

Influencia de la temperatura en las medidas del ruido de rodadura realizadas con el equipo CPX en mezclas bituminosas densas

Temperature influence on CPX tyre/road noise measurements on dense bituminous mixtures

Tomás Casas¹, Miguel A. Morcillo² y Laura Parra^{1*}

Palabras clave

ruido de rodadura;
CPX;
influencia de la
temperatura;
mezclas bituminosas
densas;

Sumario

La temperatura influye de forma significativa en la medida del ruido de rodadura, si bien no existe consenso en la cuantificación de este efecto. Durante el periodo de redacción de la norma ISO 11819-2 “Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 2: Método de proximidad”, todavía no aprobada en su versión definitiva, la forma de considerar la influencia de la temperatura en el índice CPXI ha ido variando sustancialmente, desde la no necesidad de corregir hasta la obligatoriedad de hacerlo con índices que han variado desde 0,03 dB(A)/°C hasta 0,05 dB(A)/°C. Hay estudios (como el que nos ocupa), en el que se obtienen coeficientes mayores, de hasta 0,10 ó 0,15 dB(A)/°C. Esta circunstancia implica que al efectuar medidas en un mismo tramo de carretera con una diferencia de temperatura ambiente de 15 °C (lo que no es difícil que suceda a lo largo de un mismo día), se obtienen resultados que sólo por cómo se considere la influencia de la temperatura, pueden diferir hasta en 1,5 dB(A), en función de la corrección efectuada.

Con el objetivo de concienciar sobre la importancia de realizar las medidas del ruido de rodadura de la forma más estándar posible, así como de reunir más información sobre este tema, se decidió realizar un estudio dirigido a determinar la influencia de la temperatura en las medidas realizadas con el equipo CPX en mezclas bituminosas densas. Para ello, el CEDEX y la Fundación CIDAUT han realizado medidas en dos carreteras con este tipo de capa de rodadura a distintas temperaturas ambiente (desde 15 °C a 32 °C).

Keywords

tyre/road noise;
CPX;
temperatura influence;
dense bituminous
mixtures;

Abstract

Temperature has a significant influence on tyre/road noise, but there is no consensus on the quantification of this effect. During the drafting of the ISO 11819-2 “Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 2: The close-proximity method”, not yet approved as an ISO standard, the consideration of temperature influence on the CPXI has varied substantially, from just a recommendation to the obligation to correct the results, with coefficients that have varied from 0.03 dB(A)/°C to 0.05 dB(A)/°C. There are other investigations (such as the present one) that present coefficients even higher, up to 0.10 or 0.15 dB(A)/°C. This fact implies that the results obtained out of measurements carried out on the same stretch of road with a difference of ambient temperature of 15 °C (which is not difficult to happen over one single day), may differ by up to 1.5 dB(A), depending only on the temperature correction applied.

In order to raise awareness of the importance of carrying out road noise measurements in the most standardized possible way, so as to gather more information on this topic, it was decided to conduct a study to determine the influence of temperature on measurements carried out with CPX devices over dense bituminous mixtures. For this purpose, Fundación CIDAUT and CEDEX carried out CPX measurements in this type of road surface layer at different ambient temperatures (from 15 °C to 32 °C).

1. INTRODUCCIÓN

El comité ISO/TC 43/SC 1/WG 33 está encargado de la normalización de los métodos de medida del ruido de rodadura. En concreto, desde el año 2000 aproximadamente, se trabaja en la redacción de la **norma ISO 11819-2 “Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 2: Método de proximidad”**.

El ruido de rodadura está afectado por una serie de condicionantes ambientales, entre ellos, la temperatura (Sandberg, 2004). Para determinar el grado de influencia de esta variable en el ruido de rodadura, dentro del comité de normalización internacional ISO, se designó un grupo de trabajo específico para desarrollar una norma en la que se recoja un procedimiento para la corrección por temperatura del ruido de rodadura (ISO/TC 43/SC 1/WG 27). Sin embargo, a pesar de haberse realizado distintos estudios encaminados a determinar el grado de influencia de la temperatura sobre esta característica de los pavimentos, no existe consenso en la cuantificación de este fenómeno.

* Corresponding author: laura.parra@cedex.es

¹ Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, Madrid, España.

² Fundación CIDAUT (Centro de Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía), Valladolid, España.

De forma general, las características viscoelásticas del medio por el que se propaga el sonido (aire) varían en función de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). En concreto, la temperatura del aire tiene un efecto significativo sobre la velocidad del sonido. En condiciones estándar, a una temperatura de 20 °C las ondas sonoras se desplazan en el aire a 344 m/s, aumentando esta velocidad unos 0,61 m/s por cada incremento de 1 °C de temperatura, es decir, las ondas viajan un 0,18% más rápido. Así mismo, los mecanismos de atenuación del sonido al viajar por el aire también se ven afectados por la temperatura, aunque en este caso, los efectos adquieren relevancia para distancias superiores a las que afectan a nuestro estudio.

Por otro lado, hay que tener en cuenta una serie de consideraciones que afectan de forma específica al estudio del efecto de la temperatura en el ruido de rodadura (neumáticos y pavimento). Por un lado, determinadas propiedades de los neumáticos (histéresis de la goma, dureza) dependen de la temperatura, y por otro lado también hace que se produzcan cambios en las características de la capa de rodadura de los pavimentos. Habría, por tanto, que estudiar de qué manera afecta la temperatura a los distintos mecanismos de generación y propagación del ruido (impacto, procesos aerodinámicos, fenómenos de adhesión), analizando estos efectos para cada conjunto neumático pavimento. Sin embargo, es evidente que usar una corrección para cada conjunto neumático pavimento es inabordable, por lo que se ha planteado una solución del tipo "semigenérica", en la que se define un coeficiente de corrección para varios grupos de neumáticos y para varios grupos de pavimentos.

Otra cuestión que se puede estudiar es qué temperatura puede ser la más adecuada para el análisis de la variación del ruido de rodadura, la del firme, la del ambiente o la del neumático. De forma teórica, la más representativa parece ser la del neumático, pero en la práctica su medida presenta una serie de dificultades que hacen que no resulte interesante emplear esta temperatura. La temperatura ambiente y la del pavimento, en general, se relacionan bastante bien entre sí, por lo que dentro de ISO se ha optado por emplear la temperatura ambiente, por resultar su medida más sencilla.

Dada la influencia de la temperatura en el ruido de rodadura, la norma define el CPXI para una temperatura de referencia de 20 °C. En el caso de que no se mida a dicha temperatura de referencia, el índice debería ser corregido, pero al no existir consenso en cómo afecta la temperatura al ruido de rodadura, tal y como se ha comentado, este punto todavía no se ha podido desarrollar adecuadamente en la norma. De hecho, desde el comienzo de su redacción hasta la fecha, se han propuesto diferentes correcciones por temperatura, teniendo parcialmente en cuenta los resultados obtenidos en distintos estudios llevados a cabo con el objetivo de definir el valor del coeficiente de corrección por temperatura.

A continuación, se hace un poco de historia sobre cómo se ha considerado la influencia de la temperatura en los distintos borradores normativos sobre el método de medida CPX:

En los primeros borradores normativos, se indicaba que los niveles de ruido de rodadura deberían corregirse, frente a una temperatura de referencia del aire de 20 °C, de acuerdo con el procedimiento especificado en la norma

ISO 13471-1, que estaba a su vez en fase de redacción. Sin embargo, hasta que no se aprobara la ISO 13471-1 como una ISO/DIS, solamente se consideraba obligatorio indicar en el informe los niveles no corregidos (ISO/CD 11819-2:2000).

Posteriormente, se introdujo como recomendación que los niveles de presión sonora obtenidos se corrigiesen con un coeficiente de $-0,05 \text{ dB(A)/}^\circ\text{C}$ (ISO/CD 11819-2:2008). Es decir, sumando al índice CPXI, $0,05 \text{ dB(A)}$ por cada grado superior a 20 °C, y restándolo en el caso de que la temperatura fuese inferior a los 20 °C citados.

Probablemente a la vista de los resultados publicados en Estados Unidos en 2009 (Bendtsen et al., 2009), el coeficiente de corrección por temperatura se modificó de $-0,05 \text{ dB(A)/}^\circ\text{C}$ a $-0,03 \text{ dB(A)/}^\circ\text{C}$, y la corrección pasó a ser obligatoria (ISO/CD 11819-2:2011).

Sin embargo, un nuevo estudio realizado en Europa (Bühlmann, 2011), en el que se habían obtenido resultados en los que los coeficientes correctores por temperatura eran notablemente superiores a los medidos por los americanos, hizo que se cuestionara nuevamente el valor de la corrección que se estaba planteando en la norma.

La tabla 1 muestra un resumen de los resultados obtenidos en varios de los estudios citados, en los que se han seguido los criterios anteriormente expuestos (empleo de una corrección del tipo semigenérico y consideración de la temperatura ambiente).

Tabla 1. Resumen de resultados del coeficiente de corrección por temperatura (dB(A)/°C) obtenidos en distintos estudios

Tipo de Capa de Rodadura		Tipo de neumático	Fuente
Densa	Porosa		
-0,06 a -0,12 ^a	-0,04 a -0,06 ^a	Vehículos ligeros	Sandberg (2004)
	0,027 ^b	SRTT	Bendtsen et al. (2009)
	0,03 ^c	SRTT	Sandberg (2009)
-0,10	-0,05	SRTT	Bühlmann (2011)
-0,11	-0,08	Avon AV4	Bühlmann (2011)

^a Este valor depende de la textura del pavimento.

^b Este valor se obtuvo con el método OBSI, pero los autores indican que sería válido para otros métodos empleando este tipo de neumático.

^c El valor de 0,03 se propone basado en la consideración de los autores de que no está justificado el empleo de un tercer decimal, teniendo en cuenta la precisión del método.

En el borrador de la norma que se está tramitando actualmente (ISO/DIS 11819-2:2013), se plantea que los factores de corrección para los neumáticos de tipo P1 (vehículos ligeros) y H1 (vehículos pesados) se den en las especificaciones técnicas ISO/TS 11819-3 e ISO/TS 13471-1. En el caso de usar otro tipo de neumáticos los coeficientes de corrección deberán ser determinados experimentalmente para cada uno de ellos. Hay que tener en cuenta que las especificaciones técnicas a las que se hace referencia, la ISO/TS 11819-3 y la ISO/TS 13471-1 para la determinación de los coeficientes de corrección, todavía no están disponibles en el momento de escribir este artículo.

De todo esto, se deduce que el estudio de cómo afecta la temperatura a la medida del ruido de rodadura no es sencillo. Por ello, y con la intención de aportar más información sobre esta cuestión, el CEDEX y la Fundación CIDAUT

decidieron realizar el presente estudio, referido en concreto al análisis del comportamiento sonoro de mezclas bituminosas densas con respecto a la temperatura.

2. MEDIDA DEL RUIDO DE RODADURA

2.1. Método CPX

Para la realización del ensayo CPX se han seguido las especificaciones contenidas en el **borrador de norma ISO/CD 11819-2:2008, "Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 2: Método de proximidad"**.

El método CPX es el único que permite medir de forma específica el ruido de rodadura en el contacto entre el neumático y el pavimento. Para ello, se miden los niveles de presión sonora con ponderación A, emitidos por una serie de neumáticos específicos al circular por un determinado tramo de carretera. El ruido generado por estos neumáticos es recogido por al menos dos micrófonos situados muy cerca del punto de contacto del neumático con el pavimento. En concreto, la distancia horizontal entre el micrófono y el flanco del neumático debe ser de 20 cm y la altura sobre el pavimento de 10 cm. El eje del micrófono "delantero" debe formar un ángulo de 45° con respecto a la dirección de marcha, y el del micrófono "trasero", un ángulo de 135°.

Los neumáticos utilizados en el ensayo pueden ser montados directamente en un vehículo o en un bastidor remolcado, que a su vez puede estar aislado, o no, del ruido exterior y de las reflexiones, por medio de una cámara semianecoica.

En los tramos auscultados se hacen dos pasadas, a la velocidad de referencia (en general esta velocidad es de 50, 80 o 110 km/h), utilizando dos juegos de neumáticos de referencia (L1 y H1), con el fin de simular el paso de vehículos ligeros y pesados separadamente. Sobre los datos obtenidos se realiza la corrección por velocidad indicada en el borrador de norma, utilizando la fórmula:

$$L_{corr} = L_{med} + B * \text{Log} \left(\frac{V_{ref}}{V} \right)$$

Donde:

L_{corr} = Nivel sonoro corregido por velocidad.

L_{med} = Nivel sonoro medido.

V = Velocidad media.

V_{ref} = Velocidad de medida preseleccionada, en km/h.

B = Constante de velocidad, que por defecto se estima en 35.

El resultado final del ensayo es el Índice **Sonoro de Proximidad** (CPXI, Close Proximity Index), que es una medida ponderada del nivel de presión sonora, medido con los dos tipos de neumáticos, en un determinado tramo de carretera.

El Índice Sonoro de Proximidad (CPXI) se calcula del siguiente modo:

Representando al tráfico de vehículos ligeros:

$$\text{CPXL} = L_{L1} \quad [\text{dB}]$$

Representando al tráfico de vehículos pesados:

$$\text{CPXH} = L_{H1} \quad [\text{dB}]$$

Representando al tráfico total:

$$\text{CPXI} = 0,50 L_{L1} + 0,50 L_{H1} \quad [\text{dB}]$$

Siendo:

CPXL = Índice CPX para el tráfico de vehículos ligeros.

CPXH = Índice CPX para el tráfico de vehículos pesados.

CPXI = Índice CPX para el tráfico total.

L_{L1}, L_{H1} = Niveles de presión sonora del ruido de rodadura, de los neumáticos tipo L1 y H1.

2.2. Equipo de medida del CEDEX

El equipo CPX del CEDEX (figura 1) utiliza un remolque con cámara, en cuyo interior giran libremente las ruedas de referencia, produciéndose el ruido de rodadura al interaccionar neumáticos y pavimento. De esta forma, las condiciones de medida se aproximan a aquellas en las que se produce el ruido en campo libre y, a la vez, se evita la influencia de las demás fuentes de ruido circundantes.

La cámara del remolque se subdivide en dos cámaras semianecoicas independientes, con objeto de medir, simultáneamente, el ruido de rodadura en las dos rodadas del carril (figura 2). La disposición de los micrófonos se indica en la figura 3, conforme al proyecto de norma ISO/CD 11819-2:2008.

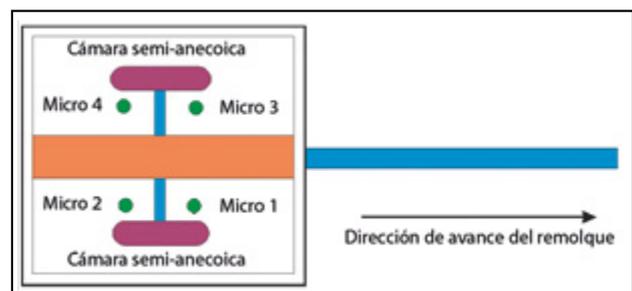


Figura 2. Esquema del remolque del equipo CPX del CEDEX.



Figura 1. Equipo CPX del CEDEX. Vista general y detalles.

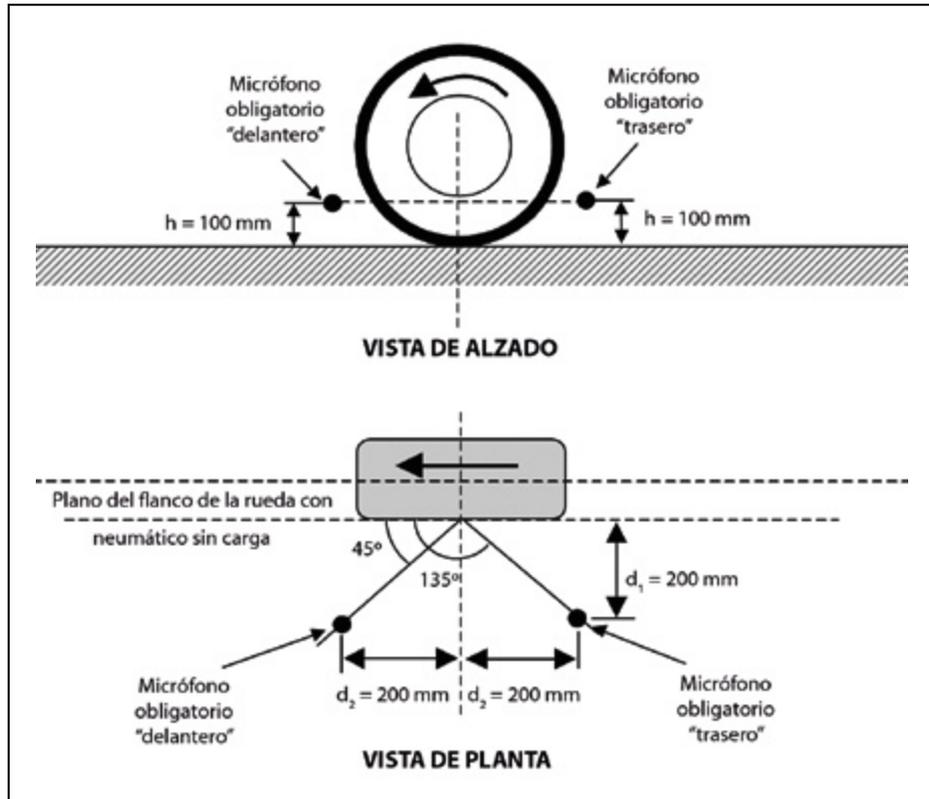


Figura 3. Esquema de los micrófonos del equipo CPX del CEDEX.

Los neumáticos de medida empleados por el equipo CPX del CEDEX son los recomendados por el Grupo de Trabajo ISO/TC43/SC1/WG33: Uniroyal, Tigerpaw, 225/60-R16 (SRTT), representativo de vehículos ligeros, y Avon, Supervan AV4, 195-R14C, representativo de vehículos pesados (Morgan, 2008). En el futuro, las especificaciones sobre los neumáticos de medida estarán recogidas en la norma ISO/TS 11819-3 “Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 3: Neumáticos de referencia”, en proceso de elaboración.

2.3. Equipo de medida de la Fundación CIDAUT

La Fundación CIDAUT utiliza para las medidas según el método CPX un vehículo autopropulsado (Toyota Auris) con los micrófonos de medida colocados en la rueda trasera izquierda según recoge la norma. Como el neumático SRTT recomendado por el Grupo de Trabajo ISO/TC43/SC1/WG33 no puede ser montado en el vehículo, se realizan los ensayos con un neumático con una dureza similar del mismo fabricante. Las características del neumático

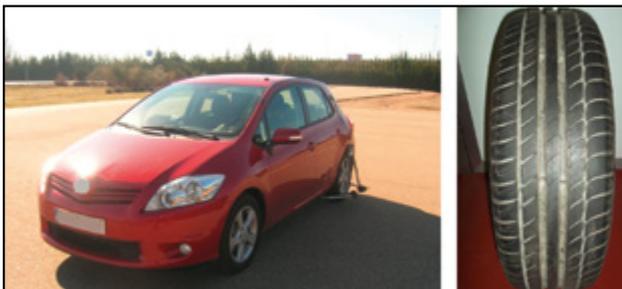


Figura 4. Detalle del sistema de medida CPX con vehículo autopropulsado según considera el método ISO 11819-2. Detalle del neumático usado Michelin Primacy HP 205-55 R16 en las medidas.

son Michelin Primacy HP 205-55 R16 (figura 4). La velocidad y la distancia recorrida son medidas mediante un sistema GPS colocado en el vehículo que proporciona datos con una frecuencia de 10 Hz.

3. PROGRAMA DE ENSAYOS

Se han realizado medidas en las carreteras M-608 y M-616 en la Comunidad de Madrid, según el programa de ensayos que se describe a continuación.

3.1. Carretera M-608

Los equipos del CEDEX y de la Fundación CIDAUT realizaron medidas de ruido de rodadura el día 6 de julio de 2011, en la carretera M-608, entre los puntos kilométricos 0+500 y 1+000 (figura 5).



Figura 5. Plano situación tramo en carretera M-608.

La carretera M-608 consta de una calzada única y se realizaron las medidas en los dos carriles a las velocidades

de 80 y 100 km/h. La capa de rodadura es del tipo AC16 surf D. Con el objetivo de tomar datos con el mayor rango de temperaturas posible, se efectuaron tres tandas de medidas a lo largo de la mañana (figura 6).



Figura 6. Imágenes de la carretera M-616 durante las medidas y de la superficie de rodadura.

3.2. CARRETERA M-616

El equipo del CEDEX realizó medidas de ruido de rodadura los días 27 de abril y 1 de julio de 2011, en la carretera M-616, entre los puntos kilométricos 1+000 y 3+000 (figura 7). Esta carretera es de doble calzada y se realizaron las medidas en el carril derecho de ambas calzadas a las velocidades de 50 y 80 km/h. La capa de rodadura es del tipo AC22 surf D.



Figura 7. Plano de situación carretera M-616.

En esta carretera se determinaron cuatro tramos (tabla 2). Se realizaron dos tandas de medidas a lo largo de cada jornada con el objetivo de tomar datos abarcando un amplio rango de temperaturas.

Tabla 2. Tramos de la carretera M-616

Tramo	pk ini	pk fin	longitud (m)
1	1+205	1+725	0,520
2	2+580	3+000	0,420
3	3+000	2+580	0,420
4	1+725	1+205	0,520

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Las medidas se han realizado siguiendo el borrador de norma ISO/CD 11819-2:2008, "Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 2: Método de proximidad".

En la carretera M-608 las mediciones se han realizado en tres momentos del día con temperaturas distintas y en la carretera M-616 en dos. En cada medición, se han efectuado dos pasadas con cada uno de los neumáticos (SRTT y Avon AV4 en el equipo CPX del CEDEX;

Michelin en el equipo de la Fundación CIDAUT) y a distintas velocidades (80 y 100 km/h en la M-608; 50 y 90 km/h en la M-616).

Una vez calculados los índices CPX, se han promediado los valores de todos los tramos y rodadas, obteniendo un único valor, para cada velocidad, de estos índices a una temperatura determinada.

Los datos obtenidos en las distintas tandas de medida efectuadas se han correlacionado con la temperatura ambiente, siguiendo las indicaciones del comité ISO/TC43/SC1/WG33. Los coeficientes de la variable x (que serían las pendientes de las rectas de regresión), se corresponden con los coeficientes de corrección por temperatura, pues representan los incrementos de los índices CPX por grado de temperatura.

Para cada neumático utilizado y para cada tanda de medida realizada a las diferentes velocidades, se representa el gráfico de espectros en tercios de octava.

Por último, se representa el gráfico de la contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia, para ver su distribución espectral. Este gráfico se crea a partir del incremento total de cada una de las bandas de frecuencia, dividido por el incremento total de temperatura.

4.1. CARRETERA M-608

En esta carretera se realizaron medidas con los equipos del CEDEX y de la Fundación CIDAUT (julio de 2011) a tres temperaturas distintas. La temperatura ambiente se midió con un termómetro de mercurio y la temperatura de la superficie del firme con uno de infrarrojos. Los valores medios a los que se realizaron las tres tandas de medidas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de temperaturas medias en la carretera M-608

	Temperatura aire (°C)	Temperatura firme (°C)
Tanda 1	21,4	28,2
Tanda 2	24,1	35,6
Tanda 3	27,6	46,7

4.1.1. Equipo CPX del CEDEX

En la tabla 4 se muestran los coeficientes de corrección por temperatura de los índices CPX obtenidos para la velocidad de 80 km/h y 100 km/h. Los coeficientes de corrección para los índices CPXL y CPXH, muestran cómo influye la temperatura en el valor obtenido del CPX al utilizar cada uno de los neumáticos, el SRTT y Avon AV4, representantes de vehículos ligeros y pesados respectivamente; el índice CPXI es el resultado global, media de los dos anteriores.

Tabla 4. Coeficientes de corrección por temperatura dB(A)/°C obtenidos en la carretera M-608 (equipo CPX del CEDEX)

	Velocidad (km/h)	
	80	100
C_t CPXI	-0,16	-0,10
C_t CPXL	-0,15	-0,09
C_t CPXH	-0,17	-0,12

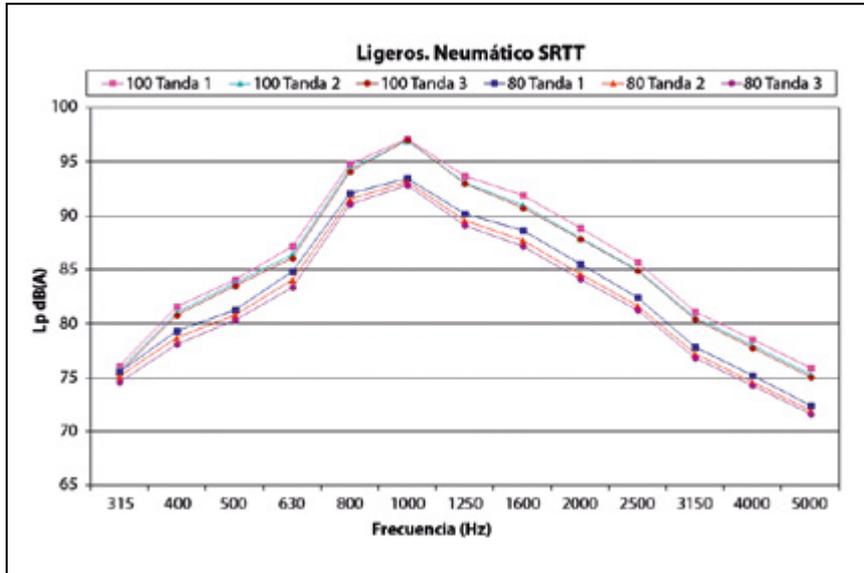


Gráfico 1. Espectros en tercios de octava de neumáticos SRTT, en la carretera M-608 (equipo CPX del CEDEX).

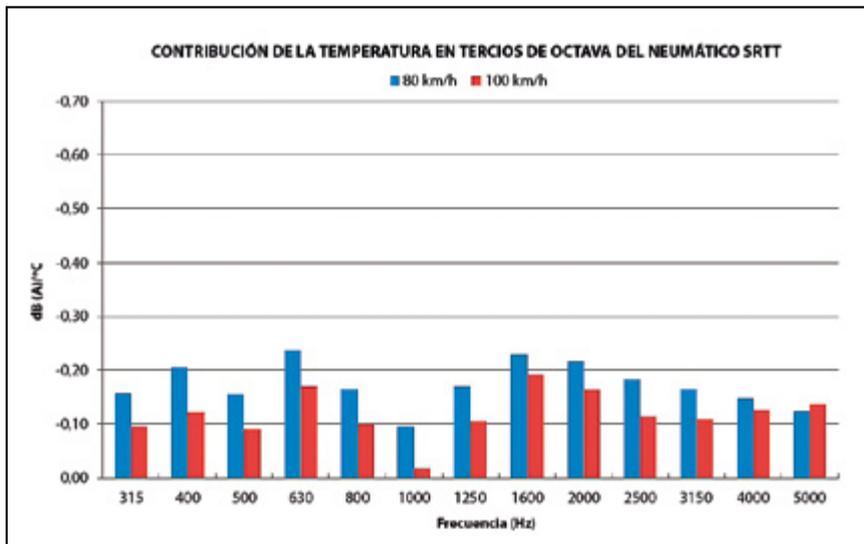


Gráfico 2. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos SRTT, en la carretera M-608 (equipo CPX del CEDEX).

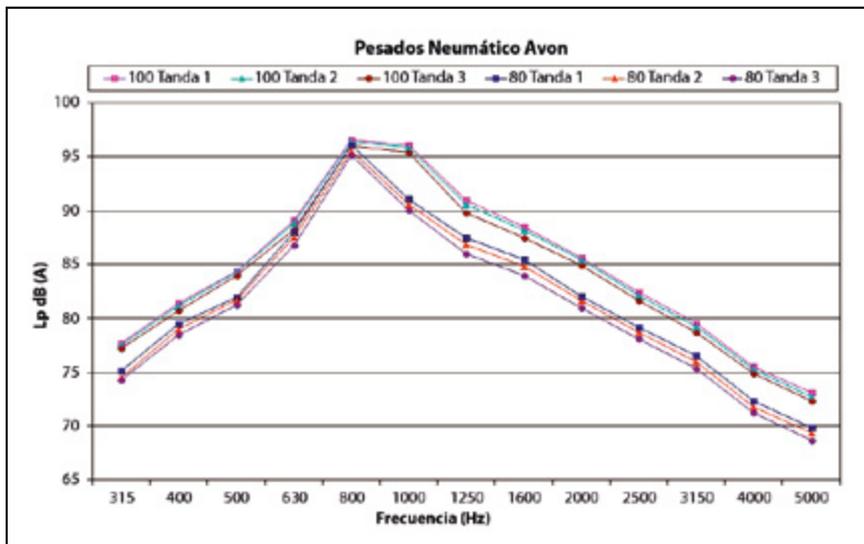


Gráfico 3. Espectros en tercios de octava de neumáticos Avon AV4, en la carretera M-608 (equipo CPX del CEDEX).

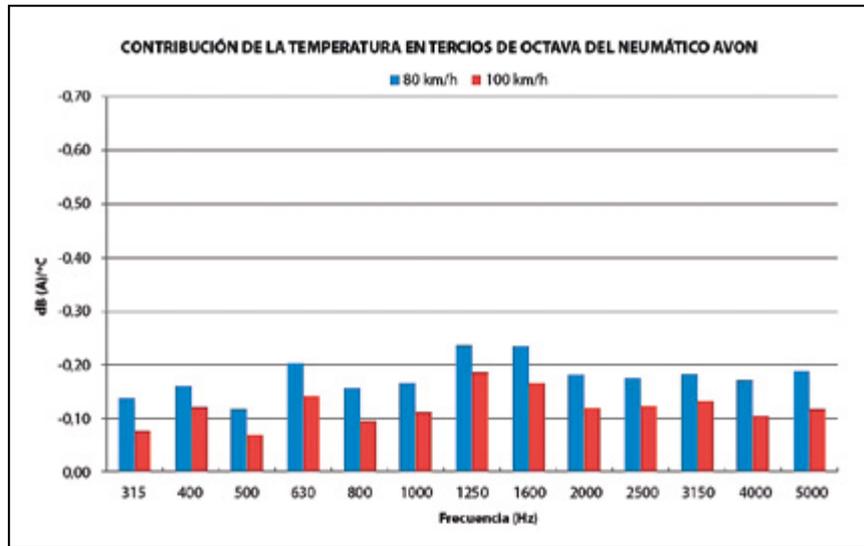


Gráfico 4. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos Avon AV4, en la carretera M-608 (equipo CPX del CEDEX).

En el gráfico 1 se muestran los espectros medidos en tercios de octava para los neumáticos de vehículos ligeros (SRTT) registrados durante la prueba.

A partir de estas medidas y con los valores de temperatura se pueden extraer los coeficientes de correlación para cada una de las frecuencias centrales de los tercios de octava considerados. Se muestra en el gráfico 2 su contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia, para el neumático SRTT.

De manera similar, en el gráfico 3 se muestran los espectros en tercios de octava y en el gráfico 4 su contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia obtenidos para el neumático de vehículos pesados Avon AV4.

4.1.2. Equipo CPX de la Fundación CIDAUT

En la tabla 5 se muestran los coeficientes de corrección por temperatura del índice CPXL obtenidos

con el vehículo autopropulsado de la Fundación CIDAUT, correspondientes al neumático de vehículos ligeros, para las velocidades de 80 y 100 km/h. En el gráfico 5 se muestran los espectros en tercios de octava.

Tabla 5. Coeficientes de corrección por temperatura dB(A)/°C obtenidos en la carretera M-608 (equipo CPX de la Fundación CIDAUT)

	Velocidad (km/h)	
	80	100
C_{CPXL}	-0,11	-0,10

De igual manera, se han calculado las contribuciones para cada una de las bandas en frecuencia utilizando los datos de temperatura registrados (gráfico 6).

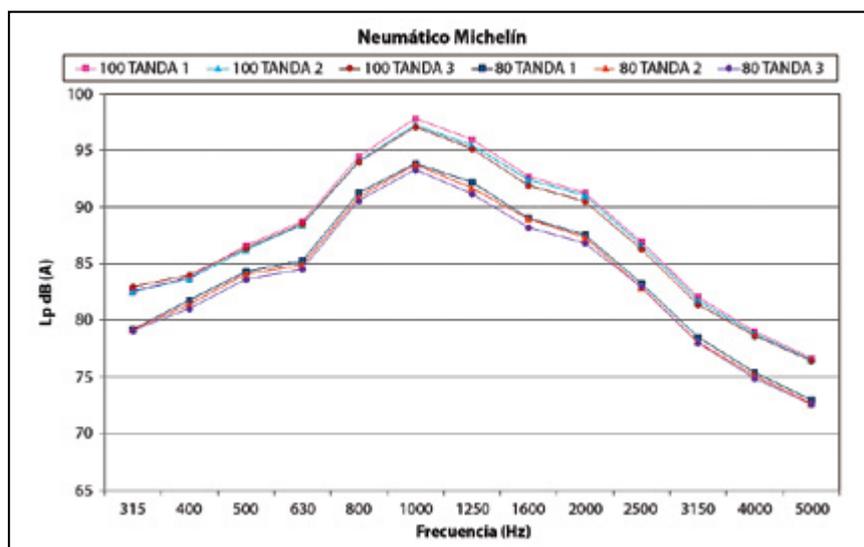


Gráfico 5. Espectros en tercios de octava con neumáticos de vehículo ligero, en la carretera M-608 (equipo CPX de la Fundación CIDAUT).

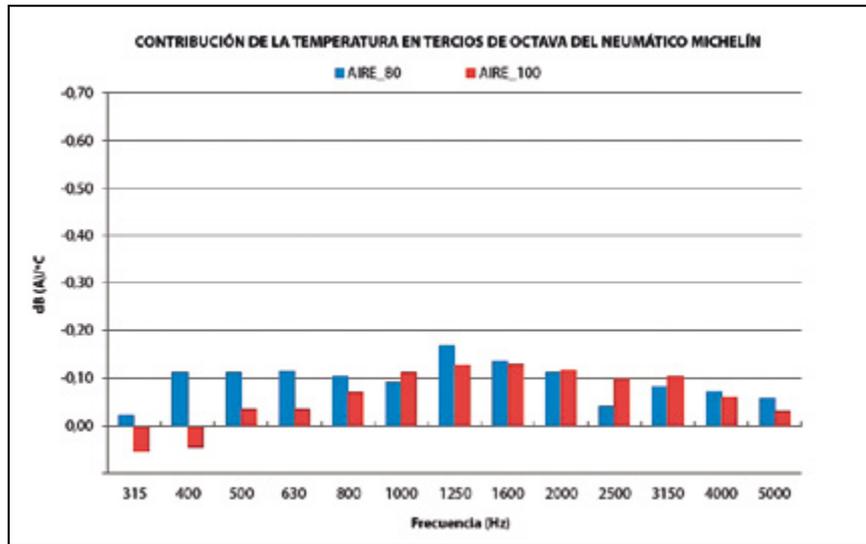


Gráfico 6. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos de vehículos ligeros, en la carretera M-608 (equipo de la Fundación CIDAUT).

4.2. CARRETERA M-616

En esta carretera se realizaron medidas solamente con el equipo CPX del CEDEX. La temperatura ambiente se midió con un termómetro de mercurio y la temperatura de la superficie del firme con uno de infrarrojos. Los valores medios a los que se realizaron las tandas de medidas de las dos campañas (abril de 2011 y julio de 2011) se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de temperaturas medias en la carretera M-616

Medidas de Abril		
	Temperatura aire (°C)	Temperatura firme (°C)
Tanda 1	15	17
Tanda 2	22	33
Medidas de Julio		
	Temperatura aire (°C)	Temperatura firme (°C)
Tanda 1	27	31
Tanda 2	32	45

Puesto que las dos campañas de medidas en este tramo de carretera se realizaron con una diferencia de tiempo relativamente importante (abril de 2011 y julio de 2011), no parece razonable realizar un análisis conjunto de los resultados de ambas medidas y se ha optado por hacerlo de forma separada.

4.2.1. Medidas de abril de 2011 (CEDEX)

En la tabla 7 se muestran los coeficientes de corrección por temperatura de los índices CPX para la velocidad de 50 km/h y 80 km/h. Los coeficientes de corrección para los índices CPXL y CPXH, muestran cómo la temperatura influye sobre el ruido de rodadura generado por cada uno de los neumáticos utilizados, SRTT y Avon AV4, representantes de vehículos ligeros y pesados respectivamente. El coeficiente de corrección del índice CPXI se obtiene como promedio de los dos anteriores y muestra la influencia total de la temperatura en la medida.

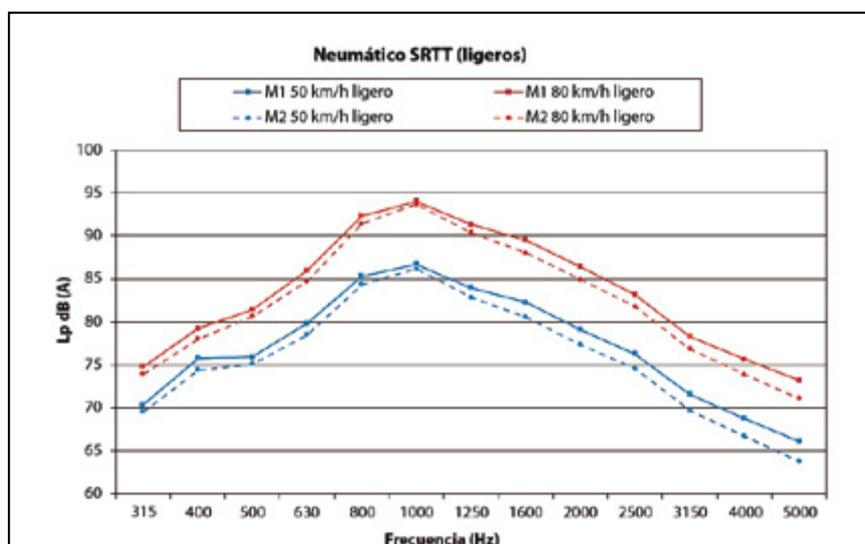


Gráfico 7. Espectros en tercios de octava de neumáticos SRTT, en la carretera M-616 (Abril 2011).

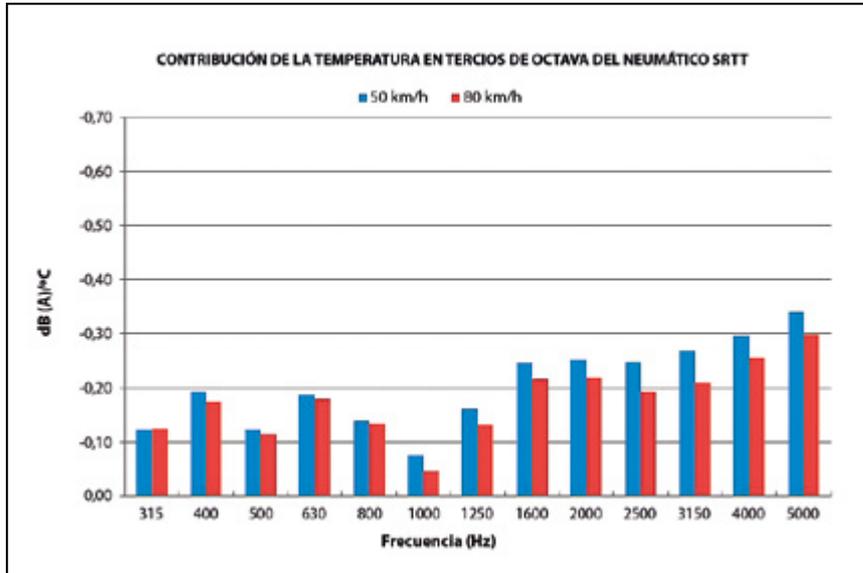


Gráfico 8. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos SRTT, en la carretera M-616 (Abril 2011).

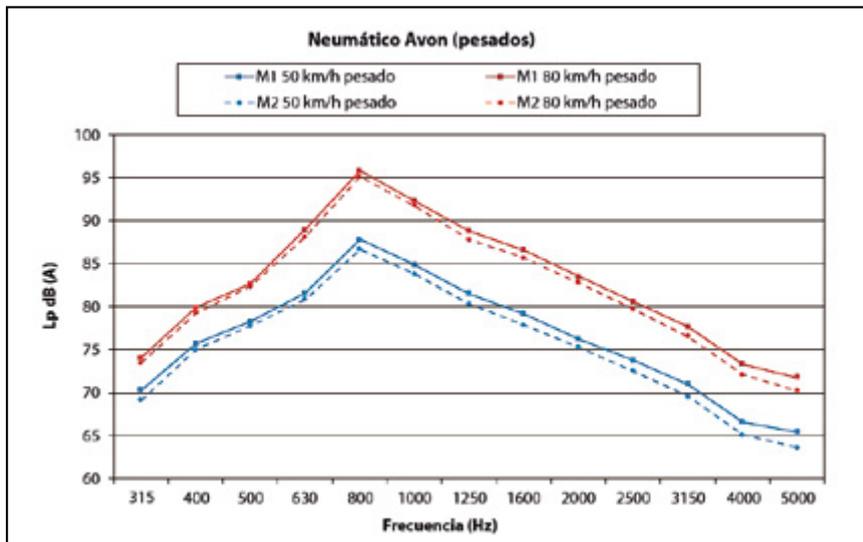


Gráfico 9. Espectros en tercios de octava de neumáticos Avon AV4, en la carretera M-616 (Abril 2011).

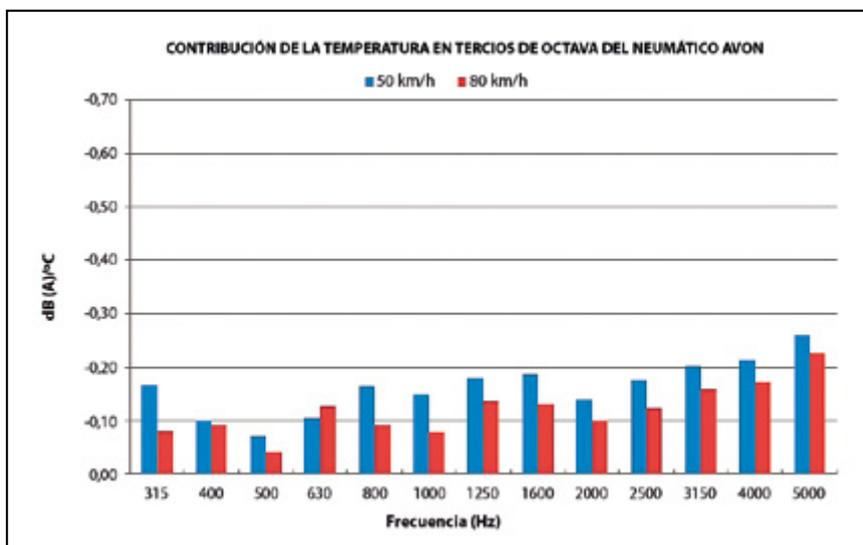


Gráfico 10. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos Avon AV4, en la carretera M-616 (Abril 2011).

En el gráfico 7 se muestran los espectros en tercios de octava y en el gráfico 8 su contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia, para el neumático SRTT.

Tabla 7. Coeficientes de corrección por temperatura dB(A)/°C obtenidos en la carretera M-616 (Abril 2011)

	Velocidad (km/h)	
	50	80
C _t CPXI	-0,15	-0,11
C _t CPXL	-0,15	-0,12
C _t CPXH	-0,15	-0,10

En el gráfico 9 se muestran los espectros en tercios de octava y en el gráfico 10 su contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia, para el neumático Avon AV4.

4.2.2. Medidas de julio de 2011 (CEDEX)

El mismo análisis realizado con los datos tomados en abril de 2011 se ha hecho a partir de las medidas efectuadas en julio de 2011.

Los coeficientes de corrección obtenidos para los índices CPXL, CPXH y CPXI, a 50 km/h y 80 km/h, se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes de corrección por temperatura dB(A)/°C obtenidos en la carretera M-616 (Julio 2011)

	Velocidad (km/h)	
	50	80
C _t CPXI	-0,19	-0,12
C _t CPXL	-0,16	-0,11
C _t CPXH	-0,22	-0,12

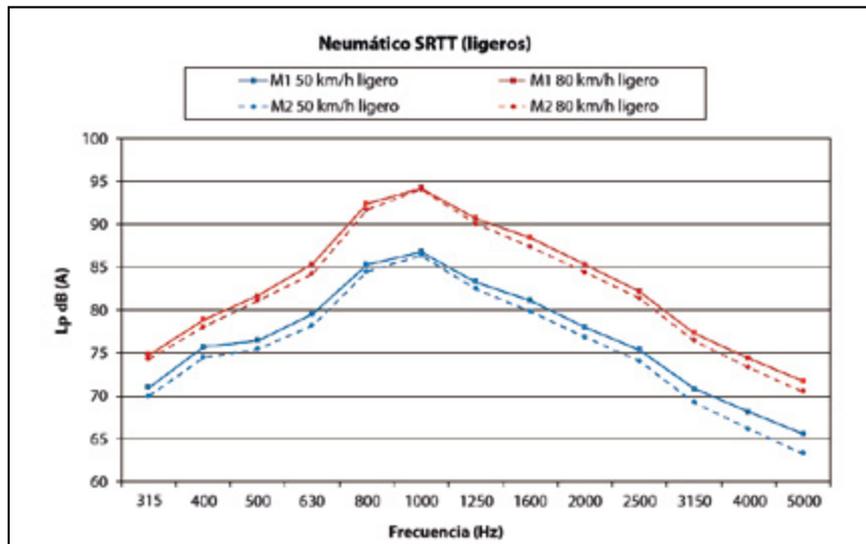


Gráfico 11. Espectros en tercios de octava de neumáticos SRTT, en la carretera M-616 (Julio 2011).

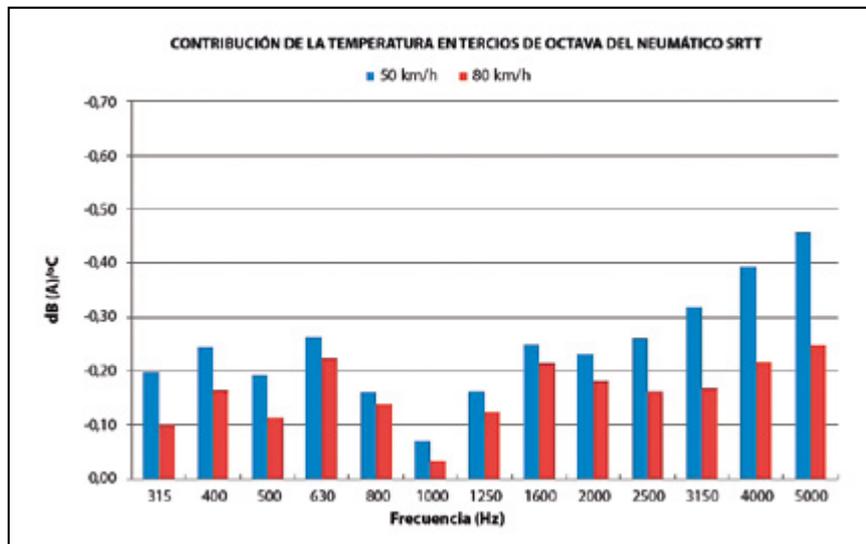


Gráfico 12. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos SRTT, en la carretera M-616 (Julio 2011)

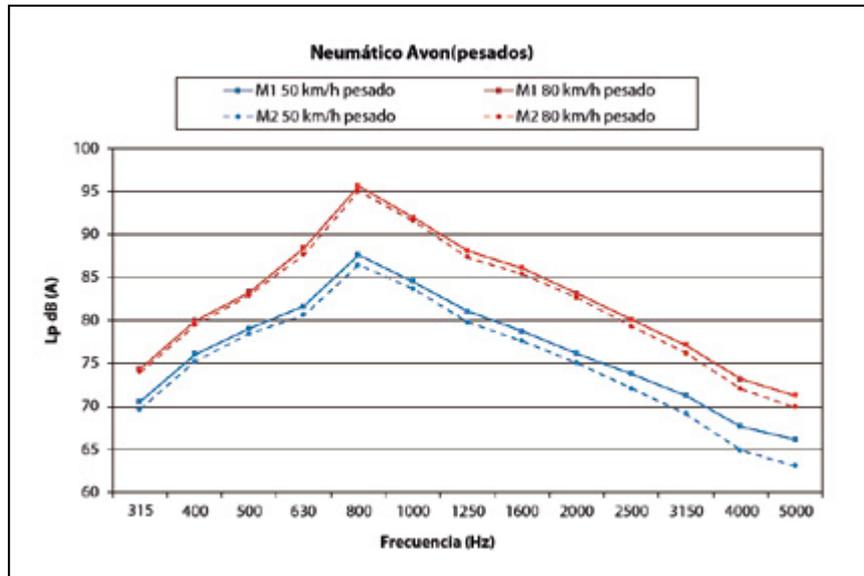


Gráfico 13. Espectros en tercios de octava de neumáticos Avon AV4, en la carretera M-616 (Julio 2011).

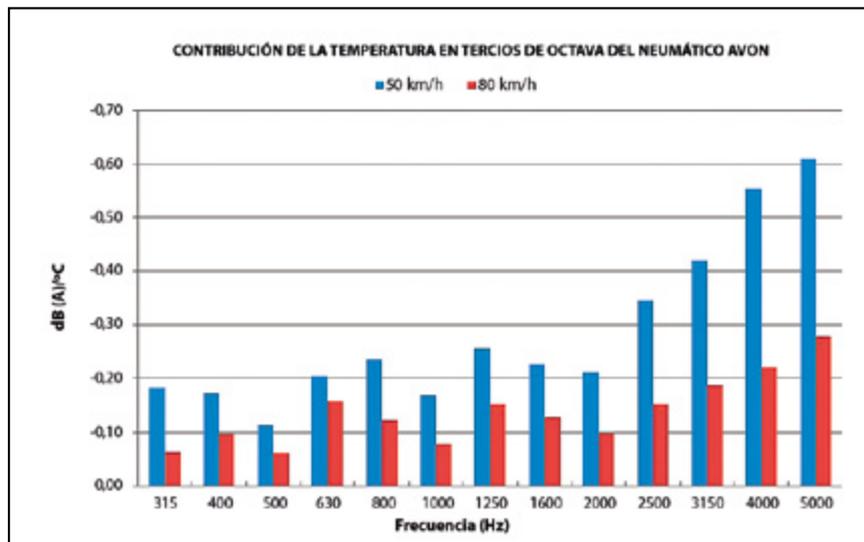


Gráfico 14. Contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia para neumáticos Avon AV4, en la carretera M-616 (Julio 2011).

En el gráfico 11 se muestran los espectros en tercios de octava y en el gráfico 12 su contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia, para el neumático SRTT.

Por último, en el gráfico 13 se muestran los espectros en tercios de octava y en el gráfico 14 su contribución en dB(A)/°C en cada una de las bandas de frecuencia, para el neumático Avon AV4.

5. RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La tabla 9 muestra los coeficientes de corrección por temperatura de los índices CPXL, CPXH y CPXI obtenidos en las carreteras M-608 y M-616, tanto con el equipo CPX del CEDEX como con el de la Fundación CIDAUT. El valor medio del coeficiente de corrección por temperatura del índice CPXI (calculado como la media de los valores sombreados en la tabla 9) en mezclas bituminosas densas resulta ser de -0,17, -0,13 y -0,10 dB(A)/°C, a las velocidades de 50, 80 y 100 km/h, respectivamente.

De los resultados obtenidos en estos ensayos, se extraen las siguientes conclusiones:

Se han medido valores del coeficiente de corrección desde -0,09 hasta -0,22 dB(A)/°C. Estos incrementos en función de la temperatura son, en todos los casos, superiores a los que propone la norma.

El coeficiente de corrección por temperatura para neumáticos ligeros medido con el equipo CPX del CEDEX y con el de la Fundación CIDAUT son similares: a la velocidad de 80 km/h el coeficiente medido por el equipo remolcado (CEDEX) es algo mayor que el medido por el equipo autopropulsado (Fundación CIDAUT), mientras que a la velocidad de 100 km/h son prácticamente iguales.

El coeficiente de corrección medio por temperatura del índice CPXI en capas de rodadura de tipo denso es mayor para velocidades más reducidas. A diferencia de lo encontrado en este estudio, Jabben (2011) indicaba que a mayor velocidad el coeficiente corrector en vehículos ligeros es mayor.

Tabla 9. Coeficientes de corrección por temperatura dB(A)/°C, de los índices CPXL, CPXH y CPXI obtenidos por los equipos del CEDEX y CIDAUT en todas las carreteras analizadas

		Datos CEDEX			Datos CIDAUT	
		Velocidad (km/h)			Velocidad (km/h)	
		50	80	100	80	100
M-608 (julio)	C _i CPXI		-0,16	-0,10		
	C _i CPXL		-0,15	-0,09	-0,11	-0,10
	C _i CPXH		-0,17	-0,12		
M-616 (abril)	C _i CPXI	-0,15	-0,11			
	C _i CPXL	-0,15	-0,12			
	C _i CPXH	-0,15	-0,10			
M-616 (julio)	C _i CPXI	-0,19	-0,12			
	C _i CPXL	-0,16	-0,11			
	C _i CPXH	-0,22	-0,12			

El coeficiente de corrección es, en general, mayor para las medidas realizadas con neumáticos representativos de vehículos pesados que con vehículos representativos de vehículos ligeros, contrariamente a lo recogido por Bendtsen et al. (2010) y Jabben (2011). En concreto, Jabben (2011) indicaba que para vehículos pesados, no se ha encontrado una dependencia significativa del ruido de rodadura con la velocidad.

La contribución en tercios de octava debido al neumático ligero tiene forma de valle, con el valor mínimo en torno a la banda de 1000 Hz. Sin embargo se hace notar que como el espectro tiene su nivel máximo en la banda de 1000 Hz, es este valor mínimo el que más contribuye en el incremento global, al realizar la suma logarítmica para hallar el valor global del índice CPXL y CPXH, y por tanto del índice CPXI.

La contribución en tercios de octava debido al neumático pesado es más uniforme, aunque, en general, es mayor en las bandas altas. Como en el caso anterior los valores que más influyen en el incremento global, son los de las bandas centrales.

Como se puede observar, las conclusiones a las que se ha llegado difieren de lo recogido por otros estudios (Bendtsen et al., 2010; Jabben, 2011), lo cual es indicativo de que hay mucha variabilidad en los resultados que se obtienen. Por todo ello, los coeficientes de corrección obtenidos deberían tomarse con precaución y ser completados con nuevos estudios, por ejemplo, con datos medidos en capas de rodadura de otros tipos.

Parece claro que los coeficientes de corrección que deben emplearse son superiores a los que se proponen actualmente en el borrador de norma. En cualquier caso, la medida a distintas temperaturas introduce un factor adicional de incertidumbre muy significativo, por lo que es importante medir en condiciones estándar, de forma que se minimicen las posibles fuentes de error adicionales a los de la propia medida. Se recomienda que las medidas

con el equipo CPX se hagan siempre a temperaturas lo más cercanas posible a la temperatura ambiente de referencia (20 °C). Así mismo, en los informes de resultados deberían incluirse siempre las medidas tanto corregidas como sin corregir.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bendtsen, H.; Kohler, E.; Lu, Q.; Rymer, B. (2009) Temperature influence on noise measurements. Proc. of EuroNoise 2009, Edinburgh, United Kingdom.

Bendtsen, H; Kohler, E.; Lu, Q. (2010) Temperature Influence on Road Traffic Noise: Californian OBSI Measurement Study. CALTRANS. USA.

Bühlmann, E.; Ziegler, T. (2011). Temperature effects on tyre/road noise measurements. Internoise 2011. Osaka, Japan.

Harris, C. M. (1998) Manual de medidas acústicas y control del ruido. Ed. Mc Graw Hill.

ISO/CD 11819-2:2008 Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 2: Método de proximidad.

ISO/DIS 11819-2:2013. Método para medir la influencia de las superficies de las carreteras en el ruido del tráfico. Parte 2: Método de proximidad.

Jabben, J. (2011) Temperature effects on road traffic noise measurements. Internoise 2011. Osaka, Japan.

Morgan, P. (2008) Technical Note: The selection of new reference test tyres for with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3.

Sandberg, U. (2004) Semi-generic temperature corrections for tyre/road noise. Internoise 2004, Prague, Czech Republic.

Sandberg, U.; Ejsmont, J. A. (2009) Keeping reference tyres and other tyres stable with respect to noise emission. Proc. of EuroNoise 2009, Edinburgh, United Kingdom.