



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

FIA2008-A114

Modelo de predicción de ruido urbano adaptado a variables. Aplicación a la ciudad de León (España)

Marcos Fuentes^(a),
Eduardo García^(a),
Jesús Cepeda^(a),
Gabriel Búrdalo^(a),
Mercedes de Barrios^(a).

(a) Laboratorio de Acústica Aplicada, Escuela de Ingenierías, Universidad de León. Edificio Tecnológico II, León, España. E-mail: acustica.lab@unileon.es

Abstract

The studies of acoustical impact of new infrastructures are solved applying a great variety of calculus models. There are two possibilities in this way: to test the accuracy of existing calculus models or create simplified tools shared by all the studies of acoustical impact. Some european countries have developed standards in order to predict noise caused by road traffic. The aim of such standards is to evaluate the expected noise that planned roads will generate around it. Standards-prediction models start from a source model depending on traffic density, composition, speed, type of pavement, slope of the road assigning in short an acoustic power to the source. They afterwards introduce corrections due to the propagation such as spreading, reflections, barriers, ground and air absorption, etc. These corrections constitute the propagation model. In this paper, Acoustics Laboratory of University of Leon explains the development of a method to predict the urban noise using statistical technology and the information of the Acoustic Map of León.

Resumen

Los estudios de impacto acústico de nuevas infraestructuras se resuelven aplicando una gran variedad de modelos de cálculo. Existen dos posibilidades en este sentido: probar la precisión de los actuales modelos de cálculo o crear instrumentos simplificados propios. Algunos países europeos han elaborado normas con el fin de predecir el ruido causado por el tráfico rodado. El objetivo de estas normas tiene como objeto evaluar el ruido previsto que las carreteras proyectadas generarán a su alrededor. Las normas de los modelos predicción parten de un modelo de la fuente sonora en función de la densidad del tráfico, composición del mismo, velocidad de los vehículos, tipo de pavimento, pendiente de la carretera. Así se asigna una potencia acústica a la fuente. Posteriormente se introducen correcciones en la propagación provocadas por la difusión, las reflexiones, los obstáculos y las aéreas de absorción, etc. Estas correcciones constituyen el modelo de propagación. El Laboratorio de Acústica de la Universidad de León ha desarrollado un método para predecir el ruido urbano de un modo opuesto al utilizado en los métodos predictivos tradicionales, basándose en descriptores estadísticos basadas en medidas “de campo” realizadas anteriormente y recogidas en el Mapa Acústico de León

1 Elaboración de Mapas Acústicos

El ruido urbano es, principalmente, el ruido de tráfico. El ruido del tráfico viene determinado por una serie de factores: a) El ruido individual de cada vehículo; b) La composición del flujo de tráfico; c) La pendiente de la calle; d) El tipo de vía. Los mapas de ruido son registros geo-referenciados de los niveles sonoros junto con otra información acústica obtenida en una determinada área. Un mapa puede ser obtenido por medida, por simulación, predicción o cálculos, o mediante un *mix* de los métodos anteriores.

Cuando los mapas son medidos, sirven como herramientas para detectar problemas o zonas a proteger. Si los mapas son calculados, los mapas de ruido permiten realizar estudios de impacto acústico en la planificación urbana.

Una consideración importante cuando se planifica la elaboración de un mapa de ruido es la selección de los puntos de medida. Teniendo en cuenta que los trabajos correspondientes a cada punto tienen un coste considerable, es importante reducir el número de puntos al mínimo.

- a) Usando una malla uniforme, por ejemplo un punto cada 200 m. La distancia entre los puntos depende del presupuesto y el área a representar.
- b) Usando una malla cuya separación entre puntos sea proporcional a la densidad de población.
- c) Usando una malla, en la cual los valores sucesivos tengan un determinado diferencial (por ejemplo, 3 dB o 5 dB).
- d) Clasificando todos los puntos potencialmente medibles de acuerdo a sus características acústicas, flujo de vehículos, composición del flujo, pendiente, etc. y midiendo, en un punto de cada clase.

Debido al alto coste que implica hacer un mapa de ruido es recomendable utilizar métodos que permitan actualizarlo sin realizarlo de nuevo por completo. Nuestro sistema permite obtener un modelo con posibilidades de corrección para futuros cambios en las condiciones.

2 Obtención del modelo predictivo de ruido

El cálculo está basado en métodos estadísticos. El origen de la información son los resultados del "Mapa Acústico de León 2002". Los principales datos utilizados para el estudio fueron los siguientes:

- Leq = Nivel de ruido equivalente en dBA, medido en cada punto.
- $V_{pe/h}$ = Número de vehículos pesados (camiones, autobuses, etc.) por hora en cada punto.
- $V_{li/h}$ = Número de vehículos ligeros (coches) por hora en cada punto.
- Mot/h = Número de motocicletas por hora en cada punto.
- RP = Ruido predominante en cada punto (voz, tráfico, trabajos en la calle, etc.)
- $Zona$ = Residencial, zonas verdes, etc.
- $Altura$ = Altura de los edificios (metros).
- $Anchura$ = Anchura de la calle (metros).
- $Tipo$ = Calles es "U", "L", calles abiertas, plazas.
- $Sentido$ = Doble, único, calles peatonales.
- CA = Carriles de aparcamiento: uno, dos, ninguno.
- TP = Tipo de pavimento: asfalto, hormigón, piedra, otros tipos especiales de pavimento.

Está claro que con esta información, podría ser complicado obtener una única ecuación que explicara todo el ruido de las calles. Por esta razón, decidimos hacer un primer estudio que nos eliminara parte de la información de partida y nos dejara sólo las variables realmente útiles. De hecho, un alto número de variables no garantiza un correcto ajuste, al contrario, el modelo de dispersión podría aumentar. Con este objetivo marcado, se prescindió de las variables “ruido predominante” y “zona”.

Sin embargo, en los resultados preliminares, observamos que los coeficientes de determinación obtenidos con nuestras ecuaciones eran muy pequeños. Este hecho nos llevó a redefinir el problema. Decidimos que era más lógico elaborar un modelo para cada tipo de calle (“U”, “L”, plazas, calles peatonales). En esta comunicación estudiamos los resultados para las calles de tipo “U”, con edificaciones en ambos lados de la calle.

2.1 Extensión

Una vez clasificada toda la información por cada tipo de calle, hemos buscado cuales son los modelos con el mejor ajuste a nuestra situación.

Para cada tipo de calles fueron hechos los siguientes estudios:

- Modelo de regresión lineal múltiple.
- Modelo de regresión lineal simple.
- Modelo de estimación curvilínea, el cual está compuesto por:
 1. Modelo lineal
 2. Modelo logarítmico
 3. Modelo inverso
 4. Modelo cuadrado
 5. Modelo cúbico
 6. Modelo de potencia
 7. Modelo compuesto
 8. Modelo “S”
 9. Modelo logístico
 10. Modelo de crecimiento
 11. Modelo exponencial

3 Consideraciones de la regresión lineal

El análisis por regresión lineal es una técnica estadística usada para estudiar la relación lineal entre variables aleatorias. Aunque una nube de puntos permite una muy rápida impresión sobre el tipo de relación entre dos variables, la relación entre dos variables no es perfecta o nula. Se puede describir la relación observada en la nube de puntos mediante una función matemática simple, la ecuación $y = a + b \cdot x$.

Hay diferentes procedimientos para fijar una función simple, para disminuir la diferencia entre el punto medido y el punto de la función calculada. La elección preferida ha sido, tradicionalmente, una línea recta que hace mínima la suma de los cuadrados de las diferencias de los rangos verticales entre cada punto y la línea recta.

3.1 Coeficientes de correlación

Además de una fórmula, podría ser útil tener alguna indicación precisa del grado en el cual la línea recta se ajusta a la nube de puntos. De hecho, la posible mejor recta no tiene porque ser la correcta.

Por tanto, necesitamos algún tipo de información adicional para determinar la fidelidad con la cual la línea describe la relación entre las variables.

El valor de este coeficiente tiene una interpretación muy intuitiva, representa la exactitud que podemos obtener cuando predecimos una variable basándonos en el conocimiento de otras variables. El error *standard* de la estimación (S_e , residuo) es la desviación *standard* de las distancias existentes entre los valores de la variable dependiente (Y_i) y los pronósticos obtenidos con la función de regresión lineal, aunque no exactamente, porque la suma de los cuadrados de las distancias es dividida por $n-2$. Generalmente, si el ajuste es mejor, el error *standard* es más pequeño.

3.2 Ecuación de regresión

El coeficiente correspondiente a la constante es el origen de la línea de regresión (que hemos llamado a):

$$a = y - b \cdot x \quad (1)$$

El coeficiente b es obtenido como sigue:

$$b = \frac{\sum X_i \cdot Y_i - \sum X_i \cdot \sum Y_i}{n \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (2)$$

3.3 Coeficientes de regresión estandarizados

Los coeficientes Beta (coeficientes *standardizados* de regresión parcial) son los coeficientes que definen la ecuación de regresión cuando esta es obtenida después de la standardización de las variables originales. Son obtenidos a partir de la siguiente expresión:

$$\beta_1 = b \cdot \left(\frac{S_x}{S_y} \right) \quad (3)$$

El análisis de regresión simple, el coeficiente *standardizado* de regresión correspondiente a la única variable independiente presente en la ecuación es exactamente el coeficiente de correlación de Pearson.

En regresión múltiple, los coeficientes *standardizados* de regresión permiten valorar la importancia relativa de cada variable independiente dentro de la ecuación.

4 Análisis de regresión multilíneal

En el análisis de regresión múltiple, la ecuación de regresión no define una línea recta en el plano, sino un hiperplano en un espacio multidimensional. Con una variable dependiente y dos independientes, necesitamos 3 ejes para poder representar el correspondiente diagrama de dispersión de puntos. Si en lugar de dos variables, necesitamos tres, sería necesario un espacio de cuatro dimensiones para poder construir el diagrama y un espacio de cinco dimensiones sería necesario para construir el diagrama correspondiente a cuatro variables independientes, etc. Por tanto con más de una variable independiente, la representación gráfica no es útil.

Es más fácil usar solo la ecuación del modelo de regresión lineal:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_k \cdot X_k + \varepsilon \quad (4)$$

De acuerdo con este modelo, la variable dependiente (Y) es interpretada como una combinación lineal de k variables independientes (X_k), cada una de las cuales tiene un coeficiente (β_k) que indica el peso relativo de la variable en la ecuación. La ecuación incluye además una constante (β_0) y un componente aleatorio (el residuo: ϵ).

5 Información complementaria

Además de la ecuación de regresión y la calidad de sus ajustes, un descriptor estadístico del análisis de regresión no tiene que limitarse a obtener aspectos estadísticos elementales como la matriz de correlación, la media de la desviación *standard* de cada variable y el número de casos con el que se está trabajando.

5.1 Análisis de residuos

Los residuos son muy importantes en el análisis de regresión. En primer lugar por la información sobre la exactitud de los pronósticos: si el error *standard* es pequeño, el pronóstico es mejor y la recta de regresión lineal se ajusta a la nube de puntos. En segundo lugar, el análisis de las características de los casos con residuos altos (positivos o negativos) puede ayudarnos a detectar casos atípicos y, consecuentemente, a perfeccionar la ecuación de regresión a través del estudio detallado de cada caso.

6 Modelo de regresión lineal múltiple para calles de tipo “U”

Las variables introducidas son:

- Vehículos pesados
- Vehículos ligeros
- Motocicletas
- Carriles de aparcamiento
- Anchura de calle
- Altura de edificios

Tabla 1. Descriptores estadísticos calles tipo “U”

Descriptores estadísticos	Media	Desviación <i>standard</i>	Número
Leq	66,75	3,666	208
Pesados veh./h	8,47	11,51	208
Ligeros veh./h	172,8	125,1	208
Motos/h	4,45	3,537	208
Carriles <i>parking</i>	1,52	0,890	208
Ancho de calle (m)	16,37	6,239	208
Altura edificios (m)	14,37	5,076	208

En la tabla de correlaciones es posible observar que la variable que influye más en el nivel de ruido equivalente (Leq) es el número de vehículos ligeros por hora, con un coeficiente de 0,786.

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre variables

Correlación Pearson	Leq	Vpe	Vli	Motos	Carriles parking	Altura edificios	Anchura calles
Leq	1,000	0,591	0,786	0,562	-0,432	-0,075	0,115
Vpe	0,591	1,000	0,744	0,379	-0,214	-0,011	0,247
Vli	0,786	0,744	1,000	0,607	-0,411	0,017	0,367
Motos	0,562	0,379	0,607	1,000	-0,313	-0,035	0,233
Carriles parking	-0,432	-0,214	-0,411	-0,313	1,000	0,184	0,216
Altura edificios	-0,075	-0,011	0,017	-0,035	0,184	1,000	0,314
Anchura calles	0,115	0,247	0,367	0,233	0,216	0,314	1,000

7 Modelos de estimación curvilínea

Entre todos los modelos, los mejores resultados son obtenidos con el modelo cúbico, el cual se especifica a continuación:

Tabla 3. Coeficientes de correlación modelo cúbico

R	R cuadrado	R cuadrado corregido	Error <i>standard</i>
0,846	0,715	0,711	1,951

Tabla 4. Coeficiente modelo cúbico

	Coeficientes no <i>standardizados</i>		Coeficientes <i>standardizados</i>	t	Sig.
	b	Error <i>standard</i>	Beta		
Nº vehículos	0,06	0,006	2,238	9,343	0,000
Nº Veh. ** 2	0,0001040	0,000	-2,503	-4,640	0,000
Nº veh. ** 3	6,64E-008	0,000	1,077	3,185	0,002
(Constante)	59,590	0,498		119,632	0,000

El ajuste es $R^2=0.711$ y la ecuación obtenida para el modelo cúbico es, de acuerdo con el modelo: $Y = b_0 + (b_1 \cdot t) + (b_2 \cdot t^2) + (b_3 \cdot t^3)$:

$$L_{eq} = 59,59 + 0,06 \cdot (V_{pe} + V_{li} + Mo) - 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot (V_{pe} + V_{li} + Mo)^2 + 6,64 \cdot 10^{-8} \cdot (V_{pe} + V_{li} + Mo)^3 \quad (5)$$

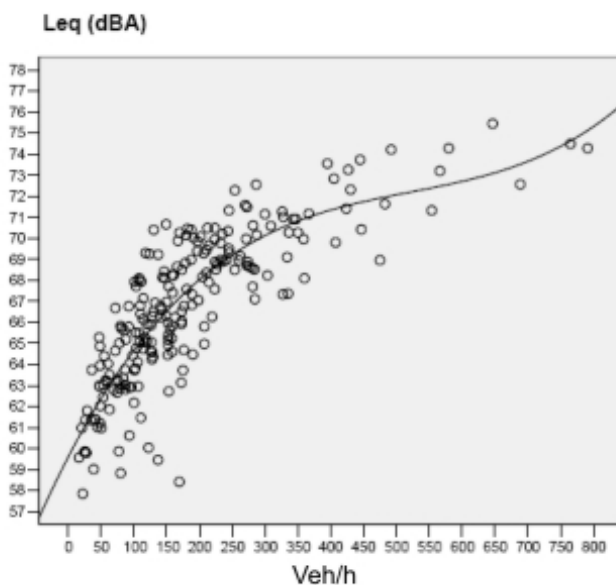


Figura 1. Ajuste del modelo

El error medio (residuo) es:

$$Err_{med} = \frac{\sum |y - y_{pro}|}{n^o} = \frac{321}{217} = 1,5 \tag{6}$$

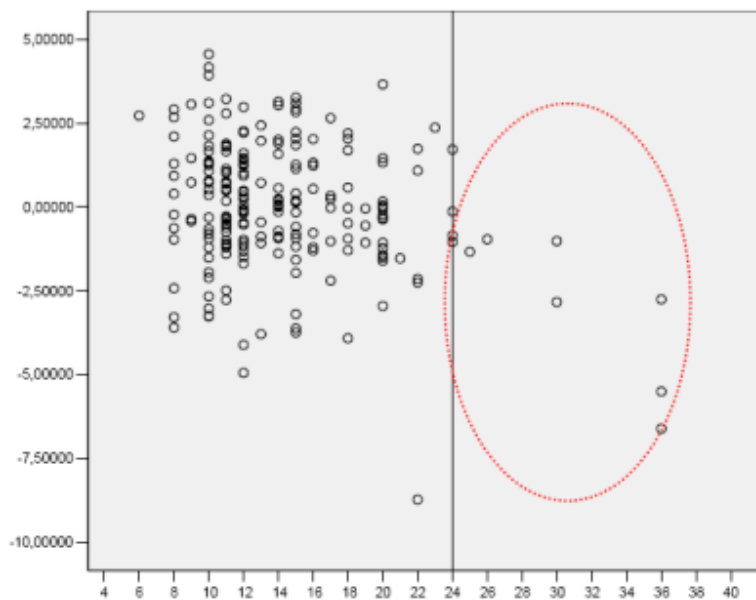


Figura 2. Distribución de residuos para la variable anchura (m)

Podemos observar en la figura de arriba el gráfico que relaciona residuos con anchura, viendo que por debajo de 24 m de anchura no existe una tendencia clara de los residuos, por lo que no podemos hacer nada con ellos. Sin embargo, para anchos superiores a 24 m, todos los residuos son negativos, con lo cual podríamos interesarnos introducir un factor de corrección

para estos casos. Calculando la media de estos errores en calles de más de 24 m, hemos obtenido que el valor es -2,7 dBA. Por esta razón introducimos un factor negativo para estos casos K de -2,7 dBA:

$$Err_{med} = \frac{311,7}{218} = 1,4 \quad (7)$$

La ecuación final para calcular nivel de ruido en calles tipo “U” queda como sigue:

$$L_{eq} = 59,59 + 0,06 \cdot n - 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 6,64 \cdot 10^{-8} \cdot n^3 + \Delta_{ancho} \quad (8)$$

n: número de todo tipo de vehículos

Δ_{ancho} : corrección para calles de más de 24 m (-2,7 dBA)

8 Conclusiones

Nuestro modelo es un alternativa a los modelos de propagación, más económica y adaptada a las características peculiares de cada ciudad.

Un modelo de este tipo nos permite buscar áreas y zonas con el mismo comportamiento acústico, identificando los mejores puntos para las medidas.

Además es posible estudiar la evolución del ruido a través de los años, diseñando nuevas infraestructuras con criterios acústicos y analizar la modificación de los factores externos que influyen.

Referencias

- García Ortiz, E.; Cepeda Riaño, J.; Fuentes Robles, M. et al (2005) “Mapa Acústico de León-2002”. Universidad de León. Secretariado de Publicaciones. ISBN 84-9773-205-7. León, España.
- Uesaka, Katsumi; et al. (2000). “Prediction and evaluation methods for road traffic noise in built-up areas”. Proc. of 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. InterNoise 2000. Niza, Francia.