

1 Introducción

Desde hace algunos años uno de los factores que afectan de forma sustancial a la calidad de los ambientes, tanto de espacios interiores como de los exteriores, es el nivel de ruido excesivamente elevado. La preocupación por esta forma de contaminación va adquiriendo en la actualidad la relevancia que el problema demanda, sobre todo en los núcleos urbanos. La medida más importante a considerar es tratar de incidir sobre las fuentes de ruido más relevantes. En las ciudades, y de acuerdo a múltiples estudios, la principal fuente de ruido es el tráfico de los vehículos. Este es el caso de la ciudad de Osorno, que se encuentra en pleno crecimiento, y por lo tanto con expansión de muchas actividades que son potencialmente ruidosas.

El objetivo de un modelo de predicción del ruido del tráfico rodado es el de disponer de una herramienta que permita prever los niveles sonoros que se generan por la existencia de una vía, una modificación de la misma, o bien aquellos niveles de ruido que se producirá con la creación de una nueva vía de circulación del tráfico rodado. En el presente trabajo se comparan diferentes modelos predictivos de tráfico rodado basados en el modelo de fuente con sus respectivas correcciones. Con ello se establecerá el modelo con mejor desempeño según las condiciones de medición utilizadas y las características de la ciudad.

2 Metodología de Muestreo

Las mediciones se realizaron en 104 puntos de las 9 principales vías de la ciudad de Osorno, con el fin de obtener una base de datos apropiada para los fines del trabajo. Se escogieron puntos alejados de cruces y semáforos, ya que el ruido originado por los vehículos en aceleración y desaceleración que son de difícil análisis, y no se han incorporado a este estudio.

Las mediciones realizadas contemplaron un tiempo de muestreo de 15 minutos, en días laborables (Lunes a Viernes), y en horario llamado fuera de punta (09:30-12:30 y 15:30-19:00). Se evitó el congestionamiento vehicular y se privilegiaron mediciones con una velocidad constante de los vehículos que transitaban por las vías. También se descartaron eventos acústicamente anómalos, como ladridos de perros, bocinas, sirenas. Se ubicó el sonómetro a 1.35 metros del suelo y en lo posible a unos 3.5 metros de cualquier superficie reflectante [1], además de ubicarlo a una distancia promedio de 8 metros del eje de la vía.

Los descriptores registrados en las mediciones fueron el L_{Aeq} , $L_{máx}$, $L_{mín}$ y los percentiles L_{10} , L_{50} y L_{90} . Paralelamente se anotaron las medidas de características físicas del entorno del punto de medición, y de las condiciones de tráfico de las vías estudiadas. Esta condición del ruido medido fue más bien estable, según su dependencia en el tiempo, considerando flujos vehiculares mayoritariamente constantes, y en campo libre.

Se registró el flujo vehicular y la clasificación de vehículos: Livianos, Medianos, Pesados. La clasificación se realizó en base al número de ejes y de ruedas, parámetros posibles de observar durante el conteo de vehículos.

Los equipos utilizados en las campañas de medición fueron un sonómetro RION NL-20, una ficha de medición, reloj, cámara fotográfica y huincha de medida. Se utilizó además filtro de viento, siendo las condiciones climatológicas favorables para las campañas de mediciones, lo que implicó generalmente cielos cubiertos sin presencia de chubascos y brisa moderada.

3. Modelos Utilizados

3.1. RLS90

El nivel base a 25 metros se evalúa mediante la expresión [2]:

$$L_{25} = 37,3 + 10 \cdot \log[Q \cdot (1 + 0,082 \cdot P)] + C_{vel} + C_{pav} \text{ (dBA)} \quad (1)$$

Donde Q es la densidad de tráfico en vehículos por hora, y P es el porcentaje de vehículos pesados, en %.

El término de corrección para una velocidad distinta de la asumida por defecto (100 Km/h para ligeros y 80 Km/h para pesados), es el siguiente:

$$C_{vel} = L_{ligeros} - 37,3 + 10 \cdot \log \left[\frac{100 + (10^{0,1 \cdot C}) \cdot P}{100 + 8,23 \cdot P} \right]$$

Donde:

$$L_{ligeros} = 27,8 + 10 \cdot \log[1 + (0,02 \cdot V_{ligeros})^3];$$

$$L_{pesados} = 23,1 + 12,5 \cdot \log(V_{pesados})$$

$$C = L_{pesados} - L_{ligeros}$$

Se utilizó un término de corrección por tipo de carpeta de rodado (C_{pav}) que generará un aumento o una disminución en el nivel de emisión, según los datos de la Tabla 1:

Tabla 1. Ajustes según tipo de carpeta.

Tipo de superficie	Máxima velocidad permitida en Km/hora			
	30	40	>50	>60
Asfalto no ranurado	0	0	0	0
Concreto o asfalto ranurado	1	1,5	2	2
Superficie pedregosa con textura lisa	2	2,5	3	3
Superficie pedregosa con estructura rugosa	3	4,5	6	6
Hormigón con tratamiento escoba metal	1	1	1	1
Asfalto hormigón sin grietas	0	0	0	-2
Asfalto poroso con más de 15% de poros del tipo 0/11	0	0	0	-4
Asfalto poroso con más de 15% de poros del tipo 0/8	0	0	0	-5

3.2. STATENS PLANVERK 96

El descriptor es el nivel sonoro continuo equivalente LA_{eq} , evaluado para un periodo de 24 horas, aunque puede ser evaluado para cualquier intervalo de tiempo [3].

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_{Aeq,10m(ligeros)}}{10}} + 10^{\frac{L_{Aeq,10m(pesados)}}{10}} \right] \text{ (dBA)} \quad (2)$$

Donde:

$$L_{Aeq,10m(pesados)} = L_{AE,10m(pesados)} + 10 \cdot \log \left(\frac{Q_p}{T} \right)$$

$$L_{Aeq,10m(ligeros)} = L_{AE,10m(ligeros)} + 10 \cdot \log \left(\frac{Q_l}{T} \right)$$

$$L_{AE,10m(ligeros)} = 73,5 + 20 \cdot \log \left(\frac{V_l}{50} \right), \text{ para } V_l \geq 40 \frac{Km}{h}$$

$$L_{AE,10m(ligeros)} = 71, \text{ para } V_l < 40 \frac{Km}{h}$$

$$L_{AE,10m(pesados)} = 81 + 30 \cdot \log \left(\frac{V_p}{50} \right), \text{ para } 50 \frac{Km}{h} \leq V_p \leq 90 \frac{Km}{h}$$

$$L_{AE,10m(pesados)} = 81, \text{ para } V_p < 50 \frac{Km}{h}$$

Siendo Q_l y Q_p el número de vehículos ligeros y pesados, respectivamente, durante el intervalo de tiempo T, en segundos.

3.3. CERTU

El modelo francés, tiene en cuenta la geometría de la calle dividiéndose los viarios en calle encajada (con perfil en U) o calle con una sola acera edificada (perfil en L). En su forma más simple sería [3]:

$$L_{eq} = 20 + 10 \cdot \log(Q_l + E \cdot Q_p) + 20 \cdot \log(V) - 12 \cdot \log \left(d + \frac{I_c}{3} \right) \text{ (dBA)} \quad (3)$$

Siendo Q_l y Q_p el número de vehículos ligeros y pesados; E factor de equivalencia entre vehículos ligeros; V velocidad (km/h); d distancia al borde de la carretera; I_c anchura de la carretera.

3.4. CORTN

En este modelo, el índice descriptor del nivel sonoro es el percentil L_{10} [4]:

$$L_{básico} = 42,2 + 10 \cdot \log(Q_l) + C_{vel} + C_{low} \text{ (dBA)} \quad (4)$$

Donde Q_l es el número de vehículos ligeros por hora.

La corrección para otra velocidad y tráfico compuesto viene dada por:

$$C_{vel} = 33 \cdot \log\left(V + 40 + \frac{500}{V}\right) + 10 \cdot \log\left(1 + 5 \cdot \frac{P}{V}\right) - 68,8$$

Este modelo adiciona un ajuste al considerar un flujo de vehículos bajo y distancia pequeña entre la fuente y el receptor. Se califica como flujo bajo al inferior a 200 vehículos por hora.

$$C_{low} = -16,6 \cdot \log\left(\frac{30}{d'}\right) \cdot \log^2\left(\frac{Q_l}{200}\right)$$

Donde d' es la distancia directa desde la fuente al receptor.

3.5. Fagoti

El descriptor utilizado por este modelo es el nivel sonoro continuo equivalente, y se basa en análisis de regresión [5].

$$L_{eq} = 10 \cdot \log(Q_l + Q_m + 8 \cdot Q_p + 88 \cdot Q_b) + 33,5 \text{ (dBA)} \tag{5}$$

Donde Q_l, Q_m, Q_p, Q_b son los flujos de vehículos livianos, motocicletas, vehículos pesados y buses respectivamente.

3.6. Sánchez

El nivel de emisión de referencia LRE se calcula a 25 metros del centro de la calzada. La ecuación del modelo de emisión es como sigue [6]:

$$LRE = 35,1 + 10 \cdot \log(Q_l + 8 \cdot Q_p) + C_{vel} + C_{pav} \text{ (dBA)} \tag{6}$$

Donde Q_l y Q_p son los flujos de vehículos ligeros y pesados respectivamente; y C_{vel} es una corrección por velocidad de circulación de los diferentes vehículos. La Tabla 2 da cuenta de la corrección por velocidad:

Tabla 2. Valores C_{vel} para distintas velocidades de circulación.

Velocidad ($\frac{Km}{h}$)	C_{vel} (dBA)
<50	0
60	1
70	2
80	3
90	4

La corrección por pavimento considera el tipo de calzada presente y su influencia en los niveles de emisión de la fuente, según Tabla 3:

Tabla 3. Valores C_{pav} según el tipo de calzada.

Tipo de pavimento	C_{pav} (dBA)
Asfalto liso	-0,5
Asfalto rugoso	0
Hormigón	1,5
Adoquinado	4

3.7. FHWA

Este modelo calcula las contribuciones de los automóviles livianos, camiones medianos y camiones pesados en forma separada, adicionándolos energéticamente en la formulación final. La distancia de referencia corresponde a 15,2 metros medidos desde el centro de la vía de dos carriles. Los niveles básicos para cada tipo de vehículo son [2]:

Automóviles:

$$L_{BA} = 38,1 \cdot \log(V_l) - 2,4 + C_{traf}$$

Camiones medianos:

$$L_{BCM} = 33,9 \cdot \log(V_M) + 16,4 + C_{traf}$$

Camiones pesados:

$$L_{BCP} = 24,6 \cdot \log(V_p) + 38,5 + C_{traf}$$

Donde V_l, V_M, V_p son las velocidades medias de los automóviles, camiones medianos y camiones pesados respectivamente.

Estos niveles básicos son modificados por la corrección por intensidad de tráfico, obteniéndose el nivel de referencia LRE . Esta corrección se detalla a continuación:

$$C_{traf} = 10 \cdot \log\left(\frac{15,2 \cdot Q_i}{V_i}\right) - 25$$

Donde Q_i es el flujo horario del tipo i de vehículo expresado en vehículos por hora y V_i es la velocidad media del tipo de vehículo expresada en Km./h.

Se obtiene la suma energética de las contribuciones de los diferentes vehículos como se detalla a continuación:

$$LRE = 10 \cdot \log\left[10^{\left(\frac{L_{BA}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{BCM}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{BCP}}{10}\right)}\right] \text{ (dBA)} \quad (7)$$

3.8. González

Este modelo fue desarrollado en la ciudad de Montevideo y se basa en análisis de regresión para los datos obtenidos en la ciudad. El descriptor utilizado es el nivel sonoro continuo equivalente que se describe a continuación [7]:

$$L_{eq} = 49,4 + 10 \cdot \log(A + 2,33 \cdot M + 9,01 \cdot O + 6,84 \cdot C) - 10 \cdot \log(d) \quad (\text{dBA}) \quad (8)$$

Donde A , M , O , C son los flujos de los automóviles, motocicletas, ómnibus y camiones respectivamente d es la mitad del ancho de la calle medida en metros.

3.9. CONAMA96

Este modelo es un "Borrador de Norma de Calidad Acústica de Viviendas", elaborado por Ambiente Consultores Ltda. El descriptor que utiliza este modelo es el nivel sonoro continuo equivalente que se detalla a continuación [8]:

$$L_{eq} = 60 + 10 \cdot \log(FVE) - 14 \cdot \log(d) + 0,2 \cdot (VMA - 50) \quad (\text{dBA}) \quad (9)$$

Donde d es la distancia entre el borde de la calzada y la ventana representativa de la fachada más próxima medida en metros; FVE es el flujo de vehículos equivalente medido en vehículos por hora y VMA es la velocidad máxima autorizada.

$$FVE = FVL + 7 \cdot FVP$$

Donde FVL y FVP son los flujos de vehículos livianos y pesados respectivamente.

3.10. CONAMA 2001

Se considera como modelo base el método establecido por la Federal Transit Administration (FTA). Este método efectúa el análisis tomando como referencia niveles SEL por categoría de vehículos, factibles de calibrar a la realidad del parque nacional.

El modelo se expresa a continuación [8]:

$$N_{ref} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{eq}(\text{livianos})}{10}} + 10^{\frac{L_{eq}(\text{medianos})}{10}} + 10^{\frac{L_{eq}(\text{pesados})}{10}} \right) \quad (\text{dBA}) \quad (10)$$

Donde

$$L_{eq}(\text{livianos}) = 75 + 10 \cdot \log(Q_l) + 28,1 \cdot \log\left(\frac{V_l}{80}\right) - 35,6$$

$$L_{eq}(\text{medianos}) = 80 + 10 \cdot \log(Q_m) + 23,9 \cdot \log\left(\frac{V_m}{80}\right) - 35,6$$

$$L_{eq}(\text{pesados}) = 84 + 10 \cdot \log(Q_p) + 14,6 \cdot \log\left(\frac{V_p}{80}\right) - 35,6$$

Donde Q_l, Q_m, Q_p son los flujos de vehículos livianos, medianos y pesados respectivamente; siendo también V_l, V_m, V_p las respectivas velocidades de los vehículos antes enunciados expresadas en Km./h.

3.11. Valdivia 1995

Este modelo es una modificación del modelo español desarrollado por Sánchez ajustado a las condiciones de tránsito reinantes en las vías de Chile. El descriptor es el nivel continuo equivalente medido a 25 metros del centro de la vía que se describe a continuación [6]:

$$LRE = 33,6 + 10 \cdot \log(Q_l + 9,2 \cdot Q_p + 6,0 \cdot Q_B) + C_{vel} + C_{pav} \text{ (dBA)} \quad (11)$$

Donde Q_l, Q_p, Q_B son los flujos de vehículos livianos, pesados y buses respectivamente. Aparte se le adiciona una corrección por velocidad de circulación y una corrección por tipo de carpeta de rodado que fueron descritas en el modelo de Sánchez.

4. Ajustes de los Modelos

Algunos de los modelos utilizados en la comparativa se ajustaron de manera que pudieran incorporar las características locales de las superficies de rodado (Ilustración 1), y de la clasificación del tipo de vehículo. También se utilizaron correcciones asociadas a las distancias de referencia para modelos y mediciones, con el fin de comparar apropiadamente los resultados. En algunos modelos se emplearon equivalencias acústicas para representar los resultados con los mismos descriptores acústicos (caso modelo CORTN). Respecto al flujo vehicular se debe señalar que en aquellos modelos utilizados que entregan el valor del LA_{eq} de una hora, se ha supuesto que el flujo vehicular de una hora de medición es cuatro veces el flujo vehicular registrado en los 15 minutos medidos. La diferenciación de los tipos de vehículos según cada modelo, se analizó caso a caso de acuerdo a sus características.

Ilustración 1. Tipo de carpeta de rodado presente en la ciudad.



5. Conclusiones

Los modelos representan una poderosa herramienta cuyo campo de aplicación incluye la planificación de espacios, control de impacto acústico sobre el ambiente, desarrollo de nuevas legislaciones para regular la contaminación acústica, entre otros.

Al comparar el L_{Aeq} medido con el L_{Aeq} calculado con los diferentes modelos, obtenemos el coeficiente de correlación “r” que se muestra en la Tabla 4.

El modelo de países nórdicos SP96 muestra un mejor comportamiento de acuerdo a la comparación con los datos medidos en la ciudad. El modelo CONAMA96 entrega valores sustancialmente diferentes de los valores medidos. Para el caso del modelo CERTU, si bien no responde tan bien a la comparación con los datos medidos, parece que la ponderación que se aplica al término de velocidad influye importantemente los resultados.

A la luz de los resultados de este trabajo, se puede señalar que tanto el modelo SP96, como el inglés CORTN, y el desarrollado por CONAMA01 son instrumentos útiles para predecir el nivel de ruido en una ciudad media chilena como Osorno, a partir del flujo de vehículos, y de incorporar las situaciones particulares de los puntos de medida.

Tabla 4. Resultados de los modelos preexistentes.

Modelo	RLS90	SP96	CERTU	CORTN	Fagoti	Sánchez	FHWA	González	CONAMA 96	CONAMA 01	Valdivia
Error Absoluto (dBA)	3,3	1	5,9	1,1	3,2	3,5	3,3	4,6	7,2	2	2,1
r	0,858	0,911	0,900	0,904	0,681	0,900	0,839	0,850	0,496	0,888	0,904
Pais	Alemania	Países Nórdicos	Francia	Inglaterra	Italia	España	EEUU	Uruguay	Chile	Chile	Chile

6. Referencias

[1] ISO. 1997. International Organization for Standardization. ISO 1996 2 Acoustics - Description and Measurement of Environmental Noise.

[2] Jorge Cárdenas Mansilla. 2004. Diseño y desarrollo de una herramienta informática simple para la predicción de ruido de tráfico vehicular en vías urbanas de la ciudad de Valdivia-Chile. Trabajo presentado como parte de los requisitos para optar al grado de doctor en acústica, Universidad Politécnica de Madrid.

[3] González J.; Machimbarrena M.; Sánchez J. I. 2002. Estudio Comparativo de Modelos Predictivos de Ruido para Tráfico Rodado. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.

[4] Arana, M.; Martínez de Virgala, A.; Aleixandre, A.; San Martín, M.L.; Vela, A. 2000. Modelos de Predicción del Ruido de Tráfico Rodado. Comparación de Diferentes Standards Europeos. TecniAcústica Madrid. Ref. Pacs: 43.50.Ba.

[5] Cvetković D.; Prašević M.; Stojanović V. 2000. Model for traffic noise. Department of Noise and Vibration, Faculty of Occupational Safety, University of Niš, Čarnojevića 10a, 18000 Niš, Yugoslavia, 2 Advanced Technical School, Beogradska 20, 18000 Niš, Yugoslavia. Journal Facta Universitatis Working and Living Environmental Protection (1) 2, 73 – 81.

[6] Sánchez J.I. y González J. 1996. Modelo matemático para la medida del L_{eq} en zonas urbanas de Chile. Jornadas Nacionales de Acústica TecniAcústica Barcelona 96.

[7] González A. E. 2000. Desarrollo de un modelo predictivo de ruido urbano adaptado a la realidad de la ciudad de Montevideo, Uruguay. Universidad de la República Oriental del Uruguay.

[8] Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. 2001. Elaboración de propuesta de normativa para la regulación de contaminación acústica generada por carreteras y autopistas.