

# Evaluación de impacto acústico: Modelos predictivos sencillos que podrían dar complicaciones

**Dra. Ing. Alice Elizabeth González**

*Departamento de Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería  
UdelaR - Uruguay*

## 1 Algunas generalidades sobre ruido

El sonido es una onda de presión que se desplaza en un medio material. El oído humano puede captar una amplia gama de frecuencias que van, dependiendo de la intensidad de las ondas sonoras, de los 20 Hz a los 20.000 Hz. A su vez, intensidades muy pequeñas aún en el rango audible podrían no generar sensación auditiva dependiendo de la sensibilidad y salud auditiva del receptor, o bien llegar a producirle dolor. El umbral auditivo se considera como de  $20 \times 10^{-6}$  Pa a 1000 Hz para individuos sanos de 18 años de edad.

A partir del Congreso Mundial del Medio Ambiente de Estocolmo organizado por las Naciones Unidas que tuvo lugar en 1972, el ruido ha sido declarado como contaminante. En efecto, de acuerdo con las definiciones generales del momento un contaminante es aquel agente que puede afectar adversamente a la salud y el bienestar de las personas, y al pleno uso y disfrute de la propiedad. En efecto, dado que el ruido puede causar daño a la salud, interferencias al bienestar y a la comunicación de las personas, es válido hablar del ruido como un contaminante y en consecuencia hablar de **contaminación acústica**. Es un agente contaminante que es muy fácil producir –se requiere mínima energía- y sin embargo es muy difícil de abatir: las medidas son siempre costosas no sólo en lo económico sino también en lo social, pues además de implicar medidas de ingeniería y arquitectura sofisticadas pueden requerir la modificación de hábitos, usos o costumbres.

Las molestias generadas por el ruido se han referido desde hace ya 2000 años, y sus posibilidades de dañar la salud auditiva fueron referenciados por Bernardino Ramazzini al estudiar “la enfermedad de los caldereros” que vivían en las afueras de Venecia en los albores del siglo XVIII.

Hacia 1700, Bernardino Ramazzini (1633-1714) -el padre de la Medicina Ocupacional- en Italia, mostró por primera vez la relación causa-efecto entre la exposición a ruido y el deterioro auditivo. En su obra "*De Morbis Artificum Diatriba*" decía:

*"...Existen broncistas en todas las urbes y en Venecia se agrupan en un solo barrio; allí martillan el día entero para dar ductilidad al bronce y fabricar luego con él vasijas de diversas clases; allí también ellos únicamente tienen sus tabernas y domicilios y causan tal estrépito que huye todo el mundo de un paraje tan molesto. .... Dañase pues principalmente el oído del continuo fragor y toda la cabeza por consiguiente; ensordecen poco a poco y al envejecer quedan totalmente sordos; el tímpano del oído pierde su tensión natural de la incesante percusión que repercute a su vez hacia los lados en el interior de la oreja debilitando y pervirtiendo todos los órganos de la audición(...)"*

Séneca, contemporáneo y preceptor de Nerón en el siglo I después de Cristo, que vivía en Roma detrás de unas termas o baños públicos, comenta sus padecimientos a causa del ruido en una de sus cartas a Lucili:

*"Vedme aquí envuelto en un fuerte griterío: vivo detrás de unos baños. Figúrense entonces todos los gritos que pueden repugnar los oídos: cuando los atletas más fuertes hacen ejercicios y bracean con las manos cargadas de plomo, cuando se fatigan o se hacen los fatigados, siendo el efecto el mismo, siendo sus respiraciones tormentosas (...) también sufro el sonido del ladrón sorprendido en el delito, el cantor que encuentra en el baño que su voz es mejor, aquellos que saltan a la piscina moviendo toda el agua remansada. Más allá de éstos, cuyos sonidos están producidos por voces naturales, figura el depilador que hace sonar una voz aguda y estridente para hacerse notar y que no calla nunca, más que cuando depila unas axilas, y en vez de gritar él, hace gritar a otros. Está también el panadero, el charcutero, el confitero y todos los proveedores de las tabernas, que venden sus mercaderías con una cantinela característica.(...) creo que la voz humana distrae más que los ruidos ya que requiere mas atención del espíritu, mientras que los ruidos sólo hieren las orejas. Entre los sonidos que hay alrededor sin distraerme, están los carros que circulan por la calle, el aserrador y aquel que cerca de la fuente de Meta Sudans, afina sus flautas y trompetas y más que cantar, berrea. Por otro lado los sonidos intermitentes distraen más que los continuos (...)"*  
(NOTA: El resaltado es de cuenta de la autora de este artículo)

Ya en su época Séneca reseñaba los tres tipos de fuentes de ruido ambiental que han permanecido a través del tiempo: el ruido de tránsito, el ruido ocupacional y el ruido de las actividades de ocio. Las fuentes emisoras han cambiado aceleradamente en los últimos siglos, y hoy son mucho más potentes manteniendo sin embargo un costo accesible, lo que fomenta su omnipresencia en la sociedad. En cambio, las tecnologías constructivas no han cambiado tanto y el aislamiento acústico que proporcionan las edificaciones a grandes rasgos se ha mantenido; esto ha hecho aumentar considerablemente el número de personas afectadas por el ruido, ya sea en cuanto a su nivel de molestia o a su estado de salud.

## 2 ¿Qué es un modelo predictivo?

Según la Real Academia Española, **modelo** tiene, entre otras acepciones, las siguientes:

- *Representación en pequeño de alguna cosa.*
- *Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.*

Y **predecir** es:

*Anunciar por revelación, ciencia o conjetura algo que ha de suceder.*

(NOTA: la palabra **predictivo** no existe en el Diccionario de la Real Academia Española)

Entonces, se puede entender que un **modelo predictivo** es una representación de una realidad compleja, que puede responder a un esquema teórico, y que se elabora para estudiar su comportamiento y anunciar o conjeturar lo que en determinadas condiciones ha de suceder.

Es interesante notar cómo se emplean permanentemente modelos predictivos sencillos para muchas cosas de nuestra vida cotidiana. Por ejemplo, a partir de la velocidad media a la que transita un vehículo es habitual estimar la hora de llegada a un cierto lugar; esto implica asumir que se puede aplicar  $velocidad = distancia / tiempo$  y luego:  $hora\ de\ llegada = hora\ actual + distancia / velocidad$ . Si el viaje es de larga distancia, por lo general se puede cometer un error de unos cuantos minutos y eso tiene que ver con que la velocidad no es uniforme todo el tiempo, con situaciones / obstáculos puntuales, como puede ser la presencia de otros vehículos en la ruta, cruzar un área poblada o detenerse a abastecer combustible. Sin embargo, pese a la imprecisión la aproximación lograda suele ser de utilidad para organizar las actividades del viajero. Es decir, el modelo es válido y su nivel de error es aceptable para los objetivos a los que se aplica.

Cuando lo que se desea predecir es el nivel de ruido esperable en un lugar en determinadas condiciones y ante la presencia de ciertas fuentes, la complejidad del caso amerita el empleo de modelos también más sofisticados. Es que si bien se trata de un tema largamente estudiado, es muy fácil cometer errores que condicionen la confiabilidad e incluso la potencial utilidad de los resultados que obtengan. Es también muy relevante definir para qué se van a emplear los resultados que se obtengan, puesto que será diferente el nivel de precisión y confiabilidad que se requiere para predecir niveles de ruido a los efectos de la planificación territorial, para evaluar lo adecuado de una modificación en el sistema de tránsito de una ciudad, o para diseñar una solución acústica que ponga fin a un litigio.

### **3 Los modelos predictivos de ruido urbano**

A los efectos de la predicción de la emisión y propagación de las ondas sonoras, hay varios aspectos a tener en cuenta. Entre ellos, es de importancia diferenciar entre fuentes fijas o móviles, y fuentes asimilables a emisores puntuales o lineales. A su vez, la direccionalidad de las fuentes, el medio de propagación, la rugosidad de la superficie de éste, los eventuales obstáculos en el camino de propagación, son algunos de los factores a tener en cuenta; algunos de ellos son extremadamente complejos para ser incluidos de un modo simple en modelos predictivos explícitos.

En lo que sigue se desarrollarán aspectos vinculados a modelos predictivos de ruido urbano y de las medidas de gestión que con ellos pueden asociarse. Un modelo predictivo confiable permite obtener buenas aproximaciones de los niveles sonoros que pueden esperarse en determinadas condiciones si se cuenta con los datos correctos para alimentarlo. Se desea que los datos a emplear sean de obtención sencilla, como por ejemplo la cantidad de vehículos que circulan por unidad de tiempo y eventualmente el tipo de vehículos de que se trata (tránsito horario total o clasificado).

Entre las aplicaciones frecuentes de los modelos predictivos de ruido urbano, puede desearse tomar decisiones acerca del desvío de líneas de tránsito colectivo, el cambio de sentido de circulación en una calle o el mejor lugar para instalar un centro de atención a la salud.

Los modelos predictivos pueden ser de base empírica o teórica. Muchos modelos empíricos se basan en el ajuste de colecciones de datos más o menos amplias, siguiendo alguna forma de ecuación sencilla y aplicando métodos matemáticos conocidos, como el ajuste por mínimos cuadrados. En este tipo de modelos, muchas veces ni la forma de la ecuación ni los coeficientes que resultan suelen tener una interpretación sencilla, y a veces hasta podrían resultar... ¿sospechosos? Por ejemplo, describir un fenómeno de propagación de ruido con un polinomio de 6° grado, a sabiendas de que en la física del fenómeno intervienen otro tipo de relaciones formales que poco tienen que ver con curvas polinómicas, y menos de un orden tan elevado.

En lo relativo a ruido de tránsito, dado que las bases generales a las que responde el fenómeno de propagación han sido ampliamente estudiadas, los modelos que suelen aplicarse se basan en análisis teóricos que pueden tener diferente complejidad.

Si la fuente emisora que se considera es un vehículo que se desplaza con velocidad uniforme, entonces conociendo el tipo de vehículo, la velocidad a la que circula y la distancia a la que se encuentra el receptor, se puede predecir el nivel sonoro recibido por dicho observador debido a la fuente puntual que se estudia. La forma teórica general de la ecuación que rige el fenómeno es de fácil deducción, aunque luego deberán encontrarse numéricamente los mejores coeficientes para ajustarla a partir de ciertas consideraciones sobre los datos experimentales, siempre procurando que los diferentes términos del modelo tengan un significado físico fácilmente comprensible.

Dentro de los factores que tienen que ver con la emisión de ruido de tránsito, deben considerarse por lo menos el número total de vehículos que circulan y la composición del tráfico, aunque también inciden otros factores como la velocidad de circulación. Esto sin entrar en el detalle de que cada vehículo tiene en sí mismo una diversidad de fuentes de emisión de ruido, algunas de ellas de difícil modelación -como el ruido de rodadura-.

En cuanto a la propagación, una de las variables primordiales es la distancia del emisor al receptor, aunque también inciden el ancho de calzada y aceras, el tipo de pavimento, el retiro frontal en ambas aceras, la altura aproximada de edificación a cada lado de la calle, la presencia o no de semáforos o cebras calle arriba y/o calle abajo del punto de medición o la pendiente aproximada de la calzada.

Es importante tener en cuenta que en el desarrollo del modelo o bien se puede intentar minimizar el número de los parámetros buscando satisfacer un grado de precisión escogido de antemano, o bien incorporar un gran número de parámetros, en busca de reducir el error residual.

La forma general que suele tomar la ecuación de predicción de niveles sonoros asociados con el tránsito puede escribirse:

$$L_{eq} = A + 10 \times \log(aQ_l + bQ_p + cQ_m) + correcciones$$

Los términos aditivos de corrección intentan colaborar a reproducir más ajustadamente el valor real de los niveles sonoros, y en algunos casos pueden responder a fenómenos particulares del lugar de estudio. Por ejemplo, el modelo de González (2000) desarrollado para la ciudad de Montevideo a partir de más de 1300 datos de campo de por lo menos 30 minutos de duración, debió introducir un término potencial dependiente del tránsito total para considerar los eventos de ruidosidad evitable (“anómalos”) característicos del tránsito montevideano.

Uno de los modelos clásicos quizás más complejo en cuanto a la información que requiere para su aplicación es el Jraiw (1986), quien propone dos ecuaciones para cálculo de niveles sonoros asociados con el tránsito, una en condiciones urbanas y otra en autopistas. Los mismos resultan de sus trabajos experimentales en la ciudad de Bath (Inglaterra). Sus modelos dependen no sólo de la densidad vehicular total y de su composición, sino también de parámetros como ancho de calle, retiro frontal, velocidad del flujo, entre otros.

*Modelo Urbano:*

$$L_{eq} = 53,2 + 6,00 \log V + 11,7 \log (L + 6M + 10H) - 4,50 \log d - 0,0107 S - 5,23 \log (D-1)$$

Siendo:	V	Velocidad media en km/h	
	L	Número de vehículos livianos por hora	} L+M+H = Q
	M	Número de vehículos medianos por hora	
	H	Número de vehículos pesados por hora	
	d	Ancho de la calzada en m	
	S	Distancia a un punto singular de la calle (semáforo, rotonda, etc.)	
	D	Retiro frontal detrás del sonómetro (m)	

*Modelo Suburbano:*

$$L_{eq} = 56,5 - 6,53 \log V + 11,6 \log Q + 0,172 P - 6,48 F - 0,0098 S - 2,47 \log N$$

Siendo:	V	Velocidad media en km/h
	Q	Tráfico medio total (veh./hora)
	P	Porcentaje de vehículos medianos y pesados

- F Distancia entre el punto de medida y la fachada más distante (m)
- N Distancia entre el punto de medida y la fachada más cercana (m)
- S Distancia a un punto singular de la calle (semáforo, rotonda, etc.)

A su vez presenta una relación para obtener el  $L_{eq}$  en función de los niveles de permanencia 10, 50 y 90%:

$$L_{eq} = 0,968 L_{50} + 0,436 (L_{10} - L_{90})$$

En 1987, Jraiw presenta dos ecuaciones similares a las anteriores, ahora para obtener en función de la misma familia de parámetros el valor del  $L_{10}$ .

En el extremo opuesto, una ecuación extremadamente simple que ha sido largamente empleada es la siguiente:

$$L_{eq} = A + B \log Q$$

Siendo Q el tránsito horario total.

Para esta ecuación pueden encontrarse múltiples ajustes de los coeficientes, en particular para diferentes ciudades españolas. De Recuero (1997) pueden tomarse los siguientes ajustes para ciudades de la Comunidad Autónoma de Madrid:

$L_{eq} = 50,0 + 6,7 \log Q$	$r = 0,80$	Pozuelo
$L_{eq} = 56,6 + 4,8 \log Q$	$r = 0,74$	Majadahonda
$L_{eq} = 41,5 + 9,7 \log Q$	$r = 0,94$	Móstoles
$L_{eq} = 51,6 + 4,0 \log Q$	$r = 0,74$	Alcobendas
$L_{eq} = 49,0 + 5,5 \log Q$	$r = 0,80$	Las Matas
$L_{eq} = 52,1 + 4,6 \log Q$	$r = 0,77$	Las Rozas
$L_{eq} = 50,0 + 6,7 \log Q$	$r = 0,85$	Aranjuez
$L_{eq} = 42,6 + 10 \log Q$	$r = 0,81$	San Lorenzo del Escorial

Y para la Comunidad Autónoma de Madrid en su conjunto:

$$L_{eq} = 49 + 7,1 \log Q \quad r = 0,90$$

Barrigón (1999) reseña el siguiente conjunto de ajustes obtenidos para diferentes ciudades:

$L_{eq} = 9,3 \log Q + 44,7$	$r = 0,81$	Ciudad de Cáceres, 1999
$L_{eq} = 9,8 \log Q + 44,8$	$r = 0,83$	Ciudad de Gandía, 1984
$L_{eq} = 8,1 \log Q + 45,9$	$r = 0,73$	Ciudad de Pamplona, 1997
$L_{eq} = 8,0 \log Q + 51,0$	$r = 0,98$	Ciudad de Santa María(Brasil), 1998
$L_{eq} = 7,8 \log Q + 47,6$	$r = 0,85$	Ciudad de Valladolid, 1985
$L_{eq} = 9,2 \log Q + 45,6$	$r = 0,82$	Ciudad de Alcoi, 1992
$L_{eq} = 8,1 \log Q + 48,6$	$r = 0,79$	Ciudad de Valencia, 1989

A éstos se pueden agregar las ecuaciones que presentan Alamar Penadés y Amando García (1996) para otras ciudades españolas:

$L_{eq} = 7,6 \log Q + 53,5$	$r = 0,72$	Ciudad de Alcoi, 1983
$L_{eq} = 9,2 \log Q + 45,6$	$r = 0,82$	Ciudad de Alcoi, 1992
$L_{eq} = 6,8 \log Q + 52,8$	$r = 0,70$	Ciudad de Valencia, 1980
$L_{eq} = 5,9 \log Q + 49,4$	$r = 0,75$	Ciudad de Zaragoza, 1988

En este caso la única variable a considerar es el tránsito horario total Q, pero aquí la complejidad de la aplicación de este modelo radica justamente en la simplicidad de la ecuación que lo rige, que deja de lado un amplio universo de características que diferencian una situación de otra. Enfrentado a esta colección de ecuaciones sencillas de idéntica forma y con diferentes coeficientes, el usuario carece de argumentos para escoger un ajuste u otro.

#### 4 Los errores en los modelos

Pocas veces se tiene en cuenta que los modelos ajustados a partir de datos empíricos, aún cuando responden a una forma obtenida a partir de un fundamento teórico firme, tienen un rango esperable de error en sus resultados. Suele ser poco frecuente encontrar las críticas asociadas con el ajuste del modelo; a lo sumo se encuentran coeficientes de correlación que advierten acerca de qué tan bien ajustó la ecuación seleccionada a los datos disponibles, como aparece al lado de cada uno de los ajustes obtenidos con la ecuación simplificada para diferentes ciudades españolas. Sin embargo, esos coeficientes tampoco hablan de la posibilidad de éxito en la aplicación de esas ecuaciones en otros casos.

Desde un punto de vista formal, la aplicación de la teoría de propagación de errores permite obtener, a partir de los errores esperables en la determinación en campo de cada parámetro, el error mínimo esperado en el ajuste del modelo.

La ecuación general de propagación de errores puede formularse de la siguiente manera:

$$dy = \sum_i \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| dx_i$$

Siendo la expresión que se estudia:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  con  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Si se conoce el error cometido al relevar cada parámetro en particular (cada  $x_i$ ), se puede determinar el máximo error que tendrá el valor que se calcule para  $y$ . A su vez, interesa notar que cuanto mayor es el número de parámetros que intervienen, para un mismo nivel de incertidumbre en cada uno de ellos mayores resultan ser las posibilidades de alejarse del valor real que se intenta calcular. En general los modelos

con gran número de parámetros dan una falsa sensación de precisión que sólo puede convertirse en verdadera si se logra determinar cada uno de los parámetros que interviene con una buena precisión.

Para el caso de ruido urbano, si se tiene  $L_{eq} = f(A, M, O, C, d)$ :

$$L_{eq} = a + 10 \times \log (A + b \times M + c \times O + d \times C) - 10 \times \log d$$

siendo A, M, O, C número de automóviles, motos, ómnibus y camiones por hora  
d distancia entre la fuente y el receptor

Entonces, aplicando la ecuación de propagación de errores resultará:

$$dL_{eq} = 10 / (A + b \times M + c \times O + d \times C) \times (dA + b \times dM + c \times dO + d \times dC) + 10 / d \times dd$$

Los valores calculados para  $L_{eq}$  se apartarán tanto más del valor teórico cuanto mayor sea el error en la determinación de cada una de las variables (A, M, O, C, d), de acuerdo con la ecuación precedente.

Si en cambio se estuviera escribiendo la ecuación simplificada:

$$L_{eq} = a + b \times \log Q$$

Entonces

$$dL_{eq} = b / Q \times dQ$$

En este caso el error de cálculo está sólo asociado con el error en la determinación del flujo vehicular, lo que parece tranquilizante. Pero en contrapartida la ecuación, al ser más simple, tiene menor sensibilidad para contemplar las diferencias entre situaciones diversas en las que puede ser de aplicación. En efecto, una buena pregunta a formularse en este caso concreto es ¿cuál de todos los pares de coeficientes  $a$ ,  $b$  disponibles en la bibliografía adoptar al aplicar esta ecuación? Salvo que se conozca la ciudad, el método de obtención de los datos de campo, el tiempo de medición empleado en cada medida, etc., no se cuenta con buenos argumentos para decidirlo, ya que el valor de  $r$  publicado sólo habla de qué tan bien que le fue al autor con *sus* datos pero poco advierte acerca de las posibilidades de éxito al aplicar esa ecuación a otra realidad diferente.

## 5 Tomar decisiones a partir de modelos predictivos

A continuación se presentan algunos resultados de la aplicación de modelos a la ciudad de Montevideo, y luego se simula una modificación en la circulación de ómnibus en una calle de la Ciudad Vieja. Esto es algo que recientemente estuvo en discusión técnica, social y política; finalmente hace algo más de dos meses se aplicó una importante

modificación, actualmente en funcionamiento, en el tránsito colectivo de ese barrio histórico.

Se eligió una serie de modelos explícitos de carácter semiempírico, es decir, que combinan resultados experimentales con cálculos basados en teorías de emisión y propagación del sonido. Su aplicación es muy sencilla, por lo que su uso debería ser muy prudente si se desea obtener resultados confiables.

Deseablemente debería conocerse para cada ecuación su rango de aplicación y su error –y verificarse antes de su uso-. No conocer o no tener en cuenta las restricciones de la ecuación elegida puede conducir a obtener valores irreales de una situación, lo que es tanto más delicado cuando el error puede incidir en la toma de ciertas decisiones relativas, por ejemplo, a gestión del tránsito en la ciudad.

Se tomaron los resultados del trabajo realizado por González donde se aplicaron 12 modelos a la ciudad de Montevideo de la cual se disponían datos de tránsito clasificado de numerosos puntos. En los casos donde se logra colocar un 80% de los datos en un rango de  $\pm 3$  dBA, es necesario adicionar un término correctivo de por lo menos +9 dBA a las ecuaciones originalmente propuestas. A continuación se muestra la tabla de resultados de la aplicación de los modelos aplicados.

*Tabla 1. Ajuste de modelos preexistentes*

<b>Modelo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>"<math>\pm 3</math> dB"</b>	75%	57%	79%	79%	76%	66%	70%	77%	82%	82%	69%	83%
<b>Corrección aditiva (dB)</b>	10	-5	2	3,6	-16,2	4	2,4	1,3	9,8	9,6	4,8	9

- 1 Gaja
- 2 Czabalay, Sarvari
- 3 Czabalay, Sarvari
- 4 Czabalay, Sarvari
- 5 Jraiw
- 6 Lamure
- 7 Lamure
- 8 Prascevic, Cveltovik, Stojanovic
- 9 Sánchez Rivera
- 10 Sánchez Rivera
- 11 Sattler
- 12 Montbrun (Caracas)

Si se analiza ahora una posible modificación en la circulación de líneas de ómnibus en la ciudad, la evaluación del impacto acústico a que ello conduce puede dar resultados

muy heterogéneos, como se ve en la tabla que sigue. Se ha tomado el caso de la calle 25 de Mayo, en la que estaba en discusión la eliminación del 90% de los ómnibus; esta modificación fue implementada y está actualmente operativa.

*Tabla 2. Diferentes Modelos con modificaciones en tránsito*

<b>Modelo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Leq c/ómnibus (dBA)	74.3	76.1	77.4	75.9	100.8	68.4	72.5	72.6	67.2	66.9	67.2	67.3
Leq s/ómnibus (dBA)	65.7	63.6	69.6	68.7	91.0	60.8	67.4	67.4	59.2	59.2	66.0	59.7
Reducción esperada	8.6	12.5	7.8	7.2	9.8	7.6	5.1	5.2	8.0	7.7	1.2	7.6

## **6 Usted ¿qué hubiera hecho?**

En primer término, si no se hubiera contado con mediciones de campo a la hora de evaluar la modificación en el tránsito que se discute –y esto es muy frecuente al inicio de los estudios-, es interesante notar que los valores que predicen los diferentes modelos escogidos varían entre 66,9 dBA y 100,8 dBA; una diferencia de más de 30 dB es abrumadora, si se tiene en cuenta que el nivel sonoro aumenta en sólo 3 dB cuando la se duplica la energía emitida.

Quizás entonces usted hubiera dicho que algo no andaba bien, y hubiera decidido descartar las dos predicciones extremas. En ese caso, el rango de divergencia entre los valores predichos para la situación original se reduciría a (¡apenas!) 10 dB, entre 67,2 y 77,4 dBA.

Con esa información, que tiene aún una variabilidad muy grande, hay que analizar la modificación propuesta de retirar el 90% de los ómnibus que circulan por esa calle, y usted aplica los diez modelos que en principio no había descartado. Pues bien: las reducciones esperables van entre 1,2 y 12,5 dB. Si la modificación en la circulación de los ómnibus logra bajar en más de 12 dB los niveles sonoros en esa vía de tránsito, seguramente se justificará el costo social inicial de las incomodidades a los usuarios y de la esperable reticencia al cambio, y la concomitante mejora en la calidad ambiental podrá capitalizarse hasta como un éxito político. Pero si todo el cambio sólo permite abatir en 1,2 dB los niveles sonoros en la calle por la que transitan los ómnibus, a la vez que genera una cantidad de incomodidades a los usuarios al alejarlos del circuito habitual de las oficinas, este proyecto será un fracaso, y tendrá un elevado costo social y político.

Si usted tuviera que tomar la decisión ¿qué haría?

Deseablemente, habría que conocer qué predicciones hace un modelo de ruido de tránsito desarrollado para la ciudad que se estudia, aún sabiendo que sus resultados necesariamente van a tener errores. Como existe un modelo desarrollado para Montevideo, esto puede hacerse. Aplicando el modelo de González, se llega a los siguientes resultados:

- $L_{eq}$  c/ómnibus = 81,0 dBA
- $L_{eq}$  s/ómnibus = 74,4 dBA

O sea que la reducción esperable en los valores de  $L_{eq}$  es de 6,6 dB.

Los resultados que se obtuvieron una vez hecha la modificación propuesta, que funciona en la Ciudad Vieja de Montevideo desde hace un par de meses, ha permitido lograr un descenso de 6,0 dB en el valor de  $L_{50}$  (ha sido el parámetro relevado por la IMM). Si se toman en cuenta los ajustes de González para obtener el valor de  $L_{eq}$  a partir de  $L_{50}$ , entonces resulta que el descenso en el  $L_{eq}$  sería de 5,3 dB, bajando entre un valor inicial de 78,8 dBA y un valor actual de 73,3 dBA.

## 7 Reflexiones finales

Con este ejemplo práctico reciente se desea ilustrar algunas conclusiones:

- Los modelos predictivos obtenidos en diferentes ciudades pueden dar resultados considerablemente diferentes, aún cuando sean válidos para los rangos de densidad de tránsito a la que se aplican.
- Existe un fuerte condicionamiento entre las ecuaciones predictivas y las características geográficas y fisiológicas de la ciudad, que si bien no aparece en forma explícita en la ecuación que suele salir a correr mundo fuera de contexto, puede inviabilizar su transferencia y aplicación a otra realidad.
- En general el tomador de decisiones no cuenta con suficientes argumentos para escoger entre los diferentes modelos predictivos que se encuentran publicados en la literatura especializada, por lo que deseablemente debería recurrir al apoyo de especialistas antes de expedirse.
- Las predicciones realizadas con un modelo desarrollado para la ciudad de Montevideo permitieron obtener en ambos casos valores dentro de un rango de  $\pm 3$  dBA. Si se hubiera trabajado con el conjunto de doce modelos propuestos y decidido su confiabilidad a partir de que reprodujeran el nivel sonoro de la situación inicial con un error no mayor que 3 dB, entonces se hubiera seguido trabajando con sólo 3 de los doce modelos (numerados como 2, 3, 4 en la tabla). Las reducciones que auguraban estos modelos ante la modificación de tránsito en estudio fluctuaban entre 7,2 y 12,5 dB, y en ningún caso los valores de la predicción de esos mismos modelos una vez retirados los ómnibus lograron mantenerse en el rango de  $\pm 3$  dBA en relación a los valores reales que luego se constataron.

## 8 Bibliografía

Barrigón, J.M.; V. Gómez Escobar; P.D. Gutiérrez; L. Alejandro; M. Casillas; J. Ahmed. Estudio preliminar del ruido ambiental en la ciudad de Cáceres. Anales de Tecniacústica 99. 7 pp. 1999.

Bracho, Alberto. Informe de Pasantía Curricular en Ingeniería Civil: Mapeo Acústico y Análisis de datos preexistentes de la ciudad de Rivera. IMFIA – Facultad de Ingeniería, UdelaR. 38 pág, 2004.

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.

García, A.; S. García; J. Palacios; A. Sandoval; E. Villar. Aplicación de un modelo de ruido urbano a la ciudad de Santander. Revista de Acústica, Vol. IX Núm.4, pp 136-139, 1978.

Garrigues, J.V.; Amando García. Análisis estadístico de los niveles de contaminación sonora medidos en diferentes zonas urbanas a lo largo de las 24 horas del día. Anales de Tecniacústica 97, pp. 49-52, 1997.

González, Alice Elizabeth. Contaminación sonora en ambiente urbano: Optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico. Tesis para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería. 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.

IMM - S.I.M.E. Estudio de la variación del ruido de fondo en la esquina 25 de Mayo y Zabala. 2005.

Jraiw, Kadhim S. Prediction techniques for road transport noise ( $L_{eq}$ ) in built up areas. Proceedings of Inter-noise 86, pp.733-738, 1986.

Jraiw, Kadhim S. A computer model to assess and predict road transport noise in built-up areas. Applied Acoustics 21 147-162, 1987.

Montbrun, Nila; Víctor Rastelli; Alexis Bouza; Jenny Montbrun Di Filippo; Yamilet Sánchez. A Mathematical Model for the Evaluation and Prediction of the Mean Energy Level of Traffic Noise in Caracas. Proceedings of Seattle ASA's Congress, 1998.

Real Academia Española. Diccionario de la Lengua Española. Edición 21, 2133 pp. 1992.

Recuero, M.; C. Gil; J. Grundman; J. Sancho. Prediction equations of outdoor acoustic noise in some towns of Madrid. Proceedings of Inter-noise 97, pp. 843-846, 1997.

Sánchez Rivera, J.I. El ruido del tráfico en Valladolid. Universidad de Valladolid. Caja de Salamanca y Soria. 144 pp. 1991.

Sánchez Rivera, J.I.; J. González Suárez; J. Arenas Bermúdez; V. Poblete. Modelo matemático para la medida del  $L_{eq}$  en zonas urbanas de Chile. Anales de Tecniacústica 96, 4 pp., 1996.