

## **DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO DE RUIDO URBANO ADAPTADO A LA REALIDAD DE LA CIUDAD DE MONTEVIDEO, URUGUAY**

REFERENCIA PACS: 43.50.Ba

Alice Elizabeth González <sup>1</sup>; Esteban Gaja Díaz <sup>2</sup>; Andrés Jorysz <sup>2</sup>; Gonzalo Torres <sup>2</sup>

1 Dpto. de Ingeniería Ambiental - IMFIA –  
Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Uruguay  
Av. Julio Herrera y Reissig 565  
CP.11.300 - Montevideo - Uruguay  
Tel: 598 2 711 52 76 Int. 131  
Fax: 598 2 711 52 77  
E-Mail: elizabet@fing.edu.uy

2 Laboratorio de Ingeniería Acústica - Dpto. de Física Aplicada –  
E.T.S.I.Industriales. Universidad Politécnica de Valencia. España.

### **ABSTRACT**

The object of this work is to get a predictive model for urban noise levels in Montevideo City, using classified traffic data (cars, motorcycles, buses and lorries). Pre-existent predictive models are tried to be adjusted with more than a thousand samples, with little success. Suspecting that the "anomalous" or distorting data are the main problem, the explicit consideration of them is tried. The "acoustically anomalous events" are objectively defined. A mathematical way to include them in the predictive equation is deduced. A speed correction is also taken into consideration. The final adjustment puts more than 90% of the simulated values in a +/-3 dBA range related to the sampled values.

### **RESUMEN**

El fin del trabajo es obtener un modelo predictivo de niveles sonoros asociados con ruido urbano en la ciudad de Montevideo, a partir de datos de tránsito clasificado (automóviles, motos, ómnibus y camiones). A partir de un conjunto de más de mil mediciones, se intenta ajustar modelos predictivos preexistentes, con escaso éxito. A la luz de que el principal problema radica en la ocurrencia de eventos "anómalos" o distorsionantes, se plantea la inclusión de un término que los contemple explícitamente. Se definen entonces en forma objetiva los eventos "acústicamente anómalos" y se deduce una forma rigurosa de incluirlos en la ecuación. Por último se incluye en el modelo una corrección por velocidad. Se logra un ajuste que coloca más del 90% de los valores simulados en un rango de +/- 3 dBA con respecto a los datos originales.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Como dice Gaja Díaz (1984), a la hora de desarrollar un modelo predictivo *"existen dos posibles líneas de acción: o se puede elegir un gran número de parámetros con la esperanza de reducir el error residual, o se puede elegir un grado de precisión desde el principio y minimizar el número de los parámetros."*

En este trabajo se escoge la segunda línea de acción. Se toma como objetivo colocar el máximo de valores posible dentro de un rango de  $\pm 3$  dBA.

A partir del modelo propuesto por Gaja Díaz (1984), y operando convenientemente, se obtiene la siguiente ecuación, en donde los índices 1, 2 y 3 se refieren respectivamente a vehículos livianos, pesados y motos.

$$Leq = 10 \times \log \left( \frac{pl}{v_1} 10^{\frac{L_{pmax1}}{10}} Q_1 + \frac{pl}{v_2} 10^{\frac{L_{pmax2}}{10}} Q_2 + \frac{pl}{v_3} 10^{\frac{L_{pmax3}}{10}} Q_3 \right)$$

Asumiendo una velocidad media del flujo uniforme para todos los vehículos, esta expresión puede reescribirse como:

$$Leq = A + 10 \times \log(aQ_1 + bQ_2 + cQ_3)$$

A esta ecuación se agregan términos de corrección para reproducir más ajustadamente el valor real.

## 2. APLICACIÓN DE MODELOS PREEXISTENTES

Se eligió un conjunto de doce modelos para verificar su ajuste a los datos montevidianos. Dichos modelos fueron desarrollados en países de América Latina y Europa, en particular, España. Se aplicó cada uno de estos a un conjunto de 1361 mediciones de ruido urbano en la ciudad de Montevideo. Fue necesario en todos los casos realizar una corrección aditiva para centrar los residuos (valores medidos menos valores simulados) en cero. Algunas veces esta corrección fue del orden de la decena de decibeles para obtener valores comparables a los reales a través de la simulación. Los resultados obtenidos para cada uno de los casos en cuanto a los citados porcentajes se presentan en la tabla adjunta.

**Tabla 1. Aplicación de modelos preexistentes**

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R	0.57	0.45	0.5	0.46	0.59	0.38	0.32	0.49	0.56	0.56	0.3	0.58
"± 3 dB"	75%	57%	79%	79%	76%	66%	70%	77%	82%	82%	69%	83%
Corrección (dBA)	10	-5	2	3.6	-16.2	4	2.4	1.3	9.8	9.6	4.8	9

Los resultados obtenidos son pobres en cuanto a ajuste, y en general se requiere de un término aditivo cuya magnitud no es despreciable (ver línea de "Corrección" en la tabla; en los casos en que se logra colocar más del 80% de los datos en un rango de ±3 dBA este valor supera los 9 dBA) que se ha debido incorporar para lograr resultados razonables. Surge entonces la necesidad de un planteo alternativo que se acerque más a la realidad que se trata de describir, que es la de la ciudad de Montevideo, tomando explícitamente en consideración los eventos anómalos.

## 3. CONSIDERACIÓN DE LOS EVENTOS ANÓMALOS

La definición de "evento anómalo" puede realizarse en un sentido *subjetivo* u *objetivo*. Los anómalos que se detectan *subjetivamente* son todos aquellos eventos que escapan a lo que el oído identifica como normal sonido de motor y rodadura. Esto incluye bocinas, alarmas, ladridos, sirenas, frenadas violentas, escapes ruidosos de motos y de otros vehículos.

Se buscó una relación que permitiera trabajar con los anómalos subjetivos en función de otros parámetros, entre los cuales el más importante es la densidad de tránsito. Los resultados no mostraron relaciones claras que permitieran su uso como correcciones en el modelo numérico en desarrollo. Por lo tanto, se apuntó a la búsqueda de una abstracción conceptual del concepto de anómalo.

Definir un criterio objetivo que diga si un evento acústico es anómalo o no, tiene un interés en sí mismo, independiente del uso inmediato que se hará del concepto: si se dispone de este criterio, deja de ser necesaria la presencia humana durante todo el intervalo de colecta de la muestra, y basta con contar con un instrumento que permita obtener los valores de  $L_{eq1}$ , el que, según el objetivo que se persiga, deberá necesariamente o no apoyarse por un medidor automático de tránsito clasificado.

A partir del criterio de Gaja Díaz (1999), que propone eliminar los valores que están por fuera del intervalo de confianza del 95% (equivale a retirar los valores por fuera de  $[\mu \pm 1,96 \sigma]$  cuando la distribución es normal), se obtuvo un criterio para la definición de los eventos acústicamente anómalos o anómalos objetivos.

Para determinarlos, sobre la serie de niveles sonoros continuos equivalentes de 1 minuto ordenados de mayor a menor se trabaja retirando los doce valores más elevados. La cantidad de 12 valores se ha obtenido a través de la prueba de Mann-Whitney, como el máximo número de minutos que pueden considerarse anómalos en una lectura de 60 minutos cuando las series son no normales, por analogía con el método que propone Gaja Díaz (1999). Se procede recalculando el  $L_{eq}$  de la muestra sin estos 12 valores más elevados, obteniendo así lo que se ha dado en llamar  $L_{Aeq-correctado}$ . Se examinan estos doce valores, y a partir de ello se dice que existe un anómalo acústico en determinado minuto de la muestra si el valor del  $L_{eq}$  en ese minuto supera el  $L_{Aeq-correctado}$  en al menos un cierto  $\varepsilon$ . Como consecuencia de la metodología, es claro que de existir un anómalo en la muestra, deberá ser uno de aquellos doce valores superiores que fueron momentáneamente apartados para calcular el  $L_{Aeq-correctado}$ , teniendo en cuenta además que no se considerarán más de 12 valores como posibles anómalos en una muestra de una hora de duración, de acuerdo con el resultado de la prueba de Mann-Whitney.

El valor que se fija en forma menos rigurosa -o que, en todo caso, podría resultar diferente al analizar la realidad de otra ciudad distinta de Montevideo- es justamente el valor de  $\varepsilon$  para el rango que define un anómalo. Este valor surge del razonamiento que se presenta a continuación.

Una vez admitida la incidencia sobre las mediciones que pueden tener los descartes de hasta 12 minutos por hora, corresponde definir de qué manera se va a determinar cuáles son los eventos -o sea los minutos- que efectivamente corresponde descartar por ser anómalos. Se entendió que la manera de tomar esta decisión está estrictamente vinculada a la capacidad de deteriorar o modificar el  $L_{eq}$  de la lectura global que tiene el minuto en cuestión. Para ello se analizaron tres posibilidades: que el minuto "censurado" tenga un  $L_{eq}$  3 dBA, 4 dBA ó 5 dBA superior al de la muestra global, una vez retirados los doce minutos de valor más elevado.

Para elegir uno de los tres valores (3, 4 ó 5 dBA) como valor de rechazo se fijaron dos criterios: que la incidencia de retirar los eventos anómalos en el  $L_{eq}$  complejo de la medición no fuera demasiado pequeña -de modo que el procedimiento tuviera algún sentido- y que incluyera una cantidad razonable de los casos bajo estudio. Finalmente se tomó el criterio de 4 dBA.

Es por ello que se arriba a la definición de **evento acústicamente anómalo** o **anómalo objetivo** como aquel minuto de medición en que ocurre un  $L_{eq}$  que supera al menos en 4 dBA la lectura del  $L_{eq}$  global, una vez que a éste se le han descontado los 12 minutos de valor de  $L_{eq}$  más elevado.

El primer paso para cuantificar el efecto de los anómalos acústicos en el  $L_{eq}$  global de la muestra consiste en estudiar la relación entre la cantidad de anómalos acústicos de una muestra y el incremento del  $L_{eq}$  global por ellos generado. Este incremento se calcula como la resta del  $L_{eq}$  recalculado sin los anómalos acústicos al  $L_{eq}$  global de la muestra. Graficando en el eje de las abscisas la cantidad de anómalos acústicos y en las ordenadas el promedio del incremento producido (se trata del promedio sobre 1116 muestras), se observa una clara dependencia lineal.

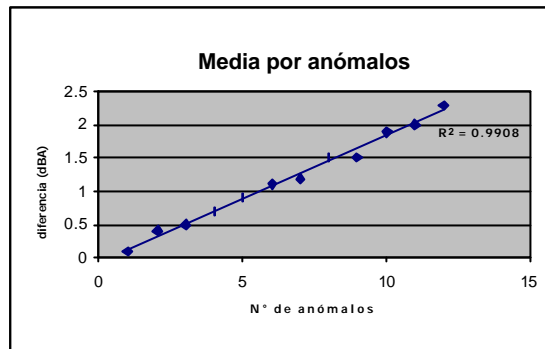


Figura 1

El paso siguiente es procurar establecer una relación entre el tránsito y el número de anómalos acústicos. Si se grafican la cantidad de anómalos acústicos de la muestra contra el caudal total de vehículos.

Se observa para cada nivel de permanencia (esto es para cada rango de tránsito, la cantidad de anómalos acústicos que es superada el  $\alpha\%$  de los casos), una relación de la forma potencial.

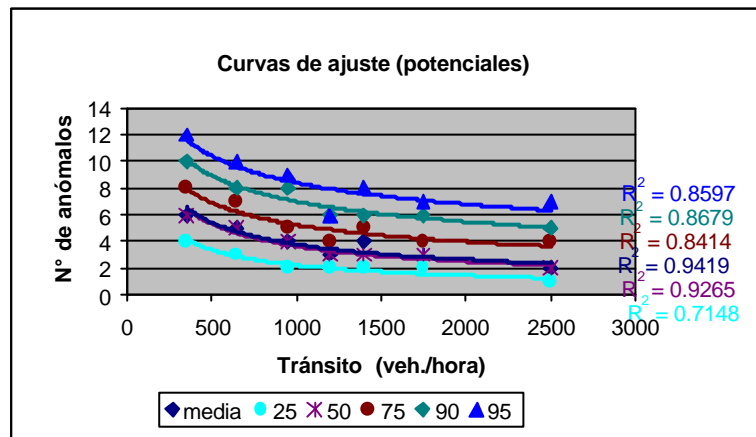


Figura 2

Una vez determinadas las anteriores relaciones, resta por definir la más importante: la relación entre la densidad de tránsito y la corrección a aplicar en el modelo. La corrección (incremento del  $L_{eq}$  global de la muestra por efecto de los anómalos) es del tipo lineal en el número de anómalos, con coeficientes de correlación muy elevados. Entonces, aplicando un razonamiento transitivo, se puede encontrar una curva potencial que vincule la corrección a aplicar con la densidad de tránsito. Se encontraron estas relaciones para los distintos porcentajes manejados, con coeficientes de correlación comprendidos entre 0,85 y 0,90 para permanencias entre el 50% y el 90%.

Para determinar cuál de las curvas de ajuste debería usarse para incluir en el modelo como corrección se intentó usar una a una cada una de ellas, y se analizaron los resultados obtenidos. El método fue descontar del  $L_{eq}$  medido la corrección real al  $\alpha\%$  de permanencia y modelar este valor considerando la corrección por anómalos correspondiente a ese mismo porcentaje  $\alpha$  de permanencia también. Los resultados obtenidos mostraron la equivalencia entre las distintas correcciones -en el sentido de la minimización de los residuos-, por lo que, a la hora de optar arbitrariamente por una de ellas, se decidió emplear la correspondiente al 90% de permanencia. La ecuación del término de corrección por anómalos es de la forma:

$$\text{Corrección por anómalos} = 23,266 \times Q^{-0,3811}$$

que tiene un coeficiente de correlación  $R = 0,93$ .  $Q$  representa el caudal total de vehículos.

### 3. ANÁLISIS DE POSIBLES AJUSTES PARA UN MODELO PREDICTIVO

Se buscó que el modelo que se desarrolla se adapte a la mayor cantidad posible de realidades edificatorias dentro de la ciudad de Montevideo. Se emplean para el ajuste datos de campo obtenidos por estudiantes de Facultad de Ingeniería en el marco del Convenio entre IMM e IMFIA para la obtención de un mapa acústico de Montevideo (IMFIA-IMM, 1999) e información complementaria recabada especialmente para esta investigación también por parte de estudiantes de la Facultad.

La fórmula de partida es:

$$Leq = K + 10 \times \log(aA + bM + cO + dC)$$

Donde A, M, O, C son los caudales de automóviles, motos, ómnibuses y camiones respectivamente.

En primera instancia se trabajó sobre un conjunto de 1116 eventos de 30, 45, 60 y 120 minutos de duración, que cubren una amplia gama de escenarios en la ciudad.

Otra corrección que se aplicó fue la disminución del nivel sonoro por la distancia entre la fuente (asumida como concentrada en el carril equivalente, concepto de Gaja Díaz, 1984) y el receptor.

#### **Corrección por distancia = $-10 \times \log d$**

Donde d es la mitad del ancho de la calle medida en metros.

Con las correcciones por distancia y por anomalos se determinaron por regresión lineal los coeficientes a, b, c y d, y así se obtuvo un primer ajuste.

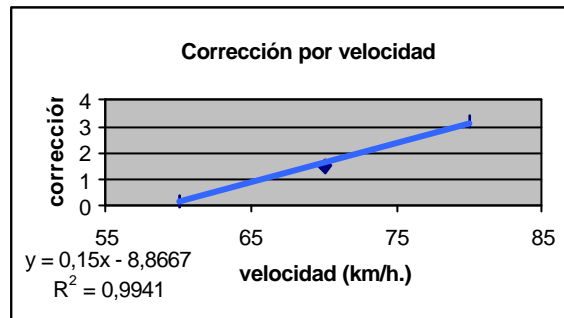
Se continuó en busca de mejoras adicionales. Se encontró que las calles en las cuales la velocidad del flujo vehicular es superior a 60 km/h tienen niveles sonoros más elevados que el resto de las calles y avenidas estudiadas. En consecuencia, el modelo anterior subestima el  $L_{eq}$  medido.

Para cuantificar la influencia de la velocidad del flujo en el modelo se tomaron los residuos del modelo correspondientes a 130 eventos en los cuales la velocidad media era superior a 60 km/h. Se graficó en el eje de abscisas la velocidad media (sólo tres valores: 60, 70 y 80 km/h, debido a las dificultades de determinación en campo de este parámetro) y en el de ordenadas los residuos promediales para cada velocidad, según consta en la siguiente tabla:

**TABLA 3 Ajuste del modelo: corrección por velocidad**

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Residuo promedial (dBA)</b>
60	0,2
70	1,5
80	3,2

Finalmente se adoptó como corrección por velocidad la recta que mejor ajusta los puntos:



**Figura 6**

**Corrección por velocidad:  $Dv = 0,15 v - 8,67$  v expresada en km/h.**

Con la corrección anterior, se llegó al ajuste final con 1116 eventos:

$$Leq = 50 + 10 \times \log(2.02 M + 0.87 A + 7.81 O + 5.93 C) + 23.266 Q^{-0.3811} - 10 \times \log d$$

**Ajuste del modelo: Versión final**

<b>50%</b>	1.3
<b>75%</b>	2.2
<b>90%</b>	3.0
<b>95%</b>	3.5
<b>±3 dB</b>	90%
<b>R</b>	0.69

El cuadro anterior indica que en el 50% de los eventos, el  $Leq$  medido y el estimado difieren en menos de 1.3 dBA y así sucesivamente con los otros valores. También aclara que el 90% de los eventos se encuentra dentro del  $\pm 3$  dBA que coincide con uno de los objetivos propuesto al comienzo de la investigación.

Se verificó la equivalencia entre los valores medidos y simulados a través de una prueba de Mann-Whitney. El resultado fue la aceptación de la hipótesis nula (son equivalentes). A los efectos de apreciar las "equivalencias acústicas", y centrando los residuos en cero, la ecuación final se puede escribir como:

$$Leq = 49.4 + 10 \times \log(A + 2.33M + 9.01O + 6.84C) + 23.266 \times Q^{-0.3811} - 10 \times \log d$$

La validez de esta ecuación en un rango de  $\pm 3$  dBA está dada para los siguientes valores de los parámetros en juego:

- Q entre 200 y 4000 vehículos/hora, incluyendo vehículos livianos, pesados y motos
- d entre 3 y 15 m
- Calles semiabiertas
- Para velocidad superior a los 60 km/h, debe aplicarse la corrección lineal antes enunciada:  $\Delta v = 0,15 \times v - 8,67$

Los coeficientes de la ecuación pueden interpretarse de la siguiente manera: en la ciudad de Montevideo un valor medio de ruido de fondo es 49,4 dBA; cada ómnibus equivale acústicamente a 9 automóviles; cada camión a casi 7 automóviles (precisamente 6,84) y cada moto a más de 2 automóviles (2,33).

#### 4. BIBLIOGRAFIA

Gaja Díaz, Esteban. Ingeniería Acústica Ambiental. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Física Aplicada. SPUPV 96.531. 262 pp, 1995.

Gaja Díaz, Esteban. "Contribución al estudio de un modelo matemático sobre el ruido emitido por el tráfico urbano y los niveles de molestia en el municipio de Valencia". Tesis Doctoral. ETSII - UPV. 1984.

González, Alice Elizabeth. Una aproximación a la metodología del tratamiento del problema de la contaminación sonora en la ciudad de Montevideo. Tesis para la obtención del grado de Magister en Ingeniería. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería. 1998.

González, Alice Elizabeth. Monitoreo de ruido urbano en la ciudad de Montevideo: determinación del tiempo óptimo de muestreo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico. Tesis para la obtención del grado de Doctora en Ingeniería Ambiental. Montevideo, marzo 2000.

IMFIA - IMM. Contaminación sonora en ambiente urbano (caso Montevideo). Informe Final del Proyecto de Iniciación a la Investigación CONICYT - Clemente Estable. Montevideo, marzo de 1998.

IMFIA - IMM. Informe Final del Convenio Mapa Acústico de Montevideo. Montevideo, octubre de 1999.

Sachs, Lothar. Estadística Aplicada. Editorial Labor. 567 pp. 1978.