

ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL VIENTO EN LA MEDICIÓN DE RUIDO URBANO UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA

WIND EFFECTS ESTIMATION ON URBAN NOISE MEASUREMENT USING FUZZY LOGIC

Lucas E. Di Giorgio y Martín E. Sequeira

*Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional,
Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de Abril 461, Bahía Blanca, Argentina,
ldigiorgio@frbb.utn.edu.ar, martins@frbb.utn.edu.ar, www.frbb.utn.edu.ar*

Palabras clave: Ruido urbano, Monitoreo continuo, Efecto del viento, Lógica difusa.

Resumen. El presente artículo tiene como propósito realizar un modelo no lineal basado en un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo que permita estimar efectos del viento en los registros sonoros de una red de monitoreo. Los registros sonoros y meteorológicos utilizados para el entrenamiento del modelo corresponden a la red de monitoreo continuo de ruido urbano del municipio de Bahía Blanca. Esta red se encuentra en una zona residencial de la localidad de Ingeniero White, perteneciente a dicha ciudad, la cual posee la particularidad de limitar con un polo industrial donde se emplazan distintas plantas de procesos continuos. El modelo no lineal es implementado mediante el Matlab Fuzzy Logic Toolbox™. Se analizan diversas situaciones meteorológicas de interés y se contrastan los resultados con los obtenidos mediante un modelo lineal.

Keywords: Urban noise, Continuous monitoring, Wind effect, Fuzzy logic.

Abstract. In this paper, a nonlinear model based on an adaptive neuro-fuzzy inference system to estimate wind effects on sound propagation from a monitoring network is developed. The sound and meteorological records used to train the model come from continuous urban noise monitoring network of the municipality of Bahía Blanca. This network is in a residential zone in the Ingeniero White district, which is adjacent to an industrial pole where various continuous process plants are located. The nonlinear model is implemented by means of the Matlab Fuzzy Logic Toolbox™. Meteorological situations of interest are analyzed, and the results are contrasted with those obtained by means of a linear model.

1 INTRODUCCIÓN

El grado de contaminación sonora generado por la actividad industrial en zonas residenciales cercanas depende en gran medida de las condiciones meteorológicas existentes. En tal sentido, los efectos debidos al viento, la temperatura y las turbulencias provocan la refracción, la dispersión y la absorción del sonido generando trayectorias ascendentes o descendente que influyen en los cambios de los niveles sonoros, sobre todo a grandes distancias. Por otro lado, la topología urbana provoca la reflexión, absorción y difracción de las ondas sonoras al interactuar con el suelo y las edificaciones, lo que puede dar lugar a zonas urbanas protegidas por efecto de apantallamiento. Sin embargo, debido a las condiciones meteorológicas, los niveles de emisión pueden propagarse a través de los obstáculos y eliminar el efecto de protección mencionado (Trikoortam y Hornikx, 2019).

La influencia de los efectos meteorológicos en la propagación sonora es un tema de investigación recurrente. En particular, se han realizado diversos estudios experimentales en relación con los efectos de las condiciones meteorológicas bajo distintos escenarios, contemplando fuentes sonoras no controladas, y diferentes características del camino de propagación como campo libre (Oshima and Ii, 2013; Hohenwarter et al., 2022) y zonas urbanas (Trikoortam y Hornikx, 2019).

En este contexto, una alternativa para analizar las complejas relaciones entre las características meteorológicas que afectan la propagación sonora en ambientes exteriores es el uso de enfoques basados en inteligencia artificial. En la actualidad, los conjuntos difusos y las redes neuronales son reconocidos como un nuevo método de predicción que permiten estudiar las relaciones no lineales involucradas en fenómenos complejos reales con gran robustez y simplicidad (Aliabadi et al., 2013; Rizwan et al., 2014).

Este artículo presenta un enfoque computacional basado en la aplicación de un sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para predecir el efecto del viento y la temperatura en la variación de los niveles sonoros, en el rango de baja y media frecuencia, en una zona residencial aledaña a un complejo industrial en la ciudad de Bahía Blanca. Los registros utilizados corresponden al año 2022, considerando una franja horaria donde los niveles de emisión de las fuentes industriales son predominantes. Los resultados son comparados con los obtenidos mediante un modelo de regresión lineal múltiple. Finalmente se analizan algunas situaciones de interés, las cuales son dependientes de la ubicación de las fuentes sonoras.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio y características de las mediciones

En la Figura 1(a) se muestran la zona de estudio y la delimitación entre el área residencial e industrial. En el sector industrial se observan las locaciones de las principales plantas de procesos continuos (rectángulos blancos) las cuales funcionan de manera permanente y son las responsables, en mayor medida, del ruido de fondo del sector. En la zona urbana, se observa la ubicación de la estación de monitoreo continuo EMAC 2 (sonómetros B&K 2270 clase I, ubicados a 5 m de altura) la cual se encuentra emplazada en un predio de un grupo Scout de la comunidad, aproximadamente a 300 m de la zona industrial y a 1000 m de la estación meteorológica. Esta última se encuentra emplazada en la terraza de edificio perteneciente al Comité Técnico Ejecutivo, CTE, organismo municipal encargado del control y monitoreo de las industrias instaladas en el sector del polo industrial y área portuaria. Es importante remarcar que ambos equipos de medición pertenecen al CTE y son utilizados para registrar las características del paisaje sonoro y condiciones climatológicas en tiempo real.

En un estudio anterior, los autores caracterizaron el nivel sonoro medio para el año 2022 en la estación de medición ubicada en la zona residencial e identificaron la franja horaria (de 1 a.m. a 4 a.m.) que presentan los niveles mínimos, correspondientes principalmente con los niveles de baja y media frecuencia emitidos por las fuentes industriales (Sequeira et. al, 2023). En este trabajo, se analiza los niveles sonoros y datos climatológicos para dicho periodo y franja horaria con la finalidad de estimar la influencia de la dirección y velocidad de viento en la propagación sonora de origen industrial. En la Figura 1(b) se muestra la rosa de los vientos que representa la velocidad y dirección del viento durante el año 2022 para la franja horaria establecida. La dirección del viento se contempla mediante 16 puntos cardinales, es decir, una cada $22,5^\circ$. Cada barra de color representa la proporción de la clase específica de velocidad para la dirección a favor del viento. La frecuencia de las velocidades del viento se muestra en el orden ascendente de los círculos concéntricos. Es importante aclarar que se limitó el análisis a velocidades de viento de hasta 5 m/s para evitar las alteraciones en los registros sonoros debido a ruidos espurios y/o efectos de turbulencia en el micrófono. Así mismo, fueron consideradas todas las recomendaciones dadas por normativas nacionales para una evaluación representativa de los niveles sonoros (IRAM 4062, 2016).

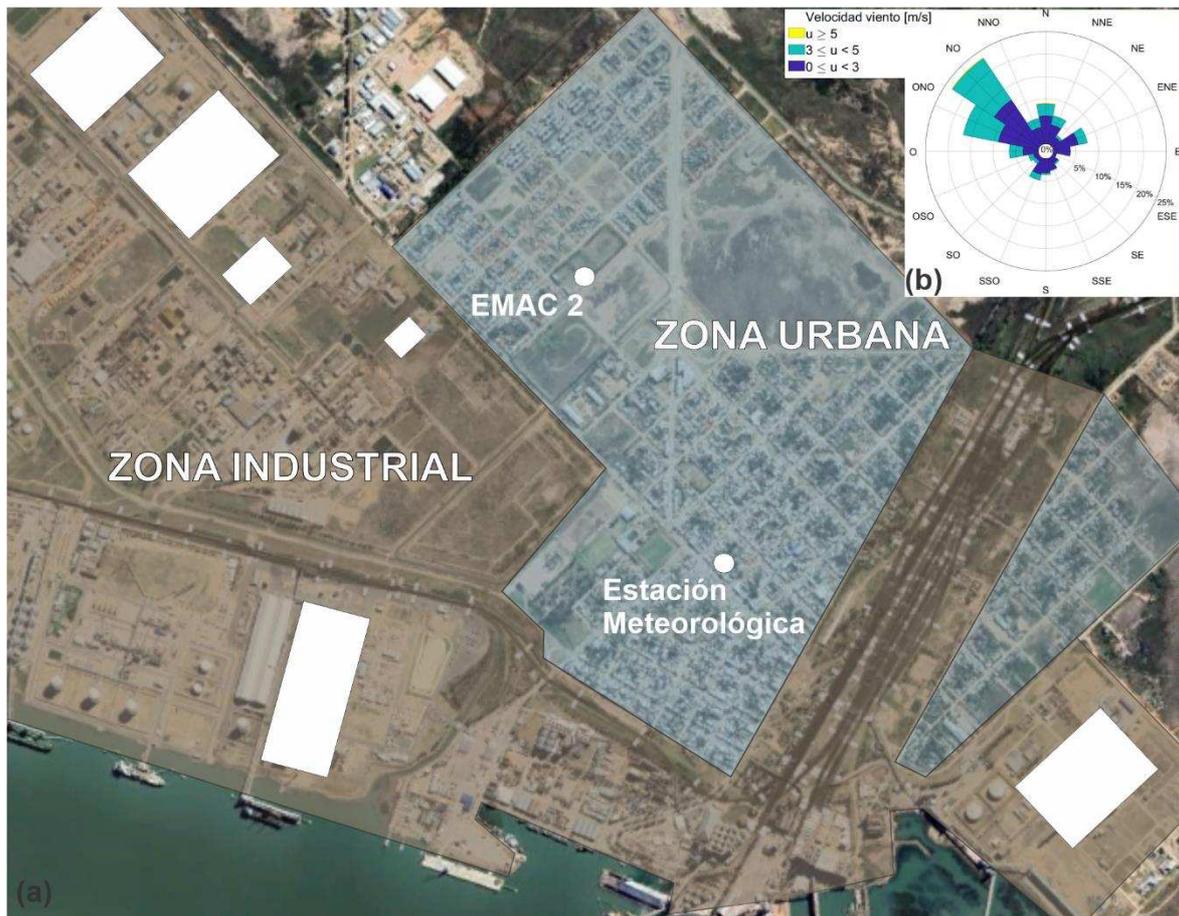


Figura 1: (a) Zona de estudio y ubicación de la estación de monitoreo continuo (EMAC 2) y la estación meteorológica. (b) Rosa de los vientos para el año 2022 y franja horaria de 1 a.m. a 4 a.m.

2.2 Variables del estudio

Los registros sonoros se analizaron por bandas de octava de 63 a 500 Hz con un tiempo de integración de una hora. Los parámetros climatológicos considerados fueron la velocidad u y

dirección del viento, y la temperatura T . Los registros de u y T se obtuvieron cada una hora. La temperatura fue incluida en el análisis debido a su influencia en la propagación del ruido en el rango de media frecuencia. Tanto la humedad relativa, como la presión atmosférica, quedaron fuera de análisis debido a que sus efectos en la propagación del ruido están relacionados y contemplados en la variable temperatura. Las características estadísticas de las variables se muestran en la Tabla 1.

| Variable | Min. | Max. | Moda | Desvío |
|-----------------------------|------|------|------|--------|
| velocidad viento, u (m/s) | 0,5 | 5 | 2,5 | 1,2 |
| Temperatura, T (°C) | 1,3 | 31,4 | 14,3 | 6,3 |
| Leq _{63Hz} (dB) | 52,2 | 67,2 | 55,9 | 2,7 |
| Leq _{125Hz} (dB) | 46,4 | 60,8 | 53,5 | 2,9 |
| Leq _{250Hz} (dB) | 40,8 | 59,9 | 53,9 | 3,8 |
| Leq _{500Hz} (dB) | 39,1 | 56,4 | 49,5 | 3,3 |

Tabla 1: Valores estadísticos de las variables.

2.3 Modelo de lógica difusa

Un sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS) es una técnica híbrida que aporta las capacidades de aprendizaje de las redes neuronales a los sistemas de inferencia difusos. El algoritmo de aprendizaje ajusta las funciones de pertenencia de un sistema de inferencia difusa (FIS) Takagi- Sugeno (Takagi y Sugeno, 1985), utilizando datos de entrenamiento de entrada y salida.

En este trabajo, la estructura FIS se construyó a partir de los datos experimentales utilizando la agrupación sustractiva, un algoritmo de clasificación que permite identificar agrupaciones naturales en el conjunto de datos para producir una representación adecuada del comportamiento del sistema. Entonces, se obtienen el total de agrupaciones (clusters) y los respectivos centros en el conjunto de datos a partir de considerar conjuntos separados de datos de entrada y salida como argumento. La agrupación sustractiva agrupa los datos en conjuntos separables basados en radios definidos por el usuario. Luego, el algoritmo determina el número de reglas y las funciones de pertenencia antecedentes y, a continuación, utiliza la estimación lineal por mínimos cuadrados para determinar las ecuaciones consecuentes de cada regla. La función entrega una estructura FIS que contiene un número mínimo de reglas de aprendizaje y funciones de pertenencia difusas que modelan el comportamiento de los datos. Finalmente, la estructura FIS se optimiza a partir del algoritmo de aprendizaje híbrido ANFIS para mejorar los parámetros del sistema. Dicho algoritmo consiste en el método de descenso de gradiente de retropropagación para el entrenamiento de los parámetros asociados a las funciones de pertenencia de entrada y estimación por mínimos cuadrados para los parámetros asociados a las funciones de pertenencia de salida (Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide, 2020, Aliabadi et al., 2013).

Para evitar el problema del sobreajuste de los datos de entrenamiento, el proceso de ajuste implementado en ANFIS puede detenerse antes de tiempo basándose en una evaluación imparcial del modelo utilizando un conjunto de datos de validación independiente. Para ello, el conjunto total de datos de 579 muestras se dividió en partes iguales contemplando un 50 % (290 muestras) para entrenamiento y el 50 % restante (289 muestras) para validación.

El modelo ANFIS se desarrolló en entorno Matlab utilizando el toolbox de lógica difusa (Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide, 2020). De manera complementaria, se construyó un modelo de regresión lineal múltiple, utilizando las funciones por defecto del programa Matlab, para contrastar con el modelo propuesto. Para cuantificar el rendimiento de los

enfoques se utilizó la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Finalmente, el modelo propuesto de lógica difusa se puede expresar, con suficiente generalidad, de la siguiente manera:

$$L_{eq,j} = f(u, sector, T), \tag{1}$$

siendo f la función general, u y $sector$ la velocidad y el sector desde donde sopla el viento respectivamente, T la temperatura, $L_{eq,j}$ el nivel sonoro continuo equivalente para la banda de octava j de interés.

3 RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra el efecto de la velocidad del viento en los niveles sonoros por sector y para cada banda de octava de interés en forma de mapas de calor para los modelos ANFIS y para los modelos de regresión lineal múltiple. En particular, la información se muestra para un valor de temperatura fijo de 15 °C. En la Tabla 2 se presenta la performance de cada modelo en función del RMSE para los conjuntos de entrenamiento y validación. Los resultados muestran que los modelos ANFIS, comparados con la técnica de regresión múltiple, son más precisos en la predicción de la variación sonora.

La Figura 3 muestra las funciones de pertenencia obtenidas luego de proceso de optimización para las variables de entrada velocidad del viento u , sector y temperatura T en función de cada banda de frecuencia. Los parámetros de control del algoritmo de agrupación sustractiva fueron elegidos de manera tal de obtener un número mínimo de funciones de pertenencia que permita lograr un ajuste adecuado, pero manteniendo cierta rigidez en los modelos ANFIS resultantes.

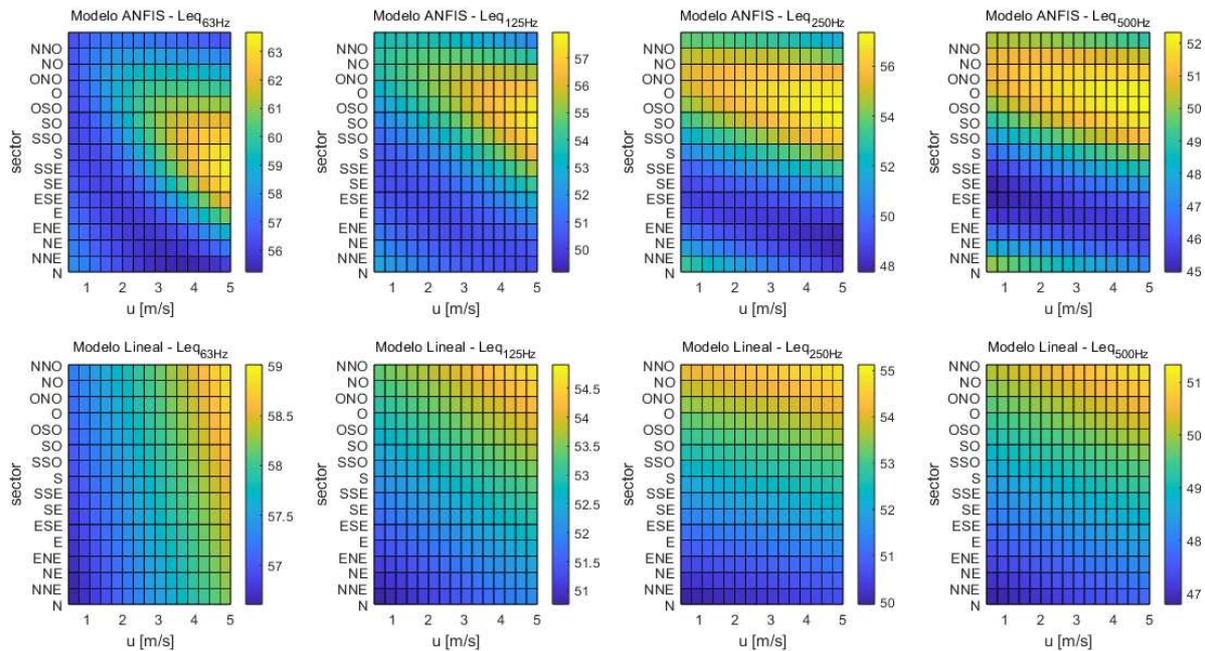


Figura 2: Efecto de la velocidad de viento u en los niveles sonoros por banda de octava para un valor de temperatura $T = 15$ °C. Modelos ANFIS (arriba) y Modelos lineales (abajo)

| Conjunto de Datos | RMSE (dB) Leq _{63Hz} | | RMSE (dB) Leq _{125Hz} | | RMSE (dB) Leq _{250Hz} | | RMSE (dB) Leq _{500Hz} | |
|-------------------|----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | ANFIS | Lineal | ANFIS | Lineal | ANFIS | Lineal | ANFIS | Lineal |
| Entrenamiento | 2,00 | 2,45 | 1,98 | 2,58 | 2,20 | 3,07 | 2,14 | 2,67 |
| Validación | 2,19 | 2,49 | 2,10 | 2,50 | 2,30 | 3,10 | 2,17 | 2,71 |

Tabla 2: Comparación de los modelos ANFIS y lineales por bandas de octava para los conjuntos de entrenamiento y validación.

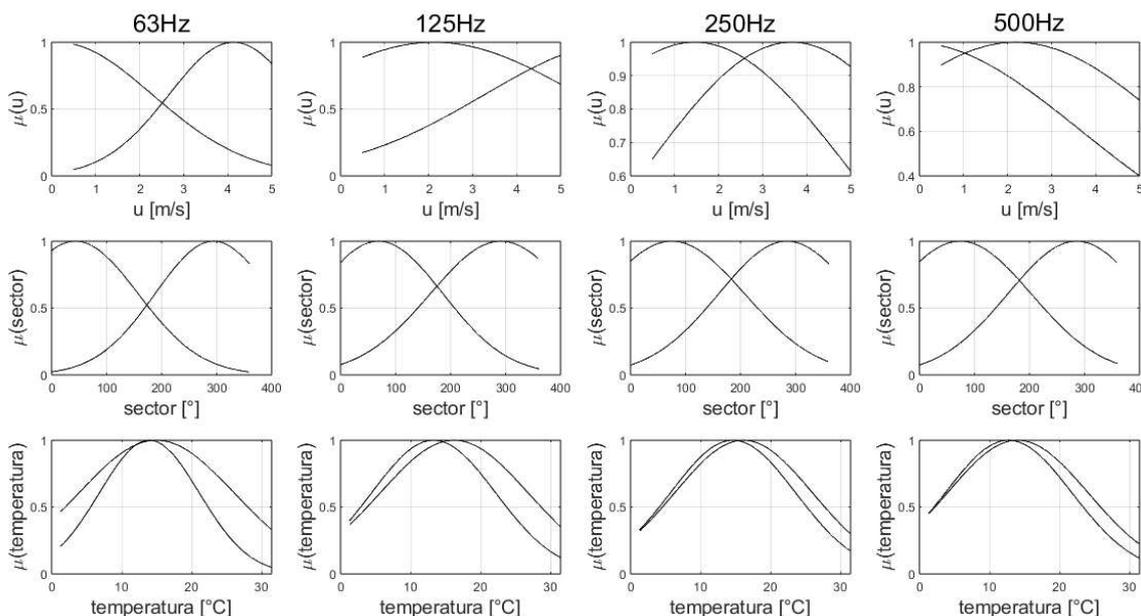


Figura 3: Funciones de pertenencia gaussianas para cada variable de entrada y banda de octava.

3.1 Caso particular de estudio

Se utilizaron los modelos ANFIS para analizar diferentes situaciones de interés. En primera instancia, se determinaron las diferencias de nivel sonoro ΔL_{eq} en las direcciones a favor del viento donde se encuentran ubicadas las principales fuentes industriales. El objetivo es identificar los sectores que generan las mayores variaciones sonoras en función de la velocidad del viento. En la Figura 4 se muestra los valores de ΔL_{eq} normalizados por bandas de octava en función de la velocidad de viento para los sectores de interés. Se aprecia que los sectores S, SE y SO presentan los mayores valores ΔL_{eq} , los cuales van disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia, mientras que los sectores O y NO acusan una leve diferencia.

Si bien el valor ΔL_{eq} para el sector S es relevante en todas las frecuencias, para la banda de 125 Hz puede observarse un incremento del nivel en la dirección SO, sector donde se encuentran las principales industrias respecto de la estación EMAC 2. Este escenario se repite, en menor medida, para la banda de 250 Hz. Esto podría indicar que los niveles de emisión de las fuentes industriales se corresponderían con el rango de frecuencias mencionado. Por otra parte, los valores altos de ΔL_{eq} observados para los sectores S y SE podrían deberse a fuentes intermitentes provenientes del sector portuario. Esta situación deberá ser analizada con mayor detalle y queda fuera del presente estudio.

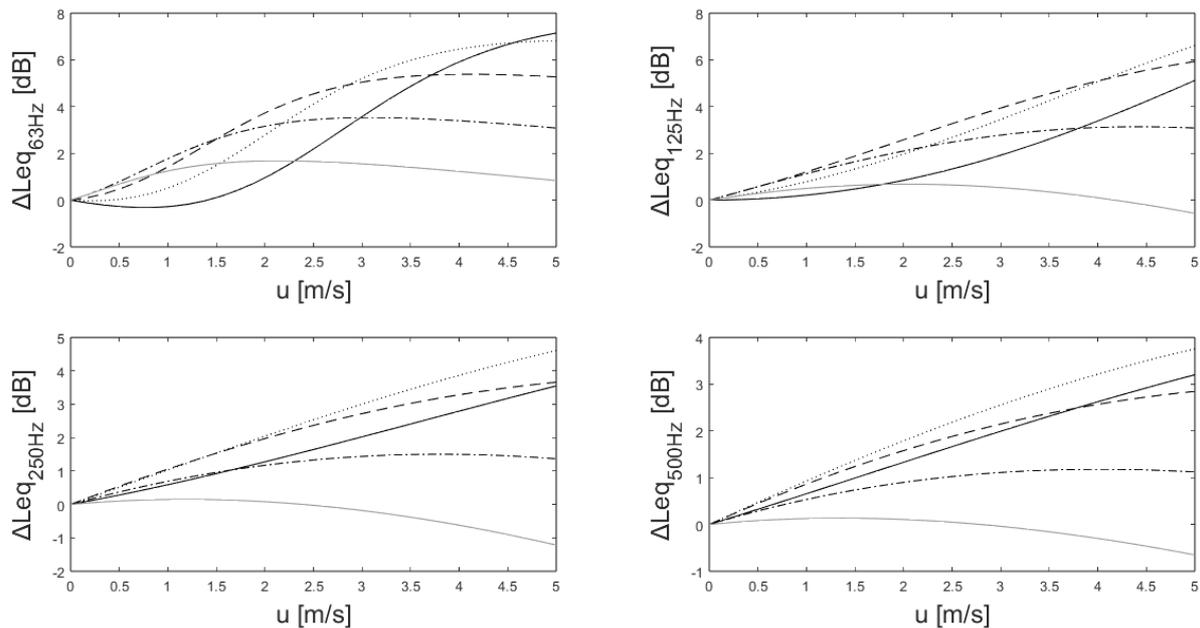


Figura 4: Niveles ΔL_{eq} normalizados para cada banda de octava en función de la velocidad del viento para diferentes sectores de interés: SE (—); S (···); SO (---); O (— · —); NO (— —).

Luego de determinar a los sectores que producen los mayores incrementos de ΔL_{eq} , se realizó un análisis del efecto del viento para los sectores opuestos. En la Figura 5 se muestra la variación del nivel ΔL_{eq} en función de la velocidad del viento contemplando las direcciones SO – NE y S – N para las bandas de 63 Hz, 125 Hz y 250 Hz. El análisis para la banda de 500 Hz no se muestra ya que la tendencia es similar a la banda de 250 Hz.

Observando la Figura 5, se aprecia una disminución del nivel ΔL_{eq} cuando el viento sopla desde los sectores NE y N. Al analizar la situación a favor del viento en la dirección fuente – receptor, se destaca un valor máximo del nivel ΔL_{eq} del orden de 6 dB para la banda de 125 Hz. Por otro lado, se observa un aumento del nivel sonoro cuando el viento proviene del sector NE para la banda de 63 Hz. Esta variación sonora podría deberse a fuentes de origen vehicular provenientes de una avenida de acceso cercana a la estación de monitoreo EMAC 2.

Resulta interesante mencionar que el efecto del viento en la propagación sonora presenta un perfil que tiende a adoptar la forma sigmoide cuando es clara la dirección fuente – receptor. Esto ha sido verificado en otros estudios (Hohenwarter et al., 2022). Esta situación es apreciable en mayor medida para baja frecuencia dado que para frecuencias medias, el efecto de la morfología urbana comienza a interferir en la propagación.

De manera complementaria, en la Figura 6 se exhiben los niveles ΔL_{eq} en función de la velocidad de viento para diferentes valores de temperatura y para las bandas de octava de 250 Hz y 500 Hz. Se aprecia una disminución del nivel ΔL_{eq} a medida que aumenta la temperatura. Esta tendencia muestra la bondad del ajuste del modelo ANFIS en representar el fenómeno físico de manera adecuada.

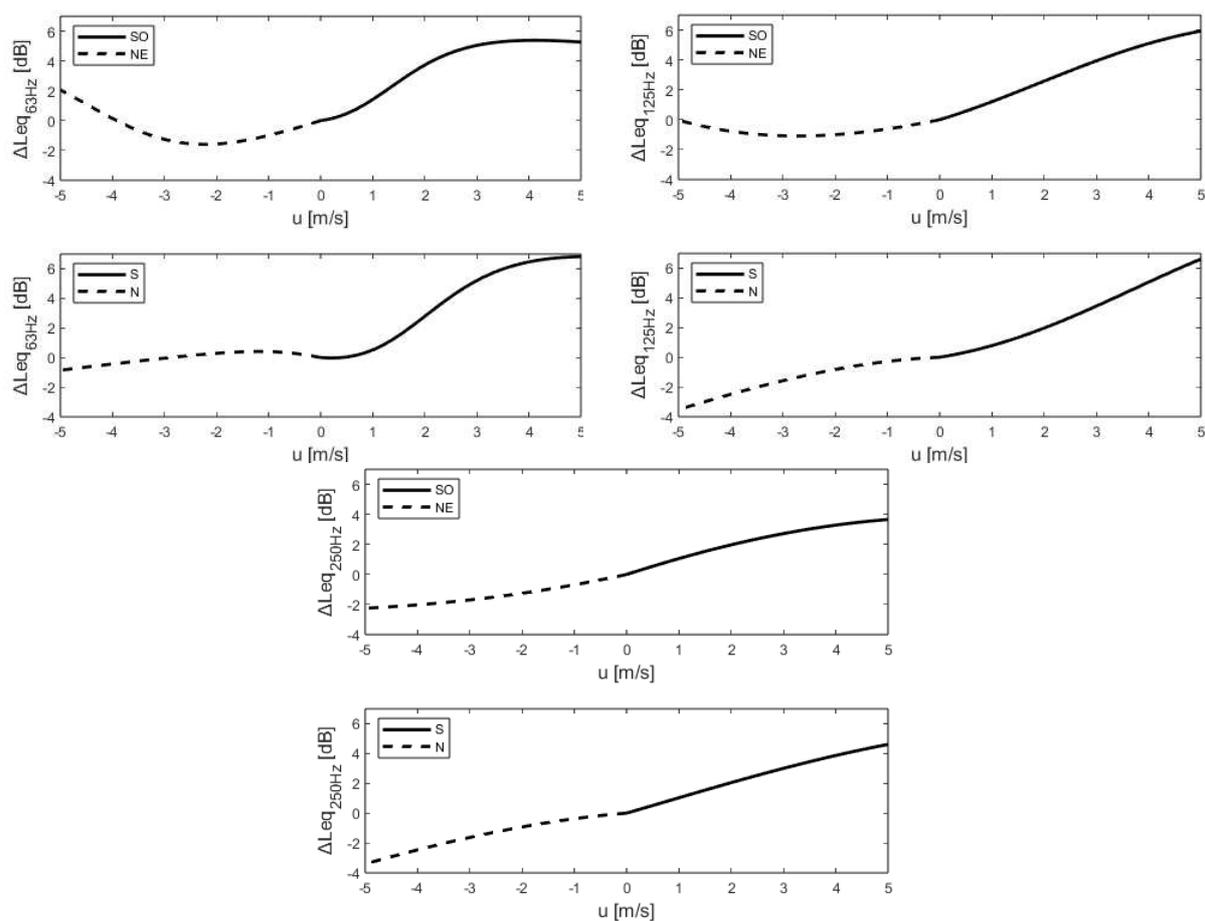


Figura 5: Velocidad de viento en función de nivel ΔLeq contemplando las direcciones SO – NE y S – N para las bandas de 63 Hz, 125 Hz y 250 Hz.

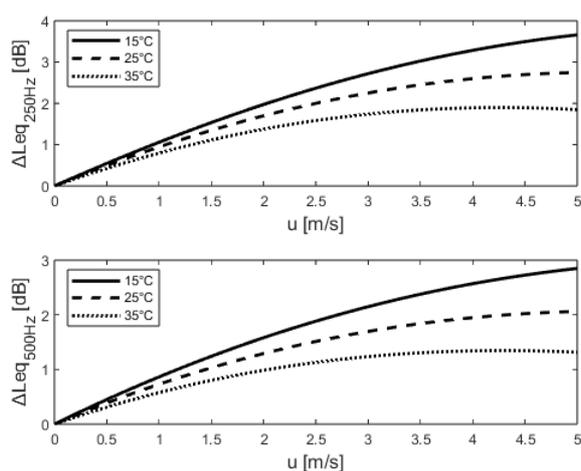


Figura 6: Niveles ΔLeq para las bandas de 250 Hz y 500 Hz en función de la velocidad del viento para diferentes temperaturas.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se generaron una serie de modelos basados en lógica difusa para predecir el efecto de viento en la variación de los niveles sonoros, para diferentes bandas de octava, en una zona residencial producto de fuentes de origen industrial. Los modelos ANFIS desarrollados se compararon con modelos de regresión lineal múltiple mostrando una mejor

performance en la predicción de la variación sonora. Los resultados muestran que los mayores incrementos de los niveles sonoros por efecto de la velocidad del viento se dan para los sectores S y SO en la banda de octava 125 Hz y son del orden de los 6 dB. En particular, el sector SO se corresponde con la dirección fuente industrial – receptor. El enfoque de predicción sonora propuesto constituye una herramienta preliminar para estudiar potenciales situaciones acústicas en el sector que involucren los efectos meteorológicos y que permitan inferir el grado de contribución sonora de las principales fuentes industriales bajo condiciones climatológicas particulares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional y del personal del Comité Técnico Ejecutivo de la Municipalidad de Bahía Blanca por el suministro de los registros sonoros y datos meteorológicos.

REFERENCIAS

- Aliabadi, M., Golmohammadi, R., Khotanlou, H., Mansoorizadeh, M., and Salarpour, A. Development of a noise prediction model based on advanced fuzzy approaches in typical industrial workrooms. *Journal of research in health sciences*, 14(2), 157-162, 2013.
- Hohenwarter, D., Mursch-Radlgruber, E., and Kirisits, C. S-shaped dependence of the sound pressure level in outdoor propagation on the effective sound speed gradient. *Acta Acustica*, 6, 13, 2022.
- IRAM 4062, Ruidos molestos al vecindario. Método de medición y calificación, 2016.
- Oshima, T., and Ii, M. Field measurements on wind effects to propagation of road traffic noise over open and flat ground. *Applied Acoustics*, 74(1), 141–149, 2013.
- Rizwan, M., Jamil, M., Kirmani, S., and Kothari, D. P. Fuzzy logic based modeling and estimation of global solar energy using meteorological parameters. *Energy*, 70, 685-691, 2014.
- Sequeira M. E., Di Giorgio L. E., Azzurro A. P. y Cortínez V. H. Análisis del ruido ambiental en una zona residencial lindera a un parque industrial en la ciudad de Bahía Blanca. XVIII Congreso Argentino de Acústica, 6 pp., 6 y 7 de diciembre, Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Buenos Aires, 2023.
- Takagi, T., and Sugeno, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1), 116-132, 1985.
- The MathWorks Inc. (2020). Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide (2020a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Trikoortam, S. C., and Hornikx, M. The wind effect on sound propagation over urban areas: Experimental approach with an uncontrolled sound source. *Building and environment*, 149, 561-570, 2019.