



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## EVOLUCIÓN DEL RUIDO NEUMÁTICO/PAVIMENTO EN CIUDAD REAL. MAPAS DE RUIDO DE RODADURA

PACS: 43.50 Lj

Fernández Vázquez, Victoriano; Terán Sierra, Fernando J.; Huertas Gallardo, Pedro; Expósito Paje, Santiago  
Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil. Universidad de Castilla-La Mancha  
Avda. Camilo José Cela s/n  
13071 Ciudad Real, España  
Tel: 926 295 300  
E-mail: Victoriano.fernandez@uclm.es

**Palabras clave:** Ruido de rodadura; Mapas Estratégicos de Ruido; CPX; Macrotextura

### ABSTRACT

Road traffic and environmental noise are highly related in urban landscapes. Pavement damages contribute to increase noise levels. This work presents the acoustic and superficial geoauscultation of several urban sections of Ciudad Real. The field assesment has been carried out in three different campaigns (during seven years), in order to evaluate the evolution of each surface over time. The results allow us to elaborate the so-called Rolling Noise Maps, as well as to estimate the theoretical levels of environmental noise, produced only by geometric spreading of sound energy.

### RESUMEN

El nivel sonoro en entornos urbanos está generalmente relacionado con el tráfico rodado. El deterioro de la capa superficial del pavimento contribuye a aumentar los niveles de ruido. Este trabajo presenta la geoauscultación acústica y superficial de varios tramos urbanos de Ciudad Real. La auscultación se ha realizado en tres campañas diferentes en un intervalo de siete años, con el fin de evaluar la evolución de cada superficie con el tiempo. Los resultados permiten elaborar los denominados Mapas de Ruido de Rodadura, así como estimar los niveles teóricos de ruido ambiental, producidos únicamente por dispersión geométrica de la energía sonora.

### INTRODUCCION

El ruido ambiental es un tipo de contaminación que produce afecciones sobre la salud de la población que lo sufre, especialmente cuando los valores exceden ciertos límites. Con el objetivo de reducir el número de afectados por este tipo de contaminación, y generar entornos urbanos más sostenibles y medioambientalmente amigables, la Directiva Europea 2002/49/CE indica los casos en los que será necesario elaborar Mapas Estratégicos de Ruido, así como elaborar los denominados Planes de Acción contra el Ruido.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Dentro del ruido ambiental cobra una gran importancia el producido por las infraestructuras del transporte, especialmente el tráfico rodado por carretera. Debido a su alta implantación en el territorio, así como al volumen de desplazamientos tanto urbanos como interurbanos. El ruido producido por un vehículo en movimiento está generado principalmente por tres mecanismos: el ruido aerodinámico, el ruido motor y el ruido producido por el contacto neumático/pavimento [1]. Este último, denominado ruido de rodadura, es el dominante en el caso de turismos desplazándose a velocidades superiores a 40 km/h [2], es decir, la mayor parte de los casos de desplazamientos urbanos e interurbanos. El ruido de rodadura es el principal objeto de estudio de este trabajo.

En este trabajo se presenta la evolución del ruido de rodadura de seis tramos urbanos localizados en la localidad de Ciudad Real (Figura 1). Los tramos estudiados se encuentran dentro de los casos en los que, según la Directiva Europea, deben realizarse Mapas Estratégicos de Ruido debido al volumen de tráfico que circula por ellos (Figura 1). Los tramos se han evaluado acústicamente durante un periodo de siete años (2008, 2013 y 2015), con el objetivo de conocer la evolución de su comportamiento acústico, así como de su macrotextura.

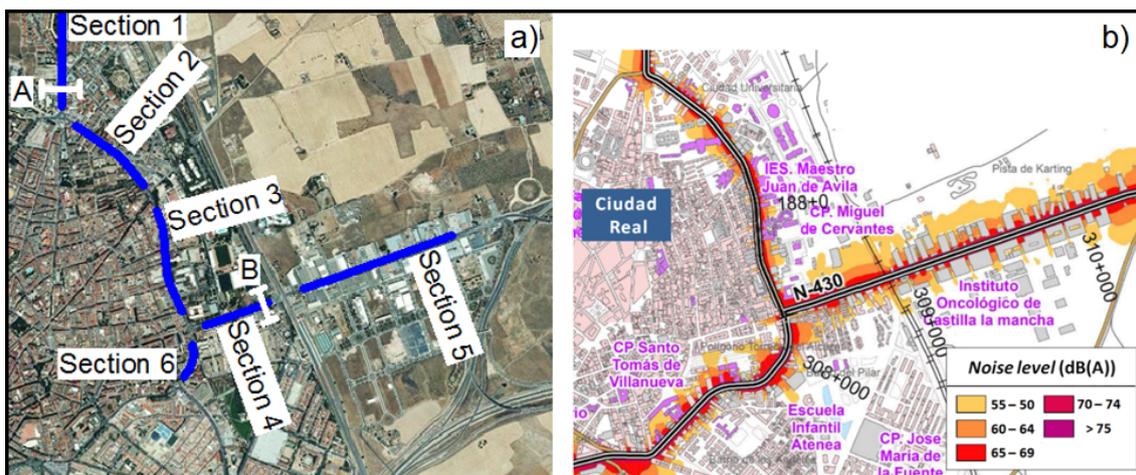


Fig.1: Secciones estudiadas (a) y Mapa Estratégico de Ruido 2012 [3] (b).

A partir de los datos obtenidos durante la auscultación acústica, este trabajo presenta, para uno de los tramos, los mapas de ruido ambiental “teóricos”, basados en la propagación espacial de la energía sonora, desde el punto de generación (contacto neumático/pavimento).

La elaboración de estos mapas se basa en la dispersión geométrica de la energía sonora debida a la expansión de los frentes de onda acústica. Considerando que el tráfico en las secciones estudiadas se comporta como una fuente lineal de sonido, y que el sonido se propaga de igual forma en todas direcciones, podemos considerar una dispersión cilíndrica de la energía sonora. En este caso, la intensidad del sonido está relacionada con la potencia de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I = P^2(r)/(\rho \cdot c) = \text{Power}/\text{Area} = W/(2 \cdot \pi \cdot r \cdot H)$$

Donde  $I$  es la intensidad de sonido ( $W/m^2$ );  $P(r)$  es la presión sonora ( $N/m^2$ ) a la distancia  $r$  (m);  $\rho$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ );  $c$  es la velocidad del sonido en el aire;  $W$  es la potencia de la fuente ( $W$ ); y  $H$  es la longitud (m) de la fuente sonora.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Por otro lado, el nivel de presión sonora, expresado en escala logarítmica, está dado por:

$$L_p(r) = 10 \cdot \log (P^2(r)/(P_0)^2)$$

Donde  $P_0$  es la presión sonora en el umbral de audición ( $20 \times 10^{-6}$  Pa). Teniendo en cuenta las expresiones anteriores, la diferencia entre el nivel de presión sonora a una distancia  $d$  ( $L_p(d)$ ) (distancia entre los micrófonos con los que se realiza el registro sonoro y la zona de generación - interacción neumático/pavimento) y una distancia cualquiera  $r$  ( $L_p(r)$ ), puede expresarse como:

$$L_p(d) - L_p(r) = 10 \cdot \log (r/d)$$

A partir de la expresión anterior determinamos las distancias  $r$  correspondientes a las isófonas de los mapas de ruido (75 dB(A), 70 dB(a), 65 dB(A), ...)

Por último, se ha determinado la distancia desde la fuente (carretera) a las isófonas a una altura de 4 m sobre la superficie de la carretera, similar a la considerada en la elaboración de los Mapas Estratégicos de Ruido (Fig. 2).

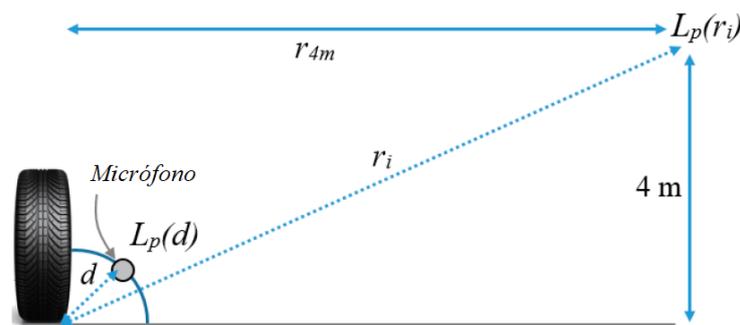


Fig.2: Relación entre la distancia reducida ( $r_{4m}$ ) y distancia ( $r_i$ ) desde la fuente sonora.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

### Tiresonic Mk4-LA<sup>2</sup>IC

Equipo compuesto por una cámara semianecoica en el interior de la cual se dispone un neumático de referencia y dos micrófonos a distancia y ángulo determinado con respecto al neumático [4]. Gracias a la cámara semianecoica, el equipo puede registrar el ruido producido en la interacción neumático/pavimento sin que las medidas se vean alteradas por el registro de otros ruidos externos (ruido por viento, por el vehículo tractor, por otros vehículos circulando en las inmediaciones...), ya que las mediciones se realizan en condiciones reales de circulación.

### LaserDynamicPG-LA<sup>2</sup>IC

Equipo compuesto por un perfilómetro láser para el registro del perfil longitudinal de la carretera y la determinación de parámetros de caracterización superficial de la misma como la MPD (Mean Profile Depth; caracterización de la macrotextura) [5]. La textura superficial de la capa de rodadura es una de las principales responsables del nivel sonoro generado en la interacción neumático/pavimento. Su importancia es aún mayor en las bajas frecuencias y está relacionada con el ruido producido por impactos y vibraciones del neumático [1].

Tanto el equipo Tiresonic Mk4-LA<sup>2</sup>IC como el LaserDynamicPG-LA<sup>2</sup>IC realizan la toma de datos georeferenciada (coordenadas GPS). Con el objetivo de caracterizar la misma trayectoria sobre la vía auscultada. El perfilómetro láser se coloca en la parte frontal del vehículo, mientras que la cámara semianecoica se ubica en la parte trasera del mismo.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre



Fig. 3. Equipos empleados en la auscultación: Tiresonic MK4-LA<sup>2</sup>IC y LaserDynamicPG-LA2IC

### SECCIÓN EXPERIMENTAL: MATERIALES

Todas las secciones estudiadas en este trabajo son secciones urbanas, fabricadas con distintos tipos de mezcla bituminosa y con distinta antigüedad. Las características de cada sección se indican en la [Tabla 1](#). Por otro lado, los usos de suelo adyacentes a los tramos se indican en la [Fig. 4](#).

Tabla 1. Características de las secciones estudiadas

Sección	Tramo	Tipo de mezcla	Edad (años)	Veh./día
1	N-401 Ctra.Toledo	Lechada Bit.	> 3	6.200
2	N-430C Ronda Toledo	Lechada Bit.	> 10	-
3	N-430C Ronda Calatrava	Lechada Bit.	> 10	-
4	N-430 Travesía	Hormigón Bit. (AC)	> 8	11.157
5	N-430 Ctra. Carrion	Hormigón Bit. (AC)	> 8	-
6	N-430 Ronda La Mata	Lechada Bit.	> 10	-

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre



Fig. 4. Edificios públicos con fachada a las secciones estudiadas.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Evolución del Ruido de rodadura

En este trabajo se presentan los niveles sonoros de proximidad CPX ( $L_{CPtr, 50 \text{ km/h}}$ ) y la amplitud de la macrotextura (MPD) de las secciones estudiadas. La Fig.5 muestra los valores de ruido de rodadura a lo largo de una longitud representativa de la Sección 2, en los años 2013 y 2015 (segunda y tercera campaña de auscultación respectivamente). Los valores mostrados en esta figura se han corregido por temperatura y por velocidad, de modo que sea posible la comparación de los mismos entre campañas de medida. Como se observa en la figura, los niveles sonoros se han incrementado prácticamente en toda la longitud del tramo representada. Resultados similares se han obtenido en el resto de las secciones estudiadas en este trabajo.

Los valores medios del ruido de rodadura obtenidos para cada sección se muestran en la Fig.6. En esta figura, además, se muestra la desviación estándar de los valores CPX de cada tramo, así como el valor medio de la MPD. Como se observa en la figura, algunas medidas de MPD y ruido de rodadura no se han podido incluir debido a limitaciones técnicas durante las campañas de medida.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

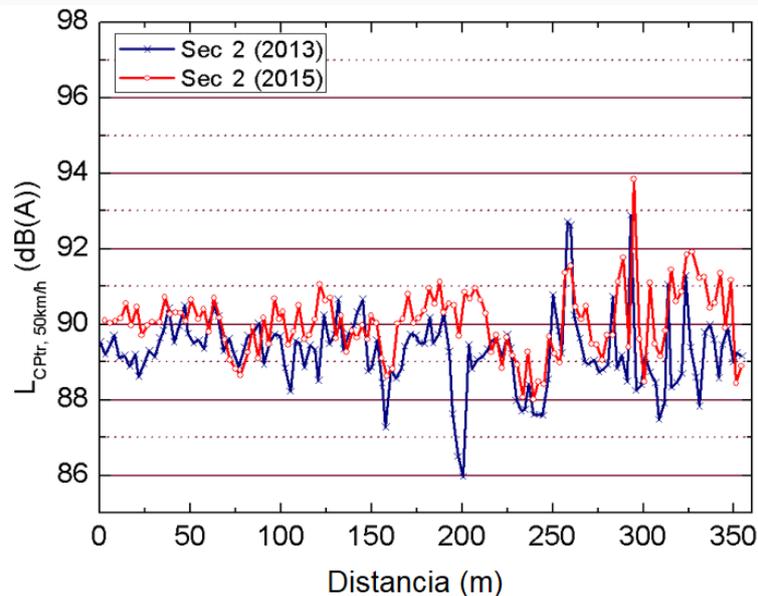


Fig. 5. Nivel sonoro  $L_{CPtr,50 \text{ km/h}}$  en una longitud representativa de la sección 2.

Como se muestra en la Fig.6, se ha producido un incremento de los niveles de ruido de rodadura a lo largo de los años. Actualmente estos niveles son superiores a 90.0 dB(A) en todas las secciones excepto en la Sección 1 (89.8 dB(A)). Entre 2008 y 2015 los niveles de ruido se han incrementado entre 0.7 y 3.0 dB(A). Los mayores incrementos se detectaron en las Secciones 4 y 5. Estas dos secciones, por otro lado, destacan por sus elevados niveles de ruido de rodadura. Las Secciones 4 y 5 son, además, las que muestran un mayor valor medio de MPD en la última campaña de auscultación (2015).

Menores incrementos de ruido de rodadura se han obtenido en el resto de las secciones (inferiores a 1.8 dB(A)), con un valor máximo de 90.7 dB(A) en la Sección 6. Por otro lado, de acuerdo con la Fig.6, la Sección 1 reduce su ruido de rodadura entre 2008 y 2013, sin embargo, esta reducción no es el resultado de la evolución de la capa de rodadura, sino el resultado de obras de rehabilitación. En cualquier caso, las operaciones de rehabilitación no fueron suficientes para evitar el rápido incremento de los niveles de ruido en esta sección entre la segunda y tercera campaña de auscultación.

De acuerdo con la Fig.6, hay una relación entre los niveles de ruido de rodadura y los valores MPD. El envejecimiento de la capa de rodadura debe llevar a un aumento de la macrotextura MPD. Los mayores niveles de ruido se han obtenido en la Sección 5 (mayor MPD), la cual está fabricada con hormigón bituminoso, y su envejecimiento ha llevado a la pérdida de áridos en superficie. Por otro lado, las secciones fabricadas con lechada bituminosa cuentan con áridos de menor tamaño. Debido en parte a sus características constructivas, estas secciones tienen menor macrotextura MPD. El envejecimiento de estas mezclas lleva a la aparición de grietas transversales y longitudinales que, sin embargo, no tienen un reflejo muy marcado en los niveles medios de macrotextra MPD.

Por otro lado, de acuerdo con los resultados obtenidos, no existe una relación lineal entre el valor MPD de una sección y su ruido de rodadura, ya que la macrotextura es solo una de las características de la carretera que influyen en la generación de ruido de rodadura.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

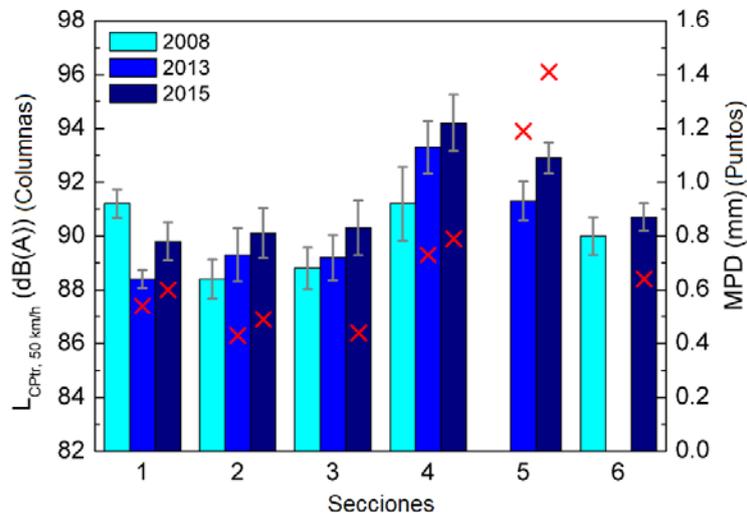


Fig. 6. Nivel sonoro  $L_{CPtr,50 km/h}$  y valores de macrotextura (MPD) de las secciones estudiadas.

A partir de los datos de ruido de rodadura se ha estudiado la evolución de los espectros de ruido para cada sección. La Fig.7 muestra los espectros promedio de las Secciones 2 y 4, que presentan un comportamiento característico de los dos grupos de secciones mostrados en la Tabla 1 (hormigón bituminoso y lechada bituminosa). El mayor aumento de los niveles de ruido de rodadura se puede observar, en ambos grupos, a frecuencias medias (1 a 2 kHz). En estas frecuencias, el ruido de rodadura es el resultado de una combinación de varios mecanismos de generación relacionados con los impactos y la vibración (neumático / pavimento) y los efectos aerodinámicos y la impedancia mecánica del pavimento.

Los mayores incrementos de ruido de rodadura a frecuencias medias se han obtenido en las Secciones 4 y 5 (Hormigón bituminoso). En estas secciones, los niveles de ruido de rodadura aumentan considerablemente a altas, medias y bajas frecuencias (aproximadamente +2.5 dB (A) en cada tercio de octava). Las bajas frecuencias aumentan con la amplitud de la textura (MPD); por lo tanto, estas frecuencias podrían estar relacionadas con la deformación y deterioro de la capa de rodadura. Por otro lado, el aumento en medias frecuencias podría deberse al deterioro de la capa de rodadura, pero también al aumento de la rigidez dinámica (impedancia mecánica) de las mezclas bituminosas envejecidas [6, 7]. Finalmente, a altas frecuencias (por encima de 2 kHz), los valores más altos de  $L_{CPtr,50 km/h}$  de las Secciones 4 y 5 podrían deberse a un mayor "efecto Horn", así como al aumento de la importancia de otros mecanismos de generación de ruido, como los relacionados con la adherencia y el deslizamiento (stick-slip y stick-snap) [8].

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

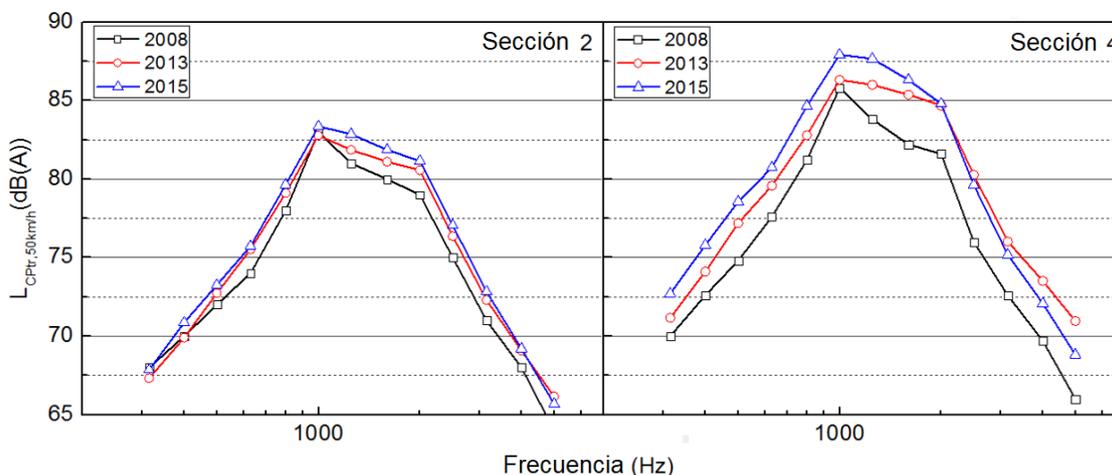


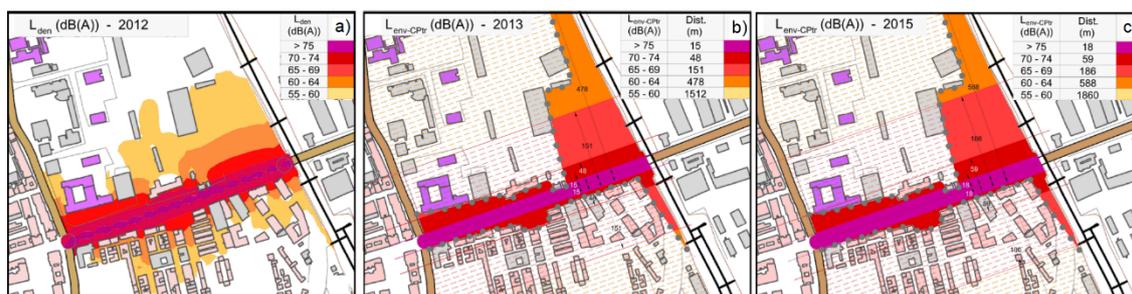
Fig. 7. Evolución de los espectros de emisión sonora de las Secciones 2 y 4.

### Proyección de Ruido ambiental

Para evaluar la evolución a lo largo del tiempo de los niveles de ruido ambiental, se han estimado los niveles teóricos de ruido ambiental a 4 m de altura ( $L_{env-CPtr}$ ) a partir de los niveles de ruido de rodadura CPX ( $L_{CPtr, 50 km/h}$ ). Los valores  $L_{env-CPtr}$  se han estimado a partir de las campañas de medición (2013 y 2015) y se han comparado con los niveles de ruido del Mapa Estratégico de Ruido 2012, ya que el tráfico es la principal fuente de ruido en estas secciones.

En resumen, el nivel de ruido  $L_{env-CPtr}$  es una estimación teórica simple del ruido ambiental a 4 m de altura (producido por el ruido del tráfico), donde solo se ha tenido en cuenta la atenuación del ruido por distancia. Como se ve en la Fig.8 también se ha tenido en cuenta la línea de fachadas de los edificios (línea de puntos grises). A partir de la misma la forma de las isobaras se desconoce debido al efecto de atenuación de los edificios. La influencia de otros factores como la absorción del suelo y la atenuación debida a la vegetación no se han considerado en esta estimación. Aunque la Figura 8a (2012, MER) y la Figura 8b (2013, CPX) deberían ser bastante similares, hay algunos factores que deben justificar el desajuste de las isobaras:

- (a) La atenuación debida a la absorción del suelo o la vegetación.
- (b) El intervalo de tiempo entre las campañas de medida para obtener los niveles  $L_{den}$  y  $L_{env-CPtr}$ .
- (c) Diferentes fuentes de ruido relacionadas con la densidad del vehículo. La Figura 8b se ha elaborado a partir de la medición de CPX, que considera un vehículo que produce ruido en cada punto de la Sección 4 y en cada segundo (fuente de ruido lineal: carril ocupado). Sin embargo, el tráfico se ha sobreestimado respecto al real de la vía (tráfico diario promedio anual de 11,157 vehículos / día).



## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Fig. 8. Sección 5. MER 2012 (a) y mapas de ruido de rodadura en 2013 (b) y 2015 (c).

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de ruido de rodadura CPX mostrados en este trabajo, los pavimentos fabricados con lechadas bituminosas muestran un comportamiento acústico mejor que aquellos fabricados con hormigón bituminoso. Este comportamiento más silencioso debe vincularse a la existencia de superficies más lisas (bajas amplitudes de macrotextura, menor generación de ruido relacionada con el impacto y las vibraciones), sin embargo, los pavimentos deben cumplir otras características relacionadas con la seguridad, como la resistencia al deslizamiento.

De acuerdo con los resultados, la MPD podría estar relacionado con el envejecimiento del pavimento y, por lo tanto, con la evolución del ruido de rodadura. Sin embargo, la relación MPD-LCPtr, 50 km/h no es igual en todas las secciones estudiadas.

Se han elaborado mapas de ruido ambiental a partir de medidas de ruido de rodadura, considerando únicamente la dispersión geométrica de la energía acústica. La metodología empleada para la elaboración de estos mapas no tiene en cuenta la absorción del suelo. Por otro lado, considera un ruido de tráfico continuo (fuente de sonido lineal). Sin embargo, a pesar de las limitaciones debidas a las simplificaciones empleadas, esta metodología representa una técnica valiosa para evaluar la evolución del ruido ambiental en entornos urbanos, especialmente a distancias cortas de las fuentes de ruido (fachadas más cercanas).

## AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo de este trabajo se ha contado con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) en el marco del proyecto TRA2016-77418-R (AEI / FEDER, UE).

## REFERENCIAS

- [1] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A. Tyre/Road Noise Reference Book; INFORMEX: Kisa, Sweden, 2002.
- [2] Vázquez, V.F.; Paje, S.E. Study of the road surface properties that control the acoustic performance of a rubberized asphalt mixture. *Appl. Acoust.* 2016, 102, 33–39.
- [3] Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento). Mapas Estratégicos de Ruido de las Carreteras de la Red del Estado Segunda Fase. 2012. 2013: <http://sicaweb.cedex.es/mapas-consulta-fase2.php>
- [4] Vázquez VF, Terán F, Huertas P, Paje SE. Field assessment of a Cold-In place-recycled pavement: Influence on rolling noise. *Journal of Cleaner Production* 2018, 197, 154-162.
- [5] Vázquez, V.F.; Luong, J.; Bueno, M.; Terán, F.; Paje, S.E. Assessment of an action against environmental noise: Acoustic durability of a pavement Surface with crumb rubber. *Sci. Total Environ.* 2016, 542, 223–230.
- [6] Li, M.; van Keulen, W.; Ceylan, H.; Cao, D.; van de Ven, M.; Molenaar, A. Pavement stiffness measurements in relation to mechanical impedance. *Constr. Build. Mater.* 2016, 102, 455–461.
- [7] Vazquez, V.F.; Paje, S.E. Dynamic stiffness assessment of construction materials by the resonant and non-resonant methods. *J. Nondestruct. Eval.* 2016, 35, 34.
- [8] Paje, S.E.; Luong, J.; Vázquez, V.F.; Bueno, M.; Miró, R. Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction. *Constr. Build. Mater.* 2013, 47, 789–798.