesta en este trabajo es $L_{AM} = 77,4$ dBA.

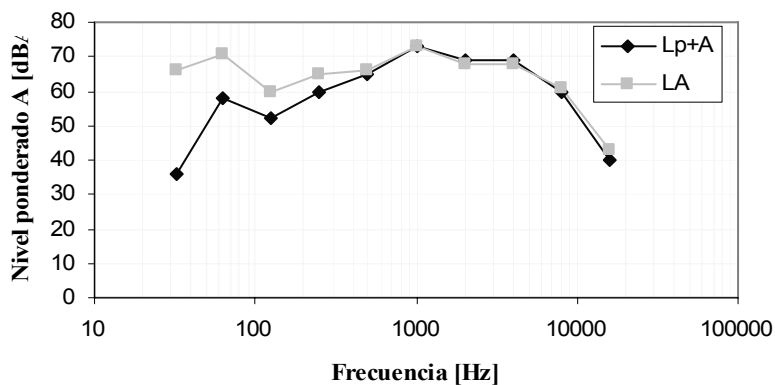


Figura 5. Espectro en bandas de octava para ruidos de una sierra de mano. El nivel sonoro calculado en la forma habitual es $L_{AH} = 76,0$ dBA y el calculado con la metodología propuesta en este trabajo es $L_{AM} = 77,2$ dBA.

Para ruido de tránsito, mostrado en la figura 3, el nivel sonoro ponderado A es de 66,3 dBA y de 69,0 dBA respectivamente, es decir, existe una diferencia de casi 3 dBA. Sin embargo puede notarse que para las frecuencias bajas las diferencias son mucho mayores. Esto se repite para el caso del ruido de herramientas usuales en la construcción, como la lijadora mostrada en la figura 4 y la sierra de la figura 5, a pesar de que en estos casos las diferencias en el nivel sonoro son mínimas.

Las variaciones encontradas en las bandas de frecuencias bajas pueden resultar importantes en algunas aplicaciones habituales de la información espectral, tales como la evaluación del ruido transmitido a través de una barrera, una fachada o un muro divisorio.

Como ejemplo, en la tabla 1 se muestra la determinación del ruido que llegará a un ambiente como consecuencia del ruido de tránsito cuyo espectro es el de la figura 3a y que esté separado del exterior por una pared con las siguientes características: muro conformado por ladrillos comunes con capa hidrófuga de cemento y revoque grueso fratachado en la cara interna, resultando el conjunto de un espesor aproximado de 15 cm. Puede notarse que el nivel sonoro a obtener en el ambiente a aislar difiere en más de 5 dBA según se parte de los niveles calculados de la manera habitual o con las consideraciones del presente trabajo.

Tabla 1. Cálculo del ruido de inmisión para ruido de tránsito. L_{AH} se refiere a valores calculados en la forma habitual y L_{AM} a valores calculados según la metodología propuesta.

f [Hz]	Ruido de tránsito		Pérdida por inserción	Ruido de inmisión	
	$L_{AH}(f)$ [dBA]	$L_{AM}(f)$ [dBA]		$L_{AH}(f)$ [dBA]	$L_{AM}(f)$ [dBA]
31,5	29	55	37,63	-	17,37
63	47	61	37,63	9,37	23,37
125	55	63	37,63	17,37	25,37
250	58	62	35,62	22,38	26,38
500	59	60	40,05	18,95	19,95
1000	61	61	45,52	15,48	15,48
2000	59	58	49,73	9,27	8,27
4000	56	55	50,27	5,73	4,73
8000	47	48	50,27	-	-
16000	25	28	50,27	-	-
L_A	66,3	69,0		25,6	30,8

En la tabla 2 se presenta el ruido de inmisión a obtener utilizando la misma pared, pero para el caso de que la fuente a aislar sea la lijadora de la figura 3b. El nivel sonoro calculado en la forma habitual es de 77,2 dBA y el obtenido con la metodología propuesta es de 77,3 dBA con lo cual no hay diferencias apreciables debido al bajo contenido de bajas frecuencia emitido por la fuente. Si embargo, al analizar el ruido de inmisión que atraviesa la barrera propuesta, se obtiene una variación de 3 dBA por el mayor debilitamiento que la misma produce sobre las frecuencias altas.

Tabla 2. Cálculo del ruido de inmisión para ruido de una lijadora. L_{AH} se refiere a valores calculados en la forma habitual y L_{AM} a valores calculados según la metodología propuesta.

f [Hz]	Ruido de lijadora		Pérdida por inserción	Ruido de inmisión	
	$L_{AH}(f)$ [dBA]	$L_{AM}(f)$ [dBA]		$L_{AH}(f)$ [dBA]	$L_{AM}(f)$ [dBA]
31,5	40	60	37,63	2,37	22,37
63	51	63	37,63	13,37	25,37
125	54	62	37,63	16,37	24,37
250	58	62	35,62	22,38	26,38
500	61	63	40,05	20,95	22,95
1000	67	67	45,52	21,48	21,48
2000	73	73	49,73	23,27	23,27
4000	72	71	50,27	21,73	20,73
8000	69	69	50,27	18,73	18,73
16000	61	64	50,27	10,73	13,73
L_A	77,2	77,4	-	29,8	33,0

4 Observaciones y conclusiones

Para un gran número de ruidos característicos, cuya distribución espectral de la energía sonora tiene poco contenido en bajas frecuencias, los valores que se obtienen realizando la ponderación A en la forma habitual resultan satisfactorios. Sin embargo, cuando las componentes de baja frecuencia tienen mayor importancia relativa, resulta necesario considerar que la ponderación A no es constante dentro de cada banda ya sea de octava o de tercio de octava.

La metodología propuesta para concretar esa consideración se basa en analizar la tendencia, creciente o decreciente, de la densidad espectral y en interpolar la misma en forma lineal como primera aproximación. Para la consecución del análisis planteado se propone la búsqueda y evaluación de alternativas que optimicen esta interpolación.

NOTA: El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT - PICT N° 38109)

Referencias

- Beranek, L.L. "The design of Speech Communication Systems". Proc. Inst. Radio Engrs. (IEEE). Vol 35, pp 880-890, 1947
- Decreto N° 351/79 (reglamentario de la Ley 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo). Buenos Aires, 1972.
- Harris, Cyril M. "Manual de medidas acústicas y control de ruido". McGraw-Hill, España. 1998.
- Miyara, Federico S. "Control de Ruido". En "Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica", ASOLOFAL. Rosario, Argentina, 2000.
- Ley N° 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Buenos Aires, 1972
- Lord, Harold; Gatley, William; Evensen, Harold. "Noise Control for Engineers. McGraw-Hill. New York, 1980.
- Miedema, H.M.E.; Vos, H. "Exposure-response relationships for transportation noise". J. Acoust. Soc. Am.,. 104(6), 1998, pp. 3432-3445.