

DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO ACÚSTICO PARA UNA ZONA RESIDENCIAL - INDUSTRIAL

**Víctor H. Cortínez¹, Martín E. Sequeira¹, Adrián P. Azzurro¹, Facundo Pons² y
Fernando Rey Saravia²**

1: Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Bahía Blanca
11 de Abril 461, B8000LMI, Bahía Blanca, Bs. As., Argentina.
e-mails: vcortine@frbb.utn.edu.ar, martins@frbb.utn.edu.ar, azzurro@frbb.utn.edu.ar

2: Comité Técnico Ejecutivo
Municipalidad de Bahía Blanca
San Martín 3474, B8000LMI, Bahía Blanca, Bs. As., Argentina.
e-mail: cte.inspec6@bb.mun.gba.gov.ar

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la actividad industrial en las últimas décadas ha provocado el aumento de la contaminación en todas sus formas, produciendo esto, cambios en la calidad de vida de la población afectada. En tal sentido, el ruido no escapa a esta problemática, tratándose en parte de un problema ocupacional cuando afecta a los operarios de las plantas industriales y de un problema urbano cuando la emisión sonora de las industrias afecta zonas aledañas urbanizadas. Consecuentemente, el ruido es considerado un factor contaminante [1] que produce importantes pérdidas económicas. Los casos de compensación como resultado de lesiones auditivas implican demandas millonarias. En muchos casos también genera pérdidas en el valor de la propiedad, cuando ésta se halla en una zona con alta contaminación acústica (cercanía de aeropuertos o fábricas). La legislación es cada vez más rigurosa en estos aspectos, fijando límites de permanencia en ambientes ruidosos excesivos y al mismo tiempo valores máximos tolerables para el ruido en ambientes exteriores. Por tal motivo, el control de este tipo de contaminación se ha convertido en un tema central en el planeamiento urbano.

En general cualquier medida de control de ruido es precedida por un diagnóstico de la situación, lo que incluye un programa de medición y la evaluación de los resultados en base a la legislación establecida. Siguiendo a la etapa de diagnóstico, deben diseñarse los procedimientos de control de ruido que pueden involucrar acciones organizativas, legislativas o tecnológicas. En cualquier caso, como parte del diseño debe evaluarse el beneficio específico que se gana con la aplicación de una medida de control, con relación a su costo. Una de las tareas fundamentales para poder evaluar el efecto de una estrategia de mitigación acústica es la estimación del ambiente acústico una vez implementada la misma. Para ello es necesario formular un modelo matemático adecuado de la propagación acústica que esté correctamente calibrado a las condiciones del ambiente analizado [2, 3]. Es decir, los resultados computacionales deben reproducir con suficiente precisión los valores obtenidos por medición directa.

Los modelos teóricos esencialmente describen una relación entre los niveles sonoros en el ambiente urbano y las potencias de las fuentes generadoras. Entonces se hace necesario caracterizar estas últimas mediante procedimientos adecuados de medición.

En tal sentido, el objetivo de este trabajo consiste en caracterizar acústicamente una zona residencial lindera a un complejo industrial petroquímico, en la ciudad de Bahía Blanca, mediante la utilización de un modelo acústico apropiado. Para ello, se determinan las potencias sonoras de las fuentes industriales involucradas mediante la implementación de una metodología de medición directa. A partir de esto, se propone una técnica simple para estimar los niveles de potencia sonora de las fuentes más importantes, considerando un número mínimo de mediciones, y se evalúa el orden de magnitud de las fluctuaciones de dichos niveles. Finalmente, se plantea una estrategia para diseñar los puntos de un rondín (caracterizado por un conjunto de mediciones discretas y periódicas) a los efectos de valorar objetivamente los niveles sonoros emitidos por las plantas industriales.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ESTUDIO

La ciudad de Bahía Blanca está localizada al sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, con una población aproximada de 300.000 habitantes. Posee condiciones estratégicas particulares, consolidándose como centro urbano proveedor de bienes y servicios para la zona circundante. La zona de Ing. White, a sólo 5 km del centro de la ciudad, está conformada por un área netamente

urbanizada, con viviendas de una o dos plantas y por una zona industrial que concentra un grupo importante de empresas, denominada Polo Petroquímico.

Las zonas involucradas en este estudio (zona industrial y urbana linderas), presentan diferencias sustanciales a partir del uso de las tierras [4] y de los niveles de ruido permitidos desde el punto de vista de la aplicación de la legislación vigente [5]. Esto genera un problema ocupacional importante debido principalmente a que no existe una franja de transición apropiada, que permita una adecuada atenuación de los niveles sonoros generados por la actividad industrial. Por tal motivo, es imprescindible lograr una caracterización sonora objetiva de la zona que permita evaluar posibles medidas de mitigación del ruido a partir del impacto acústico generado [6, 7].

La zona industrial está conformada por una serie de plantas multi-fuente de proceso continuo. Los 12 complejos seleccionados para caracterizar acústicamente son: *a) PBB-Polisur S.A.* es el principal productor en Argentina de etileno y polietileno y está conformado por las plantas *LHCI, LHCII, HDPE, LDPE, EPE y LLDPE*; *b) Air Liquid S.A.* es una planta que se dedica a la elaboración de gases industriales; *c) Profertil S.A.*, es una empresa que produce amoníaco y fertilizantes; *d) Cargill S.A.C.I.* es una planta concentradora de cereales, con tres procesos que producen aceite vegetal, malta y otros productos derivados. Dicho complejo está conformado por las plantas de Aceitera, Elevadores y Maltería. *e) Central Piedrabuena S.A.* es una central térmica de generación de electricidad de 320 MW diseñada originalmente para uso con carbón, pero actualmente funciona con gas natural y en los meses de invierno con diesel-oil y otros combustibles líquidos [8].

A fin de caracterizar las potencias sonoras de las plantas seleccionadas, se realizaron distintas mediciones aplicando los criterios establecidos en la normativa ISO 8297 [9]. Luego, se implementó un modelo de propagación sonora, basado en la norma ISO 9613-2 [10], para determinar el impacto acústico sobre el área poblada.

Para verificar el modelo aludido, se realizaron algunas mediciones en puntos localizados en las inmediaciones de la zona residencial y en algunas vías de acceso a las plantas. Todas las mediciones se efectuaron en condiciones normales de operación de las plantas y bajo las condiciones descriptas en la norma ISO 1996-2 [11], a una altura de 1.5 metros y utilizando un tiempo de medición de 5 minutos.

Por otra parte, no se consideraron los efectos meteorológicos en la calibración del modelo de propagación sonora ya que todas las mediciones se realizaron con velocidades de viento inferiores a 5 m/seg (representando la situación acústica de la zona sin viento).

En la Figura 1 se presenta la zona bajo estudio, donde se observa el sector urbanizado, la zona industrial con las distintas industrias consideradas y la ubicación de los puntos receptores utilizados en el estudio. En particular, los puntos 5, 7, 8, 9 y 10 corresponden a receptores pre-establecidos por el Comité Técnico Ejecutivo (CTE), organismo municipal dedicado al control y monitoreo del medio ambiente en la zona, utilizados para realizar controles periódicos de los niveles sonoros. El período de estudio correspondió al intervalo entre los meses de Septiembre de 2009 y Febrero de 2010.

2.1. Condiciones ambientales

Durante el período de estudio, se dispuso de los datos climáticos brindados por una estación meteorológica ubicada en instalaciones del Comité Técnico Ejecutivo (CTE), en las inmediaciones de la Central Térmica “Piedrabuena”. En la Figura 2, se observan los datos referentes a las características del viento donde se identificó como predominante la dirección

noroeste, con intensidades máximas y medias del orden de 25 y 10 m/seg, respectivamente.



Figura 1. Zona de estudio mostrando la zona urbana e industrial, las plantas multi-fuentes consideradas y los puntos receptores de medición.

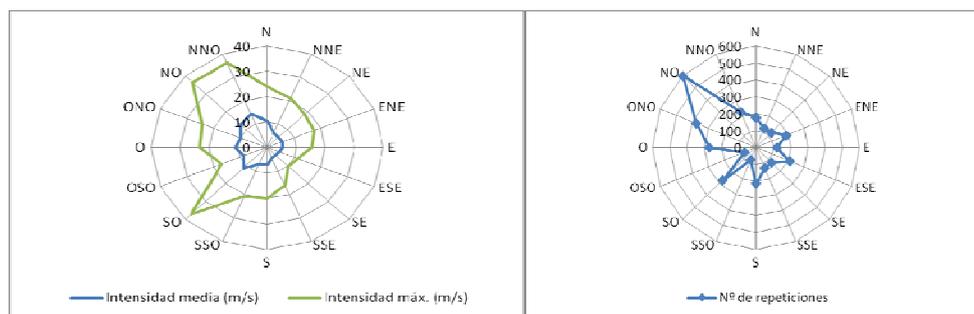


Figura 2. Intensidad y dirección predominante del viento (izquierda) y número de repeticiones del evento (derecha) en la zona de estudio.

3. ANTECEDENTES SONOROS EN LA ZONA

A los efectos de conocer la evolución acústica de la zona bajo estudio, se compararon los niveles sonoros obtenidos en campañas de medición realizadas en los años 1999, 2003 y 2007 [7]. En la Figura 3, se muestran los niveles sonoros continuos equivalentes (Leq) promediados a partir de mediciones en diferentes puntos del área urbana (Barrio 26 de Septiembre), lindera a la zona industrial. Dichos niveles están representados de manera porcentual para distintos intervalos entre 60 y 70 dB(A) y por encima y debajo de estos valores.

Se observa, durante el período diurno, un incremento de los niveles que se mantienen por debajo de los 60 dB(A), reduciéndose los que se encuentran entre los 65 y 70 dB(A). En la última campaña (año 2007), los niveles sonoros medidos no superan los 70 dB(A), no siendo así durante la campaña anterior (año 2003), donde casi un 10 % superaba dicho valor. Esto último revela una leve disminución de los niveles sonoros actuales.

Durante el período nocturno, la situación es similar, pudiéndose observar una disminución general de los niveles sonoros actuales. Además, en ningún caso se superan las 65 dB(A).

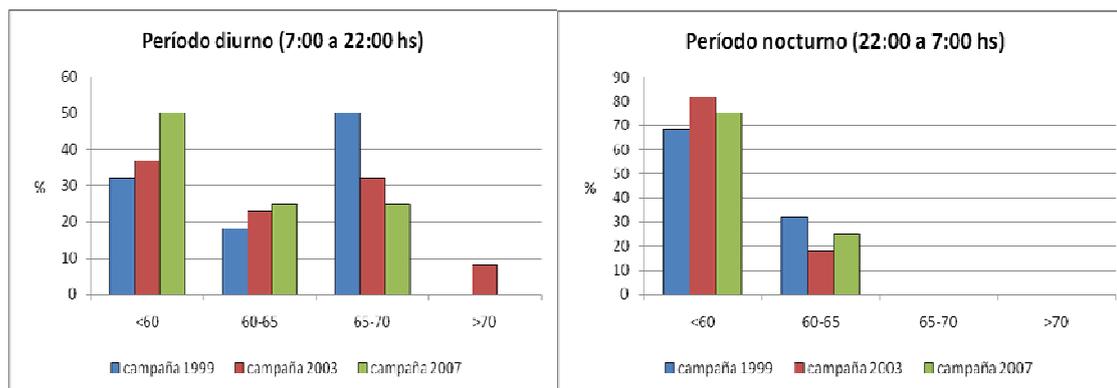


Figura 3. Comparación porcentual entre los niveles sonoros (Leq) obtenidos en diferentes campañas de medición para los periodos diurno (izquierda) y nocturno (derecha).

4. METODOLOGÍA: MODELOS ACÚSTICOS DE PROPAGACIÓN

4.1. Determinación de las potencias sonoras

Para generar el modelo de propagación sonora es necesario determinar los niveles de potencia sonora de los complejos industriales multi-fuentes seleccionados. Para ello, se adoptaron los lineamientos presentados en la norma ISO 8297, considerándose todas las fuentes involucradas como puntuales. Básicamente, el método consiste en trazar una trayectoria de forma cerrada (contorno de medición) que rodea el área de la planta. Luego se procede a medir el nivel de presión sonora en posiciones aproximadamente equidistantes del micrófono a lo largo del contorno y, posteriormente, calcular el nivel de presión sonora promedio. Las correcciones se realizan por proximidad, direccionalidad del micrófono y absorción del aire. Además, se cuantifica la superficie de medición tomando en cuenta el área incluida por el contorno, la longitud de éste y la altura del micrófono. Finalmente, se determina el nivel de potencia sonora, considerando los aspectos mencionados anteriormente [9,12].

Esta metodología es aplicable en áreas industriales donde la mayoría de los equipos operan en el exterior y está limitada por el largo de la planta multi-fuente considerada [9]. Esta restricción generó un problema en el caso de estudio presentado ya que algunas de las instalaciones poseen dimensiones mayores que la establecida como límite por la norma. Para solucionar dicho inconveniente, se decidió generar sub-zonas de medición, en aquellas plantas industriales que no cumplen con lo estipulado por la normativa. Las sub-divisiones adoptadas se eligieron considerando la ubicación de las instalaciones de proceso (aéreas ruidosas) mediante visitas in situ en cada uno de los establecimientos.

La incertidumbre principal de esta metodología, se basa en la relación entre la distancia promedio entre el contorno de medición y los límites de la planta, y la raíz cuadrada del área de la planta. El error debido a esto no excede los 3 dB(A) [9]. Sin embargo, esta norma no establece las incertidumbres que se pueden presentar debidas a las variaciones de las emisiones de ruido de las fuentes y durante la propagación del ruido (ej, variación de los efectos meteorológicos) en el período de tiempo considerado. Esta última incertidumbre depende fundamentalmente de la distancia fuente-receptor y es influyente a partir de los 1000 metros [13].

En la Tabla 1, se muestran los niveles de potencias sonoras equivalentes calculados, en bandas de octava, para todas las fuentes sonoras consideradas.

Cabe mencionar que debido a que no se pudieron realizar las correspondientes mediciones sonoras en el complejo industrial “Central Térmica”, el aporte de energía sonora de dicho establecimiento se determinó mediante un enfoque de identificación directa, el cual se explicará posteriormente.

Planta Industrial	Nivel de potencia sonora por banda de octava [dB]								Leq [dB(A)]	
	63 [Hz]	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	8000 [Hz]		
Air Liquid	122.05	119.92	118.26	115.77	109.52	101.87	94.12	88.85	116.18	
Profertil	132.26	129.16	126.16	123.88	122.02	123.42	119.27	114.07	128.89	
LDPE	122.39	125.16	122.02	120.20	115.82	115.79	116.57	113.71	123.89	
EPE	119.75	118.48	114.84	113.34	110.07	109.38	109.80	106.36	117.30	
HDPE	118.27	115.64	115.97	113.82	109.98	110.20	111.27	105.09	117.87	
LHCI	Sector 1	127.21	123.58	121.82	120.18	120.34	121.25	123.50	122.98	129.05
	Sector 2	123.09	120.29	118.84	113.96	108.37	106.93	107.12	104.22	116.78
LHCII	Sector 1	124.15	120.98	118.78	116.17	118.35	116.46	116.38	116.28	123.98
	Sector 2	121.73	117.53	111.98	105.91	104.28	105.01	107.20	105.75	113.48
LLDPE	120.74	119.17	117.77	127.96	120.29	111.20	108.70	108.73	126.53	
Cargill	Aceitera	123.19	119.42	113.73	110.68	106.88	103.81	102.25	99.61	113.50
	Maltería	117.99	114.02	111.18	109.79	106.31	102.84	99.48	95.13	111.86
	Elevadores	124.65	121.79	120.54	119.10	113.92	108.94	105.96	101.69	120.01
Central Térmica									118.00	

Tabla 1. Niveles de potencias sonoras equivalentes de cada planta industrial analizada.

4.1. Modelo de propagación sonora

Se formuló un modelo simplificado de predicción sonora, basado en la normativa ISO 9613-2, considerando únicamente los efectos de divergencia esférica y atenuación debido a la absorción del suelo y del aire en el camino de propagación. Debido a que, en la zona bajo estudio, no existen obstáculos importantes en el camino de propagación entre las fuentes industriales y los receptores, no se consideraron efectos de barrera. Asimismo, y dado que el terreno no presenta grandes desniveles, se consideró todo el sector como plano. El modelo de propagación sonora se implementó utilizando el software comercial SoundPlan®. El mismo presenta una interfaz gráfica versátil que permite una rápida interpretación de los datos.

En consecuencia, el nivel de presión sonora en la posición del receptor, L_p , queda expresado de la siguiente manera:

$$L_p = L_w + D_c - A \quad (1)$$

donde L_w es el nivel de potencia sonora, D_c es un factor de corrección por directividad y A es la atenuación debida a la propagación desde la fuente sonora al receptor. En el caso analizado, el factor $D_c = 0$ dado que todas las fuentes se consideraron omnidireccionales y radiando en campo libre. Todos los términos citados están expresados en dB.

El término A corresponde a la contribución de distintas atenuaciones, las cuales se enuncian a continuación:

$$A_{aire} = \alpha d / 1000 \quad (2)$$

$$A_{suelo} = 4.8 - (2h_m / d) \times (17 + 300d) \quad (3)$$

$$A_{div} = 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad (4)$$

donde A_{aire} es la atenuación resultante de la absorción del aire durante la propagación a través de la distancia entre la fuente y el receptor d y α es el coeficiente de atenuación atmosférica para cada banda de octava; A_{suelo} es la atenuación debida al suelo, siendo h_m la altura media del camino de propagación sobre del suelo y A_{div} es la atenuación por divergencia esférica, siendo d_0 la distancia de referencia.

El nivel de presión sonora total, Lp_{TOTAL} , se obtiene a partir de considerar las contribuciones del promedio temporal cuadrático de las presiones sonoras calculadas de acuerdo con la ecuación (1) para cada fuente sonora y para cada banda de octava, como se detalla en la siguiente ecuación:

$$Lp_{TOTAL} = 10 \log \left\{ \sum_{j=1}^n \left[\sum_{f=1}^8 10^{[Lp(jf)/10]} \right] + 10^{[Leq_{tráfico}/10]} \right\} - A_{Cmet} \quad (5)$$

donde n es el número total de fuentes j y f es el índice que indica las ocho frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas. La ecuación precedente, puede incluir los términos adicionales, $Leq_{tráfico}$ y A_{Cmet} , correspondientes al nivel sonoro generado a partir del flujo vehicular de la zona y a una corrección por efectos climatológicos, respectivamente. El primer término adicional no se contempla en este trabajo ya que solo se modelan las fuentes de ruido provenientes de la actividad industrial.

5. RESULTADOS

5.1. Verificación del modelo acústico

Se realizaron comparaciones entre los niveles sonoros medidos “in situ” y simulados a efectos de cotejar el modelo computacional. Las mediciones se realizaron en puntos ubicados en cercanía de cada planta industrial, donde la influencia de otras fuentes es mínima y el efecto de direccionalidad, despreciable.

Los niveles sonoros medidos en estos puntos (puntos de referencia), se obtuvieron bajo las mismas condiciones de operación que aquellos utilizados para determinar las potencias acústicas equivalentes de cada planta. Los puntos seleccionados son: 2, 4, 6, 11, 12, 13, 14 y 15 (ver Figura 1). En la Tabla 2 se presentan las comparaciones entre los valores simulados y medidos en los puntos de referencia de cada planta industrial. Se observa un buen ajuste, con diferencias menores a los 2 dB(A).

Nº receptor	Niveles de presión sonora [dB(A)]							
	2	4	6	11	12	13	14	15
Valores medidos	61.2	58.1	62.2	62.4	62.6	58.2	63.4	67.1
Valores simulados (SoundPlan®)	63.1	58.4	60.7	61.7	61.3	59.2	63.9	68.2
Diferencia abs.	1.9	0.3	1.5	0.7	1.3	1	0.5	1.1

Tabla 2. Comparación entre los niveles sonoros medidos y simulados en los puntos de referencia para cada planta.

En la Figura 4 se presenta el mapa acústico de la zona bajo estudio generado a partir de la implementación del modelo computacional. Se observa, adicionalmente, una curva de nivel límite de 50 dB(A), como ejemplo de un valor indicativo permisible ó de molestia al vecindario, y la cantidad de superficie expuesta a niveles superiores.



Figura 4. Mapa acústico de la zona bajo estudio. La línea roja determina la curva de nivel de 50 dB(A) adoptada como valor límite permisible.

5.2. Determinación de puntos característicos para cada industria

Mediante el modelo computacional, se analizaron los niveles sonoros en cercanías de cada planta contemplando todas las fuentes actuando en forma conjunta y cada una por separado. A partir de esto, se pudieron establecer puntos particulares para cada industria donde la influencia de cada una es predominante e independiente del resto. En la Tabla 3 se muestran estos puntos característicos con los niveles simulados obtenidos al considerar todas las fuentes actuando en simultáneo (nivel sonoro total) y de manera individual (nivel sonoro parcial). Se observa que la máxima diferencia encontrada entre ambas configuraciones es de 1.5 dB(A), salvo en el caso de las fuentes HDPE, EPE y LDPE donde se alcanzan diferencias apreciables.

De esta manera, es posible identificar directamente la potencia sonora emitida por la mayoría de las fuentes industriales, mediante la evaluación del nivel sonoro en los puntos característicos asociados, empleando la siguiente fórmula [10]:

$$Lw_f = Lp_f + A_f + C_{CORR_f} \quad (6)$$

donde Lw_f es la potencia sonora de la fuente, Lp_f es el nivel de presión sonora en la posición del

punto característico, A_f es un término que considera la contribución de las distintas atenuaciones en el camino de propagación y el subíndice f indica la banda de octava analizada. El término C_{CORRf} corresponde a una corrección determinada a partir de la diferencia encontrada entre los niveles sonoros totales y parciales de los puntos característicos de cada planta industrial. La utilización de este término permite una identificación más ajustada a partir de los valores simulados. Finalmente, para obtener el nivel de potencia total en cada planta se debe sumar las contribuciones de todas las bandas de frecuencia consideradas.

La potencia sonora de la fuente Central Térmica, indicada en la Tabla 1, se determinó a partir de la expresión (6), considerando el nivel sonoro correspondiente al punto característico de dicha planta.

Fuente industrial	Punto característico	Niveles sonoros simulados [dB(A)]		
		Total	Parcial	Dif.
LHCII	1	59.7	58.2	1.5
LHCI	3	62.7	61.8	0.9
HDPE	4	58.4	49.7	8.7
Air liquid	6	60.7	59.8	0.9
Cargill	9	59.2	58.6	0.6
Termoeléctrica	10	53.4	52.5	0.9
EPE	11	61.7	54.8	6.9
LDPE	12	61.3	58.9	2.4
Profertil	13	59.2	58.1	1.1
LLDPE	15	68.2	68.1	0.1

Tabla 3. Comparación entre los niveles sonoros simulados considerando todas las fuentes actuando de manera conjunta e individual en los puntos característicos de cada planta.

La fuente HDPE tiene una influencia determinante en la variación de los niveles sonoros en la zona urbana. Asimismo, dicha planta se encuentra retirada de la calle que limita la zona industrial y urbana y muy próxima a los dos complejos industriales adyacentes, LHCI y Air Liquid (ver Figura 1). Por tal motivo, no es posible caracterizarla fácilmente (al menos de una manera directa como con el resto de las plantas). En consecuencia, es necesario establecer una técnica de identificación particular, la cual se detalla en la siguiente sección.

De la misma manera, es posible utilizar esta técnica para determinar las potencias sonoras de las plantas EPE y LDPE (las cuales también presentan dificultades en su caracterización directa), pero dado que el aporte sonoro de las mismas no es significativo en la zona urbana (a partir de la gran distancia que separa ambos sectores), no se tendrán en cuenta en dicho enfoque.

A partir de la determinación de las potencias de cada fuente industrial, se puede establecer el aporte individual de cada una de ellas y, por ejemplo, determinar cuáles de las fuentes industriales (actuando de manera aislada) producen un nivel sonoro en la zona urbana superior a cierto valor límite fijado. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestran los distintos mapas acústicos de cada planta actuando de manera independiente junto con la cota de 50 dB(A) adoptada como valor límite. Se observa, en particular, que los niveles generados independientemente por las plantas EPE y LDPE no sobrepasan los 50 dB(A) en la zona urbana.

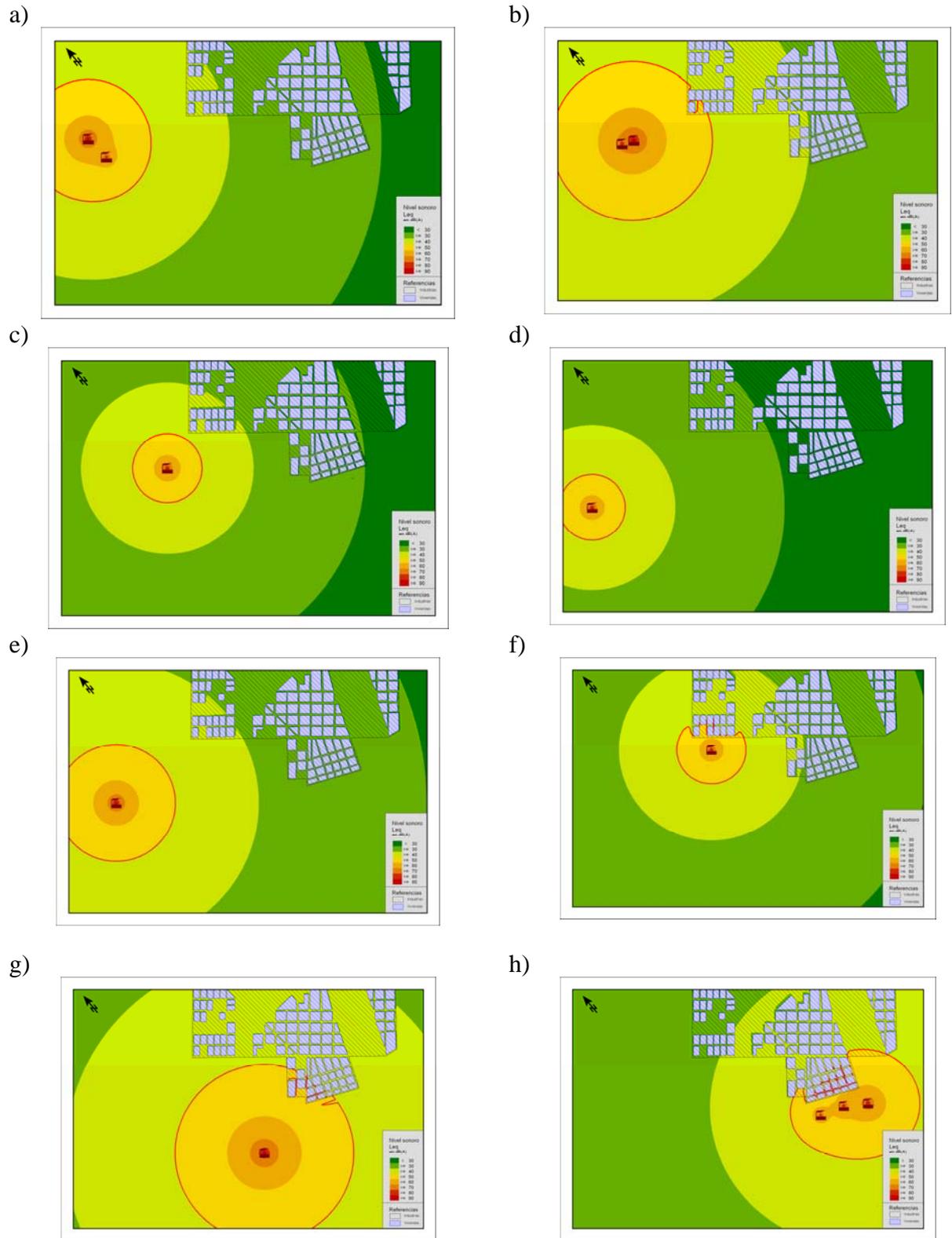


Figura 5. Mapas acústicos de la zona generados a partir del aporte individual de los niveles de potencia sonora de cada planta: a) LHCII. b) LHCI. c) HDPE. d) EPE. e) LDPE. f) Air Liquid. g) Profertil. h) Cargill.

5.2.1. Caracterización particular de la fuente industrial HDPE

Del análisis efectuado en la sección anterior, se determinó que la mayoría de las fuentes industriales consideradas en el estudio pueden ser caracterizadas a partir de mediciones en puntos característicos establecidos.

Sin embargo, esta metodología es difícil de aplicar en aquellas plantas donde la cercanía con otras plantas es significativa, como por ejemplo la fuente industrial HDPE. En estos casos es necesario considerar alguna técnica inversa de identificación que englobe a un conjunto reducido de plantas a los efectos de poder determinar la contribución de la fuente desconocida a partir de los valores conocidos de las variables involucradas.

Para identificar la potencia sonora emitida por la fuente HDPE (ver Figura 6), se formuló un procedimiento de identificación considerando las potencias de las fuentes industriales adyacentes LHCI y Air Liquid, previamente identificadas mediante la expresión (6), y el nivel de presión sonora en el punto receptor 4 (punto característico adoptado para planta HDPE). A partir de esto, la potencia desconocida se determina mediante la siguiente expresión:

$$LW_{HDPE_f} = 10 \log_{10} \left\{ 10^{(Lp_{PUNTO4_f}/10)} - \sum_{j=1}^n \left[10^{(L_{w_{jf}} - A_{jf})/10} \right] \right\} + A_{HDPE_f} \quad (7)$$

donde LW_{HDPE_f} corresponde al nivel de potencia sonora calculado de la fuente HDPE, para la bandas de frecuencias f , que depende del nivel sonoro medido en el punto 4 (Lp_{PUNTO4_f}), del nivel de potencia sonora ($L_{w_{jf}}$) de las fuentes adyacentes j y de la atenuación en el camino de propagación entre cada fuente involucrada j y el punto 4 (A_{jf}) para la banda considerada f .

A modo de ejemplo, en la Tabla 4 se muestra el cálculo para esta situación, considerando los datos para la banda de octava de 1000 Hz. Es claro que el mismo procedimiento se puede realizar considerando cada una de las bandas y obtener el nivel de potencia sonora global sumando las distintas contribuciones.



Figura 6. Escenario propuesto a los efectos de identificar el nivel de potencia sonora de la fuente HDPE.

Datos [dB(A)]	
Nivel de presión sonora en el punto 4 ($L_{pPUNTO4}$)	52.3
Nivel de potencia sonora en la fuente LHCI, sector 1 ($L_{W_{LHCI S1}}$)	120.34
Nivel de potencia sonora en la fuente LHCI, sector 2 ($L_{W_{LHCI S2}}$)	108.37
Nivel de potencia sonora en la fuente Air Liquid ($L_{W_{AirLiquid}}$)	109.52
Atenuación entre la fuente LHCI, sector 1, y el punto 4 ($A_{LHCI S1}$)	70.03
Atenuación entre la fuente LHCI, sector 2, y el punto 4 ($A_{LHCI S2}$)	72.39
Atenuación entre la fuente Air Liquid y el punto 4 ($A_{AirLiquid}$)	65.16
Atenuación entre fuente la HDPE y punto 4 (A_{HDPE})	66.46
Resultados [dB(A)]	
Nivel de potencia sonora <i>calculada</i> en la fuente HDPE ($L_{W_{HDPE (CALC.)}$)	111.36
Nivel de potencia sonora <i>medida</i> en la fuente HDPE ($L_{W_{HDPE (MED.)}$)	109.98
Diferencia	1.3

Tabla 4. Identificación de la potencia sonora de la planta HDPE para la banda de 1000 Hz.

5.3. Estudio de fluctuaciones en los niveles de potencia de las fuentes industriales

Se determinaron las variaciones de los niveles sonoros medidos en algunos puntos característicos bajo diversas condiciones de operación de las plantas asociadas. Cabe aclarar que solo se pretende evaluar el ruido industrial, por lo tanto, todas las mediciones se realizaron con baja o nula influencia de otras fuentes de ruido.

En la Tabla 5 se muestra una comparación entre los niveles sonoros medidos, en algunos puntos de referencia, bajo diversas condiciones de operación de las plantas y el nivel de potencia sonora calculado a partir de los procesos de identificación previamente presentados. A fin de determinar la potencia de la fuente HDPE, asociada a las variaciones sonoras encontradas en el punto 4, se consideraron fijas las potencias de las fuentes adyacentes (LHCI y Air Liquid).

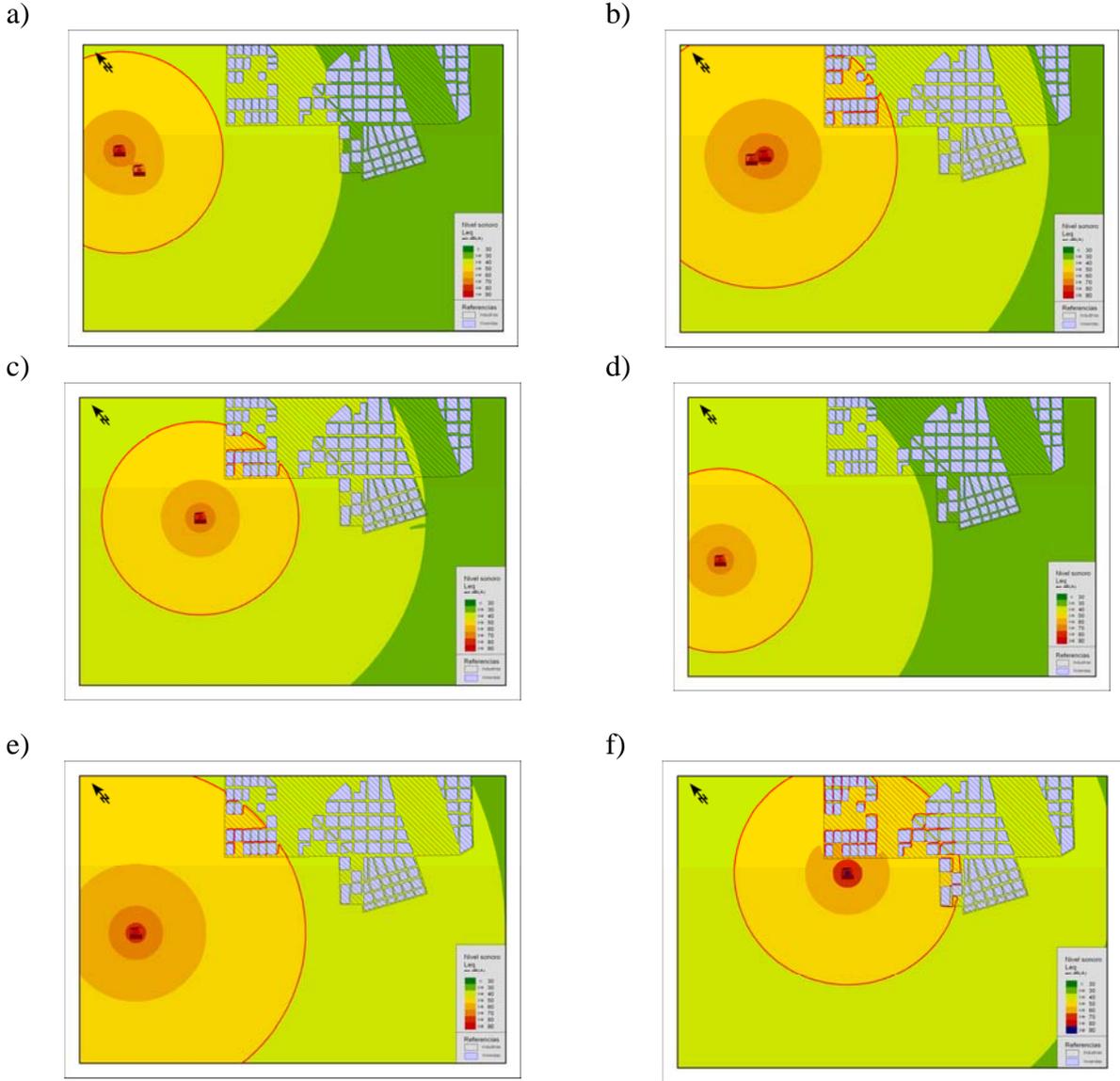
Punto de referencia	Lp medido [dB(A)]	Lw total calculado [dB(A)]	Diferencias entre los Lw totales calculados [dB(A)]	Fuente considerada	Observaciones
1	55.8	128.2	13.5	LHCII	sin obs.
	61.8	141.7			Horno en decoque
3	63.8	139.5	5.9	LHCI	sin obs.
	66.3	145.4			Horno en decoque
4	58.1	119.3	18.9	HDPE	sin obs.
	64.9	138.2			sin obs.
6	57.1	114.4	5	Air liquid	sin obs.
	62.2	119.4			sin obs.

Tabla 5. Comparación entre valores simulados y medidos bajo diversas condiciones operativas en las plantas.

Se observa que el orden de magnitud de las fluctuaciones de los niveles de potencia globales emitidos por las plantas varía, aproximadamente, entre 3 y 19 dB. Además, se muestra que, en algunos casos, las variaciones en los niveles sonoros podrían ser atribuibles a anomalías o eventos claramente detectables en las fuentes (punto 1 y 3), mientras que en otras situaciones no es tan claro el origen de dicha perturbación (punto 4 y 6).

En una situación de este tipo (con incrementos de niveles sonoros de alguna/s de las fuentes/s consideradas), será necesario reajustar todo el modelo computacional a partir de un nuevo set de mediciones verificando los puntos característicos de cada planta.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se aprecian los mapas acústicos para cada una de las fuentes industriales actuando independientemente, pero con un aumento en sus niveles de potencia sonora de 10 dB. Este gráfico claramente refleja la incidencia particular de cada nueva configuración de las fuentes y permite establecer cuáles de ellas podrían sobrepasar, en la zona residencial, algún valor límite previamente establecido.



g)



h)

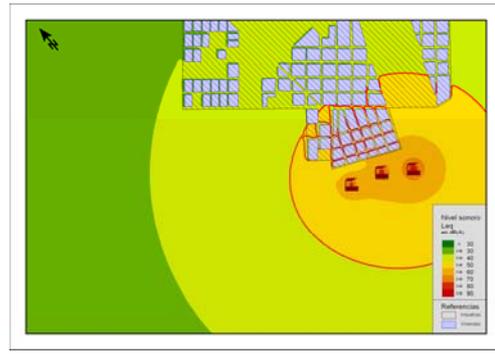


Figura 7. Mapas acústicos de la zona generados a partir de un aumento en 10 dB, con respecto a la situación normal de operación, en el aporte individual de los niveles de potencia sonora de cada planta: a) LHCII. b) LHCI. c) HDPE. d) EPE. e) LDPE. f) Air Liquid. g) Profertil. h) Cargill.

6. DISEÑO DE LOS PUNTOS DE UN RONDÍN A LOS EFECTOS DE OPTIMIZAR EL MONITOREO SONORO

Como se comentó previamente, el CTE es el organismo encargado de controlar y monitorear el medio ambiente en la zona bajo estudio. En particular, realiza evaluaciones periódicas de los niveles sonoros en diferentes puntos conformando un rondín de mediciones directas.

En esta sección se presenta una posible estrategia para monitorear los niveles sonoros en la zona y evaluar objetivamente los niveles de potencia de las plantas industriales, a partir de una cantidad mínima de mediciones. Esta metodología consiste en los siguientes pasos (ver Figura 8):

Paso 1. Realizar las mediciones de los niveles sonoros en cada punto establecido para el rondín (puntos 5, 7, 8, 9 y 10).

Paso 2. Si los niveles sonoros en los puntos receptores se mantienen bajo cierto valor límite tolerable (ϵ), la cantidad de puntos de medición será la correspondiente a los puntos del rondín.

Paso 3. En aquel caso que algún punto del rondín supere el valor establecido, se deberá efectuar mediciones adicionales en los puntos característicos de las plantas factibles de producir el aumento en el nivel sonoro. Esto se realiza a los efectos de determinar, mediante las técnicas de identificación previamente desarrolladas, el nivel de potencia sonora de cada planta industrial involucrada.

En el caso que el nivel sonoro en el punto 5 sea superado, será necesario efectuar mediciones adicionales en los puntos característicos 1, 3, 4 y 6. Si el aumento se percibe en el punto 8 ó 9, se deberá realizar mediciones adicionales en el punto 13. La medición en el punto 7 del rondín solo permite evaluar el nivel sonoro del ambiente en general, y se puede considerar como un nivel indicador del ruido ambiente en la zona urbana.

La elección del valor límite ϵ , factor determinante en la extensión de los puntos de medición, deberá ser estudiada a partir de análisis estadísticos de los niveles existentes en la zona, pudiéndose utilizar diferentes valores límites para analizar distintos períodos del año.



Figura 8. Diseño del rondín de mediciones directas en la zona de estudio.

7. INFLUENCIA DEL VIENTO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS NIVELES SONOROS

En esta sección, se estudian los efectos climatológicos (especialmente la incidencia del viento) sobre la variación de los niveles sonoros en los puntos característicos considerados en este trabajo. Para ello, se consideran los lineamientos generales, sobre correcciones meteorológicas, establecidos en la norma CONCAWE [14]. Este modelo es el único desarrollado que considera aspectos tales como dirección y magnitud del viento y la estabilidad atmosférica, basados en los estudios realizados por Piercy, Emblenton y Sutherland [14].

De ésta manera, el término de atenuación sonora debida a los efectos meteorológicos (A_{Cmet}) es calculado para cada banda de octava según la clasificación de las condiciones ambientales presentes en el camino de propagación de la onda sonora de acuerdo a la estabilidad establecida por Pasquill, obteniendo así seis categorías (categorías A – G). A partir de esto, se definen las ecuaciones para los términos de atenuación sonora para cada banda de octava y categoría meteorológica presente en el ambiente entre la(s) fuente(s) sonora(s) y el(los) punto(s) receptor(es). La categoría A representa un fuerte gradiente de temperatura (disminución de la temperatura con la altura), mientras que la categoría G representa inversión de temperatura que puede ser encontrada en una tranquila noche estrellada [14, 12]. De esta manera, y de acuerdo a la radiación solar cuando es de día y la nubosidad en la noche, se establece la siguiente tabla:

Una vez definida la categoría de la condición climática en análisis, y de acuerdo a la magnitud del vector de viento (v) medido al nivel del suelo (componente en dirección fuente–receptor), se define la categoría meteorológica final (entre 1 y 6) de acuerdo a la Tabla 7 (donde el signo positivo representa la dirección del viento hacia el receptor). Para la categoría 4, todas las correcciones por efectos meteorológicos son cero. Para las demás categorías se definen una serie de ecuaciones para estimar las correcciones meteorológicas [14, 12]. En la Figura 9 se observan dichas expresiones para el caso de la banda de octava de 1000 Hz.

Clasificación de las condiciones meteorológicas de acuerdo a la estabilidad de Pasquill								
Velocidad del viento (m/s)	De día (radiación solar, mW/cm ²)				1hr antes de que se esconda el sol o 1hr después de que salga	De noche (de acuerdo a la nubosidad, octas)		
	> 60	30 – 60	< 30	0		0 – 3	4 – 7	8
≤ 1,5	A	A – B	B	C	D	F o G	F	D
2,0 – 2,5	A – B	B	C	C	D	F	E	D
3,0 – 4,5	B	C	C	C	D	E	D	D
5,0 – 6,0	C	C – D	D	D	D	D	D	D
> 6,0	D	D	D	D	D	D	D	D

Tabla 6. Clasificación de las condiciones meteorológicas de acuerdo a Pasquill y Turner.

En el presente trabajo, se adopta la categoría D (estabilidad atmosférica neutra o estable) y una velocidad del viento promedio (v) de 10 m/s con dirección predominante del sector NO (ver sección 2.1). Estos valores fueron establecidos a partir de las características de la zona de estudio.

Categorización meteorológica			
Categoría meteorológica	Categorización de Pasquill		
	A, B	C, D, E	F, G
1	$v < -3,0$	--	--
2	$-3,0 < v < -0,5$	$v < -3,0$	--
3	$-0,5 < v < +0,5$	$-3,0 < v < -0,5$	$v < -3,0$
4	$+0,5 < v < +3,0$	$-0,5 < v < +0,5$	$-3,0 < v < -0,5$
5	$v > +3,0$	$+0,5 < v < +3,0$	$-0,5 < v < +0,5$
6	--	$v > +3,0$	$+0,5 < v < +3,0$

Tabla 7. Categorización de las condiciones meteorológicas según Pasquill.

En la Tabla 8 se muestran los niveles sonoros simulados en los puntos característicos para la situación normal (sin efectos meteorológicos) y para dos situaciones con condiciones meteorológicas particulares. La primera situación (pero caso: $F \rightarrow R$) corresponde a la condición ficticia más desfavorable donde se considera la dirección del viento predominante desde cada una de las fuentes hacia cada receptor (esta situación representa la cota máxima de incremento sonoro sobre cada receptor para la velocidad establecida). En el segundo caso se muestra la situación con la dirección del viento predominante en la zona (NO). En ambos casos, al modelo de predicción de emisiones sonoras generadas por las fuentes industriales, establecido en la norma ISO 9613-2, se le adiciona el aporte del término de atenuación sonora (A_{Cmet}) debido a los efectos meteorológicos extraídos del modelo CONCAWE.

$$A_{Cmet, categoria1} = -54.3 + 39(Logd) - 4.92(Logd)^2 - 0.239(Logd)^3$$

$$A_{Cmet, categoria2} = -148.2 + 164.99(Logd) - 56.287(Logd)^2 + 6.3422(Logd)^3$$

$$A_{Cmet, categoria3} = -150 + 160.95(Logd) - 54.786(Logd)^2 + 6.1604(Logd)^3$$

$$A_{Cmet, categoria5} = 104.6 - 108.03(Logd) + 35.295(Logd)^2 - 3.8227(Logd)^3$$

$$A_{Cmet, categoria6} = 123.4 - 127.6(Logd) + 42.017(Logd)^2 - 4.584(Logd)^3$$

Figura 9. Atenuación sonora debida a los efectos meteorológicos para las distintas categorías considerando la banda de 1000 Hz.

Fuente industrial	Punto característico	Niveles sonoros simulados [dB(A)]				
		Sin efectos meteorológicos	Con efectos Meteorológicos (peor caso: F → R)	Dif.	Con efectos Meteorológicos (dir.: NO)	Dif.
LHCH	1	59.7	63.6	3.8	63.6	3.8
LHCI	3	62.7	66.6	3.9	58.5	-4.2
HDPE	4	58.4	62.6	4.2	56.7	-1.7
Air liquid	6	60.7	62.3	1.6	59.5	-1.2
Cargill	9	59.2	61.4	2.2	60	0.8
Termoeléctrica	10	53.4	57.1	3.7	57.1	3.7
EPE	11	61.7	65.2	3.5	63.8	2.1
LDPE	12	61.3	64.9	3.7	59.7	-1.6
Profertil	13	59.2	63.2	4	56.9	-2.3
LLDPE	15	68.2	69.9	1.7	64.6	-3.6

Tabla 8. Comparación entre los niveles sonoros simulados para las situaciones con y sin efectos meteorológicos considerando todas las fuentes actuando de manera conjunta.

Es necesario recalcar que la metodología implementada permite obtener valores indicativos de las variaciones de los niveles sonoros debida a la refracción del sonido en presencia de distintas velocidades de viento y gradientes de temperatura. En tal sentido, sería necesario estudiar, no solo teóricamente sino experimentalmente, el efecto del viento bajo distintas condiciones adicionales (ej. situaciones de turbulencia locales) a fin de conocer su influencia de una manera más objetiva.

8. CONCLUSIONES

Se implementó un modelo para evaluar la incidencia acústica generada por fuentes de ruido industrial sobre una zona urbanizada lindera, a partir de la utilización de un software de simulación comercial. Para verificar dicho modelo, se compararon los niveles sonoros simulados con datos reales medidos, siendo el error máximo obtenido inferior a los 2 dB(A).

Se desarrolló una metodología para la identificación de las potencias sonoras de las fuentes industriales en condiciones normales de operación y se propuso una estrategia de medición para evaluar objetivamente los niveles de potencia en función de las fluctuaciones encontradas.

Todas las mediciones se realizaron con velocidades del viento inferiores a los 5 m/seg, caracterizando la zona sin la influencia del viento. Asimismo, se simuló el incremento sonoro debido a los efectos climatológicos considerando los lineamientos generales de la normativa CONCAWE a fin de poder determinar, mediante valores indicativos, las variaciones en los niveles sonoros en los puntos receptores.

Como trabajo a futuro, sería importante realizar un programa de seguimiento de emisiones sonoras óptimo por medio de la implementación de una red de monitoreo continuo de ruido correctamente diseñada, a partir de la selección de un conjunto mínimo de puntos receptores. Esto permitiría cuantificar el impacto acústico e identificar los posibles emisores que inciden sobre el entorno, generando una herramienta de evaluación sonora que responda a la normativa vigente.

REFERENCIAS

- [1] Samir Y. Gerges and Jorge P. Arenas, *Fundamentals and Control of noise and vibrations*, NR Editora, Florianópolis, (2004).
- [2] Pablo G. Girón, Martín E. Sequeira, Adrián P. Azzurro y Víctor H. Cortínez. “Control de ruido industrial mediante un modelo computacional: estudio de caso”. *Mecánica Computacional*, Vol. XXIV, pp. 2325-2341, (2005).
- [3] Víctor H. Cortínez, Martín E. Sequeira y Marta C. Vidal. “Identificación de fuentes de ruido en ambientes urbanos industriales”. II Reunión Anual del Proyecto Integrador para la Mitigación de la Contaminación Atmosférica (PROIMCA), Versión impresa, ISBN: 978-950-42-0119-9, (2009).
- [4] Plan Estratégico de la ciudad de Bahía Blanca. Etapas de Formulación. Municipalidad de Bahía Blanca. Buenos Aires, Argentina, (2000).
- [5] Ordenanza Municipal N° 13.032. “Régimen de Ruidos Molestos”. Ciudad de Bahía Blanca. Buenos Aires, Argentina, (2004).
- [6] Víctor H. Cortínez, Pablo G. Girón, Adrián P. Azzurro, Mariano H. Tonini, Martín E. Sequeira y Liberto Ercoli. “An urban study in the city of Bahía Blanca, Argentina”. *Internoise*, Río de Janeiro, Brasil, (2005).
- [7] Martín E. Sequeira, Cecilia I. Stoklas, Pablo G. Girón, Adrián P. Azzurro y Víctor H. Cortínez. “Caracterización de Ruido Urbano en la ciudad de Bahía Blanca”. *VI Congreso Iberoamericano de Acústica*, Buenos Aires, (2008).
- [8] Enrique Puliafito, Fernando Rey Saravia, Marcelo Pereyra y Marcia Pagani. “Calidad del aire en el Polo Petroquímico de Bahía Blanca”. *II Reunión Anual del Proyecto Integrador para la Mitigación de la Contaminación Atmosférica*, Versión impresa, ISBN: 978-950-42-0119-9, (2009).
- [9] ISO 8297:1994 -Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Multisource Industrial Plants for Evaluation of Sound Pressure Levels in the Environment.
- [10] ISO 9613-2:1993 -Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 2: General Method of Calculation.
- [11] ISO 1996-2:1987 - Acoustics – Description and measurement of environmental noise. Part 2: Acquisition of data pertinent to land use.
- [12] Andrés Guzmán Garcés. “Implementación de una red de monitoreo continuo de ruido en Enap refinerías Bio Bio”. Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Licenciado en Acústica y al título profesional de Ingeniero Acústico. Universidad Austral. Valdivia, Chile, (2006).
- [13] Céline Boutin and Alexis Bigot. “Mixed Industry and traffic noise Mapping”. Acoustic-08, Paris, (2008).
- [14] Conservation of clear air and water in Europe (CONCAWE):1981. The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighboring Communities. Report N° 4/81.