

$$L_w = A + 10 \log \left[\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) \cdot \left(1 + B \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right] + 10 \log(N) + Coor$$

Donde $A=43$ y $B=20$ son dos constantes empíricas, v es la velocidad media de todo el flujo vehicular, ε es la razón entre el número de vehículos pesados y la cantidad total de vehículos, N es el flujo total de vehículos por hora y $Coor$ es una corrección dependiendo del tipo de carpeta y la pendiente de la carretera.

3.4. Consideraciones y Factor de Corrección

Para realizar una comparación entre los niveles proyectados y medidos, se debe hacer una corrección asociada a la distancia y altura de referencia de los modelos, ya que los tres modelos entregan valores de emisión para distancias y alturas de referencia diferentes a las distancias y alturas utilizadas en terreno. Por lo anterior, se optó en utilizar un factor de atenuación basado en la atenuación por distancia de una fuente lineal sobre una superficie reflectante (divergencia cilíndrica) [26][27] y en el teorema de Pitágoras. El factor de corrección utilizado está dado por la siguiente ecuación [5]:

$$Factor\ de\ corrección = 10 \log \left(\sqrt{\frac{d_{fr}^2 + (h_r - h_f)^2}{d_{ref}^2 + (h_{ref} - h_f)^2}} \right)$$

Donde:

d_{fr} es la distancia de la fuente al receptor (donde se realizó la medición), d_{ref} es la distancia de referencia de los modelos, h_r es la altura donde se quiere evaluar el nivel (donde se realizó la medición), h_{ref} es la altura de referencia de los modelos y h_f es la altura de la fuente (todo en metros).

Por otra parte, los modelos utilizados se ajustaron para que pudieran incorporar las características locales de las superficies de rodado y clasificación del tipo de vehículo. Además, se ha supuesto que el flujo vehicular de una hora es cuatro veces el flujo de 15 minutos.

4. RESULTADOS

Teniendo en cuenta la cantidad de ciudades y/o comunas estudiadas, se optó en mostrar los resultados globales obtenidos de forma gráfica. En la Figura 1 se muestra los diferentes diagramas de cajas para los distintos modelos y en la Figura 2 se presenta los diagramas de dispersión y las estimaciones de regresión, tomando como variable dependiente el nivel medido y como variable independiente los niveles proyectados por cada modelo.

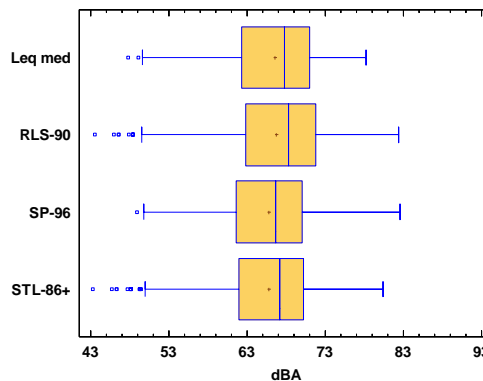


Figura 1. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados globales de todas las ciudades y/o comunas para los distintos modelos.

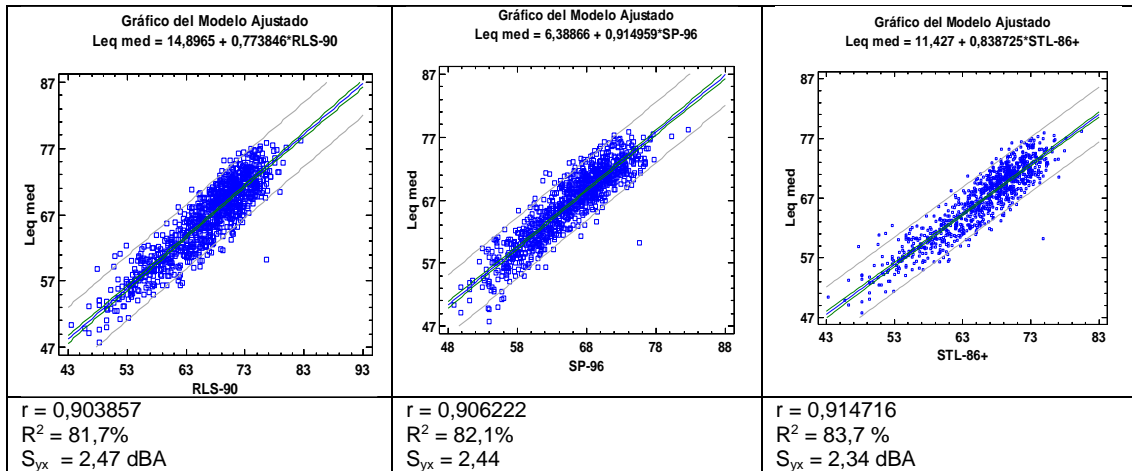


Figura 2. Curva de dispersión de los resultados globales de todas las ciudades entre los niveles proyectados y observados para los distintos modelos.

Por otra parte, en la Tabla 3, se muestra un resumen de los datos obtenidos para cada ciudad y/o comuna y el resultado global de todos los estudios.

Tabla 3. Resumen resultados obtenidos en cada comuna o ciudad.

Ciudad o Comuna	Modelo	Prom. Error Absoluto (dB(A))	Desv. Estándar (dB(A))	% Puntos < 1 dB(A)	% Puntos < 3 dB(A)	% Puntos Sobre-estimados	% Puntos Sub-estimados	Coefficiente R Pearson
Antofagasta	RLS-90	2,56	4,74	28,4	62,7	82,4	17,6	0,88
	SP-96	1,40	4,22	38,2	92,2	56,9	43,1	0,92
	STL-86+	1,74	4,40	29,4	86,3	58,8	41,2	0,90
Providencia	RLS-90	1,64	5,07	37,5	84,4	37,5	62,5	0,92
	SP-96	1,75	4,79	36,5	80,2	45,8	54,2	0,90
	STL-86+	1,80	4,80	31,3	78,1	28,1	71,9	0,92
Gran Santiago	RLS-90	2,08	7,21	29,5	73,8	36,7	63,3	0,95
	SP-96	2,24	6,56	27,5	71,8	32,8	67,2	0,92
	STL-86+	2,32	6,78	23,0	69,5	21,3	78,7	0,95
Temuco y Padre Las Casas	RLS-90	2,94	8,04	18,6	59,8	59,8	40,2	0,91
	SP-96	2,15	5,54	25,5	69,6	37,3	62,7	0,94
	STL-86+	2,41	7,51	21,6	66,7	49,0	51,0	0,92
Coquimbo y La Serena	RLS-90	2,55	6,91	26,3	68,4	44,7	55,3	0,86
	SP-96	2,23	5,24	33,3	72,8	28,1	71,9	0,86
	STL-86+	2,53	6,45	21,9	71,1	33,3	66,7	0,87
Valdivia	RLS-90	2,25	6,57	28,0	72,0	47,0	53,0	0,90
	SP-96	2,62	4,29	23,0	56,0	27,0	73,0	0,93
	STL-86+	2,24	6,09	30,0	70,0	29,0	71,0	0,91
Osorno	RLS-90	2,50	4,15	17,4	42,4	94,6	5,4	0,88
	SP-96	0,95	3,26	57,6	97,8	52,2	47,8	0,93
	STL-86+	1,40	3,73	44,6	94,6	39,1	60,9	0,90
Global	RLS-90	2,30	6,75	27,8	70,3	51,3	48,7	0,90
	SP-96	2,04	5,72	31,2	75,1	38,4	61,6	0,91
	STL-86+	2,14	6,30	26,7	74,5	35,9	64,1	0,91

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Analizando la Figura 1 se aprecia la similitud de la dispersión de los tres modelos y los niveles medidos, salvo algunos puntos outliers que llevan a la media hacia la izquierda. Por otra parte, en la Figura 2 se observa que los tres modelos presentan coeficiente de regresión altamente significativos, con errores estándar de medición similares variando entre 2,34 y 2,47 dBA. En relación al grado de explicación de cada modelo sobre el valor medido, el STL-86 alcanza un 83,7% de explicación, seguido por el SP-96 con un 82,1% y luego el RLS-90 con un 81,7%.

Respecto a la Tabla 3, se concluye que los tres modelos presentan coeficientes R Pearson muy similares, acercándose a una correlación positiva perfecta (valores muy cercanos a $R=1$). Además, respecto a la sobreestimación de niveles, el RLS-90 alcanza un 51,3%, seguido del SP-96 con un 38,4% y finalmente el STL-86+ con un 35,9%. Esto último resulta fundamental, desde el punto de vista de ingeniería, debido a la posibilidad de trabajar con un margen de seguridad, por ejemplo al momento de diseñar una medida de control.

6. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis comparativo entre distintos modelos de ruido de tránsito vehicular y niveles de ruido medidos en distintas ciudades y comunas de Chile, estudiando 911 muestras.

De los resultados obtenidos, se aprecia que los tres modelos estudiados, RLS-90, SP-96 y STL-86+, presentan resultados muy similares, siendo el modelo STL-86+ el que entrega un mayor grado de explicación, lo que implica un menor error de estimación.

Por otra parte, las diferencia entre los errores que presenta cada modelo es poco significativa, considerando que varían entre 2,34 y 2,47 dBA. Por lo anterior, es importante considerar otras variables para seleccionar un modelo de ruido de tránsito para Chile. En este sentido, el modelo RLS-90 alcanza un mayor porcentaje de sobreestimación de niveles de ruido, siendo un factor a considerar para aplicaciones de ingeniería.

Además, se concluye que los tres modelos estudiados son válidos para hacer estudios en Chile, considerando un error promedio entre los niveles proyectados y reales de 3 dBA, lo cual es un margen razonable para el nivel de información con que se han trabajado en los modelos.

En virtud de los análisis realizados, un modelo de predicción de ruido de tránsito vehicular que entrega mejores estimaciones en las ciudades chilenas, es el modelo RLS-90

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se podría haber realizado sin la ayuda del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, ya que facilitaron todos los datos de los estudios de ruido que se han elaborado en Chile.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Elaboración de Mapas de Ruido mediante Software de Modelación, para Caso Piloto (Comunas de Antofagasta y Providencia) (Contrato N° 01-059/09). Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (2009).
- [2] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración de Mapa de Ruido Comuna De Santiago Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación N° 1588-67-LE10. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (2010).
- [3] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración de Mapa de Ruido del Gran Santiago Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación N° 608897-12-LE11. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (2011).
- [4] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración y Análisis de Mapas de Ruido de tres Conurbaciones Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación N° 608897-LP12. Proyecto en ejecución por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile; 2013-2015.
- [5] Bastián, N.; Álvarez, J.P.; Moreno, F. Evaluación de Modelos de Predicción de Ruido de Tránsito Vehicular en Ciudades Pequeñas: Casos Ciudad de Valdivia y Osorno. IX Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2014. Valdivia, Chile (2014).

- [6] Álvarez, J.; Suárez, E. Estudio Comparativo de Modelos de Predicción de Ruido de Tráfico Rodado Utilizando Mediciones en la Ciudad de Osorno. VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires, Argentina; 2008
- [7] International Organization for Standardization. International Standard ISO 1996-2: 2007, *Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures*. International Organization for Standardization; 2007, Switzerland.
- [8] Steele, C. A critical review of some traffic noise prediction models. *Applied Acoustics*. Volume 62, 2001, Pages 271-287 (2001).
- [9] Garg, N.; Maji, S. A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. *Environmental Impact Assessment Review*. Volume 46, 2 March 2014, Pages 68-81 (2014).
- [10] Barry, T.M.; Reagan, J.A. FHWA highway traffic noise prediction modelo, FHWA-RD-77-108. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research, Office of Environmental Policy Washington, DC: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research, Office of Environmental Policy (1978).
- [11] Department of Transport. Calculation of road traffic noise. Department of Transport, Welsh Office, HMSOU.K: Department of Transport, Welsh Office, HMSO (1998).
- [12] Der Bundesminister Für Verkehr. Abteilung StraBenbau. Richtlinien für den Lärmschutz an StraBen RLS-90. Ausgabe (1990).
- [13] Yamamoto, K. Road traffic noise prediction model "ASJ RTN-Model 2008": report of research committee on road traffic noise. *Acoust Sci Technol* 2010;31:1-55 (2010).
- [14] Watts, G. Harmonoise prediction model for road traffic noise, PPR 034 (2005).
- [15] Heutschi, K. Son Road: New Swiss road traffic noise model. *Acta Acust United Acust* 2004;90:548-54 (2004).
- [16] INFORMATIONS CONCERNANT L'ORDONNANCE SUR LA PROTECTION CONTRE LE BRUIT (OPB) N°6 – Bruit du trafic routier: Correction applicable au modèle de calcul du trafic routier, in *L'environnement pratique*. 1995, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, 1995).
- [17] Heutschi, K. SonRoad. Modèle de calcul du trafic routier. 2004, Office federal de l'environnement, des forêts et du paysage. P. 74. (2004)
- [18] Cárdenas, J. 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. Madrid, España (2004).
- [19] Kragh, J.; Svein, A.; Jonasson, H.G. Nordic environmental noise prediction methods. Nord 2000, summary report. Denmark: DELTA (2002).
- [20] Dutilleul, G.; Defrance, J.; Ecotiére, D.; Gauvreau, B.; Bérengier, M.; Besnard, F, et al. NMPB-Routes 2008: the revision of the French method for road traffic noise prediction. *Acta Acust United Acust* 2010;96:1-11 (2010).
- [21] Kephelopoulos, S.; Paviotti, M.; Anfosso-Lédée, F. Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU); 2012;1-180.
- [22] Suárez, E.; Barros, J.L. Traffic Noise Mapping of the City of Santiago de Chile. *Science of the Total Environment*. Volumes 466-467, 1 January 2014, Pages 539-546 (2014).
- [23] Dintrans, A.; Préndez, M. A method of assessing measures to reduce road traffic noise: A case study in Santiago, Chile. *Applied Acoustics* 2013;74:1486-1491 (2013).
- [24] EMPA. Modèle de calcul de bruit du trafic routier pour ordinateur – Les cahiers de l'environnement n°60. 1987, Office fédéral de la protection de l'environnement (1987).
- [25] Aballea, F.E.; Rene, P.F. Uodate of the Swiss Source Model for Road Traffic Noise. The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration ICSV 16, Kraków, Poland (2009).
- [26] Gerges, S.N.Y.; Arenas, J.P. Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones, 2da Ed., NR Editora, Florianópolis (2010).
- [27] Möser, M.; Barros, J.L. Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones. 2da Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009).