

## **MONITOREO DE RUIDO URBANO: DETERMINACIÓN DEL TIEMPO MÍNIMO DE MUESTREO EN 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

Av. Julio Herrera y Reissig 565

11300 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 duration of traffic noise measurements must be carefully determined in order to guarantee that results are good descriptors of the sampled reality. The main object of the investigation is the determination of sample's duration, suggested by the experience developed in the first years of investigation, and later reaffirmed by the low percentages of comparable samples in each sampling period. In other words, to find a timing for the samples so that the  $L_{eq}$  of each sample is a good descriptor of the global diary  $L_{eq}$  (from 8:00 a.m. to 8:00 p.m.).

### **RESUMEN**

La determinación de la duración de las mediciones de ruido de tráfico es un tema por demás delicado si se desea garantizar que los resultados de las mismas sean buenos descriptores de la realidad muestreada. De acuerdo con la experiencia desarrollada en los primeros años de investigación, y ratificada por los bajos porcentajes de muestras comparables obtenidos en cada horario de muestreo en estudios posteriores, el objetivo perseguido es la optimización del tiempo de muestreo, o dicho de otra manera es encontrar una duración para las muestras de modo que el  $L_{eq}$  obtenido sea representativo del  $L_{eq}$  global diario (se ha entendido éste como el correspondiente al intervalo de 8 a 20 horas).

### **1. TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN**

El tiempo mínimo de muestreo se estudia en función de lo que ha dado en llamarse el *tiempo de estabilización del instrumento*. El concepto correspondiente es el siguiente:

Cuando se realiza una medición, el  $L_{eq}$  va variando a medida que transcurre el tiempo, al irse acumulando mayor información para ser considerada. Pero como es un parámetro con "mucho inercia", llega un momento en el que se requieren grandes variaciones en los niveles instantáneos para que dichas fluctuaciones se reflejen en el parámetro en cuestión.

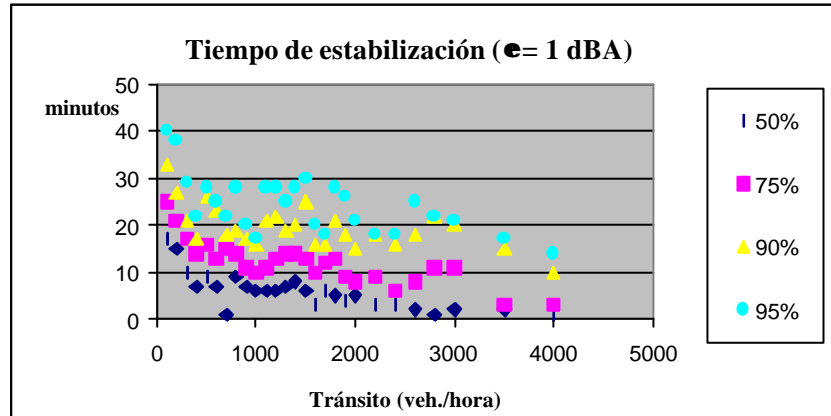
El tiempo de estabilización se obtiene de la comparación del  $L_{eq}$  global del evento que se considera con el  $L_{eq}$  del primer minuto de medición, de los dos primeros minutos acumulados, de los tres primeros minutos acumulados, etc. ( $L_{eq1}$ ,  $L_{eq1'+2}$ ,  $L_{eq1'+2'+3}$ , etc.). Cuando a partir del minuto  $n$  de medición, el  $L_{eq}$  acumulado y el  $L_{eq}$  global del evento difieren en menos

de un cierto  $\epsilon$ , se dice que  $n$  es el tiempo de estabilización del instrumento. El valor de  $\epsilon$  que se adopte condiciona fuertemente los resultados.

Los estudios de tiempo de estabilización del instrumento se realizaron sobre un conjunto de 1357 muestras de ruido urbano registradas por personal de Facultad de Ingeniería en la ciudad de Montevideo, Uruguay, en el marco del Convenio con la Intendencia Municipal de Montevideo para la obtención de un Mapa Acústico de la ciudad (IMFIA - IMM, 1999).

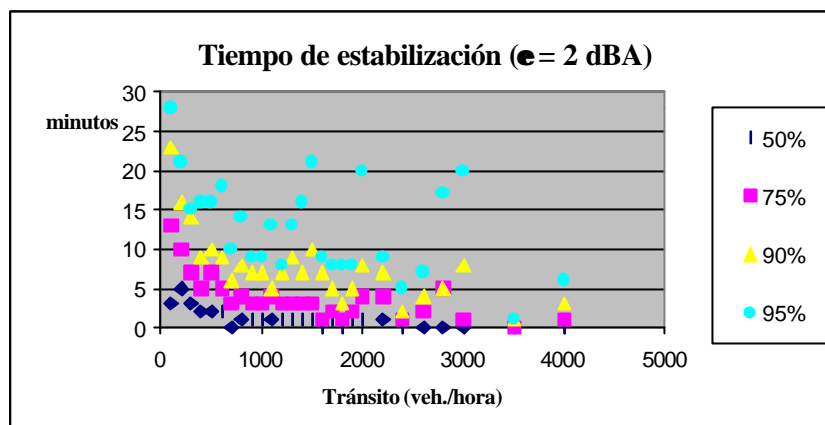
Si se adopta  $\epsilon = 1$  dBA, entonces los tiempos de estabilización son considerablemente mayores que los que refiere la bibliografía internacional para mediciones de ruido urbano: para estabilizar el 95% de las muestras se requiere un tiempo mínimo de 30 minutos. En efecto, el estudio oportunamente realizado mostró que para lograr la estabilización del instrumento en un rango de  $\pm 1$  dBA (es decir, que el  $L_{eq}$  acumulado del evento en cuestión fluctúe desde ese momento y hasta el final de la medición en dicho rango de  $\pm 1$  dBA) y en un mínimo del 95% de los casos, el tiempo de muestreo requerido debía ser de por lo menos 30 minutos. Si bien es un tiempo bastante superior al que refiere la bibliografía especializada, las características del ruido ambiente en Montevideo, signado fuertemente por la presencia de eventos anómalos (bocinas, alarmas, etcétera.), lo avalan más allá de los estudios y verificaciones formales realizadas.

En los siguientes gráficos se muestran los valores obtenidos para el tiempo de estabilización en función de la densidad de tránsito total. Se dan los valores que son superados en el 50%, 75%, 90% y 95% de las mediciones efectuadas. Para  $\gamma = 1$  dBA se ve que estabilizar el 95% de las muestras requiere un tiempo de muestreo del orden de 30 minutos para vías que tengan hasta 2000 vehículos/hora; si se tolera que sólo un 90% de las muestras se estabilicen, bastaría con muestrear durante 20 minutos, y así sucesivamente.



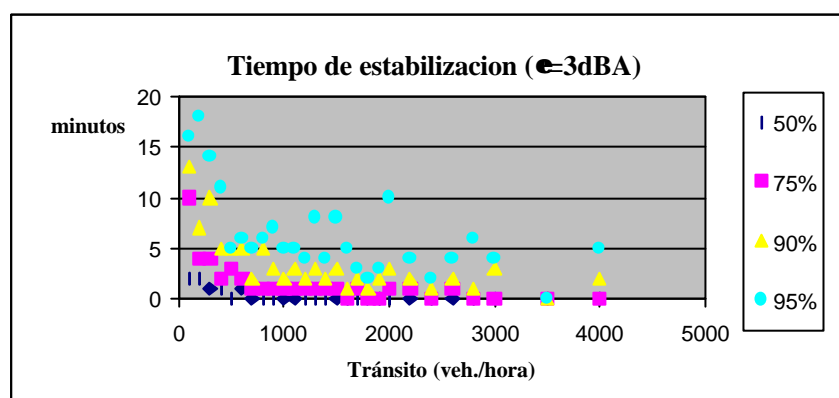
**Figura 1** Tiempo de estabilización en función del tránsito ( $\epsilon = 1$  dBA)

Para  $\epsilon = 2$  dBA, los tiempos de estabilización comienzan a ser similares a los que recomienda la bibliografía para la obtención de muestras de ruido urbano: 15 minutos para estabilizar el 95% de las muestras.



**Figura 2** Tiempo de estabilización en función del tránsito ( $\epsilon = 2$  dBA)

Si se aplican exigencias más laxas aún (por ejemplo,  $\pm 3$  dBA ó más) los tiempos de estabilización son muy bajos, pasan a ser casi instantáneos y a los efectos de este estudio prácticamente despreciables, es decir, ya desde el comienzo el  $L_{eq}$  difiere en menos de  $\epsilon$  del valor global que se registra al finalizar la medición.



**Figura 3** Tiempo de estabilización en función del tránsito ( $\epsilon = 3$  dBA)

## 2. TIEMPO MÍNIMO DE MUESTREO

El problema del tiempo de medición no se acaba con la determinación del tiempo de estabilización del instrumento. En efecto, se ha podido comprobar largamente que mediciones realizadas en el mismo punto geográfico y dentro de un mismo horario no son estadísticamente comparables -o sea, no representan el mismo fenómeno físico-. Esto se ha verificado, a través de la prueba de Mann-Whitney cuando se han considerado dos eventos o la de Kruskal-Wallis cuando se trataba de más de dos eventos.

Esto conduce al planteo de otra interrogante: cuál es el tiempo más adecuado para realizar una medición, es decir, se debe adoptar una duración que no sea excesivamente breve ni inútilmente prolongada.

En primer término, se desea verificar si la unidad "horario diurno" -considerando como tal el comprendido entre las 8 y las 20 horas- es tratable como una sola realidad. Esto apunta a ver si hay horarios diferenciados al cabo del día cuyo manejo sea sencillo y no encarezca demasiado las campañas de medición, o es efectivamente un buen criterio considerar un horario diurno único. En ese sentido, se analizaron los horarios de 8 a 14 y de 14 a 20 horas. Se trabajó sobre un conjunto de 33 lecturas de doce horas registradas minuto a minuto en

distintos puntos de la ciudad de Montevideo, y se compararon los  $L_{eq}$  parciales de esos horarios. El resultado obtenido mostró que en 27 de las 33 lecturas (82%) los horarios matutino y vespertino eran equivalentes al 95% de confianza según una prueba de Mann-Whitney. A partir de este resultado se infirió que no hay evidencia que conduzca a la necesidad de muestrear en forma independiente los horarios especificados, y que a nivel estadístico pueden tratarse como una misma realidad.

Se trabaja entonces en la búsqueda de un tiempo de medición representativo para cualquier lectura que se realice en horario diurno (entre las 8 y las 20 horas). El tiempo de medición buscado debe ser, obviamente, mayor o igual que 30 minutos, que es el tiempo de estabilización para  $\varepsilon = 1$  dBA. La pregunta es hasta cuánto es necesario extender esta duración como mínimo para obtener resultados válidos.

Al respecto, se realizó un estudio sobre 36 lecturas de doce horas continuadas (de 8 a 20 horas) tomadas por estudiantes de la Facultad de Ingeniería en vías de tránsito con características diferentes en el período 1997 - 1999.

Además de cubrir una diversidad de lugares de características diferentes, fue preciso realizar una medición prolongada en uno de ellos. El punto elegido fue el de Av. Uruguay entre las calles Tacuarembó y Vázquez. Allí se midió durante doce días en horario de 8 a 20 horas, de modo de obtener datos de dos días lunes, dos días martes, etc., hasta dos días sábado. El día domingo se excluyó intencionalmente del estudio, en el entendido de que las referencias bibliográficas trabajan normalmente sobre datos de días hábiles, y en definitiva el objeto del estudio es caracterizar niveles sonoros de día hábil en la ciudad.

La primera verificación que se realizó fue acerca de la normalidad de los datos a tratar. En primer término se analizaron las muestras de 12 horas, y se encontró que en un 37% de los casos los datos eran no normales. Asimismo, se trabajó a nivel horario en el análisis de normalidad: de las 36 muestras de doce horas disponibles se eligieron diez -tomadas en varios puntos de la ciudad- y para los datos de cada hora de medición se aplicó la prueba de D'Agostino. Sobre las 120 pruebas realizadas se encontró aproximadamente un 15% con comportamiento no normal, por lo que todos los procesamientos posteriores se realizaron con técnicas de la estadística no paramétrica.

Los siguientes procesamientos se realizaron sobre las mediciones realizadas en Av. Uruguay entre las calles Tacuarembó y Vázquez, que es el punto en el que se dispuso de la información necesaria para llevarlos a cabo. En lo que sigue, se trabajó sobre los datos de  $L_{eq}$  tomados cada un minuto, que permitieron obtener analíticamente el  $L_{eq}$  de cada hora y  $L_{eq}$  global de las doce horas de medición, a través de la fórmula matemática correspondiente.

Aplicando la prueba de Mann-Whitney se compararon entre sí los días lunes, los días martes, etc., hasta los días sábados, describiéndolos por las curvas de  $L_{eq}$  horarios entre las 8 y las 20 horas. **Se verificó en todos los casos la comparabilidad de los mismos. Generalizando, esto muestra que los días lunes son equivalentes entre sí como lo son también los martes, los miércoles, los jueves, los viernes y los sábados.**

El siguiente paso consistió en verificar la equivalencia de los distintos días de la semana entre sí. Para ello se recurrió a la prueba de Kruskal-Wallis. Se consideró cada una de las dos semanas disponibles como un conjunto de seis días, donde cada día está descrito por los datos de sus  $L_{eq}$  horarios. Se compararon entre sí y por separado los elementos de cada conjunto de seis días de lunes a sábado, y en ambos casos el resultado fue el rechazo de la hipótesis nula. Esto quiere decir que, de acuerdo a lo esperable, no son equivalentes los seis días de lunes a sábados (el comportamiento del día sábado se esperaba diferente del de los demás días de la semana). Sin embargo, y también de acuerdo a lo esperable, resultaron equivalentes entre sí los elementos de ambos conjuntos cuando se retiró el día sábado de cada uno de ellos.

**Con esto se ha mostrado que en cada semana cualquier día de lunes a viernes es igualmente válido para muestrear en el horario de 8 a 20 horas.** Como se había ya verificado la equivalencia de los lunes, los martes, etc. de distintas semanas, estos resultados

serían ya suficientes para acreditar la representatividad de cualquier día hábil para la realización de mediciones. Empero, se realizó una verificación adicional que consistió en aplicar la prueba de Mann-Whitney a ambas semanas, vale decir, las muestras a comparar contenían los datos de los  $L_{eq}$  horarios de doce horas de los días hábiles de cada semana. Tanto para el caso en que se considerara la semana de lunes a viernes como de lunes a sábado, se obtuvo la equivalencia de las dos muestras. **Esto ratifica el supuesto de que en principio las distintas semanas en el año son equivalentes.**

### 3. TIEMPO ÓPTIMO DE MUESTREO

A partir de los resultados anteriores, el objetivo es entonces determinar cómo describir el  $L_{eq}$  diurno (considerado entre las 8 y las 20 horas) de un día hábil elegido al azar en un cierto punto arbitrario de la ciudad. Sobre el conjunto de 36 muestras de 12 horas disponibles, se determinó el tiempo mínimo de duración de una muestra para que su valor sea una buena descripción del  $L_{eq}$  diurno.

Para el caso del tiempo de estabilización obtenido para  $\varepsilon = 1$  dBA, se consideró el día dividido en períodos de 30 minutos (tiempo mínimo de muestreo fijado por el tiempo de estabilización del instrumento) y se compararon al 95% de confianza las curvas que resultaron de tomar esos 24 valores de 30 minutos contra una curva constante cuyo valor numérico es el  $L_{eq}$  global de las doce horas medido en campo. Cuando ambas curvas no resultaron comparables, se incrementó –de a intervalos de 5 minutos- el período de 30 minutos elegido inicialmente, hasta encontrar la duración de las muestras adecuada para describir el  $L_{eq}$  diurno global. Se obtuvo que, para estabilizar el 95% de las muestras, la duración del muestreo se debe establecer en 70 minutos. Si se acepta un nivel de confianza menor, entonces puede operarse con una duración de 30 minutos, sabiendo que permite estabilizar el 89 % de las muestras.

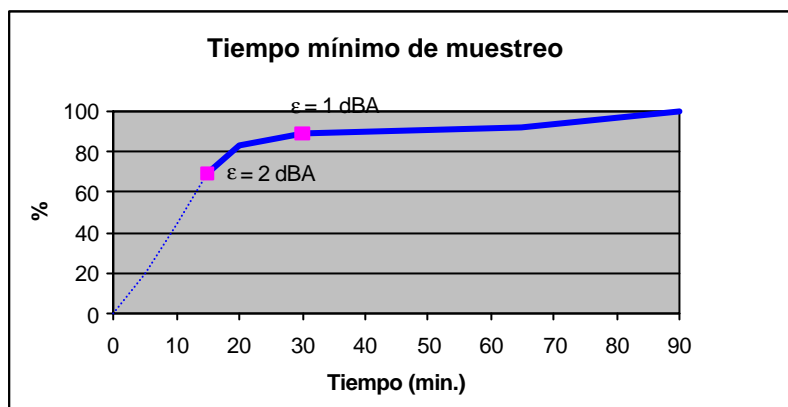
El trabajo se repitió considerando  $\varepsilon = 2$  dBA en el tiempo de estabilización, y se trabajó entonces con muestras desde 15 minutos de duración. Por cierto, sólo se aplicó el procedimiento a las 33 muestras que admitieron inicialmente ser descritas con eventos de 30 minutos, puesto que para las tres restantes ya se sabía de antemano que el tiempo de estabilización era superior. El resultado fue que para obtener resultados comparables en el 95% de las 33 muestras en cuestión (que es el 86% de la población inicial), la duración del muestreo se debe establecer en 25 minutos. Si esta exigencia se baja, entonces puede operarse con una duración de 20 minutos, sabiendo que la comparabilidad se da en el 90% de las 33 muestras (el 83,3% de la población original).

Luego se asumió un  $\varepsilon$  aún mayor en el tiempo de estabilización -esto es, se aceptaron como válidas muestras de menor duración-, y se analizó el porcentaje de muestras aceptadas para duraciones de 10 y 5 minutos.

Los valores obtenidos en el análisis de los datos experimentales se resumen en la tabla 1.

**TABLA 1 Tiempo mínimo de muestreo**

<b>Duración (minutos)</b>	<b>Muestras estabilizadas (%)</b>
90	100
65	91,7
30	88,9
25	86,1
20	83,3
15	69,4
10	44,4
5	19,4



**Figura 4**

Puede inferirse que un tiempo de muestreo adecuado en la ciudad de Montevideo para describir los niveles sonoros entre las 8 y las 20 horas es de 30 minutos, que garantiza una buena representatividad en el 90% de los casos considerando  $\epsilon = 1$  dBA en el tiempo de estabilización del instrumento. Incrementar la duración a 1 hora o más aumenta la confiabilidad del resultado, pero no en forma decisiva. Sin embargo, bajar dicha duración hace perder rápidamente representatividad a las muestras.

## REFERENCIAS

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

Gaja, E.; J.L. Manglano, S. Sancho, A. Reig. Methodology of noise map. Proceedings of Euro-noise 98. pp. 1055-1058, 1998.

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.

Martínez Luaces, Víctor. Estadística Aplicada a la Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. 53 pp. 1999.

Mendenhall, W.; D. Wackerly; R. Scheaffer. Estadística Matemática con Aplicaciones. Grupo Editorial Iberoamericana S.A. de C.V. 772 pp. 1994.

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