



TESIS DOCTORAL

**PREDICCIÓN Y MONITORIZADO DE RUIDO DE AEROGENERADORES Y SUS
IMPLICACIONES PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE PARQUES EÓLICOS**

ÁLVARO GRILO BENSUSAN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

2015



TESIS DOCTORAL

**PREDICCIÓN Y MONITORIZADO DE RUIDO DE AEROGENERADORES Y
SUS IMPLICACIONES PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE
PARQUES EÓLICOS**

ÁLVARO GRILO BENSUSAN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA.

Conformidad de los Directores:

Fdo: D. Conrado Ferrera Llera

Fdo: Dña. Emilia Guisado-Pintado

Fdo: D. Joaquín Fernández Francos

2015

AGRADECIMIENTOS

A Lía, que despertó en mí la curiosidad por la investigación y que ha sido fuente inagotable de apoyo durante la realización de esta tesis. Gracias por tu eterna paciencia.

A mis padres, auténticos catedráticos de la vida, y a mi abuela, familia y amigos, a los que este trabajo tanto tiempo ha robado.

Agradecer el apoyo brindado por Sarah Joubert, Saul Davies, Simon Shilton, Dr. Alan Sticmac y en especial, al Dr. Vitor Rosao, por las interminables discusiones en Turquía y el interés mostrado.

Gracias a mis directores Dra. Emilia Guisado, Dr. Conrado Ferrera y Dr. Joaquín Fernández, por su confianza y apoyo para llevar a buen puerto este proyecto, así como a todo el equipo de INERCO Acústica por haberme brindado la posibilidad de desarrollar esta investigación.

Por último, me gustaría dedicar esta tesis a la memoria de mi abuela Gertrudis.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	1
CONTENIDO.....	3
1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	5
2.1 CONTEXTO Y ANTECEDENTES.....	7
Los aerogeneradores como emisor sonoro.....	7
Los estándares de calidad acústica para parques eólicos.....	9
2.2 MARCO NORMATIVO.....	17
Real Decreto 1367/07: Reglamento de la Ley del Ruido.....	18
El Reglamento contra la Protección Acústica en Andalucía.....	20
Aplicación del RPCCA a parques eólicos.....	23
Límites admisibles de ruidos en parques eólicos según RPCCA.....	24
Índices de valoración.....	25
Recomendaciones de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.....	27
3. ESTADO DEL ARTE.....	31
3.1 Estándares internacionales de predicción sonora.....	34
Norma ISO 9613-2:1996 Atenuación del Ruido en Propagación de Exteriores. Método General de Cálculo.....	34
Método CONCAWE. Propagación del Ruido desde Complejos Petroleros y Petroquímicos a las Comunidades Vecinas.....	37
Modelo Nórdico de Predicción de Ruido Ambiental NORD 2000.....	38
Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (CNOSSOS-EU).....	39
Otras normas de cálculo.....	40
3.2 Monitorizado de ruidos: metodologías y postprocesado.....	41
Análisis discreto conforme a la normativa autonómica.....	41
Análisis por Regresión Polinomial.....	43
<i>Binning method</i> : Análisis agrupado por bins de viento.....	45
Otras metodologías.....	46
4. ÁMBITO DE ESTUDIO.....	49
4.1 Caracterización acústica de los aerogeneradores.....	52
Condiciones de funcionamiento de los aerogeneradores.....	53
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA.....	55
Punto de medida 1.....	55
Punto de medida 2.....	56

5. OBJETIVO E HIPÓTESIS.....	57
6. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	61
6.1 FASE I. MONITORIZADO DEL RUIDO.....	62
Instrumentación de Medida.....	62
Tiempo de integración.....	63
Condiciones ambientales.....	64
Condiciones de propagación favorables.....	67
Valoración del ruido de fondo.....	68
Valoración de la incertidumbre.....	68
Otras condiciones específicas de instalación.....	70
6.2 FASE II. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS SONOROS.....	74
6.3 FASE III. CÁLCULO DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN SONORA.....	78
Norma ISO 9613-2:1996 Atenuación del Ruido en Propagación de Exteriores.....	86
Método CONCAWE. Propagación del Ruido desde Complejos Petroleros y Petroquímicos a las Comunidades Vecinas.....	90
Modelo Nórdico de Predicción de Ruido Ambiental Nord 2000.....	97
Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (CNOSSOS-EU).....	104
7. RESULTADOS.....	111
7.1 RESULTADO DE LA FASE DE MONITORIZADO DE RUIDO.....	112
Método I. Análisis de Registros Discretos según Decreto 6/2012 de Andalucía.....	112
Método II. Análisis por Regresión Polinomial.....	114
Método III. Análisis Agrupado por Bines de Viento.....	117
Evaluación del ruido de fondo.....	121
Evaluación de la incertidumbre.....	125
7.2 RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN SONORA.....	126
Norma ISO 9613-2:1996 Atenuación del Ruido en Propagación de Exteriores. Método General de Cálculo.....	126
Método CONCAWE. Propagación del Ruido desde Complejos Petroleros y Petroquímicos a Las Comunidades Vecinas.....	134
Modelo Nórdico de Predicción de Ruido Ambiental NORD 2000.....	140
Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (CNOSSOS-EU).....	147
8. DISCUSIÓN CIENTÍFICA.....	155
8.1 METODOLOGÍA DE MONITORIZADO DE RUIDOS EN PARQUES EÓLICOS.....	156
Valoración de la representatividad del Método I: Análisis discreto de registros.....	156
Valoración de la representatividad del Método II: Análisis por Regresión Polinomial...158	158
Valoración de la representatividad del Método III: Agrupación por bines.....	162
Procedimiento de monitorizado de ruido.....	168
Valoración del ruido de fondo.....	169
8.2 DISPERSIÓN DE LA MUESTRA Y DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD.....	173

8.3	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN EN PARQUES EÓLICOS MEDIANTE MONITORIZADO DE RUIDOS.....	178
	Evaluación de las Diferentes Normas de Cálculo según el Punto de Medida evaluado ...	179
	Evaluación de las Diferentes Normas de Cálculo según el Periodo de evaluación	185
8.3	EVALUACIÓN GLOBAL DE LOS MODELOS DE LAS NORMAS DE CÁLCULO RESPECTO AL MONITORIZADO DE RUIDO APLICANDO METODOLOGÍA IOA.....	193
8.4	EVALUACIÓN GLOBAL DE LOS MODELOS BASE DE LAS NORMAS DE CÁLCULO EN FUNCIÓN DE LA ABSORCIÓN DEL TERRENO G	197
8.5	EFICACIA DE LAS ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN DE BAJO RUIDO.....	202
8.6	MODELO RECOMENDADO PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE PARQUES EÓLICOS 205	
9.	CONCLUSIONES.....	209
9.1	Futuras líneas de investigación	211
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	213
	ANEXO I. GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	223
	ANEXO II. RESULTADOS DE MODELIZACIONES POR BINES DE VIENTO.....	227
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0$	228
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0$ Y LIMITACIÓN DE ATENUACIÓN A_{bar}	231
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0$ Y METODOLOGÍA IOA.....	232
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0,5$	233
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0,5$ Y LIMITACIÓN DE ATENUACIÓN A_{bar}	236
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0,5$ Y METODOLOGÍA IOA	237
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G CONFORME A CLC.....	238
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G CONFORME A CLC Y LIMITACIÓN DE ATENUACIÓN A_{bar}	241
	RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G CONFORME A CLC Y METODOLOGÍA IOA... ..	242
	ANEXO III. ARTÍCULO PRESENTADO EN TECNIACÚSTICA 2015	243

1. RESUMEN

En la actualidad, la evaluación del impacto acústico de un parque eólico requiere de un estudio acústico previo así como de una serie de campañas acústicas *in situ* tras la puesta en marcha, que permitan garantizar el cumplimiento de los valores límites sonoros que les sean de aplicación. Para ello, es importante que los modelos de predicción sonora empleados durante la fase de planificación sean precisos con vistas a maximizar la producción energética al tiempo que se verifica el cumplimiento de la normativa aplicable en el ámbito acústico.

En base al principio de prevención ambiental, se ha desarrollado un modelo combinado de predicción sonora/monitorizado de ruido para la evaluación acústica de parques eólicos, que comprende la adopción de un estándar de cálculo y valores de impedancia acústica, que garanticen un alto grado de precisión en los resultados.

El modelo propuesto se ha desarrollado a partir de un análisis comparativo entre las diferentes normas y estándares de cálculo internacionales para la predicción sonora en campo libre así como el análisis estadísticos de registros sonoros de una campaña de monitorizado altamente representativa de los niveles sonoros. La correlación existente entre ambas bases de datos ha permitido establecer la fidelidad del modelo respecto a la situación acústica real.

El parque eólico objeto de estudio presenta una serie de particularidades altamente relevantes: alta capacidad productiva del parque eólico, elevado número de aerogeneradores, topografía compleja e implementación de estrategias de bajo ruido que regula el funcionamiento de los aerogeneradores durante el periodo nocturno. De esta forma, el modelo de predicción propuesto da respuesta a la evaluación de la eficacia de las medidas de mitigación implementadas para la reducción del ruido ambiental, así como a situaciones de propagación en terrenos irregulares y donde la atenuación acústica del terreno requiere una cuidadosa elección del valor de absorción empleado, e incluso la introducción de factores correctores en base a criterios de visibilidad o reflexiones múltiples.

El análisis comparativo de las simulaciones acústicas se estructura en torno a cuatro normas de cálculo:

- En primer lugar el modelo ISO 9613-2:1996 "*Acoustic - Abatement of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation*" (ISO, 1996), de referencia desde el año de su publicación, revisado en 2012 por la ISO y modelo de referencia tomado por la Directiva 49/2002/CE para la evaluación del ruido ambiental de fuentes industriales y la elaboración de mapas estratégicos y planes de acción.
- En según lugar, *CONCAWE-report 4/81, "The propagation of noise from petroleum and petro-chemical complexes to neighboring communities"* (Manning, 1981) desarrollado para el estudio acústico de refinerías y complejos petroquímicos pero que introdujo la posibilidad de estimar los niveles sonoros en función de diferentes direcciones de viento y clases de estabilidad atmosférica de Pasquill.
- El modelo nórdico de predicción sonora NORD2000 (Plovsing, 2010) que surge de la iniciativa de los países nórdicos (Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia) para armonizar la norma de cálculo de referencia que ha sido empleado como tercer escenario. Este

modelo recogía la experiencia específica de modelizaciones acústicas en el momento de su publicación y adaptaba los cálculos a las nuevas capacidades computacionales.

- En último lugar, se emplea los Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (*Common Noise aSSessment methOdS* - CNOSSOS en adelante)(Comisión Europea, 2015) cuya versión actualizada recientemente por la Directiva 996/2015 será adoptada como método de cálculo armonizado por todos los países miembros de la Unión Europea a partir de 2018. La aplicación del modelo CNOSSOS al caso objeto de estudio constituye una investigación pionera en la validación del modelo para fuentes sonoras a gran altura, como son los parques eólicos.

El análisis de los ensayos de la campaña de monitorizado acústico (realizada conforme a la Norma ISO 1996-2:2007 “*Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 2: Determination of environmental noise levels*” (ISO, 2007) se ha realizado mediante regresión polinomial de los índices L_{Aeq} y L_{90} así como mediante un análisis por bins¹ de viento desarrollado por Ashtiani et al. (Ashtiani y Titus, 2011), empleando intervalos de corta duración para garantizar su adaptación a la regulación normativa existente en España.

Los resultados de las comparaciones realizadas han puesto de manifiesto que la selección del valor de impedancia acústica del terreno determinan ampliamente la precisión del modelo respecto a los niveles sonoros monitorizados, incurriéndose en algunos modelos en altas sobrestimaciones, que pueden ocasionar la restricción de ubicaciones de aerogeneradores en posiciones altamente rentables o, aún peor, subestimaciones que conlleven incumplimientos normativos en las edificaciones más cercanas.

El modelo combinado propuesto combina un análisis estadístico por bins de viento que permite evaluar el nivel sonoro promedio estimado para cada ventana de emisión de los aerogeneradores en un intervalo de medida acorde a la normativa (1 minuto) así como un modelo de predicción basado en la norma de cálculo CNOSSOS con un valor absorción del terreno G de 0 (terreno duro). Este sistema permitiría la evaluación del impacto acústico en el caso objeto de estudio con un alto grado de precisión (promedio de desviaciones respecto al monitorizado de 0,6 dBA para todos los casos estudiados) sin incurrir en subestimaciones de los niveles sonoros.

Además la evaluación mediante análisis estadísticos de los registros sonoros para cada velocidad de viento se adapta mejor a las reducciones de potencia acústica derivados de la implementación de medidas de mitigación en los parques eólicos, frente a las regresiones polinomiales. El procesado mediante bins de viento refleja adecuadamente los cambios existentes en los niveles sonoros entre diferentes ventanas de viento, así como a la dispersión derivada de la entrada en funcionamiento del control de la velocidad de los aerogeneradores.

La implementación de la Guía de Buenas Prácticas para la Evaluación del Ruido de Parques Eólicos del Instituto de Acústica del Reino Unido (Institute of Acoustics, 2013) no ha introducido mejoras relevantes en el comportamiento de los modelos de predicción para los casos estudiados, introduciendo un mayor rango de sobrestimación de los niveles sonoros. La metodología propuesta por el IOA, sugerida para topografías complejas y con alta densidad de aerogeneradores, atiende a criterios de visibilidad de los aerogeneradores y cambios del desnivel en el perfil vertical que pueden ocasionar cálculos erróneos de la atenuación del terreno. La aplicación de dichas correcciones debe ser evaluada de forma pormenorizada en función del desnivel existente en el área de estudio, aun verificándose las condiciones establecidas por la guía para su consideración.

¹ Término anglosajón referido a un rango de velocidades de viento de $1 \pm 0,5$ m/s de amplitud.

Finalmente, los trabajos desarrollados han puesto de manifiesto la efectividad de las medidas de mitigación de ruido, mediante la implementación de determinadas estrategias de bajo ruido en función de la velocidad de viento. La reducción de la potencia sonora de los aerogeneradores se ha traducido en importantes atenuaciones acústicas (en el rango 3-7 dBA) respecto al funcionamiento habitual del parque a máxima potencia, con ciertas desviaciones respecto al nivel objetivo (45dBA). En este sentido, el modelo de predicción propuesto contribuirá sin duda al diseño de estrategias de reducción acústico con un mayor grado de precisión, puesto que las desviaciones están motivadas por la falta de validación del modelo empleado.

2. INTRODUCCIÓN

En la última década, la energía eólica se ha postulado como uno de los pilares del sector energético en España con vistas a compensar el déficit energético del sistema mediante el desarrollo de energías renovables alternativas. Esta circunstancia dio lugar a un rápido desarrollo en el sector, de forma que la energía eólica constituye en la actualidad más del 21% de la potencia instalada del sistema eléctrico nacional, superando los 23 GW de potencia la totalidad del parque eólico nacional (AEE, 2015). A pesar de que la entrada en vigor de la Reforma Energética en el año 2014 ha supuesto la retirada de incentivos a numerosos parques y el estancamiento en la instalación de más potencia, el sector eólico sigue constituyendo un importante reto desde el punto de vista ambiental y acústico.

El desarrollo de los parques eólicos implica la necesidad de herramientas de evaluación ambiental eficaces y específicas para las características de estas instalaciones energéticas, que permitan anticiparse, prevenir y minimizar los posibles impactos que puedan provocar. Desde el punto de vista acústico, los aerogeneradores constituyen un foco ruidoso cuya potencia sonora ha ido en aumento a medida que se incrementaba su potencia eléctrica, por lo que son necesarios estudios acústicos específicos que permitan valorar su incidencia sobre el medio ambiente exterior y las edificaciones más cercanas.

En la actualidad, el impacto acústico de los parques eólicos se encuentra regulado por el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, que desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas (Boletín Oficial del Estado, 2005a) y autorización ambiental mediante la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Ambas normativas han sido desarrolladas reglamentariamente por las diferentes comunidades autónomas dentro del ámbito de sus competencias en materia de medio ambiente. En concreto en Andalucía, se desarrolla mediante las siguientes normativas:

- La Ley 7/2007 de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (en adelante GICA, Boletín Oficial del Estado, 2007), que establece la necesidad de presentar un estudio acústico de aquellas actuaciones que sean fuentes de ruidos y vibraciones (artículo 74). Los parques eólicos quedan recogidos dentro de esta norma dentro del procedimiento de Autorización Ambiental Unificada, que obliga a incluir dentro de la documentación pertinente, un estudio acústico. Los contenidos y metodología para la realización de dichos estudios fue determinado reglamentariamente tal y cómo se explica a continuación.
- El Real Decreto 1367/07 se desarrolla reglamentariamente en el año 2012 mediante el Decreto 6/2012 de 17 de Enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía (en adelante RPCCA, Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 2012), que será de aplicación para las nuevas actividades y todas las actividades ya existentes que originen molestias y denuncias por ruido, que deberán adaptarse a los nuevos límites de inmisión establecidos por el Reglamento a su entrada en vigor (24 de Octubre de 2007).

El RPCCA establece los valores límites aplicables para todas las actividades así como instrucciones técnicas específicas para certificar el cumplimiento de cualquier tipo de foco susceptible de ocasionar problemas por ruidos y vibraciones. De forma específica, los parques eólicos requieren de estudios acústicos operacionales mediante métodos de cálculo según el Anexo II del RD1513/2005 (Boletín Oficial del Estado, 2005b) para la evaluación del impacto acústico de las

situaciones más desfavorables (esto es, ISO 9613-2:1996), incluyendo la consideración de los vientos predominantes y máxima emisión de las fuentes.

Sin embargo, y de forma general, los procedimientos y herramientas de valoración acústica diseñadas son poco adecuadas para evaluar los parques eólicos dadas sus particularidades, fundamentalmente por tres motivos:

- La potencia acústica de los aerogeneradores varía con la velocidad del viento y suele alcanzar su máximo en el rango de 7 a 15 m/s a altura de buje. Los procedimientos de ensayos establecidos en las instrucciones técnicas del RPCCA establecen que se descarten los registros sonoros obtenidos con velocidades de viento² superiores a 5 m/s por lo que de forma general no sería posible valorar los periodos de mayor afección acústica de los parques eólicos.
- La certificación acústica de una actividad según el RPCCA refleja la necesidad de obtener suficientes registros sonoros representativos para establecer si una actividad es un emisor objetivamente legal. La afección sonora asociada al funcionamiento de un parque eólico es variable en función de las condiciones meteorológicas por lo que no es adecuado aplicar procedimientos de medidas discretos como en el resto de actividades industriales, ya que las conclusiones sólo serán representativas del instante en el que se realizó la medición.
- La modelización acústica de parques eólicos es compleja y requiere la adecuada parametrización de los casos de estudios en relación con la topografía, impedancia acústica, condiciones meteorológicas y caracterización de las fuentes. Numerosos autores (Cooper et al., 2012; Delaire et al., 2011; Institute of Acoustics, 2013) han demostrado las desviaciones derivadas de la utilización de la norma ISO 9613-2:1996, por lo que la selección de la norma de cálculo y los parámetros de entrada debe ser cuidadosamente analizada.

Por tanto, la evaluación del impacto acústico de los parques eólicos y la certificación acústica de estas instalaciones requiere de una metodología específica en cuanto a modelos de predicción y ensayos acústicos, que sea específica para las particularidades del ruido ocasionado por los aerogeneradores y que refleje la variabilidad de la afección sonora implícita durante la fase operacional.

En este sentido, diferentes países han producido normativas específicas con los requerimientos aplicables a los parques eólicos, destacando la legislación desarrollada en Australia y Nueva Zelanda donde los procedimientos son mucho más detallados y por tanto tienen gran valor de cara a analizar la afección acústica de los parques eólicos. Los estudios acústicos en estos países requieren una amplia recopilación de datos para la determinación de los niveles de ruido ambiental y los límites sonoros son sensiblemente más bajos en línea con las directrices de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1999, 2009)

A continuación se analiza el estado del arte de la evaluación acústica de parques eólicos, desde un punto de vista normativo en relación a los valores límites normativos establecidos en diferentes países y desde el punto de vista práctico en los diferentes estándares y normas de cálculo internacionales para su predicción así como las experiencias y avances alcanzados en las últimas décadas en el sector.

² Todas las referencias a velocidades de vientos del presente estudio están referidas a una altura de 10 metros (w_{10}) a menos que se indique expresamente otra altura de valoración.

2.1 CONTEXTO Y ANTECEDENTES

Los aerogeneradores como emisor sonoro

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el efecto perjudicial del ruido se define como un *cambio en la morfología y fisiología de un organismo que resulta en el desajuste de una capacidad funcional, reacción adversa ante el estrés o un incremento en la susceptibilidad del organismo frente a los efectos perjudicial de otras influencias ambientales* (WHO, 2000). Entre los efectos adversos, ya sean temporales o a largo plazo, se distinguen de acuerdo a sus efectos específicos: la pérdida de audición, el efecto sobre la inteligibilidad, molestia del descanso e interrupción del sueño, efectos psicológicos y molestia por ruidos en su interferencia con otras actividades sociales. Estos efectos negativos se ven reforzados en numerosas ocasiones por la combinación de diferentes fuentes de ruidos y la existencia de grupos vulnerables, en función de las diferentes sensibilidades ante la exposición al ruido.

La interrupción del sueño es uno de los mayores efectos del ruido ambiental, causando un efecto directo sobre el descanso y un efecto secundario al día siguiente de la exposición al ruido. El sueño ininterrumpido es un requisito necesario para una adecuada salud física y mental, siendo los principales efectos del ruido la dificultad de dormir, sobresaltos y alteraciones de las fases del sueño, aumento de la presión cardiaca y pulsaciones, vasoconstricción, alteraciones respiratorias y arritmia. La probabilidad de molestia está asociada a la diferencia entre el nivel sonoro del evento y el ruido de fondo más que el nivel absoluto del evento (European Environmental Agency, 2010).

Además de otros efectos indeseados, como el impacto visual o socio-económicos, los aerogeneradores industriales pueden causar molestias y otros efectos negativos sobre la salud (Horner et al., 2013). Son numerosas las referencias que incluyen: molestias por ruido, alteración del suelo y/o otros impactos sobre la salud y la calidad de vida de los habitantes del entorno del parque eólico (Ambrose et al., 2012; Bakker et al., 2012; Janssen et al., 2009; Pedersen y Persson Waye, 2007a; Pedersen y Waye, 2004; Pedersen, 2007a; Pedersen et al., 2009; Shepherd et al., 2011).

El ruido total generado por un aerogenerador procede de los diversos componentes y mecanismos con constituyen el conjunto formado por la góndola, el buje las palas y su interacción con la torre. Cuando la velocidad de viento se encuentra por debajo de la velocidad de arranque, el aerogenerador está en estado estacionario y la generación de ruido es mínima. Cuando el aerogenerador entra en funcionamiento (habitualmente a velocidades de viento entre 4 y 30 metros a altura de buje), la potencia sonora aumenta hasta alcanzar un nivel estacionario, hasta que alcanza la velocidad de corte, tal y como se puede apreciar en la ilustración 1.

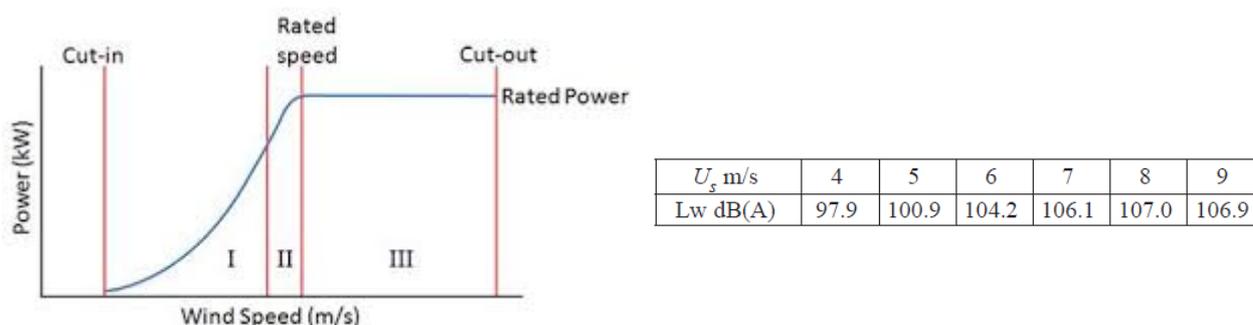


Ilustración 1. Evolución de la producción eléctrica y ejemplo de potencia acústica L_w asociada para un aerogenerador 3 MW, según la velocidad de viento U_s (Evans et al., 2013a; Tonin, 2012)

El ruido total producido por el aerogenerador se puede agrupar en ruido mecánico y aerodinámico. Las fuentes de ruido mecánico son la caja de cambios, el generador, el sistema de

ventilación, el sistema de orientación, otros sistemas auxiliares y la aplicación del freno de parada. Aunque dichos elementos son susceptibles de generar tonalidad en su emisión, de forma general el ruido mecánico de los actuales aerogeneradores no es perceptible por encima del ruido aerodinámico (Tonin, 2012).

Habitualmente el ruido aerodinámico asociado al paso del aire sobre las palas es el principal componente del ruido aerodinámico. Tonin, 2012 define las siguientes fuentes de ruido aerodinámico, que se identifican en la Ilustración 2:

- *Trailing Edge Noise* o el ruido aerodinámico generado en el borde de fuga de la pala cuando se produce la transición del flujo laminar a flujo turbulento. Es la principal fuente de ruido en las actuales, en el rango de frecuencias de 250-10kHz (Wagner et al., 1996).
- *Amplitude modulation -AM*: Los aerogeneradores genera un silbido que es la variación en banda ancha del ruido aerodinámico de las palas. La variación o modulación de los niveles sonoros sucede con la frecuencia de paso de las palas que es habitualmente sobre 1 Hz (2-6 dB). Normalmente el paso de la pala genera un pico en los niveles sonoros de unos pocos decibelios. Normalmente este incremento está asociado al *trailing edge noise*. Sin embargo, en algunos casos, este pico (denominado según los términos anglosajones como *swishing* o *thumping*) se incrementa considerablemente y es habitualmente conocido como *amplitude modulation* o *AM*. En estos casos, las variaciones en los niveles sonoros son mayores de 6 dB y las variaciones son percibidas a largas distancias, a favor y en contra del viento. Además aparece un cambio en las características del ruido, que se convierte en impulsivo y/o presenta mayor contenido de bajas frecuencias, que se pone en evidencia cuando las altas frecuencias son atenuadas (RenewableUK, 2013). En la actualidad se atribuye al ruido de banda ancha causado por la rotación de la pala, particularmente en la zona de difusión del borde de la pala y el efecto *doppler* del movimiento de la pala hacia el receptor (Xue et al., 2015).
- Ruido del flujo turbulento de entrada: Esta fuente es debida al flujo turbulento en el frente de ataque de la pala, debido a la interacción con el borde de la pala. La frecuencia generada es habitualmente por debajo de 20 Hz.
- *Blade tip noise* o el ruido de la circulación del flujo por la extensión de la pala. Poco representativo respecto al resto de fuentes aerodinámicas.
- Interacción palas-torre: Ruido de tipo impulsivo fruto por la interacción de las palas con el flujo turbulento causado por la torre. Frecuencia de tipo infrasónica pero de magnitud poco significativa en los actuales aerogeneradores.
- Ruido tonal resonancias de estructuras no aerodinámicas o flujo no laminar debido a desperfectos en el borde de fuga de la pala. Habitualmente no constituye un problema en aerogeneradores en buen estado.

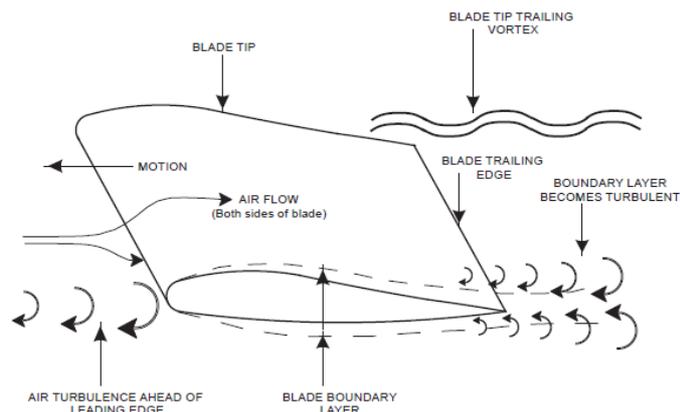


Ilustración 2. Diagrama de interacción del flujo de aire con la pala (Tonin, 2012)

En la actualidad, se están consensuando los métodos de medidas más adecuados para la valoración tanto de la efecto AM como de ruido de baja frecuencia e infrasonidos originados por parques eólicos (Irvine and Acoustics, 2015; Lundmark and Akustik, 2011; RenewableUK, 2013) y se han establecido en algunos países (ej. Dinamarca) criterios específicos para el control del ruido de baja frecuencia (Danish Parliament, 2011). Además de las iniciativas emprendidas la armonización de los criterios de evaluación (Xue et al., 2015), se están realizando estudios específicos de niveles de baja frecuencia e infrasonido (Evans et al., 2013b, 2013c) y la evaluación de la percepción humana de los mismos (Hansen et al., 2015).

Los estándares de calidad acústica para parques eólicos

En relación con los estándares de calidad acústica, la OMS, estableció en el año 1999 a través del documento *Guidelines for community noise* (WHO, 1999) el impacto de la exposición al ruido durante la noche sobre la interrupción del sueño. En concreto establece lo siguiente:

Para evitar los efectos negativos sobre el sueño, los niveles sonoros continuo equivalentes superiores a 30 dBA en interiores deberían ser evitados para ruidos continuos. Si el ruido no es continuo, la interrupción del sueño se relaciona mayormente con el nivel L_{Amax} y los efectos se observan con niveles de 45 dBA o superiores, especialmente cuando el ruido de fondo es bajo. Los eventos sonoros superando 45 dBA deberían ser limitados en lo posible. Niveles inferiores serían incluso recomendables para personas especialmente sensibles.

Además, la OMS establece que debería ser posible verificar estos límites considerando las ventanas parcialmente abiertas (considerando una atenuación acústica desde el exterior hacia el interior de 15 dBA), aunque estas atenuaciones han sido puestas en duda posteriormente por algunos autores (Dickinson, 2009a) y deberían ser analizados con más detalle. En la tabla 1 se resumen las recomendaciones establecidas por la OMS que han servido como base para la adopción de niveles límites a nivel internacional, no sólo para el ruido de parques eólicos, sino para cualquier fuente de ruido.

Specific environment	Critical health effect(s)	LAeq [dB]	Time base [hours]	L _{Amax,fast} [dB]
Outdoor living area	Serious annoyance, daytime and evening	55	16	-
	Moderate annoyance, daytime and evening	50	16	-
Dwelling, indoors	Speech intelligibility and moderate annoyance, daytime and evening	35	16	
Inside bedrooms	Sleep disturbance, night-time	30	8	45
Outside bedrooms	Sleep disturbance, window open (outdoor values)	45	8	60
School class rooms and pre-schools, indoors	Speech intelligibility, disturbance of information extraction, message communication	35	during class	-
Pre-school Bedrooms, indoors	Sleep disturbance	30	sleeping-time	45
School, playground outdoor	Annoyance (external source)	55	during play	-
Hospital, ward rooms, indoors	Sleep disturbance, night-time	30	8	40
	Sleep disturbance, daytime and evenings	30	16	-
Hospitals, treatment rooms, indoors	Interference with rest and recovery	#1		

Tabla 1. Niveles sonoros recomendados para la comunidad por la OMS (WHO, 1999) [#1 Tan bajo como sea posible]

En el año 2009, la OMS estableció unas nuevas recomendaciones para el ruido nocturno en Europa en base a los nuevos estudios sobre la relación dosis-efecto y los nuevos descubrimientos respecto a la interrupción del sueño (WHO, 2009). Las principales novedades que introduce son la confirmación de que umbrales inferiores a 45 dBA presente efectos perjudiciales sobre la salud (tabla 2) y la adaptación del indicador de ruido al empleado por la Directiva 2002/49/CE (L_{night})³, herramienta de evaluación y gestión del ruido ambiental a nivel europeo (Consejo Europeo, 2002).

Average night noise level over a year $L_{night, outside}$	Health effects observed in the population
Up to 30 dB	Although individual sensitivities and circumstances may differ, it appears that up to this level no substantial biological effects are observed. $L_{night, outside}$ of 30 dB is equivalent to the no observed effect level (NOEL) for night noise.
30 to 40 dB	A number of effects on sleep are observed from this range: body movements, awakening, self-reported sleep disturbance, arousals. The intensity of the effect depends on the nature of the source and the number of events. Vulnerable groups (for example children, the chronically ill and the elderly) are more susceptible. However, even in the worst cases the effects seem modest. $L_{night, outside}$ of 40 dB is equivalent to the lowest observed adverse effect level (LOAEL) for night noise.
40 to 55 dB	Adverse health effects are observed among the exposed population. Many people have to adapt their lives to cope with the noise at night. Vulnerable groups are more severely affected.
Above 55 dB	The situation is considered increasingly dangerous for public health. Adverse health effects occur frequently, a sizeable proportion of the population is highly annoyed and sleep-disturbed. There is evidence that the risk of cardiovascular disease increases.

Tabla 2. Efectos de diferentes niveles de ruido nocturno en la salud de la población. (WHO, 2009)

³ Tal y como está definido en la norma ISO1996-2:1987, nivel continuo equivalente A largo plazo, determinado sobre todos los periodos nocturnos del año (habitualmente de ocho horas de duración entre las 23 horas y las 7 horas); en un año representativo respecto a la emisión de ruidos y un año promedio en cuanto a las condiciones meteorológicas.

Basado en la relación dosis-efecto de la tabla anterior, los niveles límite de ruido nocturno son establecidos para la protección de la salud pública de la siguiente manera:

- Nivel recomendado noche (NNG) - $L_{\text{night,exterior}} = 40 \text{ dB}$
- Objetivo interno europeo (IT) - $L_{\text{night,exterior}} = 55 \text{ dB}$

El nivel NNG se establece como un nivel basado en criterios médicos, para proteger a la población, incluyendo los grupos más vulnerables como los niños, enfermos crónicos y ancianos de los efectos adversos del ruido nocturno. El nivel IT se establece como un nivel intermedio cuando los niveles NNG no pueden ser alcanzados a corto plazo. Aunque este nivel no garantiza la protección de los grupos más vulnerables, es un nivel que protege a un amplio grupo de población y que puede ser asumido temporalmente en base a la viabilidad en su cumplimiento.

Aunque de forma general estos niveles límite de referencia pueden ser aplicados a los parques eólicos, dadas las particulares características acústicas de los aerogeneradores, es necesario realizar un estudio más detallado de la relación dosis-efecto. Diferentes autores (Janssen et al., 2009, 2011; Lee et al., 2011; Pedersen y Persson Waye, 2007b; Pedersen y Waye, 2004; Pedersen, 2007b; Pedersen et al., 2009; Persson Waye y Öhrström, 2002; Van Renterghem et al., 2013; Taylor et al., 2013) han estimado esta relación tanto *per se* como en relación con otras fuentes de ruido ambiental. Entre las principales conclusiones destacan:

- Se han encontrado mayores porcentajes de población sensible y molesta que la esperada respecto al ruido de infraestructuras de transporte. Esta circunstancia podría estar motivada por el impacto visual, por la propia molestia del ruido así como por las particulares componentes del ruido.
- El grado de molestia asociado al ruido de aerogeneradores es mayor que en otras fuentes sonoras para niveles sonoros relativamente bajos.
- La molestia fue menor para propietarios que recibían incentivos económicos por parte de los promotores y mayores para los residentes que visualizaban los aerogeneradores desde sus viviendas.
- La edad y la sensibilidad al ruido juegan papeles similares en la evaluación de la molestia para otras fuentes de ruido.
- Las personas expuestas en áreas con otras fuentes de ruido presentan menores molestias que las expuestas en áreas tranquilas.

En las Ilustraciones 3 y 4 se incluyen la relación dosis-efecto estimada para el ruido de aerogeneradores tanto en el exterior como en el interior de las edificaciones.

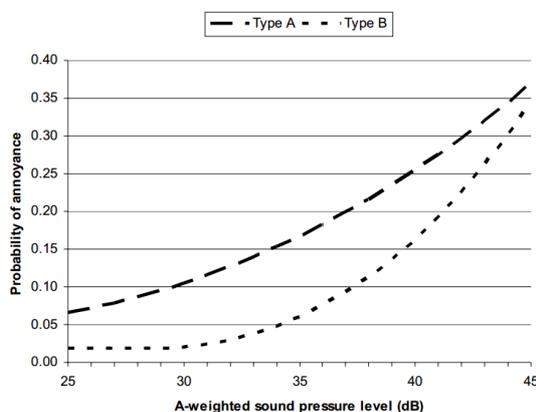


Ilustración 3. Estimación de la probabilidad de molestia en función del ruido de aerogeneradores en exteriores (SPL en dBA) en entornos rurales con bajo ruido de fondo (tipo A) y entornos suburbanos (tipo B). (Pedersen, 2007b)

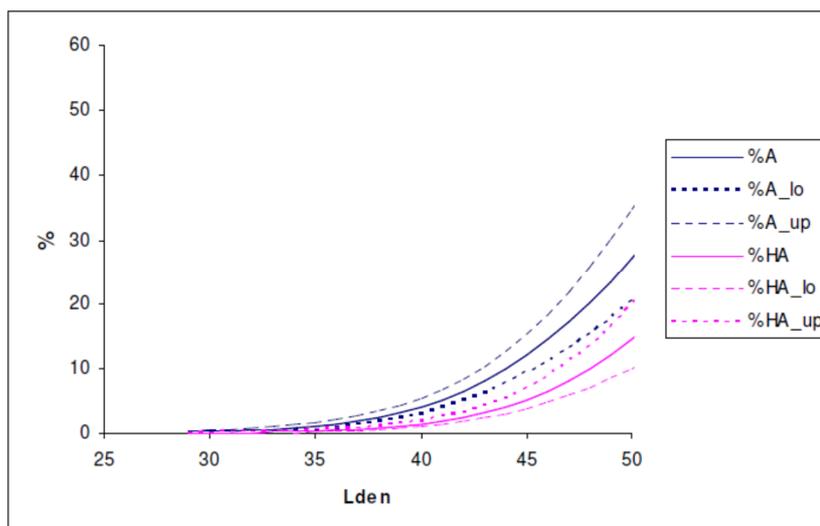


Ilustración 4. Porcentaje estimado de personas molestas (%A) y muy molestas (%HA) por el ruido de aerogeneradores en interiores, con un intervalo de confianza del 95% (Janssen et al., 2010)

Estos resultados podrían sugerir la necesidad de niveles límite más restrictivos que los establecidos por la OMS, dada la especial sensibilidad respecto a otras fuentes sonoras (Janssen et al., 2009, 2011). Sin embargo, en la actualidad estos estudios se consideran insuficientes para confirmar las conclusiones obtenidas, especialmente cuando existen otros factores no acústicos (como la postura general frente a la energía eólica y el impacto visual), con gran influencia en la percepción de la molestia (Pawlaczyk-Łuszczczyńska et al., 2014).

Tomando como base las recomendaciones de la OMS y el posterior desarrollo de estándares específicos sobre ruidos de aerogeneradores, cada país ha establecido límites normativos (Tabla 3) mediante el desarrollo de legislación acústica de ámbito general (para actividades industriales) o específica para parques eólicos, en muchos casos complementadas con guías de buenas prácticas. A continuación se resumen el análisis legislativo llegado a cabo a nivel internacional, obteniéndose las siguientes conclusiones generales:

- Los niveles límites objetivos oscilan en un intervalo de 20 dBA para las 26 normativas que presenta valores fijos, en el rango 30-60 dBA para el periodo nocturno.
- Únicamente en 3 de las 42 normas analizadas, los niveles sonoros están basados en el ruido de fondo con un margen de 3-7 dBA.
- En 13 de las 42 normativas analizadas, los valores límites están definidos por un valor límite fijo para bajas velocidades de viento combinados con un límite superior basado en el ruido de fondo.
- La mayoría de legislaciones analizadas utilizan métricas energéticas (L_{Aeq}) o derivadas de este indicador (L_d , L_e , L_n o L_{den}) mientras que en sólo 7 de 42 normas se emplean límites basados en índices estadísticos (principalmente L_{90}). Conviene destacar que el debate sobre el indicador a emplear sigue siendo objeto de discusión (Bliss, 2013; Dickinson, 2009; Fredianelli and Licitra, 2014; Larsson and Öhlund, 2014; Thorne and Shepherd, 2011 entre otros).

Región/País	Indicador	Límite objetivo (Día/Noche)	Límite relativo al ruido de fondo
Alberta/Canadá	L _{Aeq}	40 dBA	-
Alemania	L _r	50/35 dBA	-
Andalucía/España	L _{keq}	55 dBA/45 dBA	-
Columbia Británica/Canadá	L _{Aeq}	35 dBA	Ruido de fondo +5 dBA para nivel superior a 35 dBA hasta un máximo de 50 dBA
China	L _{Aeq}	55/45 dBA	-
Dinamarca	L _{Aeq}	37 dBA para 6 m/s 39 dBA para 8 m/s	-
España	L _{keq}	45/45 dBA	-
Flandes/Bélgica	L _{Aeq}	48/43 dBA	-
Francia	L _{Aeq}	35 dBA	5 dBA emergente durante el día 3 dBA emergencia durante la noche
Georgia/EEUU	L _{Aeq}	55 dBA	-
India	L _{Aeq}	55/45 dBA	-
Italia	L _{Aeq}	55/45 dBA	-
Japón	L _{AF}	55 dBA/45 dBA	-
Corea	L _{Aeq}	50/40 dBA Áreas tranquilas 55/45 dBA Residencial	-
Maine-Washington/EEUU	L _{Aeq}	60/50 dBA	-
Michigan/EEUU	L ₉₀	55 dBA	Ruido de fondo + 5 dBA
New South Wales/Australia	L ₉₀	35 dBA	Ruido de fondo + 5 dBA
New York State/EEUU	L _{Aeq}	-	Ruido de fondo + 5 dBA
Noruega	L _n	45 dBA	-
Nueva Zelanda	L ₉₀	35 dBA	Ruido de fondo + 5 dBA
Ontario/Canadá	L _{Aeq}	40 dBA	Ruido de fondo(L ₉₀) + 7 dBA
Oregón/EEUU	L ₅₀	55/50 dBA	-
Países Bajos	L _{den} /L _n	L _{den} 47 dBA/L _n 41 dBA	-
Pensilvania/EEUU	L _{Aeq}	-	Ruido de fondo + 5 dBA
Portugal	L _{Aeq}	45 dBA	Ruido de fondo+5/+4/+3 (D/E/N)
Quebec/Canadá	L _{Aeq}	45 /40 dBA	-
South Australia/Australia	L ₉₀	35 dBA	Ruido de fondo + 5 dBA
Suecia	L _{Aeq}	35 dBA para 8 m/s	-
Suiza	L _{Aeq}	60/50 dBA existentes 55/45 dBA nuevas	-
Turquía	L _{Aeq}	-	Ruido de fondo + 5 dBA
UK (Inglaterra, Gales, Escocia e Irlanda del Norte)	L ₉₀	Límite diario 35-40 dBA dependiendo de la densidad Límite nocturno 43 dBA	Ruido de fondo + 5dBA
US Environmental Protection Agency	L _{Aeq}	45 dBA	-
Victoria/Australia	L ₉₀	35 dBA	Ruido de fondo + 5 dBA
Wallonia/Bélgica	L _{Aeq}	45 dBA todas velocidades	-
Georgia-Nevada-North Carolina/EEUU	L _{Aeq}	55 dBA	-
Wisconsin/EEUU	L _{Aeq}	50/45 dBA	-
Wyoming/EEUU	L _{Aeq}	50 dBA	-

Tabla 3. Comparativas de niveles límites de normativas internacionales. Revisado y actualizado de (Arcadis et al., 2013; Van Den Berg, 2015; Garrigues y Gamba, 2012; Goemé, 2015; Ministry of Environmental Protection of China, 1994; Ministry of the Environment Japan, 1998; Ramakrishnan, 2007; Tachibana y Lang, 2009; Tachibana, 2014)

El análisis de los niveles límites en comparación con las recomendaciones de la OMS (Ilustración 5) pone de manifiesto que la mayoría de normativas están adaptadas a las recomendación de la OMS de limitar el ruido exterior a 45 dBA mientras que solo algunas normas establecen límites más restrictivos acordes con las nuevas recomendaciones para el periodo nocturno.

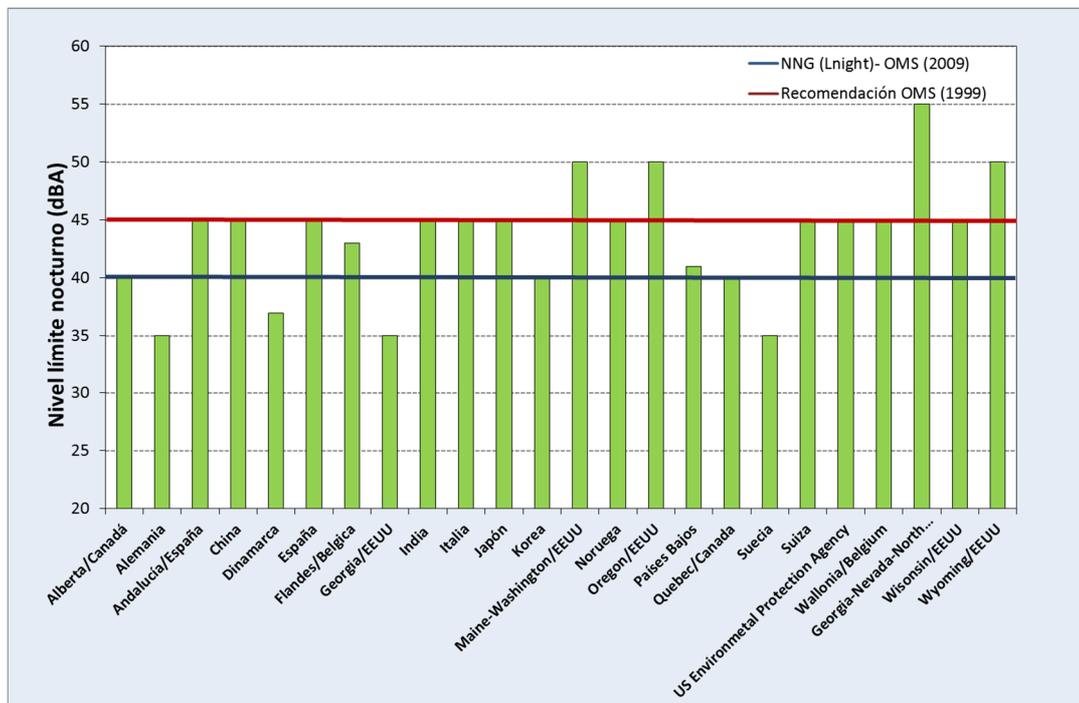


Ilustración 5. Comparativa de niveles límites de ruido y recomendaciones de la OMS (Elaboración propia)

Tomando como base estos niveles límites es posible hacerse una idea general sobre el grado de protección que proveen de forma general, para un parque eólico de referencia sobre terreno llano, tal y como se muestra en la Ilustración 6 tomada de NSW Department of Planning and Infraestructure, 2011. En este sentido, se observa como los estándares establecidos en Australia son sensiblemente más exigentes o del orden de las recomendaciones establecidas por la OMS en el año 2009.

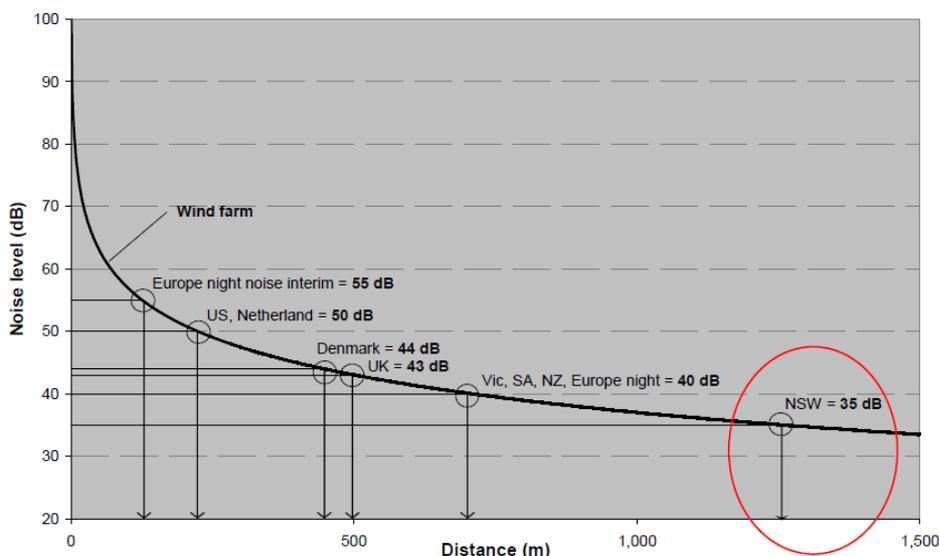


Ilustración 6. Comparativa entre las normativas internaciones en función de la distancia al aerogenerador (NSW Department of Planning and Infraestructure, 2011)

La combinación de límites fijos con niveles basados en el ruido de fondo propuesta por algunos países (Tabla 3) presenta la ventaja de permitir el funcionamiento del parque eólico a bajas velocidades de viento, cuando el ruido de fondo es habitualmente tan bajo, que el funcionamiento de los aerogeneradores ocasiona emergencias de más de 5 dBA habitualmente (Large y Stigwood, 2015). En este sentido, también es interesante analizar el enfoque planteado en la Columbia Británica (Canadá), donde se establece un nivel límite máximo de 50 dBA, independientemente del ruido de fondo existente (Ministries of Environ. & Energy of British Columbia, 2012). Esta medida limita la producción del parque con velocidades de viento más altas pero reduce la molestia sobre los receptores con altos ruidos de fondo, cuando a pesar del enmascaramiento del ruido inducido por el viento, la contribución del parque eólico es evidente.

Por último, es conveniente destacar la existencia de algunas normas internacionales que facilitan valores promedios de ruido de fondo para el establecimiento del valores límite (Ontario) así como las normativas de Illinoise, Indiana y Wisconsin que establecen umbrales de ruido por frecuencias (Ilustración 7).

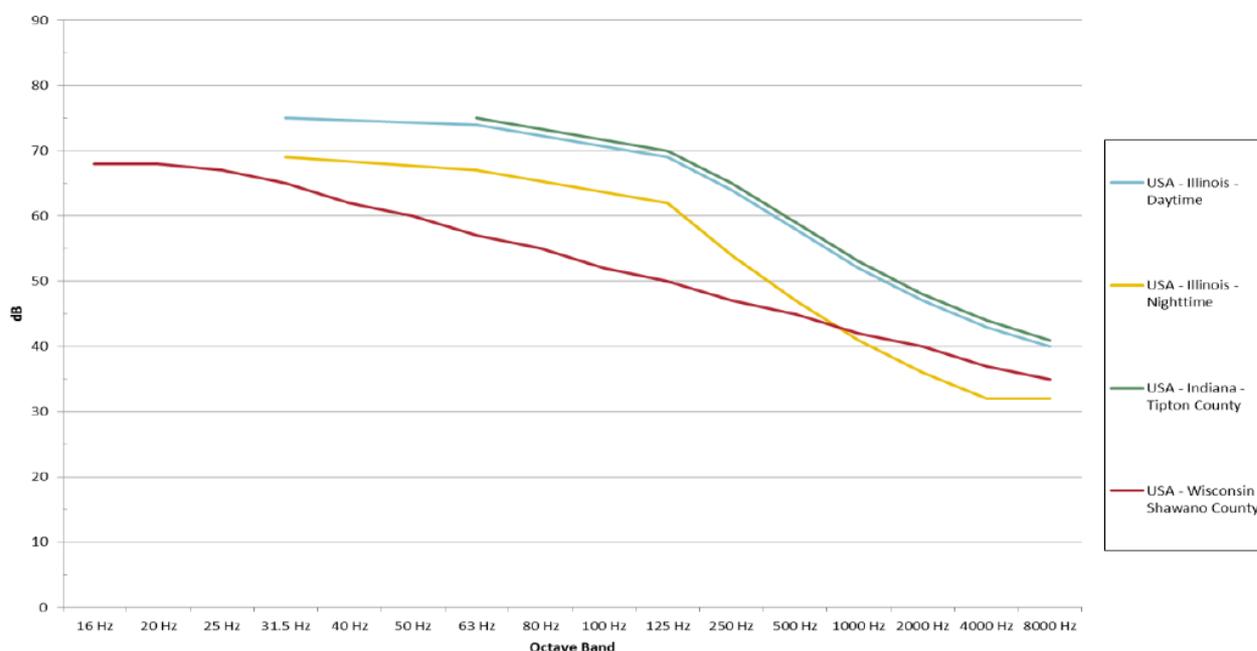


Ilustración 7. Comparativa entre niveles límite en bandas de octava para diferentes estados de Estados Unidos (Arcadis et al., 2013)

En la actualidad, existe un amplio debate sobre la gestión del ruido ambiental de los parques eólicos y si los valores límites deben estar basados en el ruido de fondo o deben ser límites fijos. Las normativas más desarrolladas y reciente en materia de impacto acústico de parques eólicos (Australia, Nueva Zelanda, Francia, Ontario y Columbina Británica) coinciden en combinar la aplicación de límites fijos con límites relativos en función del ruido de fondo existente. La ventaja del límite asociado a la velocidad de viento es que adapta el control normativo a la variabilidad de los niveles asociada con el viento, permitiendo que el ruido de los aerogeneradores sea la fuente dominante con altas velocidades de viento. Este tema fue tratado de forma específica en relación con los cambios normativos acaecidos en Andalucía por el autor del presente estudio mediante un artículo del 46º Congreso Ibérico de Acústica 2015, organizado por la Sociedad España de Acústica (SEA), que puede ser encontrado en el Anexo III del presente documento.

A continuación se analiza con más detalle, el marco normativo existente en España y particularmente en la Comunidad Autónoma Andaluza que servirá como referencia para el desarrollo del método combinado para la evaluación acústica de parques eólicos, que se desarrolla en esta tesis.

2.2 MARCO NORMATIVO

Conocida la incidencia de la contaminación acústica sobre la salud y calidad de vida de las personas, el Libro Verde sobre la política futura de lucha contra el ruido de la Comisión Europea calificaba en el año 1996 al ruido ambiental como uno de los mayores problemas medioambientales en Europa, insistiendo en la necesidad de establecer medidas e iniciativas específicas para la reducción de la contaminación acústica. Fruto de estas políticas, se desarrolla la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental con vistas a la homogeneización de las herramientas de control en la Unión Europea.

En España, la transposición de la Directiva de Ruido Ambiental se realiza a través de la Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del Ruido, incorporando además de los parámetros y medidas para la evaluación y gestión del ruido, otras herramientas e instrumentos oportunos para la mejora de la calidad acústica de nuestro entorno, especialmente integrando la variable de ruido al proceso de planificación de suelo.

La incorporación de la Directiva a nuestro ordenamiento jurídico se completa a través del Real Decreto 1513/2005, de 16 de Diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental, completando aquellos aspectos objeto de desarrollo reglamentario que no fueron incluidos en la Ley del Ruido. En este Real Decreto, se desarrollan los conceptos de ruido ambiental y sus efectos y molestias sobre la población, junto a una serie de medidas que permiten la consecución del objetivo previsto estableciendo un calendario de actuaciones y fijando el contenido mínimos de los mapas estratégicos de ruidos y de los planes de acción, así como de la información que debe estar a disposición del público. Además, se adoptan los métodos interinos de cálculo, una vez revisado por la Comisión Europea mediante la resolución del 6 de Agosto de 2003, constituyendo la norma ISO 9613-2:1996 la referencia para la predicción de ruido industrial.

Finalmente, el desarrollo reglamentario de la Ley del Ruido se completa en una segunda fase más reciente, con las normas siguientes:

- Real Decreto 1367/2007, sobre zonificación, objetivos de calidad y emisiones acústicas, y
- Real Decreto 1371/2007, por el que se aprueba el documento básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de Edificación.

En la Ilustración 8 se muestra un resumen del desarrollo reglamentario en materia de acústica y vibraciones a nivel europeo, nacional y autonómico.

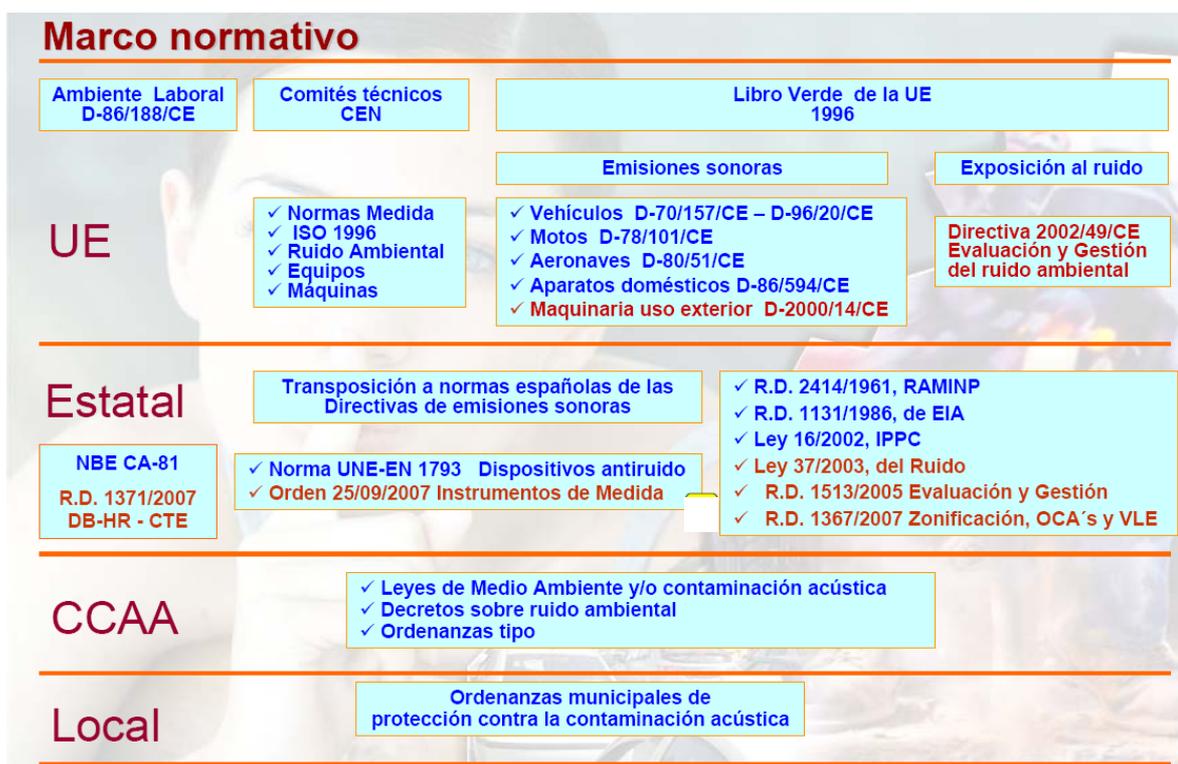


Ilustración 8. Marco normativo en materia de ruidos y vibraciones (MMA, n.d.)

El marco normativo se completa con la publicación el día 19 de Mayo de 2015, de la Directiva 996/2015, que aprueba los métodos comunes de evaluación del ruido en virtud de la Directiva END. El texto presentado sustituye completamente al Anexo II de la Directiva 2002/49/CE y establece que todos los Estados Miembros traspongán dicha directiva a más tardar el 31 de diciembre de 2018, con vistas a que sea considerado como método de cálculo para la tercera ronda de desarrollo/actualización de los Mapas Estratégicos de Ruido.

Real Decreto 1367/07: Reglamento de la Ley del Ruido

El Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas entra en vigor el 24 de octubre de 2007 y viene a desarrollar las normas necesarias para el desarrollo y ejecución de la Ley 37/ 2003, de 17 de noviembre, del Ruido en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

La entrada en vigor de este Real Decreto supuso una novedad en cuanto a que proporcionaba los índices acústicos y niveles límite de aplicación para áreas acústicas y emisores acústicos a nivel nacional para la aplicación de la Ley del Ruido e incorporaba la Directiva 2002/49/CE a la legislación Española. Hasta entonces, el Real Decreto 1513/2005 había definido cuáles serían las herramientas para la gestión del ruido ambiental (mapas estratégicos de ruidos y planes de acción entre otras) así como los métodos de cálculo provisionales, pero no contaba con los criterios de confort acústico que eran de aplicación.

El Real Decreto 1367/07 también define en su artículo 3 los índices acústicos en desarrollo del artículo 11 de la Ley 37/2003 definiendo los siguientes índices para la evaluación del ruido de emisores acústicos:

- $L_{Aeq,T}$ para evaluar niveles sonoros en un intervalo temporal T (L_d , L_e y L_n referido al periodo día, tarde y noche respectivamente)
- $L_{keq,T}$ para evaluar niveles sonoros en un intervalo temporal T, con correcciones de nivel por componentes tonales emergentes, por componentes de baja frecuencia o por ruido de carácter impulsivo.

Para los emisores acústicos, el artículo 24 del Real Decreto establece el régimen aplicable a las nuevas actividades:

- Deberá adoptar las medidas necesarias para que no transmita al medio ambiente exterior de las correspondientes áreas acústicas niveles de ruido superiores a los establecidos como valores límite en la tabla B1, del anexo III, evaluados conforme a los procedimientos del anexo IV.

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L_{kd}	L_{ke}	L_{kn}
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial	55	55	45
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	65	65	55
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos	63	63	53
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso característico turístico o de otro uso terciario no contemplado con el tipo c	60	60	50
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica	50	50	40

Tabla B1 del Anexo I. Valores límite de inmisión de ruido aplicables a actividades y a infraestructuras portuarias competencia autonómica o local (dBA)

- De igual manera, cuando por efectos aditivos derivados, directa o indirectamente, del funcionamiento o ejercicio de una instalación, establecimiento o actividad de las relacionadas en el apartado anterior, se superen los objetivos de calidad acústica para ruido establecidos en los artículos 14 y 16, esa actividad deberá adoptar las medidas necesarias para que tal superación no se produzca. Los criterios de confort acústico en exterior como *objetivos de calidad acústica* se especifican en la tabla A del Anexo II y se ven disminuidos en 5 dBA cuando se aplican a nuevas áreas urbanizadas.

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L_d	L_e	L_n
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial	65	65	55
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	75	75	65
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos	73	73	63
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso característico turístico o de otro uso terciario no contemplado con el tipo c	70	70	60
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica	60	60	50

Tabla A. Objetivos de calidad acústica para ruidos aplicables a áreas urbanizadas existentes (dBA)

Estos límites serán de aplicación en áreas acústicas que se clasificarán, en atención al uso predominante del suelo, en los tipos que determinen las comunidades autónomas, las cuales habrán de prever, al menos, los siguientes:

- a) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.
- b) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.
- c) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.
- d) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en el párrafo anterior.
- e) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica.
- f) Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que los reclamen.
- g) Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.

Como se comentó con anterioridad, la importancia de esta clasificación de áreas acústicas y su definición espacial en el ámbito municipal reside en que, además de determinar la calidad acústica aplicable a cada tipología mediante los objetivos de calidad acústica en el exterior, también define los valores límite de inmisión que serán de aplicación a las actividades en función del área acústica en la que se implanten. De forma general, se atiende a una zonificación acústica que proteja a los usos más sensibles que puedan coexistir en una misma área.

Las diferentes comunidades autónomas, en el desarrollo de las competencias adquiridas en materia de Medio Ambiente, han ido desarrollando sus propios reglamentos en materia de ruidos y vibraciones a raíz de la publicación del Real Decreto 1367/07. En su mayoría, han adoptado los mismos procedimientos de medida y criterios establecidos en la normativa nacional de obligado cumplimiento. A continuación se especifica el desarrollo reglamentario que se ha hecho en Andalucía, en relación con los procedimientos de medida y criterios de valoración aplicables a los parques eólicos.

El Reglamento contra la Protección Acústica en Andalucía

En Andalucía, el 17 de enero de 2012 se publica el Decreto 6/2012 por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía y se adapta la normativa existente en materia de ruidos y vibraciones (el derogado Decreto 326/03 que aprobaba el anterior RPCCA - Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 2003) a las prescripciones de la normativa nacional.

Las principales novedades del RPCCA aprobado por el Decreto 6/2012 son las siguientes:

- El nuevo reglamento supone la adaptación de la normativa autonómica a los valores límites, índices de cálculo y procedimientos de ensayos establecidos por el Real Decreto 1367/07 de ámbito nacional. En este sentido el RPCCA incorpora los objetivos de calidad acústica en el exterior e interior establecidos por el Real Decreto y asume los valores límites de inmisión en el exterior y niveles transmitidos al interior aplicables para nuevas actividades e infraestructuras portuarias. En este sentido, el reglamento andaluz aporta luz sobre los criterios para la selección de los puntos de medida, estableciendo que los Niveles de Inmisión

al Exterior ocasionados por las actividades se valoren a una distancia de 1,5 metros del límite de propiedad y a 1,5 metros de altura.

- Del mismo modo, el Reglamento culmina el desarrollo reglamentario en materia de ruidos y vibraciones que establecía la Ley GICA en su sección 4^a y dentro de una estrategia general de incorporar la acústica en las herramientas de prevención que define dicha ley (AAU, AAI y CA). En este sentido, el RPCCA también incorpora los contenidos mínimos de los estudios acústicos de las actividades incluidas en la Ley GICA así como establece las entidades y técnicos que son competentes para la realización de dichos estudios. Entre los contenidos del estudio de impacto ambiental, se incluye la modelización acústica del estado operacional mediante norma ISO9613-2:1996.
- El RPCCA unifica la zonificación acústica propuesta en la Ley GICA de Andalucía (artículo 70) con la zonificación del Real Decreto 1367/07, ya que ambas presentaban una analogía en cuanto a los usos englobados en cada categoría. La zonificación acústica del territorio es determinante a la hora de establecer cuáles son los objetivos de calidad acústica que se aplican en las diferentes zonas de una aglomeración y los valores límite de niveles de inmisión al exterior que serán de aplicación a una determinada actividad en función el tipo de área acústica en la que se desarrolle. La clasificación de un área dentro una categoría de la zonificación acústica responderá a la zonificación acústica del mapa estratégico de ruidos de la aglomeración y, en su ausencia, en función de los usos predominantes de suelos descritos en el planeamiento urbano.

La principal diferencia del nuevo Reglamento contra la Contaminación Acústica en Andalucía con respecto a la anterior normativa autonómica (Ilustración 9) en relación con los parques eólicos reside en que se sustituye la aplicación de un límite subjetivo dependiente del ruido de fondo existente en la zona (valoración con ventanas abiertas definida en el artículo 23 del Decreto 326/03, actualmente derogado) a la aplicación de un nivel límite objetivo, fijo independientemente del ruido de fondo existente en la zona. El derogado Decreto 326/03 aplicaba un valor límite medido en el centro de la ventana abierta, basado en que la afección sonora de la actividad estudiada no superase en más de 5 dBA el ruido de fondo evaluado bajo el mismo procedimiento. Dado que los parques eólicos se encontraban habitualmente en zonas tranquilas⁴, era difícil garantizar el cumplimiento normativo especialmente durante la noche y con bajas velocidades de viento (el Decreto 326/03 establecía que los ensayos se realizaran con velocidades de viento inferiores a 3 m/s), más aún cuando los modos de operación de bajo ruido de los aerogeneradores no presentan atenuaciones para bajas velocidades de viento (únicamente la posibilidad de detener su funcionamiento).

⁴ Zona tranquila en campo abierto: Espacios situados en zonas tranquilas sin aglomeración no perturbados por el ruido procedente del tráfico, las actividades industriales o las actividades deportivo-recreativas (según artículo 3 del Decreto 6/2012).

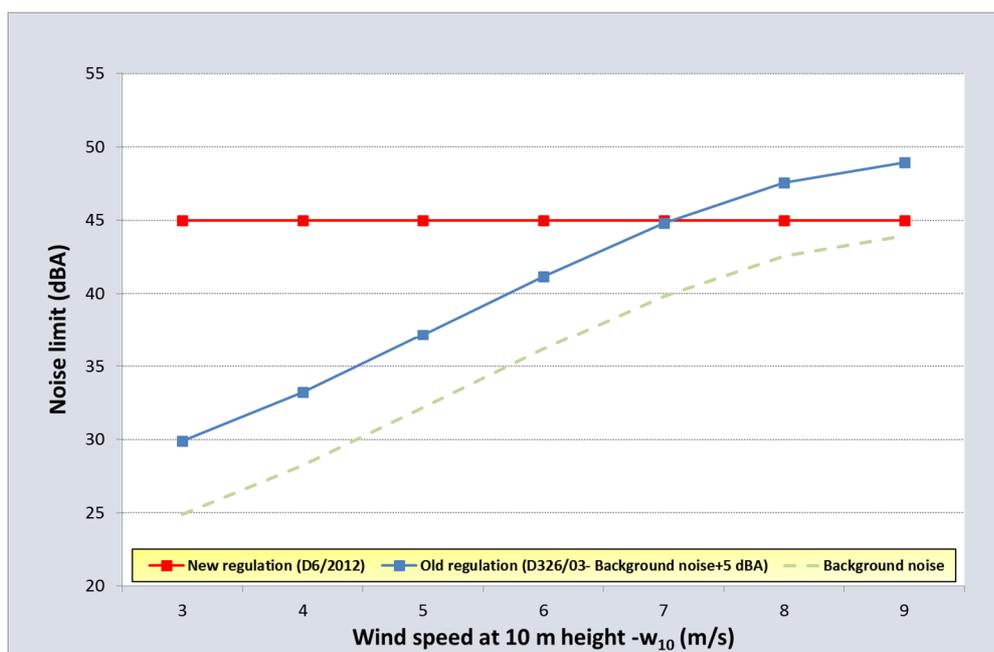


Ilustración 9. Comparativa entre los niveles límite de la normativa andaluza actual y previa (Grilo, 2015)

La aplicación de un límite de Nivel de Inmisión al Exterior fijo en el nuevo RPCCA junto a la posibilidad de realizar ensayos con velocidades de viento de hasta 5 m/s introducen ciertas facilidades tanto para el cumplimiento como para la valoración de la normativa acústica en los parques eólicos. En este sentido, la tendencia general de la normativa acústica específica sobre parques eólicos a nivel internacional es la aplicación de límites absolutos combinados con límites variables en función del ruido de fondo de la zona. A continuación (Ilustración 10), se incluye un análisis comparativo entre el límite aplicable en Andalucía y los niveles límites variables en función del ruido residual, valorado para un parque eólico concreto.

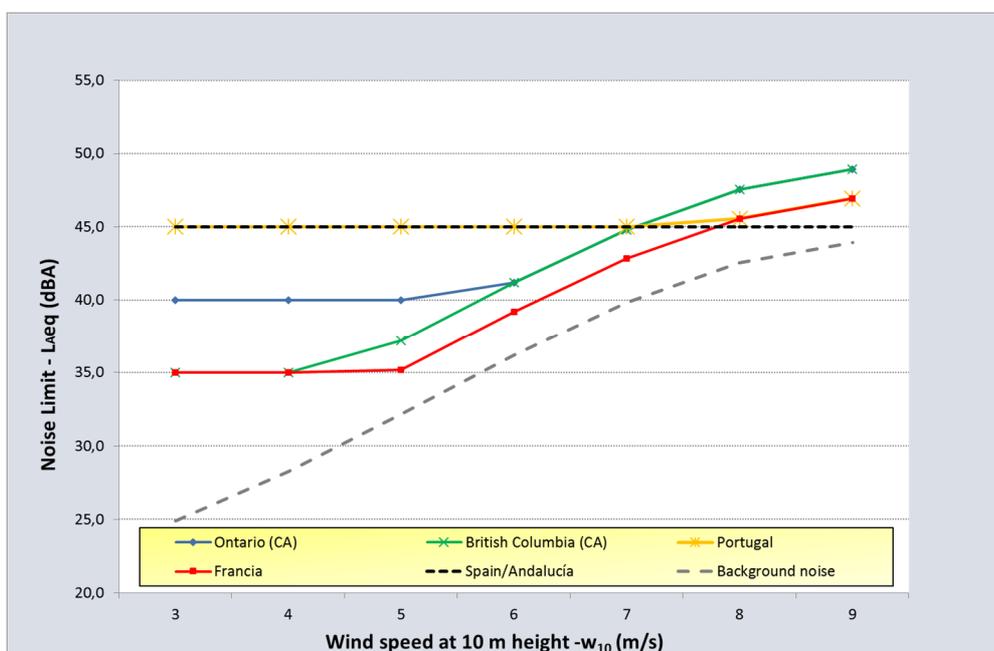


Ilustración 10. Comparativa entre los niveles límite para una vivienda rural durante el periodo nocturno (Grilo, 2015)

Aunque el nuevo RPCCA incorpora otras novedades (mapas estratégicos de ruidos, requisitos de aislamientos de actividades, control de emisores acústicos, disciplina e infracciones, etc.) nos centraremos en el siguiente apartado en la aplicación del nuevo reglamento al caso específico de los parques eólicos en Andalucía.

Aplicación del RPCCA a parques eólicos

El ámbito de aplicación del Reglamento de Protección frente a la Contaminación Acústica en Andalucía se define en el artículo 2 indicándose que será de aplicación a *cualquier infraestructura, instalación, maquinaria o proyecto de construcción, así como a las actividades de carácter público o privado, incluidas o no en el Anexo I de la Ley 7/2007, de 9 de julio, que se pretendan llevar a cabo o se realicen en el territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía y produzcan o sean susceptibles de producir contaminación acústica por ruidos o vibraciones.*

En este sentido, es de plena aplicación para los parques eólicos al ser evidente su capacidad de producir contaminación acústica dada la potencia sonora de los aerogeneradores, con valores superiores a 100 dBA (Broneske, 2014) y al encontrarse incluidos en el Anexo I de la Ley GICA dentro de la categoría 2.2 *Parques Eólicos*.

En la disposición transitoria cuarta del RPCCA, se regula el régimen que será de aplicación para las actividades industriales existentes, es decir, aquellas que estén legalmente constituidas o iniciadas, o respecto de las que se haya iniciado el procedimiento para otorgar alguna de las autorizaciones previstas en los párrafos a), b) y c) del artículo 18.1 de la Ley 37/2003 del Ruido (evaluación de impacto ambiental u otras figuras de evaluación ambiental previstas en la normativa autonómica), de 17 de noviembre, con anterioridad al 24 de octubre de 2007.

Por tanto, para todos aquellos parques eólicos que estuviesen autorizados o que hubiesen iniciado el trámite de Autorización Ambiental Integrada, les será de aplicación el siguiente régimen.

a) Si en la evaluación del cumplimiento de los objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a las áreas de sensibilidad acústica urbanizadas existentes contenidas en la tabla I del Reglamento se determinase el incumplimiento de los objetivos de calidad en el exterior, la Administración competente requerirá, en el plazo máximo de seis meses a contar desde que se detecte el incumplimiento, un plan de acción que incluya las medidas necesarias para solucionar el problema en el menor plazo posible.

b) Las medidas establecidas en el citado plan sólo serán de aplicación a las actividades industriales que incumplan los valores límites de inmisión de la tabla VII (niveles de inmisión al exterior).

c) El plan deberá incluir el cronograma de ejecución de las medidas que lo integren.

Este régimen de aplicación para las actividades industriales existentes fue diseñado sin duda para afrontar los problemas de concentración de actividades contaminantes en los polos industriales, con vistas a dotar a las administraciones de herramientas para evitar el efecto acumulativo de todos los procesos industriales y para que, cuando se superen los objetivos de calidad acústica en el exterior en los receptores afectados, se fuerce la adaptación a la nueva normativa de aquellas industrias que superen los nuevos límites de Niveles de Inmisión al Exterior establecidos en la tabla VII.

En la Ilustración 11 se establece el régimen de aplicación normativo para los parques eólicos considerando la aplicación tanto del Real Decreto 1367/07 como el Decreto 6/2012 y teniendo en consideración las disposiciones aplicables a actividades nuevas y existentes.



Ilustración 11. Régimen normativo aplicable para actividades nuevas o existentes (Elaboración propia)

Límites admisibles de ruidos en parques eólicos según RPCCA

El artículo 29 del RPCCA establece los límites de inmisión de ruidos aplicables a las actividades cuyos emisores estén situados en el exterior:

Toda actividad ubicada en el ambiente exterior, salvo las que tengan regulación específica, así como toda maquinaria y equipo que, formando parte de una actividad, estén ubicados en el ambiente exterior, deberán adoptar las medidas necesarias para que no se superen los valores límites establecidos en la siguiente Tabla, evaluados a 1,5 m de altura y a 1,5 m del límite de la propiedad titular del emisor acústico los valores establecidos en la tabla VII.

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L_{kd}	L_{ke}	L_{kn}
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial	55	55	45
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	65	65	55
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos	63	63	53
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso característico turístico o de otro uso terciario no contemplado con el tipo c	60	60	50
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica	50	50	40

Tabla VII. Valores límite de inmisión de ruido aplicables a actividades y a infraestructuras portuarias competencia autonómica o local (dBA)

Donde L_{kd} : índice de ruido continuo equivalente corregido para el período diurno (definido en los índices acústicos de la IT1), L_{ke} : índice de ruido corregido para el período vespertino y L_{kn} : índice de ruido corregido para el período nocturno.

En el caso de los parques eólicos, no se aplicarían límites de ruido transmitido a locales colindantes ya que éstos no existen (distancia mínima de seguridad de los aerogeneradores a edificaciones) y el ruido se transmite siempre por vía aérea.

Del mismo modo esas actividades deberán garantizar que no se superen por efecto aditivo directo o indirecto los objetivos de calidad acústica establecidos en el RPCCA (tablas I y IV que se incluyen a continuación), debiendo adoptar las medidas necesarias para que tal superación no se produzca, tanto en las edificaciones existentes como en las futuras.

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L _d	L _e	L _n
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial	65	65	55
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	75	75	65
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos	73	73	63
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso característico turístico o de otro uso terciario no contemplado con el tipo c	70	70	60
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica	60	60	50
f	Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte y otros equipamientos públicos que lo reclamen	Sin determinar	Sin determinar	Sin determinar
g	Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica	Sin determinar	Sin determinar	Sin determinar

Tabla I. Objetivos de calidad acústica para ruidos aplicables a áreas urbanizadas existentes (dBA). Los niveles se reducen en 5 dBA para nuevas áreas urbanizadas

Uso del local	Tipo de recinto	Índices de ruido		
		L _d	L _e	L _n
Residencial	Zonas de estancia	45	45	35
	Dormitorio	40	40	30
Administrativo y oficinas	Despachos profesionales	40	40	40
	Oficinas	45	45	45
Sanitario	Zonas de estancia	45	45	35
	Dormitorios	40	40	30
Educativo o cultural	Aulas	40	40	40
	Salas de lectura	35	35	35

Tabla IV. Objetivos de calidad acústica aplicables al espacio interior habitable de edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales y administrativos o de oficinas (dBA)

Índices de valoración

En la Instrucción Técnica 1 del Decreto 6/2012 se establecen los índices de ruido normativos para cada uno de los límites de aplicación:

- Índice de ruido continuo equivalente L_{AEQT} para la valoración de los objetivos de calidad acústica en el exterior e interior.

- El índice de ruido L_{AeqT} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, en decibelios, determinado sobre un intervalo temporal de T segundos, definido en la norma UNE-EN ISO 1996-1:2005, donde:
 - Si $T = d$, L_{Aeqd} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, determinado en el período día;
 - Si $T = e$, L_{Aeqe} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, determinado en el período tarde; y,
 - Si $T = n$, L_{Aeqn} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, determinado en el período noche;
- Índice de ruido continuo equivalente corregido L_{KqT} para la valoración de los Niveles de Inmisión al Exterior.
 - El índice de ruido L_{KqT} , es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, (L_{AeqT}), corregido por la presencia de componentes tonales emergentes, componentes de baja frecuencia y ruido de carácter impulsivo, de conformidad con la expresión siguiente:

$$L_{KqT} = L_{AeqT} + K_f + K_t + K_i$$

- Donde:
 - K_t es el parámetro de corrección para evaluar la presencia de componentes tonales emergentes calculado por aplicación de la metodología descrita en la Instrucción técnica 2;
 - K_f es el parámetro de corrección, para evaluar la presencia de componentes de baja frecuencia calculado por aplicación de la metodología descrita en la Instrucción técnica 2;
 - K_i es el parámetro de corrección, para evaluar la presencia de ruido de carácter impulsivo calculado por aplicación de la metodología descrita en la Instrucción técnica 2;
- Si $T = d$, L_{Kq_d} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, corregido, determinado en el período día;
- Si $T = e$, L_{Kq_e} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, corregido, determinado en el período tarde;
- Si $T = n$, L_{Kq_n} es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, corregido, determinado en el período noche;

Estos índices se definirán para cada uno de los tres periodos temporales de evaluación diarios que establece el reglamento:

- Período día (d): al periodo día le corresponden 12 horas, desde las 07:00 horas hasta la 19:00horas.
- Período tarde (e): al periodo tarde le corresponden 4 horas, desde las 19:00 horas hasta la 23:00horas.
- Período noche (n): al periodo noche le corresponden 8 horas, desde las 23:00 horas hasta la 07:00horas.

Recomendaciones de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente

La Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía ha establecido unos los criterios técnicos específicos para los parques eólicos en la *Guía de Contaminación Acústica* (Consejería de Agricultura Pesca y Medio Ambiente (CAPMA), 2012) para el análisis del impacto acústico de la actividad. A continuación se detallan la aplicación del RPCCA para el estudio acústico de parques eólicos.

Tal y cómo se indica en el Decreto 6/2012, se debe comprobar mediante la comparación entre la situación preoperacional y la operacional si:

- *Se cumplen los objetivos de calidad acústicos en las áreas de sensibilidad acústicas colindantes al parque.*
- *Si se cumplen los valores límite aplicables a los emisores acústicos de la actividad.*

La justificación de este punto, en el caso de los parques eólicos, es un tanto especial puesto que nos encontramos con los siguientes inconvenientes:

- *Los parques suelen estar situados en zonas rurales dónde no existe zonificación acústica.*
- *Es complicado establecer el cumplimiento de los valores límite aplicables puesto que se evalúan a 1,5m del límite de la propiedad y como sabemos, este tipo de actividad en muchas ocasiones no dispone de una parcela delimitada sino que establece de forma puntual cada uno de los aerogeneradores.*
- *Por otro lado, si fijásemos el límite de la propiedad en el punto de instalación del aerogenerador, tampoco podría efectuarse la medida puesto que el Decreto recomienda que la medición se realice a 1,5 m de altura, lo cual implicaría una situación de viento en el caso más desfavorable que superaría los 5 m/s y por tanto quedaría descartada la medición.*

Atendiendo a todas estas particularidades, se recomienda lo siguiente:

- *Cumplimiento de los objetivos de calidad: Siempre que exista cualquier urbanización o asentamiento de tipo residencial (acorde a la legislación urbanística) en las inmediaciones al parque, los resultados arrojados por el modelo acústico del mismo deberán corroborar que se cumplirán los objetivos de calidad establecidos para un área de sensibilidad de tipo a). De la misma manera y atendiendo a lo establecido en el punto 2 de la disposición transitoria tercera, los parques eólicos deberán cumplir con los objetivos de calidad establecidos en las áreas de sensibilidad acústicas que se fijan por motivos de similitud de usos del suelo o de equivalente necesidad de protección acústica. En cualquier caso, se deberá justificar en el correspondiente estudio acústico, la elección del área considerada y el cumplimiento de los objetivos establecidos en la misma.*
- *Valores límite de inmisión de ruido aplicables a actividades (tabla VII): Como regla general, y puesto que se trata de una actividad industrial, los parques eólicos deberán cumplir con los valores límite aplicables a actividades situadas en sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial. Como se ha comentado anteriormente, debido a la imposibilidad de medir según establece el Decreto, los valores límite deberán medirse a 1,5m de distancia y a 1,5m de altura de la fachada del receptor o receptores más cercanos a la instalación. Esta recomendación de medida está justificada y además es acorde a lo establecido en el Real Decreto 1367/2007, de carácter básico.*

La aplicación concreta del RPCCA para un parque eólico de nueva implantación en Andalucía que tuviese en su entorno edificaciones de tipo rural dispersas, con uso residencial permanente u ocasional en suelo no urbanizable y que se encuentren dentro de la legalidad urbanística, sería la siguiente:

- El parque eólico deberá garantizar el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica en el exterior establecido en la tabla I para edificaciones existentes (tabla II para áreas urbanizadas tras el 24 de octubre de 2007) para sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial tipo A por equivalente necesidad de protección de las personas que allí habitan, referenciados a 4 metros de altura en las fachadas de las edificaciones.

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L _d	L _e	L _n
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial	65 (60)	65 (60)	55 (50)

Tabla 4. Objetivos de calidad acústica en el exterior aplicables a edificaciones dispersas en el entorno del parque eólico (entre paréntesis límite aplicable a nuevas áreas urbanizadas).

Uso del local	Tipo de recinto	Índices de ruido		
		L _d	L _e	L _n
Residencial	Zonas de estancia	45	45	35
	Dormitorio	40	40	30

Tabla 5. Objetivos de calidad acústica en el interior aplicables a edificaciones dispersas en el entorno del parque eólico.

- El Nivel de Inmisión al Exterior ocasionado por el Parque Eólico a nivel de fachada de las edificaciones más cercanas, valorado a 1,5 metros de altura y 1,5 metros de distancia de la fachada, no podrá superar los valores límites establecidos para sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial, por analogía con el tipo de actividad que se está valorando. Los criterios interpretativos establecidos por la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente establecen que hay que diferenciar si el cumplimiento de los límites de la tabla VII, del Decreto 6/2012 se realiza para la concesión de licencias a una nueva actividad o si se trata de una inspección.
 - En el caso de inspecciones de actividades existentes, hay que comprobar que realmente se cumplen los apartados 2º y 3º del punto 1 a) del Artículo 30 del Decreto. Esto es, los límites del Nivel de Inmisión al Exterior de las tablas, incrementados en 3 dBA para el promedio diario y 5 dBA para el valor instantáneo.
 - En el caso del trámite de licencias o de las correspondientes autorizaciones para nuevas actividades, de nuevo les serán de aplicación los límites establecidos, **pero en este caso no habrá márgenes puesto que se trata de medidas de verificación de los niveles recogidos en el estudio acústico y por tanto han de cumplirse los límites de las tablas, tal y como establece el Reglamento.**

Por tanto, los valores de aplicación del Nivel de Inmisión al Exterior para los parques eólicos valorados a 1,5 metros de distancia de la fachada más cercana y a 1,5 metros de altura mediante ensayos acústicos serán los siguientes:

- **Para parques eólicos de nueva implantación:** Los valores instantáneos y promedios anuales deberán garantizar los valores límites establecidos tabla VII del RPCCA para sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial, por analogía con el tipo de actividad que se está valorando.

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L _{k,d}	L _{k,e}	L _{k,n}
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	65	65	55

Tabla 6. Nivel de Inmisión al Exterior aplicable a parques eólicos.

- **Para los parques eólicos existentes:** Los valores instantáneos no podrán superar en más de 5 dBA los valores establecidos en la tabla VII y los promedios diarios no podrán superar en más de 3 dBA los valores establecidos en la tabla del RPCCA para sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.

Tipo de área acústica			Índices de ruido		
			L _{k,d}	L _{k,e}	L _{k,n}
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	Valor instantáneo	70	70	60
		Promedio diario	68	68	58

Tabla 7. Nivel de Inmisión al Exterior aplicable a parques eólicos existentes.

Finalmente, es conveniente destacar los criterios de declaración de conformidad establecidos por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), descritos en los documentos G-ENAC-15 y basados en una probabilidad de cobertura del 95 % para la incertidumbre expandida. Estos criterios sólo permiten declarar conformidad si el resultado de la medida más la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % no supera el límite de especificación (caso 1 de la Ilustración 12). Si el resultado de la medida menos la incertidumbre expandida supera el límite de especificación, entonces se puede declarar el no cumplimiento con la especificación (ver caso 4).

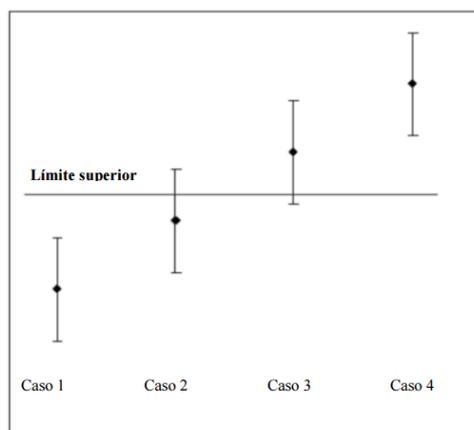


Ilustración 12. Declaración de conformidad en relación con el valor medido y la incertidumbre expandida (ENAC, 2009)

Si el resultado de la medida más/menos la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95 % incluye el límite (casos 2 y 3) no es posible declarar el cumplimiento o no-cumplimiento. En el caso 2 de la figura 12 es posible indicar que la medida está por debajo del límite, lo que puede realizarse utilizando una declaración similar “no es posible declarar el cumplimiento utilizando una probabilidad de cobertura del 95 % para la incertidumbre expandida aunque el resultado de la medida está por debajo del límite”. Esta circunstancia es bastante habitual en los

parques eólicos debido a las incertidumbres asociadas a los ensayos y la distancia de medida respecto a la fuente emisora, generando grandes dificultades para declarar conformidad de las instalaciones eólicos.

3. ESTADO DEL ARTE

La necesidad imperiosa de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, ha dado lugar en las últimas décadas a un vertiginoso desarrollo del sector eólico, tanto *onshore* como *offshore*, que en la actualidad cuenta con una capacidad mundial de 395 GW (World Wind Energy Association, 2015). Del continuo desarrollo tecnológico de los aerogeneradores, con potencias que alcanzan los 10 MW con alturas de buje de 125 metros y 190 metros de diámetro de rotor, y la proximidad de las instalaciones a las áreas habitables, surgió la necesidad de establecer mecanismos de planificación que permitiesen la evaluación del impacto acústico sobre la población.

En Europa, la creciente necesidad de agrupar y armonizar los diferentes esfuerzos sectoriales para describir la incidencia acústica de los aerogeneradores (tanto a nivel de compañías del sector eólico como consultores e instituciones del sector acústico) llevó a la Comisión de la Unión Europea a desarrollar varios proyectos de investigación con tal fin. Dentro del programa JOULE (*Joint Opportunities for Unconventional and Long term Energy options*), se subvencionaron cinco proyectos con el objeto de asesorar sobre el impacto acústico de los aerogeneradores y la naturaleza del problema. En la siguiente tabla se especifican los contenidos más relevantes desarrollados:

Título del proyecto	Número de proyecto
Ruido aerodinámico de aerogeneradores	JOUR-CT90-0107
Ruido de aerogeneradores: variaciones asociadas a la fabricación y la propagación	J02-CT92-0124
Desarrollo de una herramienta para la predicción del ruido aerodinámico de los aerogeneradores	J02-CT92-0148
Investigación de modificaciones del borde de la pala y mejora del rotor como medida de mitigación	J02-CT92-0205
Ruido aerodinámico y modificaciones del rotor	J02-CT92-0233

Tabla 8. Proyectos específicos del programa JOULE sobre acústica de aerogeneradores (Wagner et al., 1996)

Las principales conclusiones de estos proyectos son recogidas por *Wagner et al.* en 1996 en un manual que constituye una primera visión sobre el estado del arte en cuanto a la evaluación acústica de los aerogeneradores como fuente sonora. Tomando como base esta primera aproximación al problema y junto con las recomendaciones establecidas por la OMS (1999), los diferentes países fueron desarrollando su normativa acústica, incorporando la mayoría de ellos referencias específicas al ruido de aerogeneradores a finales de la pasada década.

En paralelo, el Instituto de Ingeniería para el Control del Ruido (*INCE-Europe*) desarrolló una serie de conferencias monográficas donde se recogían los últimos avances en el control del ruido y vibraciones de los aerogeneradores y que sirviese como marco para nuevas investigaciones en acústica del sector eólico. Estas conferencias, desarrolladas en Berlín, Lyon, Aalborg, Roma, Denver y Glasgow con carácter bianual entre los años 2005 y 2015, reúnen a los principales actores del sector, incluyendo fabricantes de aerogeneradores, promotores, institutos de investigación y administraciones. Las publicaciones de dichos congresos junto con las aportaciones de otros congresos internacionales (*INTERNOISE*, *NOISE CON*, *EURONOISE*, *International Congress of Sound and Vibration-ICSV*) y las reuniones del Instituto de Acústica-IOA y de la Sociedad Americana de

Acústica-ASA) engloban los principales avances en la materia junto con las guías metodológicas y estándares desarrollados por los diferentes países.

Entre los principales desafíos que se han puesto de manifiesto en dichas reuniones, destaca la necesidad de contar con modelos de predicción sonora que permitan evaluar el impacto acústico de los parques eólicos con precisión y de forma previa a la instalación de los aerogeneradores. Además de un requisito reglamentario, es fundamental para la optimización de la capacidad productiva de las instalaciones. En muchas ocasiones, la ubicación óptima de los aerogeneradores se sitúa en las zonas más elevadas, que incrementan la afección acústica sobre las edificaciones más cercanas. Más allá de los necesarios requisitos de seguridad, es necesario respetar una distancia mínima que permita garantizar el confort acústico en las viviendas más cercanas, y esto depende no sólo de la potencia acústica del aerogenerador, sino de las condiciones de propagación (topografía e impedancia acústica del terreno) y de las condiciones meteorológicas.

Esta problemática se extiende también a las instalaciones ya existentes, bien porque los estudios preoperacional hayan sido insuficientes y existan denuncias relacionadas con el ruido de los aerogeneradores, bien porque se vaya a proceder a la repotenciación del parque y se planifique la instalación de equipos con mayor potencia sonora.

Una vez en funcionamiento, es necesarios emplear métodos de ensayos que se adapten a las particulares circunstancias que concurren en los parques eólicos, especialmente en relación con las variaciones temporales asociada a la meteorología (estabilidad atmosférica y perfil vertical de viento (Van Den Berg, 2004, 2006, 2008; Broneske, 2014; Larsson y Öhlund, 2012) y la incertidumbre sobre la influencia del ruido inducido por el viento sobre el micrófono y el ruido de fondo (Bonsma, 2009; Leclercq et al., 2008; Wang et al., 2012 entre otros).

En la Tabla 9, se muestran algunos ejemplos sobre las técnicas empleadas para el monitorizado y predicción del impacto acústico de parques eólicos, en diferentes países en función de la normativa de aplicación. Se observa como el monitorizado de ruidos con posterior análisis por regresión polinomial y la norma ISO9613-2 son las metodologías más habituales para el evaluación acústica de los parques eólicos.

A continuación se describen en detalle estas normas y estándares de cálculo internacionales para la predicción acústica de parques eólicos así como las diferentes metodologías para el postprocesado y análisis de los registros de monitorizado de ruidos

País	Metodología de ensayos	Estándar de cálculo
Alemania/EEUU	Ensayos corta duración - Análisis discreto	ISO 9613-2:1996
British Columbia /Canadá	Monitorizado - <i>Binning</i> method	ISO/CONCAWE/HARMONOISE/NORD2000
Dinamarca	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996/Nord2000
España	Ensayos corta duración - Análisis discreto	ISO 9613-2:1996
Francia	Monitorizado - <i>Binning</i> method	ISO 9613-2:1996
Michigan/EEUU	Ensayos corta duración - Análisis discreto	ISO 9613-2:1996
Minnesota/EEUU	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996
New South Wales/Australia	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996/CONCAWE
Nueva Gales del Sur/Australia	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996/CONCAWE
Países Bajos	IEC61400 – Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996
Portugal	Ensayos corta duración - Análisis discreto	ISO 9613-2:1996
Queensland/Australia	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996
South Australia/Australia	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO/CONCAWE
Turquía	Ensayos corta duración - Análisis discreto	ISO 9613-2:1996
UK (Inglaterra, Gales, Escocia e Irlanda del Norte)	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996
Victoria/Australia	Monitorizado - Análisis por regresión polinomial	ISO 9613-2:1996

Tabla 9. Metodología de medición y normas de cálculo para diferentes países (Elaboración propia)

3.1 ESTÁNDARES INTERNACIONALES DE PREDICCIÓN SONORA

A continuación se describen los principales estándares de cálculo de propagación del ruido en exteriores, que cuentan con un reconocido prestigio internacional. Dado que en numerosas casos, éstos no fueron diseñados para parques eólicos o fuentes a gran altura, los diferentes modelos deben ser validados para garantizar su idoneidad para la evaluación de parques eólicos (Chiles, 2010; Dickinson, 2009b; Tickell, 2006).

Norma ISO 9613-2:1996 Atenuación del Ruido en Propagación de Exteriores. Método General de Cálculo.

De acuerdo con el Artículo 6 y el Anexo II de la Directiva 2002/49/EC, el método de computación para la determinación del ruido industrial recomendado para los Estados Miembros que no cuentan con métodos nacionales propios es el establecido por la norma ISO9613-2:1996 *Acoustic – Abatement of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation* (ISO 9613 en adelante).

La segunda parte de la norma ISO 9613 especifica un método de ingeniería para el cálculo de la atenuación del ruido durante la propagación en exteriores con vista a la predicción de niveles de ruido ambiental de diversas fuentes a una distancia dada. Este método predice los niveles continuo equivalentes en dBA bajo condiciones meteorológicas de propagación favorables o equivalentes, considerando la propagación bajo inversiones térmicas bien desarrolladas (como ocurre durante la noche). Estas condiciones de propagación favorables (*downwind conditions*) son descritas en la norma ISO 1996-2:2007 e implican:

- Viento soplando desde la fuente sonora dominante hacia el receptor (dentro de un ángulo de $\pm 60^\circ$ de día, y dentro de un Angulo de $\pm 90^\circ$ de noche),
- Velocidad del viento, medida a una altura de 3 m a 11 m sobre el suelo, entre 2 m/s y 5 m/s durante el día o más de 0,5 m/s en la noche,
- No existan gradientes negativos de temperatura cerca del suelo, ej. condiciones soleadas durante el día.

Quedan excluidos del alcance de esta norma las predicciones de inversión térmica sobre superficies de agua que proporcionarían valores altamente sobreestimados sobre la propagación real sobre este tipo de superficies.

La consideración de estas condiciones de propagación favorables se realiza a través de factores de corrección meteorológica, que también permiten la predicción de promedios temporales de larga duración, referidos a una amplia diversidad de condiciones meteorológicas (porcentaje de condiciones favorables durante el año promedio meteorológico).

La norma ISO 9613-2 ha sido ampliamente reconocida por la comunidad científica como norma de referencia para la predicción acústica y a nivel europeo, fue reconocida como norma de cálculo recomendada para la predicción de ruido industrial. La revisión bibliográfica realizada ha puesto de manifiesto que el parámetro determinante para la predicción de ruido asociado a los parques eólicos es el factor G que determina la atenuación del suelo. En general, el efecto del suelo resulta en la atenuación del sonido en el rango de frecuencia de 200-800 Hz y en un incremento de los niveles sonoro a bajas frecuencias (Kragh y Jakobsen, 1995). Cuando el sonido se propaga a través de la superficie del suelo, el rayo sonoro alcanza el receptor de forma directa y de forma reflejada, tras ser reflejado en el suelo. Debido a la diferencia en las dos vías de propagación y la impedancia sonora de la superficie del suelo, el rayo reflejado tendrá una amplitud y fase diferente

de la vía directa de propagación. El efecto del suelo se define como el nivel de presión sonora respecto al existente en campo libre considerando radiación esférica y la absorción del aire. El efecto del suelo depende de las propiedades del suelo (principalmente poros), geometría (altura de la fuente y el receptor y la distancia entre ellos, que define el ángulo de incidencia del suelo) y de las condiciones meteorológicas cuando largas distancias (Wagner et al., 1996).

En la siguiente tabla, se resumen las principales referencias en la aplicación de la norma ISO 9613-2 al estudio de parques eólicos, haciendo referencia al valor del parámetro de absorción del terreno G que se ha empleado en cada caso y otras especificaciones y conclusiones alcanzadas en cuanto a la aplicación de esta norma.

Autor/Referencia	Valor de Absorción de suelo G	Especificaciones/conclusiones
Delaire et al., 2011	0, 0.25, 0.5	El nivel medio de sobreestimación para G=0.5 es de 0.8-1.7 dBA empleando valores garantizados de potencia acústica. La sobreestimación se incrementa hasta 2-3 dBA en el caso de G=0, representando G=0.25 una situación intermedia.
Cooper et al., 2013	0, 0.5	Recomendación de emplear G=0.5 para terrenos planos o pendiente constante en descenso de forma conservativa y G=0 para pendientes cóncavas.
Evans and Cooper, 2012	0, 0.5	Recomendación G=0 aunque para terrenos con grandes pendientes hacia el receptor pueden producirse subestimaciones de hasta 1 dBA. Valores de G=0.5 pueden introducir importantes subestimaciones. Un análisis detallado de la topografía debe ser realizado para la selección de la norma aplicada.
Institute of Acoustics, 2013	0, 0.5	Recomendación de emplear G=0.5. Las predicciones con G=0 puede producir sobreestimaciones. El valor de G=1 no debería ser usado. La atenuación debido al apantallamiento del terreno (calculado según la ecuación 12 de la norma) debe ser limitado a 2 dBA y sólo para aquellos casos en los que no línea de visión directa entre aerogenerador y el receptor. Una corrección de +3 dB debe ser empleada (+1.5 dB si G=0) debe ser empleada para el cálculo de propagación a través de valles (perfil topográfico cóncavo) o donde el terreno desciende de manera importante entre la turbina y el receptor. El criterio de aplicación viene dado por la altura media hm (Figura 3 ISO9613-2) y las altura de la fuente h _s y receptor h _r [$hm \geq 1.5 \times (\text{abs}(h_s - h_r) / 2)$]
Siponen et al., 2013	0	Emplear valores garantizados y declarados por el fabricante. Valor de G adecuado para topografía plana de Finlandia.
Italian Organization for Standardization, 2005	0.5	No emplear valores de G=1
Teague et al., 2011	0	Mejor correlación con mediciones desde un punto de vista conservativo
Environmental Protection Authority South Australia, 2009	0	Recomendación para una predicción conservativa
Duncan and Kaliski, 2008	Sin atenuación del suelo	La aplicación del modelo para terrenos llanos y absorción espectral del terreno conlleva a la subestimación de los niveles sonoros, mientras que las simulaciones realizadas con un coeficiente de absorción presentan subestimaciones.
Ministries of Environ. & Energy of British Columbia, 2012	<0.7	El Ministerio de Medio Ambiente de Ontario establece 0.7 como el valor global más alto de absorción del terreno que debe ser considerado.
Ontario Ministry of the Environment, 2008	<0.7	La atenuación del suelo debe ser calculada empleando el método general definido en la norma ISO9613. Los valores de atenuación no deben superar G=1 para la región de la fuente, G=0.8 para la región intermedia y G=0.5 para la región del receptor. Alternativamente, el valor global de G no debería superar 0.7.
Hessler Associates Inc., 2011	0.5	El valor medio de 0.5 generalmente funciona adecuadamente como promedio anual para terrenos de cultivo rurales.
Northern Ireland EPA, 2010	0.5	Un valor de G=0.5 debe ser utilizado salvo cuando la propagación se realice completamente por terrenos duros o agua (G=0).
The New Zealand Standard Institute, 2010	0.5	Valores de atenuación por encima de 0,5 no deberían ser utilizados.

Tabla 10. Referencias bibliográficas sobre la implementación de la norma ISO 9613-2 en parques eólicos

Las anteriores referencias presentan una lista exhaustiva de cómo los diferentes autores y organismos competentes han procedido a regular el valor de la atenuación del terreno habitualmente desde un punto de vista conservativo.

Método CONCAWE. Propagación del Ruido desde Complejos Petroleros y Petroquímicos a las Comunidades Vecinas

El modelo está basado en la publicación CONCAWE-report 4/81, "The propagation of noise from petroleum and petro-chemical complexes to neighboring communities" (Ref.AT 931), CONCAWE, Den Haag de Mayo de 1981. *Acoustic Technology Limited* fue contratada por CONCAWE (*European Oil Company Organisation for Environment, Health and Safety*) para desarrollar una investigación sobre la propagación del ruido desde complejos petroleros y petroquímicos hacia las comunidades vecinas, desarrollando un modelo matemático para predecir los niveles sonoros bajo un determinado rango de condiciones meteorológicas. Este modelo permitirá evaluar el impacto acústico de una nueva planta o ampliación de las existentes con vista a establecer las medidas correctoras más eficientes para solventar el problema (Tonin, 1985).

El método CONCAWE fue desarrollado para la predicción de ruido de centrales térmicas y validado en áreas relativamente planas (Manning, 1981). Como consecuencia, algunos autores (Evans y Cooper, 2012; Teague et al., 2011) no recomiendan el uso del modelo bajo determinadas condiciones, especialmente bajo determinadas condiciones de viento (suelo duro) cuando esta norma sobreestima sensiblemente los niveles sonoros. Sin embargo otras referencias, coinciden en que esta norma puede llegar a ser precisa bajo determinadas condiciones de propagación y después de la validación bajo un determinado rango de condiciones (Kaliski y Duncan, 2008) y algunas regiones mantienen esta norma para la evaluación del impacto acústico de parques eólicos (New South Wales –AS y British Columbia - CA).

La relevancia de este modelo reside en la consideración del efecto atmosférico, considerando diferentes categorías de estabilidad atmosférica para evaluar la influencia de la velocidad del viento y del gradiente de temperatura y en la posibilidad de diseñar diferentes escenarios para diferentes direcciones de viento. Estas circunstancias unidas a la posibilidad de testear un modelo en uso en la actualidad bajo condiciones complejas de propagación (diversas aportaciones con topografía irregular) justifican la incorporación de esta norma a los escenarios diseñados.

La norma CONCAWE sigue constituyendo uno de los referentes en las predicciones sonoras de parques eólicos cuando se introduce el vector dirección de cálculo a pesar de que no fue originaria para este tipo de instalaciones y a su relativa antigüedad. De hecho, numerosas referencias normativas siguen haciendo referencia específica a esta norma para la predicción de niveles sonoros de parques eólicos junto a la norma ISO 9613-2. Fruto de esta consolidada aceptación a nivel internacional y a la petición expresa del cliente que solicitó el estudio acústico, la norma CONCAWE fue considerada en la comparativa realizada.

En la siguiente tabla, se resumen las principales referencias en la aplicación de la norma de esta norma, haciendo referencia al valor del parámetro de absorción del terreno G que se ha empleado en cada caso y otras especificaciones y conclusiones alcanzadas en cuanto a su aplicación.

Autor/Referencia	Valor de Absorción de suelo G	Especificaciones/conclusiones
Evans and Cooper, 2012	1	El método CONCAWE ha sido empleado dentro con la categoría más favorable de propagación (Categoría 6) y con terreno completamente absorbente dado que con terreno duro se ha encontrado previamente significantes sobreestimaciones con el método CONCAWE.
Duncan and Kaliski, 2008	Recomendación G=1	Emplea el método CONCAWE con ajuste de estabilidad atmosférica para vientos superiores a 3 m/s y atenuación espectral.
Teague et al., 2011	0.5-0.7	Después de una validación para un rango de situaciones, hemos encontrado una mejor correlación con las medidas de parques eólicos con un factor de atenuación de suelo entre 0.5 y 0.7 (conforme a la realidad).
Environmental Protection Authority South Australia, 2009	0	Recomendación para una predicción conservativa. Categoría 6.
Ministries of Environ. & Energy of British Columbia, 2012	<0.7	El Ministerio de Medio Ambiente de Ontario establece 0.7 como el valor global más alto de absorción del terreno que debe ser considerado tanto para ISO9613, CONCAWE, Harmonoise y Nord2000

Tabla 11. Referencias bibliográficas sobre la implementación de la norma CONCAWE en parques eólicos

De esta revisión bibliográfica sobre las experiencias existentes en la aplicación de la norma podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La caracterización del terreno más recomendada constituye los suelos mixtos o totalmente absorbentes (en contraposición de la norma ISO 9613-2) si bien algunas referencias sugieren suelo duro o valores de G inferiores a 0,7.
- Existen pocas recomendaciones adicionales sobre el resto de parámetros de cálculo de la norma, salvo la aplicación de la categoría meteorológica 6 (Cooper et al., 2012).

Modelo Nórdico de Predicción de Ruido Ambiental NORD 2000

Este modelo fue desarrollado en el marco del “Nordic Project” con el objeto de desarrollar un método de predicción válido para diferentes tipos de fuentes de ruido ambiental, tales como carreteras, ferrocarriles, plantas industriales y aerogeneradores, que fue iniciado en 1996, completado en 2001 y revisado en 2010 (Plovsing, 2010). Las autoridades de los países que integran el proyecto (Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia) identificaron a mediados de los noventa la necesidad de armonizar los diferentes métodos de predicción para diferentes fuentes de ruidos así como poner en valor los años de experiencia adquirida en acústica y la disponibilidad de mayor capacidad de computación. El proyecto fue financiado por diferentes Organismos y Autoridades Nórdicas e implicó en su desarrollo a *SP Swedish National Testing & Research Institute* (Suecia), *SINTEF Telecom and Informatics* (Noruega) y *DELTA, Acoustics & Vibration* (Dinamarca).

El modelo nórdico de propagación fue pionero en la implementación de rayos sonoros curvos para la representación del efecto de la refracción meteorológica. Norma de referencia en Dinamarca, Suecia, Noruega y Finlandia, el modelo de propagación ha sido considerado como una de las alternativas para su declaración como método armonizado Europeo. Por ambas razones, este modelo se incorpora como norma de cálculo para el presente análisis comparativo.

En la siguiente tabla, se resumen las principales referencias en la aplicación de la norma de esta norma, haciendo referencia al valor del parámetro de absorción del terreno G que se ha empleado en cada caso y otras especificaciones y conclusiones alcanzadas en cuanto a la aplicación de esta norma.

Autor/Referencia	Valor de Absorción de suelo G	Especificaciones/conclusiones
Evans and Cooper, 2012	≈0,7 (80 kNsm ⁻⁴)	El modelo NORD2000 generó subestimaciones de los niveles sonoros aunque la precisión del modelo podría ser mejorada mediante la obtención con precisión de los parámetros meteorológicos.
Siponen et al., 2013	0	Emplear valores garantizados y declarados por el fabricante. Valor de G adecuado para topografía plana de Finlandia. Sugiere la utilización de NORD2000 en la fase II de estudio de detalle.
Søndergaard et al., 2013	≈0,6 (500 kNsm ⁻⁴)	La comparativa entre el valor global y espectral para el caso de estudio es buena en el rango -0,5-2.9 dBA para los receptores estudiados.
Teague et al., 2011	0,5-0,7	El modelo NORD2000 presentó diferenciales negativos de 1 dBA respecto a las predicciones más precisas realizadas con el modelo CONCAWE
DELTA, 2009	0,7	El modelo presenta una buena precisión tanto con terrenos llanos como para topografías complejas y condiciones atmosféricas variables. El modelo mejora los resultados obtenidos por ISO9613 especialmente para topografías complejas. Las validaciones han sido realizadas tanto para altavoces como para aerogeneradores en funcionamiento. Todas las simulaciones fueron realizadas con un coeficiente de rugosidad z ₀ de 0.05 m.
Ministries of Environ. & Energy of British Columbia, 2012	<0.7	El Ministerio de Medio Ambiente de Ontario establece 0.7 como el valor global más alto de absorción del terreno que debe ser considerado. Establece el método Nord2000 como una de las alternativas que tiene en cuenta la difracción del sonido.

Tabla 12. Referencias bibliográficas sobre la implementación de la norma NORD2000 en parques eólicos

La revisión bibliográfica realizada ha puesto de manifiesto que una de las principales dificultades de la implementación del modelo Nord2000 es la adecuada caracterización de las variables meteorológicas.

Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (CNOSSOS-EU)

De Acuerdo con el artículo 6.2 de la Directiva de Ruido Ambiental, la Comisión Europea decidió desarrollar unos métodos armonizados para la evaluación del ruido (*Common Noise assessment methOds – CNOSSOS-EU*) para ruido de tráfico, ferrocarriles, aeropuertos e industria para ser empleados por los Estados Miembros en la realización de los mapas estratégicos que establece la propia directiva. El desarrollo del CNOSSOS fue coordinado por el *Joint Research Centre (JRC)* del Instituto de Salud y Protección del Consumidor y desarrollado por un Comité de Expertos nombrado por los Estados Miembros. El trabajo fue desarrollado en el contexto de dos proyectos estipulados entre el JRC y la Dirección General de Medio Ambiente (DG ENV) denominado NOISE I y NOISE II.

Tras el desarrollo metodológico producido en dichos proyecto y un proceso de testeo y validación de las herramientas de cálculo, se procedió a la implementación de la norma mediante la actualización del Anexo II de la Directiva END. Finalmente, se publica el día 19 de Mayo de 2015, mediante la Directiva 996/2015 (175) por la que se aprueban los métodos comunes de evaluación del ruido en virtud de la Directiva END. El texto presentado sustituye completamente al Anexo II de la Directiva 49/2002 y se establece que todos los Estados Miembros traspongan dicha directiva a más tardar el 31 de diciembre de 2018, con vistas a que sea considerado como método de cálculo para la tercera ronda de desarrollo/actualización de los Mapas Estratégicos de Ruido.

Por tanto, el modelo CNOSSOS constituye el marco de referencia metodológico para los próximos años a nivel Europeo, aunando los esfuerzos y experiencias llevados a cabo en los últimos años (HARMONOISE, INSPIRE, IMAGINE, etc.). Este hecho junto a la necesidad de evaluación para fuentes elevadas a gran altura (como es el caso de los aerogeneradores), justifican la incorporación de este modelo a las normas testeadas. Cabe destacar que en los esfuerzos de validación realizados se han llevado a cabo exclusivamente para fuentes de tráfico rodado y ferroviario, por lo que las aportaciones que se hagan para fuentes industriales son completamente necesarias para la posterior validación del método.

Dada la reciente publicación de la versión final del modelo CNOSSOS y la ausencia de experiencias relacionadas con la simulación acústica de parques eólicos usando este modelo, no existen referencias en los parámetros de cálculo, salvo las específicas incluidas en el propio texto de la Directiva.

Otras normas de cálculo

Los estándares anteriormente citados constituyen los modelos más reconocidos internacionalmente para la predicción acústica, que han sido implementados por la mayoría de desarrolladores de software acústicos (CadnaA, Lima, SoundPlan e INMI entre otros).

Existen otros estándares de cálculo que también podrían ser utilizados en los modelos de predicción, destacando el modelo de cálculo desarrollado por el proyecto HARMONOISE (R.Nota et als., 2005), desarrollado por nueve países europeos durante más de 10 años con vistas a armonizar la metodología de predicción. Este algoritmo incorpora un complejo modelo del terreno y metodología, incluyendo turbulencias atmosféricas (Van Maercke, 2006). Sin embargo, este modelo ha sido sustituido y mejorado a nivel europeo por el modelo CNOSSOS-EU, que ha sido implementado como norma de cálculo armonizada en la Unión Europea. Por tanto, se concluye que el modelo HARMONOISE ha quedado obsoleto con las mejoras introducidas posteriormente por CNOSSOS-EU, que lo ha utilizado como base de referencia junto al modelo NORD2000.

Existen otros modelos con especial difusión en Oceanía, como el modelo ENM (Tonin, 2012) o los modelos numéricos de los estándares australianos AS4959:2010 (Australian Standard, 2010) y neozelandés NZS6808:2010 (The New Zealand Standard Institute, 2010) , que no se encuentran implementados en el software de predicción y por tanto, su utilización no está tan extendida a nivel internacional.

3.2 MONITORIZADO DE RUIDOS: METODOLOGÍAS Y POSTPROCESADO

En la evaluación acústica de los parques eólicos una vez entran en funcionamiento, existen diferentes metodologías en relación con las campañas de ensayos acústicas a realizar y el análisis de datos posterior. En línea con el tratamiento de otras fuentes industriales, numerosas normativas acústicas, incluyendo la española, únicamente requieren la toma de registros sonoros discretos, durante la peor situación desde el punto de vista acústico (máxima emisión de la fuente y máxima exposición del receptor). En el caso de los aerogeneradores, esta aproximación es insuficiente por varias razones:

- La normativa limita la velocidad máxima de viento durante los ensayos (habitualmente por debajo de 5 m/s) por lo que las ventanas de máxima emisión de un aerogenerador no pueden ser monitorizadas.
- Las condiciones de propagación más favorables desde el emisor hacia el receptor pueden no concurrir en el momento de la realización de las mediciones, especialmente cuando la duración de los ensayos es reducida.
- Las condiciones meteorológicas y las variaciones en el ruido de fondo introducen una variabilidad importante en los niveles sonoros que no queda reflejada con la toma de muestras discretas (Larsson y Öhlund, 2012).

Por estas razones, otras referencias normativas, como la norma NSZ6808:2010, establece que es recomendable un mínimo de 10 días de monitorizado en continuo para obtener datos representativos de un rango de direcciones y velocidades de viento lo que representaría de forma previa al filtrado 720 intervalos de 10 minutos para el periodo día, 240 intervalos para el periodo tarde y 720 periodos para el periodo noche. Diversas experiencias en la aplicación de la NSZ6808:2010 (Smith y Chiles, 2012) indican que pueden ser necesarios entre 2.000 – 4.000 intervalos diez minutales para el monitorizado de ruido de un parque eólico ya que, dentro de la totalidad de los datos obtenidos, puede determinarse patrones temporales asociados a los periodos día/noche y tendencias asociados a direcciones de viento, ya sea a un único punto cardinal o rango de direcciones (por ejemplo, viento predominante de Poniente comprendido entre NW-SW), por lo que como mínimo se recomienda no menos de 8 horas de datos representativos para cada periodo temporal.

Cuando el monitorizado de ruidos incluye medidas de larga duración, es necesaria el procesado de los registros sonoros, incluyendo el análisis de los datos, su filtrado y clasificación. Existen diferentes metodologías para tal procesado que se describe a continuación junto con la evaluación de los ensayos conforme a la normativa de aplicación en Andalucía.

Análisis discreto conforme a la normativa autonómica

El RPCCA aprobado por el Decreto 6/2012 propone una sistemática de medida basada en registros discretos de cada uno de los periodos de evaluación (día, tarde, noche). La sistemática de medida basada en la norma ISO 19962:2007 se describe en la Instrucción Técnica 2 y presenta las siguientes características: Las mediciones se llevaron a cabo aplicando métodos de muestreo del nivel de presión sonora en intervalos temporales de medida de 1 minuto dentro del periodo temporal de evaluación (día y tarde analizados en conjunto 07:00 – 23:00 horas y noche 23:00 – 07:00 horas).

- Las muestras se consideran representativas para cada periodo temporal de evaluación y para una determinada velocidad y dirección de viento caracterizada por los datos meteorológicos aportados por la estación meteorológica situada a altura de buje.

- Estas muestras se considerarán representativas del promedio diario, vespertino y nocturno para una determinada velocidad y dirección del viento dado que las series meteorológicas de la zona indican que el parque podría funcionar de manera estable bajo ese régimen de funcionamiento. Esta hipótesis de funcionamiento debe ser asumida dado que el patrón de distribución de frecuencias de velocidades de viento varía ampliamente durante todo el año, no existiendo un patrón diario, vespertino o nocturno representativo

Además, los ensayos de nivel de inmisión de actividades deberán cumplir los siguientes requisitos establecidos en la Instrucción Técnica 2 del RPCCA:

- *La medición, tanto de los ruidos emitidos al ambiente exterior de las áreas de sensibilidad acústica, como de los transmitidos al ambiente interior de las edificaciones por los emisores acústicos, se llevará a cabo en el punto de evaluación, en que su valor sea más alto.*
 - Con carácter previo a la selección de los puntos de medida en las edificaciones objeto de estudio (identificadas como más desfavorables mediante el modelo de predicción sonora empleado en el estudio acústico), se lleva a cabo un muestreo espacial en el que se identifica la fachada más expuesta a la afección sonora del parque eólico, con vistas a seleccionar el punto final de medida donde el valor registrado sea más alto.
- *Cuando, por las características del emisor acústico, se comprueben variaciones significativas de sus niveles de emisión sonora durante el periodo temporal de evaluación, se dividirá éste, en intervalos de tiempo, T_i , o fases de ruido (i) en los cuales el nivel de presión sonora en el punto de evaluación se perciba de manera uniforme.*
 - En el caso de los parques eólicos, las variaciones significativas están asociadas a la variación de la velocidad de viento y su dirección de viento que hace variar la potencia sonora de los aerogeneradores. Por esta razón, se seleccionó de periodo de valoración de 1 minuto ya que para ese periodo el ruido asociado al funcionamiento del aerogenerador es prácticamente continuo para una determinada velocidad y dirección de viento. Además, el intervalo mínimo de las estaciones meteorológicas era de un minuto por lo que era el intervalo de tiempo mínimo para el cual se podían obtener registros sincronizados “ruido-viento” sin realizar extrapolaciones.
- *En cada fase de ruido se realizarán al menos tres mediciones para el cálculo de los correspondientes valores del L_{K,eqT_i} , de una duración mínima de 5 segundos, con intervalos de tiempo mínimos de 3 minutos, entre cada una de las medidas.*
 - Se verificó que existiese un intervalo de tiempo mínimo de 3 minutos entre los registros considerados para la valoración normativa.
- *Las medidas se considerarán válidas, cuando la diferencia entre los valores extremos obtenidos, es menor o igual a 6 dBA.*
 - En principio, el ruido generado por un aerogenerador es continuo para unas mismas condiciones de viento (dirección y velocidad) y no presenta oscilaciones por encima de 6 dBA para un intervalo de integración de 1 minuto.
- *Se tomará como resultado de la medición el valor más alto de los obtenidos.*
 - Tras obtener tres registros del periodo de actividad de 1 minuto de duración para una determinada velocidad y dirección de viento con tres minutos de separación mínima entre los registros, se selecciona el valor más alto de los obtenidos siempre que no exista una diferencia entre ellos de más de 6 dBA. Se actúa de forma análoga para la medición del ruido de fondo.

- *En la determinación del $L_{K_{eq}T_i}$ se tendrá en cuenta la corrección por ruido de fondo. Para la determinación del ruido de fondo, se procederá de forma análoga a la descrita para la medida del $L_{K_{eq}T_i}$, manteniendo invariables las condiciones del entorno de la medición.*
 - En el caso de los parques eólicos, es fundamental que el ruido de fondo considerado para la corrección responda a las mismas condiciones de velocidad y dirección de viento registrados durante la medición del parque eólico funcionando. Para ello habrá que proceder a detener el funcionamiento del parque eólico o bien contar con registros suficientes y representativos del estudio acústico preoperacional en el mismo punto de medida y bajo las mismas condiciones meteorológicas.
- *Una vez valorado el nivel de fondo en los mismos puntos de medición, el nivel transmitido por la fuente sonora será la diferencia energética entre el nivel obtenido con la actividad en marcha y los valores del ruido de fondo mediante la expresión:*

$$L_{Aeq \text{ Actividad}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{Aeq \text{ total}}}{10}} - 10^{\frac{L_{Aeq \text{ fondo}}}{10}} \right)$$

Si la diferencia entre $L_{Aeq \text{ total}}$ y $L_{Aeq \text{ fondo}}$ es igual o inferior a 3 dBA, se indicará expresamente que el nivel procedente de la fuente sonora $L_{Aeq \text{ actividad}}$ no puede ser determinado con exactitud. El valor del nivel sonoro resultante, se redondeará incrementándolo en 0,5 dB(A), tomando la parte entera como valor resultante.

Análisis por Regresión Polinomial

La metodología más habitual para el procesado de los registros de monitorizado de ruido viene marcada por la familia de normas IEC61400 así como por otras guías de referencia en la materia (Institute of Acoustics, 2013; Ljunggren, 1997; Ministries of Environ. & Energy of British Columbia, 2012).

En este método, se persigue obtener el mejor ajuste polinomial entre el nivel continuo equivalente L_{Aeq} (u otro índice de ruidos) y la velocidad de viento a 10 metros de altura, tanto para el funcionamiento del parque eólico como para el ruido de fondo. A partir del ajuste por regresión polinomial, podemos obtener el nivel sonoro para cada velocidad de viento y el nivel L_{Aeq} del ruido de fondo puede ser sustraído logarítmicamente del nivel L_{Aeq} obtenido durante la fase de funcionamiento para ser comparado con los límites normativos de aplicación.

Los registros minutales de L_{Aeq} y velocidad de viento se representan en el mismo diagrama, representando el nivel sonoro L_{Aeq} frente a la velocidad de viento y se ajusta a una regresión polinómica de segundo grado (o superior). Debe emplearse una escala lineal de viento.

$$L_{Aeq} = a + b * w_{10} + c * w_{10}^2$$

Donde

- L_{Aeq} es el nivel continuo equivalente valorado (ruido total/ruido de fondo) en dBA.
- W_{10} es la velocidad de viento a 10 metros de altura (m/s)
- A, b y c son las constantes que son determinadas por la regresión

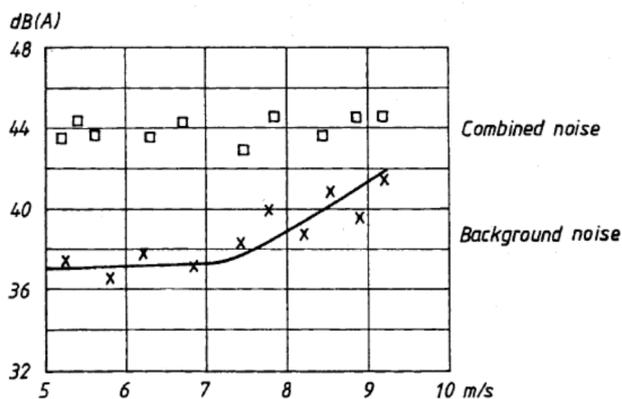


Ilustración 13. Ejemplo de grafico de correlación de ruido total y ruido de fondo frente a la velocidad de viento (Ljunggren, 1997)

La medida combinada del ruido total, incluyendo el ruido del parque eólico, es corregida con el ruido de fondo existente a la misma velocidad de viento, obtenidos ambos de la curva de regresión. A partir de la curva de regresión, podremos determinar el nivel continuo equivalente del ruido total o ruido de fondo para un determinado bin⁵ de viento a partir de la representación gráfica o aplicando la fórmula de la curva de regresión polinomial.

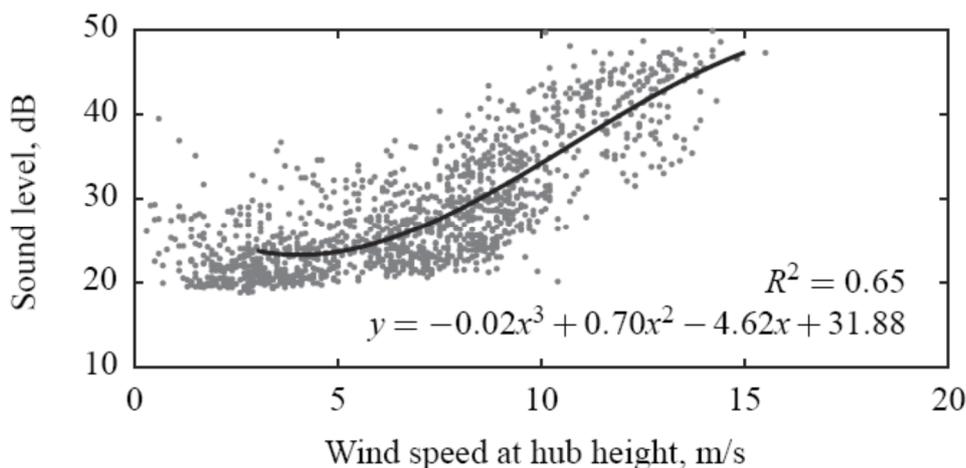


Ilustración 14. Ejemplo de correlación entre niveles sonoros y velocidad de viento a altura de buje (Ashtiani y Titus, 2011)

Además de proporcionar valores discretos, las curvas de regresión nos permitirán verificar gráficamente que para todo el rango de velocidades estudiado se verifica el cumplimiento de los valores límites normativos con la siguiente particularidad:

1. Los resultados serán únicamente válidos dentro del rango de velocidades de viento donde se haya obtenido registros sonoros representativos (al menos 20 intervalos).
2. En algunos casos, la curva de regresión puede verse influenciada por un número limitado de datos de los extremos del rango de vientos analizado. Por esta razón, se limitan los resultados al rango comprendido entre la velocidad de arranque (3 m/s a 10 metros de altura) hasta 10 m/s (donde el aerogenerador ya está funcionando a plena potencia) con suficientes datos representativos (ver Ilustración 15).

⁵ Término anglosajón referido a un rango de velocidades de viento de 1±0,5m/s de amplitud.

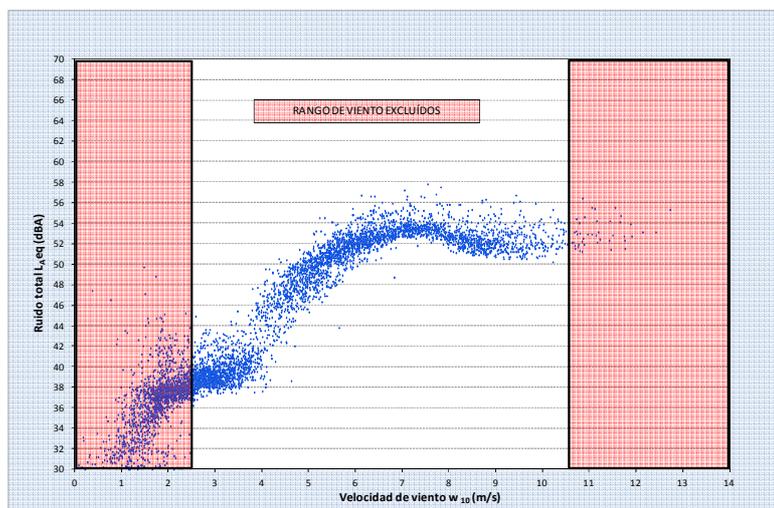


Ilustración 15. Limitación del rango de vientos estudiado

Una vez ajustada la recta de regresión a la nube de observaciones es importante disponer de una medida que mida la bondad del ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente o se deben buscar modelos alternativos. Como medida de bondad del ajuste se utiliza el coeficiente de determinación R^2 .

El coeficiente de determinación mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente (niveles sonoros) respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión. Es frecuente expresar esta medida en tanto por ciento, multiplicándola por cien.

En nuestro estudio consideraremos representativas aquellas regresiones polinomiales en las que el coeficiente de determinación R^2 sea superior a 0,8. Esto es, que el 80% de la variación de los niveles sonoros (totales o ruido de fondo) puede ser explicado por la variación de la velocidad de viento.

La principal ventaja de este método es su simplicidad mientras que entre sus inconvenientes destaca la reducción de la precisión en los extremos de la curva polinomial y que aporta poca información sobre la variabilidad de los datos.

Binning method: Análisis agrupado por bines de viento.

En Ontario, la provincia más poblada de Canadá, la rápida expansión de la energía eólica ocasionó que el Ministerio de Medio Ambiente (MOE bajo sus siglas anglosajonas) haya desarrollado estrategias específicas para limitar la contaminación acústica de este tipo de instalaciones (Ontario Ministry of the Environment, 2008). En este sentido ha desarrollado un método estandarizado para cuantificar la aportación sonora de los aerogeneradores en los puntos de medida, denominado “*binning method*” o análisis agrupado por bines de viento.

Este método agrupa los datos filtrados para cada velocidad de viento, de forma que para cada bin analizado, habrá un determinado número de medidas de L_{Aeq} de un minuto de duración. Para cada bin ± 0.5 m/s, la media aritmética es tabulada junto con la desviación estándar de la muestra. Se establece como requisito que existan al menos 60 registros para cada bin de viento. En la Ilustración 16 se incluye un ejemplo de este análisis.

Wind speed [m/s]	L _{Aeq} [dBA]	No of points	St dev
1	30.9	459	4.9
2	33.1	456	5.1
3	35.4	556	5.1
4	37.4	593	4.0
5	40.5	324	3.9
6	43.3	195	2.0
7	44.5	188	2.2
8	44.8	60	1.8
9	46.3	2	0.1

Ilustración 16. Ejemplo de tabulación de datos (Fte. Ashtiani and Titus, 2011.)

Al igual que en el análisis por regresión polinomial, este procedimiento se realiza tanto para el ruido total como para el ruido de fondo de forma, con vistas a valorar exclusivamente la aportación sonora de los aerogeneradores. De esa forma, la representación gráfica de la medida aritmética del nivel sonoro generado por los aerogeneradores ± la desviación estándar de cada bin de velocidad de viento nos permite valorar el grado de cumplimiento normativo en el rango ensayado, tal y como se muestra en la Ilustración 17.

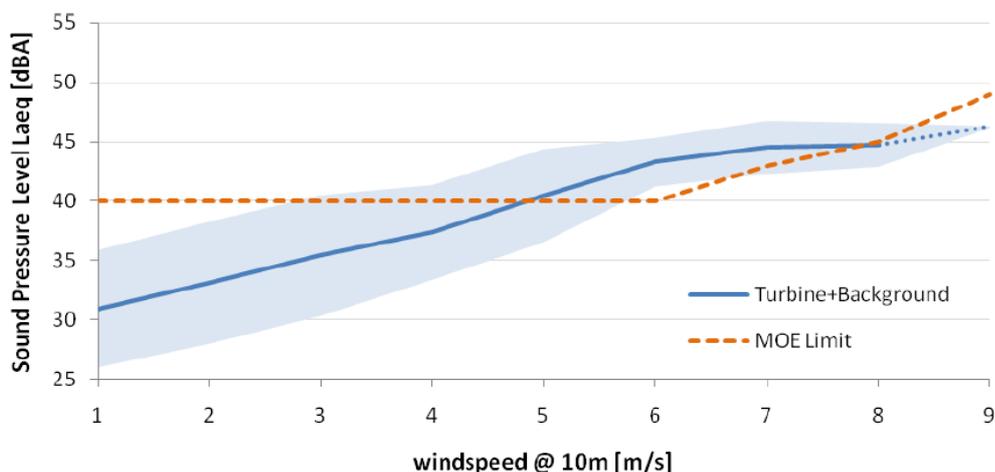


Ilustración 17. Comparativa entre ruido total y límite normativo (Ashtiani y Titus, 2011)

La desviación estándar (o desviación típica) es una medida de dispersión que nos permite valorar en qué medida se apartan los datos obtenidos de la media. Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que representan los datos en su distribución. En el caso de los niveles de inmisión de los parques eólicos, nos permite tener una visión más acorde con una realidad “fluctuante” por lo que este método, a diferencia de la regresión lineal, provee de información adicional sobre la variabilidad del conjunto de datos para cada velocidad de viento.

Otras metodologías

Existen otras metodologías de análisis de datos basadas en otros indicadores de ruido (por ejemplo la norma NZS6808:2010), para describir tanto el ruido de fondo como el ruido operacional. Entre los argumentos a favor de este índice de ruido con respecto a los niveles continuo equivalente, la norma específica que el nivel sonoro L_{90} representa el nivel igualado o excedido durante el 90% del tiempo de medida. Representa, por tanto, el nivel mínimo que permanece inalterado por eventos sonoros de mayor magnitud y corta duración como los causados por la energía del viento y que podría determinar un nivel energético, como L_{Aeq} , lo cual no sería representativo del funcionamiento del parque eólico.

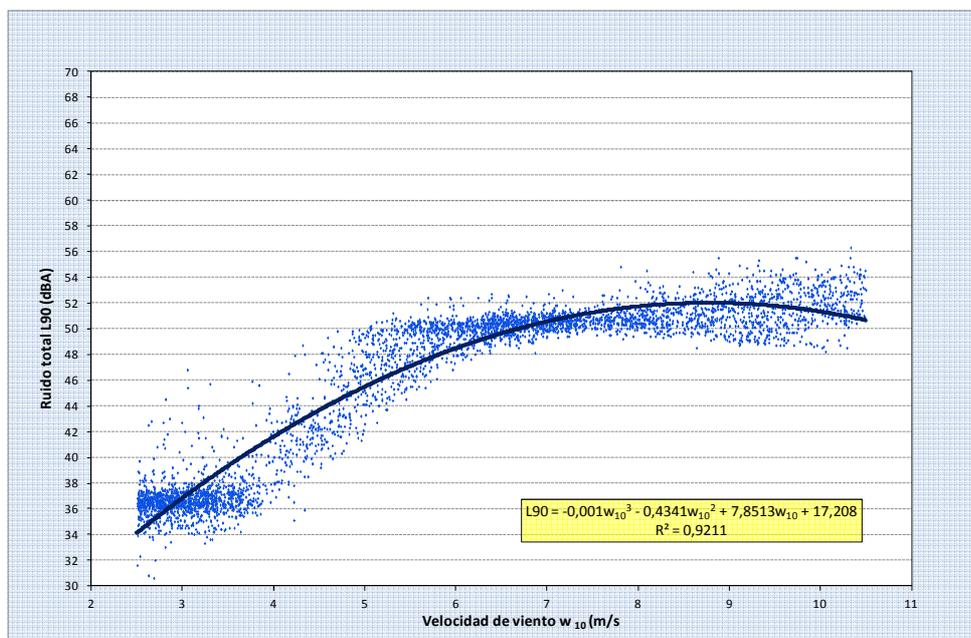


Ilustración 18. Correlación entre nivel sonoro L90 y velocidad de viento (Elaboración propia)

Aunque esta metodología fue empleada en estudios anteriores del parque eólico con éxito (ver Ilustración 18), ha sido excluido del presente estudio puesto que el principal objetivo es la definición de una metodología que se adapte a los requisitos normativos de aplicación en España.

Otros autores (Ashtiani y Titus, 2011) han desarrollado metodologías muy representativas basadas en la probabilidad de ocurrencia de niveles sonoros en función de la velocidad de viento, obtenidas por medio de análisis estadísticos, como se muestra en la Ilustración 19. Sin embargo, la aproximación mediante probabilidades es difícilmente compatible con los requerimientos normativos, cuyo principal objetivo es la obtención de registros sonoros precisos y objetivos que permitan identificar si un emisor sonoro es legal o no.

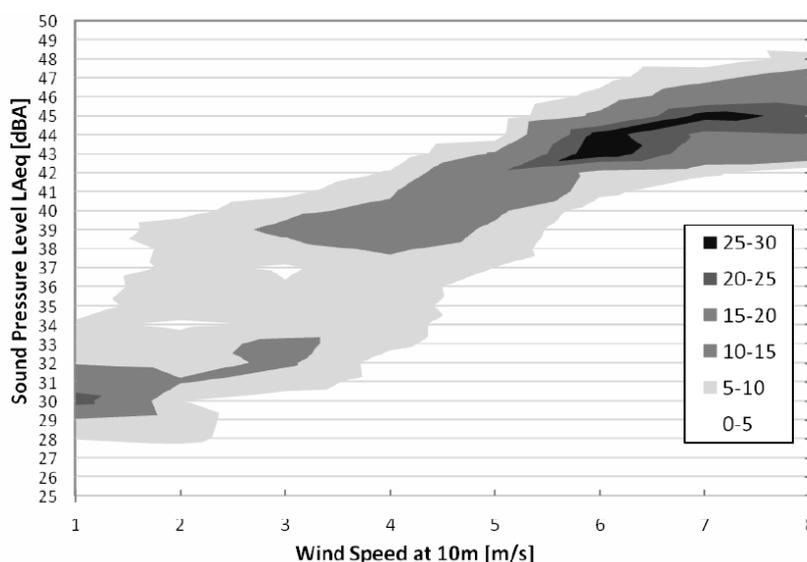


Ilustración 19. Densidad de probabilidades del nivel sonoro global en un receptor del entorno de un parque eólico, donde en la leyenda se especifican los diferentes rangos de probabilidades en % (Ashtiani y Titus, 2011)

4. ÁMBITO DE ESTUDIO

En el presente apartado se describe el parque eólico y la zona objeto de estudio donde se llevó a cabo la campaña de ensayos acústicos. Por cuestiones de confidencialidad, en todo el trabajo no se revelará la denominación del parque eólico ni su ubicación ni se aportará detalle sobre las características acústicas de los aerogeneradores. No obstante dicha omisión de datos no afecta a las conclusiones del presente estudio.

El parque eólico objeto de estudio se localiza en una extensa área situada entre pequeñas entidades poblaciones, en una zona con un marcado carácter rural-natural con predominio de cultivos herbáceos, olivar y almendral así como arboledas dispersas y monte bajo (Ilustración 20). La zona se caracteriza por la existencia de edificaciones rurales dispersas de planta única o dos plantas tales como cortijos, instalaciones ganaderas y almacenes agrícolas. En la actualidad, los usos de suelos predominantes son de tipo agrícola, ganadero y cinegético, destacando las labores asociadas al cultivo extensivo de secano.



Ilustración 20. Vista general de la zona objeto de estudio (Google Maps, 2015)

El relieve se caracteriza por pendientes suaves, con pequeños cerros que se alternan con vaguadas y que oscilan desde 850 m.s.n.m hasta 1.420 m.s.n.m. en la zona Norte del parque. En la Ilustración 21 se aprecia una vista general del modelo tridimensional del terreno objeto de estudio, obtenido a partir de la base cartográfica disponible, junto con la ubicación de los aerogeneradores (puntos azules).

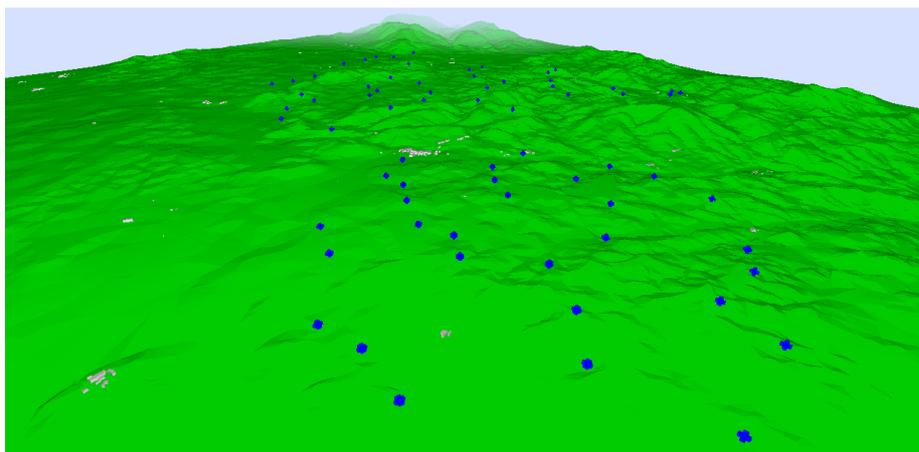


Ilustración 21. Vista general del modelo tridimensional del terreno del ámbito de estudio (Elaboración propia)

Los niveles sonoros ambientales están condicionados por el tráfico rodado asociado a una carretera de carácter local situada al Sur del parque y otras vías locales de menor entidad, así como por la existencia de labores agrícolas. En las zonas de campo abierto y especialmente durante el periodo nocturno, la influencia antrópica es prácticamente inexistente y los niveles sonoros están influenciados fundamentalmente por ruido de origen natural y el propio funcionamiento de los aerogeneradores.

Con respecto al régimen de vientos de la zona, la rosa de los vientos (Ilustración 22) presenta una dualidad muy marcada en las direcciones predominantes, conforme a los datos meteorológicos obtenidos por el promotor del parque eólico en la estación permanente instalada en la zona a la altura de buje de 78 metros. Se observa que los vientos predominantes tanto en frecuencia como en energía se corresponden con vientos de Noroeste (270º) y Este-Sureste (115º). En el presente estudio, se denominarán vientos de poniente a las direcciones correspondientes al sector de 270 º.

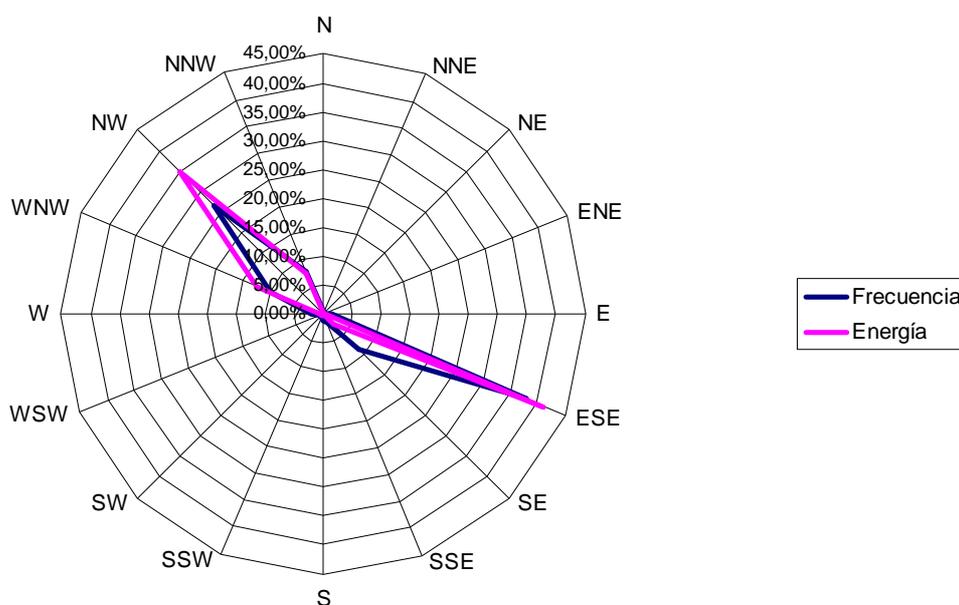


Ilustración 22. Rosa de los vientos a altura de buje (78 metros) representativa del periodo 2002-2012 (Fte. Promotor del parque).

El parque eólico objeto de estudio cuenta con más de 50 aerogeneradores y una potencia instalada de más de 100 MW. Los aerogeneradores se distribuyen aproximadamente en alineaciones no uniformes que ocupan las posiciones más altas de los cerros existentes en la zona.

El modelo de aerogenerador objeto de estudio desarrolla una potencia de 2 MW y presenta un diámetro de rotor de 90 metros con 3 palas que se orientan a barlovento. La góndola se instala sobre una torre de acero sobre zapata de hormigón alcanzando una altura total de buje de 78 metros.

Los aerogeneradores se conectan en paralelo a centros de transformación mediante líneas eléctricas y evacuando la energía producida a la subestación colectora. La afección acústica de ésta no será objeto de este estudio al igual que tampoco lo es el tráfico rodado asociado a las vías de mantenimiento del parque.

4.1 CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LOS AEROGENERADORES

Las emisiones acústicas de un aerogenerador puede tener dos orígenes: origen mecánico y ruido aerodinámico. El ruido mecánico está asociado a los mecanismos de funcionamiento y producción eléctrica del interior de la góndola así como al sistema de orientación y refrigeración del aerogenerador y la caja multiplicadora. Los avances de la ingeniería han hecho que la influencia de estas fuentes sea inferior a la influencia del ruido aerodinámico.

Con respecto al ruido aerodinámico, la interacción entre el flujo de aire atmosférico y el rotor de un aerogenerador da lugar a un campo fluctuante de presiones dentro del rango audible, que depende de la turbulencia del flujo, la geometría del rotor y el acabado superficial de las palas que lo componen.

Los aerogeneradores objeto de estudio presentan una potencia de emisión sonora facilitada por el fabricante acorde a la norma UNE-EN 61400-11:2004 (Ilustración 23), alcanzando la potencia máxima para velocidades de viento superiores a 6 m/s. Conviene destacar que el modelo de aerogenerador presente en el parque eólico tienen una velocidad de viento de arranque de 3 m/s y una velocidad de corte o desconexión de 21 m/s.

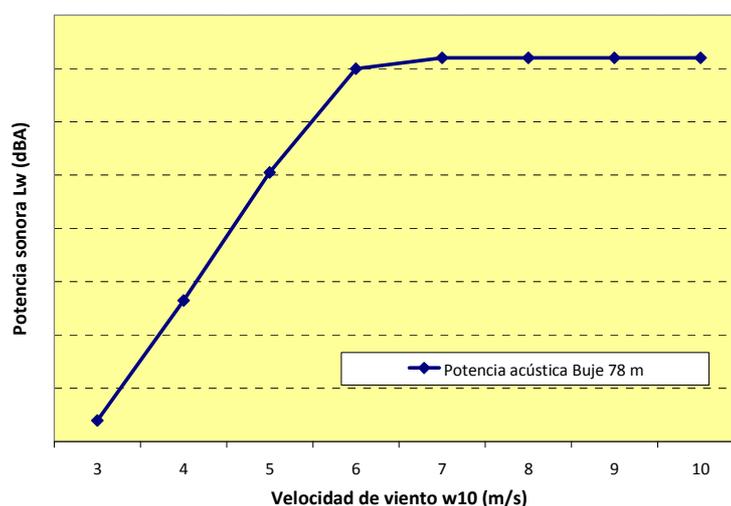


Ilustración 23. Gráfica de la potencia sonora del aerogenerador en función de la velocidad de viento para una altura de buje de 78 m. (Fte: Fabricante del aerogenerador)

La valoración espectral de la emisión se especifica en la siguiente gráfica a partir de la información facilitada por el fabricante para la potencia máxima del aerogenerador. Se observa que el espectro se caracteriza por una importante componente de baja y media frecuencia, no identificándose durante los trabajos de campo eventos impulsivos ni otros fenómenos como “silbidos” o “rugidos” asociados al paso de pala o al funcionamiento del aerogenerador.

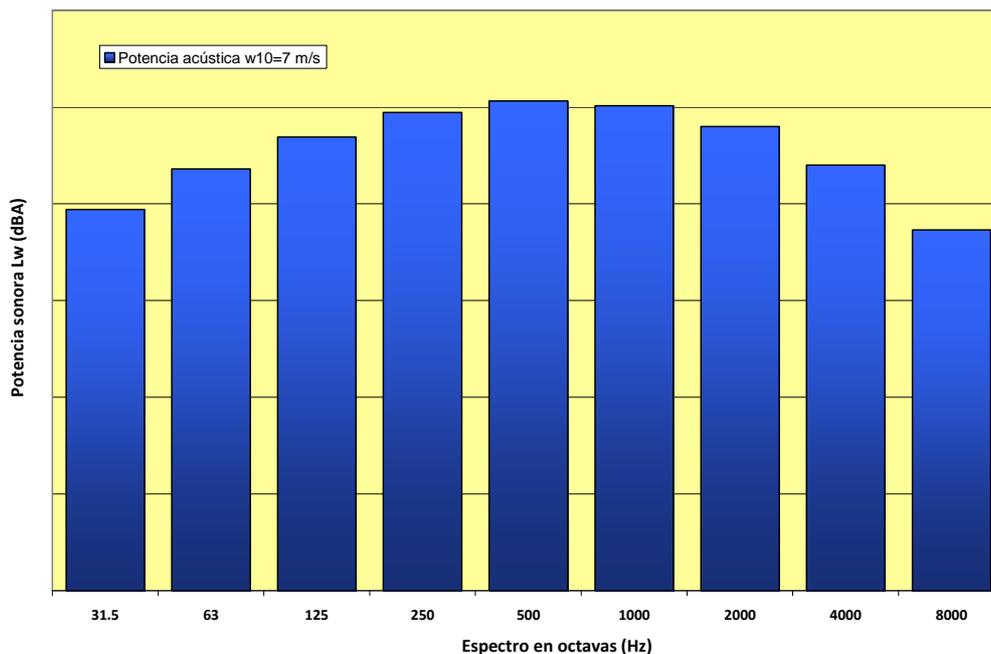


Ilustración 24. Gráfica del espectro de potencia sonora del aerogenerador para una velocidad de viento a 10 metros de 7 m/s. (Fte: Fabricante del aerogenerador)

El funcionamiento de los aerogeneradores objeto de estudio cuenta con varias configuraciones de bajo ruido que pueden ser empleadas como medidas correctoras en la gestión del Parque Eólico para evitar la superación de los niveles límite establecido por la normativa vigente. En la Tabla 13 se describen las atenuaciones acústicas de los modos de operación de bajo ruido existente para una altura de buje de 78 metros, conforme a la norma IEC TS 61400-14:2005.

Velocidad de viento W10 (m/s)	Modos de operación de bajo ruido				
	NRS01	NRS02	NRS03	NRS04	NRS 05
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0,5	0	0	0	0
6	4,4	3,9	3,2	2,4	1,4
7	4,8	4,3	3,6	2,8	1,8
8	4,8	4,3	3,6	2,8	1,8
9	4,8	4,3	3,6	2,8	1,8
10	4,8	4,3	3,6	2,8	1,8

Valores expresados en dBA

Tabla 13. Atenuación acústica de los diferentes modos de operación de bajo ruido con respecto al modo normal de operación del aerogenerador para una altura de buje de 78 metros. (Fte. Fabricante del aerogenerador).

Condiciones de funcionamiento de los aerogeneradores

De acuerdo con la información facilitada por los responsables del parque eólico, los aerogeneradores funcionaron normalmente durante la realización de la campaña de ensayos acústicos, sin que existiesen problemas técnicos que contribuyesen de manera fundamental a alterar los niveles sonoros existentes en los puntos de medida 1 y 2.

Los promotores del parque eólico implementaron una estrategia de funcionamiento de bajo ruido en el parque durante el periodo nocturno con vistas a garantizar el cumplimiento normativo y reducir las molestias sobre los propietarios potencialmente afectados por el funcionamiento de los aerogeneradores, así como para garantizar el cumplimiento de la normativa acústica de aplicación.

En la Tabla 14 se resume la estrategia de reducción de ruidos para los aerogeneradores que generan mayor contribución sobre el nivel de inmisión sonora en las viviendas, distinguiendo funcionamiento normal (FP), funcionamiento bajo uno de los modos de operación de bajo ruido descritos en la tabla 1 (NR) y periodos de parada forzada del aerogenerador (OFF).

PUNTO DE MEDIDA 1								
Aerogenerador	Velocidad de viento w_{10} (m/s)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Aportación principal	FP	FP	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Aportación secundaria	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP
PUNTO DE MEDIDA 2								
Aerogenerador	Velocidad de viento w_{10} (m/s)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Aportación principal	FP	FP	FP	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01
Aportación secundaria 1	FP	FP	FP	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01
Aportación secundaria 2	FP	FP	FP	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01
Aportación secundaria 3	FP	FP	FP	NRS 05				
FP: Plena potencia. NRS: Modos de bajo ruido descritos en la tabla 13								

Tabla 14. Estrategias de operación de bajo ruido aplicable al periodo nocturno con viento de Poniente. (Fte. Promotor del parque).

Esta estrategia de reducción de ruidos permaneció implementada durante la campaña de ensayos *in situ* por lo que los registros sonoros deberán reflejar la eficacia de dicha medida correctora y el grado de atenuación acústica que se obtiene en las viviendas.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA

La campaña de ensayos acústicos se ejecutaron en dos edificaciones situadas en el entorno próximo de la zona Este del Parque Eólico, donde los propietarios indicaron que existían molestias por ruidos asociados al funcionamiento de los aerogeneradores, especialmente con la presencia de vientos de poniente (predominantes en la zona).

A continuación se describen las principales características de los puntos de medida objeto de estudio.

Punto de medida 1

El primer punto de medida se sitúa en una edificación rural de planta baja y primera situada en una vaguada cercana al parque eólico. La edificación tiene carácter residencial y está habitada permanentemente y cuenta con un edificio anexo para el almacenaje de aperos.

El aerogenerador más cercano se encuentra situado a 238 metros lineales de distancia y la edificación presenta un desnivel aproximado de 108 metros respecto a la altura de buje. El resto de aerogeneradores del parque se encuentran situados a más de quinientos metros por lo que los niveles sonoros en este punto están condicionado fundamentalmente por el funcionamiento del aerogenerador más cercano (Ilustración 25).

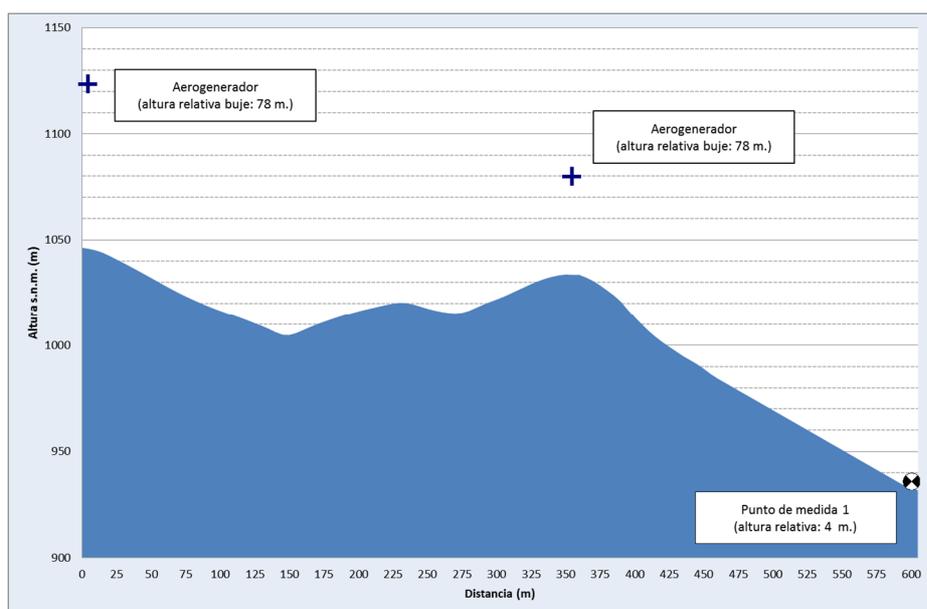


Ilustración 25. Perfil de elevación del punto de medida 1 respecto al aerogenerador más cercano. (Fte. Elaboración propia).

La fachada objeto de valoración está orientada hacia el Noroeste y el sonómetro se dispone en posición normal a la fachada, a nivel de primera planta (4 metros) y con el micrófono orientado hacia el aerogenerador más cercano en el centro de la ventana abierta. La fachada está orientada hacia un campo de cultivo de almendros con escasa densidad de árboles (y follaje) y con el terreno arado y sin presencia de una cubierta vegetal continua.

A la edificación se accede a través de una vía asfaltada de aproximadamente 4 metros de ancho de calzada que finaliza en la propia edificación objeto de estudio por lo que los movimientos

de vehículos está muy limitada a las personas que habitan en las edificaciones cercanas. Los niveles sonoros en el entorno del punto de medida están condicionados por las labores agrícolas del campo de cultivo, por la actividad doméstica y por la presencia de perros en la vivienda que ladran ocasionalmente ante la presencia de vehículos.

Punto de medida 2

El punto de medida se encuentra situado en una edificación rural que cuenta con planta baja y primera situada en la zona superior de un pequeño cerro. La edificación tiene carácter residencial si bien funciona como segunda residencia o residencia de verano.

El aerogenerador más cercano se encuentra situado a 295 metros lineales y la edificación presenta un desnivel aproximado de 107 metros respecto a la altura de buje. El aerogenerador representado en la parte derecha de la Ilustración 26 se encuentra situado a 546 metros si bien puede presentar una aportación importante a los niveles sonoros registrados en la edificación dada la dirección predominante de viento y tal y como se aprecia en el estudio *in situ* de los técnicos responsables de las mediciones.

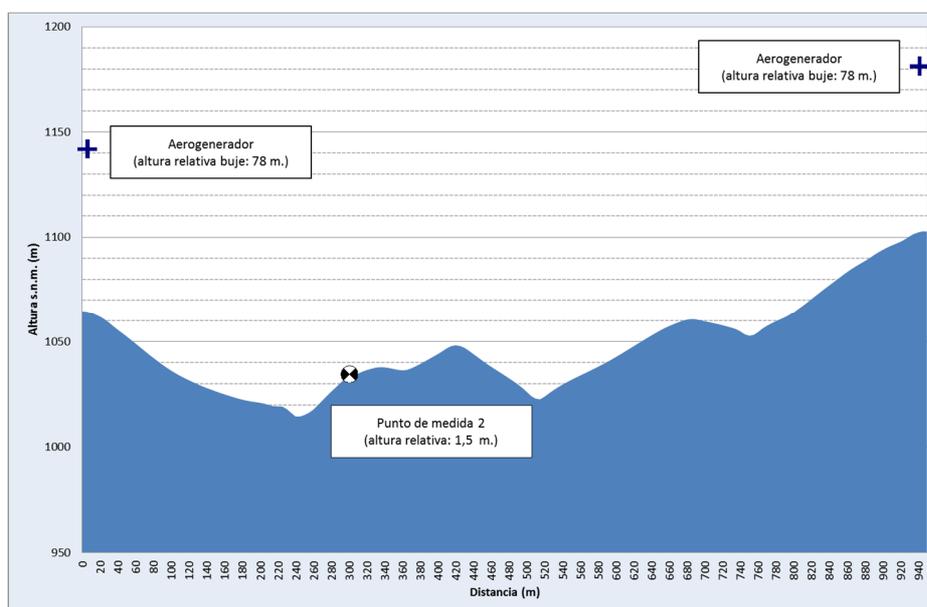


Ilustración 26. Perfil de elevación del punto de medida 2 respecto al aerogenerador más cercano. (Fte. Elaboración propia).

La fachada objeto de valoración está orientada hacia el Suroeste y el sonómetro se dispone en posición normal a la fachada y con el micrófono orientado hacia el aerogenerador más cercano a nivel de ventana abierta de la planta baja del edificio. La fachada está orientada hacia el porche de la edificación que está completamente hormigonado.

La única vía de acceso es una carretera asfaltada con un ancho de calzada aproximado de cuatro metros. Dado que la edificación se encuentra en un pequeño cerro, el punto de medida se encuentra apantallado acústicamente frente a la afección sonora de la carretera de acceso por el propio talud de la misma. Por tanto, la influencia del tráfico rodado de la carretera de acceso sobre los niveles registrados es reducida, más aún cuando dicha carretera sólo sirve de acceso a edificaciones rurales dispersas.

5. OBJETIVO E HIPÓTESIS

Una vez llevada a cabo la revisión de los antecedentes y el contexto actual sobre la temática a tratar en esta Tesis Doctoral, se plantean los siguientes objetivos e hipótesis.

Los objetivos se enmarcan dentro del contexto de la evaluación de impacto acústico de los parques eólicos aplicable al ámbito geográfico de España y más concretamente en el análisis de las herramientas de predicción y monitorizado para garantizar el cumplimiento normativo.

Mediante la revisión del contexto y los antecedentes de los modelos de predicción sonora y su especial vinculación con el desarrollo del sector eólico, se pone de manifiesto la ausencia de una metodología armonizada a nivel internacional, tanto a nivel de monitorizado acústico como en la fase de evaluación preoperacional. En este contexto, se analiza la representatividad de las diferentes normas de cálculo y diferentes técnicas de ensayos que podrían ser aplicadas para estudiar el impacto acústico de los aerogeneradores.

Las hipótesis de partida son las siguientes:

- Las técnicas de ensayos basadas en muestreos discretos son insuficientes para cubrir la variabilidad de emisión de los aerogeneradores y los diferentes escenarios de propagación en función de la meteorología. Un monitoreo en continuo y su procesado posterior permitirá garantizar un correcto análisis de la inmisión de un parque eólico bajo las condiciones más desfavorables y más representativas.
- La variabilidad de la inmisión sonora de un parque eólico en función de las condiciones de propagación dificulta en gran medida la verificación del cumplimiento normativo. Las técnicas de monitorizado deberían proporcionar algún parámetro o indicador sobre dicha variación con vistas a permitir declarar conformidad del cumplimiento de la normativa con suficientes garantías.
- Dado que los métodos de predicción sonora no fueron ideados originalmente para el estudio de fuentes sonoras a gran altura, la precisión de los resultados podría no ser adecuada para la evaluación acústica de los aerogeneradores.
- Los modelos de predicción sonora presentan diferentes grados de adaptación en función de la topografía del terreno y es habitual que los parques eólicos se encuentren en terrenos con irregularidades. La precisión de los modelos sobre escenarios de topografía compleja puede ser mejorada incorporando factores de corrección asociados a criterios de visibilidad o altura media calculada de forma independiente para cada receptor, conforme a las recomendaciones del IOA. Los estudios y experiencias internacionales demuestran que el valor de la absorción del terreno (G) es uno de los parámetros clave que determina la representatividad de los modelos de predicción sonora y por lo que debe ser seleccionado con criterio. La adopción de valores de absorción de suelo asociados a los diferentes usos de suelos existentes podría ser un criterio adecuado para mejorar la precisión de los modelos de predicción.

- La implementación de estrategias de modos de bajo ruido en los aerogeneradores, diseñadas mediante modelos de predicción, constituye una medida de mitigación efectiva evaluable mediante ensayos acústicos *in situ*.
- La evaluación acústica de los parques eólicos debe estar basado en un modelo combinado de norma de cálculo y monitorizado de ruidos que permita el análisis de diferentes escenarios de propagación, con un alto grado de precisión y sin incurrir en subestimaciones de los niveles sonoros.

Estas hipótesis se concretan en un objetivo general y cuatro específicos que dan respuesta al título de esta tesis “Predicción y Monitorizado de Ruido de Aerogeneradores y sus implicaciones para la Evaluación Acústica de Parques Eólicos”.

El objetivo general del trabajo es contribuir al desarrollo y mejora de una sistemática específica de valoración del impacto acústico de los parques eólicos que combine modelos de predicción sonora con sistemas de monitorizado en continuo de ruido ambiental *in situ*, para topografías complejas.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Aplicar diferentes métodos de análisis estadísticos de registros sonoros obtenidos mediante una campaña *in situ* basados en normas y estándares internacionales.
- Análisis comparativo de diferentes normas de cálculo para la predicción de los niveles sonoros ocasionados por los aerogeneradores.
- Validación de los parámetros de cálculo que permitan reducir la desviación de las estimaciones de los modelos de predicción acústica respecto a los niveles sonoros registrados *in situ*.
- Valorar la eficacia de la implantación de estrategias de modos de operación de bajo ruido en los aerogeneradores para minimizar la afección acústica del parque eólico.

Las principales novedades del estudio propuesto con respecto a las líneas de investigación desarrolladas a nivel internacional residen en los siguientes aspectos:

- Adaptación de los métodos de análisis estadísticos reconocidos internacionalmente a los índices de ruidos e instrucciones técnicas específicas de aplicación en el territorio español.
- Validación de un modelo de predicción sonora para su aplicación específica para parques eólicos situados en terrenos con topografía compleja.
- Verificación del funcionamiento de los sistemas de bajo ruido implementados en un parque eólico para minimizar la afección acústica del parque eólico.

Estos tres aspectos constituyen los pilares básicos del estudio proyectado y darán lugar a una serie de recomendaciones o “guía de buenas prácticas” de aplicación para la evaluación acústica de futuros parques eólicos en armonía con la legislación española, que no existe en la actualidad.

El alcance del proyecto está limitado a los aspectos anteriormente descritos, validados mediante escenarios de propagación favorables tanto en la campaña de ensayos como en los modelos de predicción. La consideración de la directividad de la fuente, la valoración de componentes tonales,

impulsivas u otras características de emisión de los aerogeneradores no son objeto del presente estudio aunque podrían ser consideradas como futuras líneas de investigación.

6. METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología aplicada para la consecución de los objetivos establecidos para el presente estudio comprende las siguientes fases:

- **FASE I.** Monitorizado del ruido del parque eólico mediante una campaña de ensayos acústicos *in situ*: El objetivo de esta fase es obtener registros sonoros suficientes y representativos del funcionamiento del parque eólico para diferentes velocidades de viento predominante de Poniente en los dos puntos de medida seleccionados.
- **FASE II.** Análisis de los registros sonoros: En esta fase se llevará a cabo el análisis de los registros sonoros obtenidos durante la campaña de ensayos y evaluación del cumplimiento normativo según el Decreto 6/2012 empleando los siguiente procedimientos:
 - **Método I:** Nivel de Inmisión al Exterior conforme al artículo 29 del Decreto 6/2012 y los procedimientos descritos en la Instrucción Técnica 2.
 - **Método II:** Nivel de Inmisión al Exterior conforme al artículo 29 del Decreto 6/2012 aplicando el método de regresión polinomial para obtener la correlación entre los registros sonoros y la velocidad de viento.
 - **Método III:** Nivel de Inmisión al Exterior conforme al artículo 29 del Decreto 6/2012 aplicado análisis por bins de viento descrito *Guía para la evaluación y medición acústica de parques eólicos de Ontario* (Ontario Ministry of the Environment, 2009).
- **FASE III.** Modelo de predicción sonora: Mediante el software acústico CadnaA de Datakustik, se estimarán los niveles sonoros en los puntos de valoración conforme a las siguientes normas de cálculo:
 - **Modelo ISO 9613-2:1996** “Acoustic – Abatement of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation”.
 - **Norma CONCAWE-report 4/81**, “The propagation of noise from petroleum and petro-chemical complexes to neighboring communities”.
 - **Modelo nórdico de predicción sonora NORD2000.**
 - **Métodos Comunes de Evaluación del Ruido** (Common NOise aSSessment methOdS – CNOSSOS).

Con los resultados obtenidos de las fases II y III, se llevara a cabo un análisis comparativo que permita identificar la estrategia más eficaz para la evaluación del impacto acústico del parque eólico objeto de estudio.

6.1 FASE I. MONITORIZADO DEL RUIDO

El objeto de la campaña de ensayos es realizar un monitorizado de ruido en diferentes ubicaciones potencialmente afectadas por el parque eólico, bajo norma ISO1996-2:2007, con vistas a obtener suficientes registros representativos del nivel de inmisión en las edificaciones para las velocidades de viento predominantes y así para valorar el impacto acústico asociado al parque eólico objeto de estudio. Para ello se lleva a cabo una campaña de ensayos acústicos *in situ* durante las siguientes fechas:

- Septiembre-Octubre de 2012: Ensayos de corta duración para valorar la afección bajo condiciones de viento predominante de Poniente.
- Octubre-Noviembre de 2012: Ensayos de larga duración en continuo con una duración total de siete (7) intervalos de 24 horas con predominio de viento de Poniente.

No fue posible realizar la medición de larga duración de forma consecutiva debido a las condicionantes meteorológicas. El volumen de datos obtenidos durante la campaña de ensayos acústicos se especifica a continuación:

- 368 horas de medición,
- 1.324.800 registros de un segundo de L_{eq} (A,C,Impulse) y niveles estadísticos L_n (percentiles),
- 115.200 registros espectrales de un segundo,
- Más de 22.000 registros minutales de condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, velocidad de viento máxima y media, dirección de viento, presión atmosférica y otros) a 1,5 metros de altura y altura de buje
- Más de 1.200 registros minutales de los datos de producción eléctrica del parque eólico.

Instrumentación de Medida

Los equipos de medida para las certificaciones de parques eólicos serán sonómetros integradores-promediadores, con análisis estadísticos y detector de impulso, con análisis espectral para medidas en bandas de tercios de octava y cumpliendo los requisitos generales que establece el artículo 37 del RPCCA.

Estos equipos (descritos en las Tablas 15 y 16) debe ser tipo 1/clase 1 conforme a la norma UNE-EN 61260:1997 y a la norma UNE-EN 61260/A1:2002, para el caso de «Filtros de octava y de bandas de una fracción de octava» según exige la normativa vigente. Es decir, deben ser de la máxima fiabilidad, siempre que la medición forme parte del proceso de concesión de alguna autorización o conlleve el posible inicio de un expediente sancionador. Los instrumentos de medida y calibradores utilizados contaban con los correspondientes certificados de verificación y calibración periódica conforme las disposiciones establecidas en la Orden de Ministerio de Fomento, de 25 de septiembre de 2007, por la que se regula el control metrológico del Estado de los instrumentos destinados a la medición de sonido audible y de los calibradores acústicos. Además, antes y después de los ensayos, se chequeó la calibración de todos los equipos no registrándose desviaciones superiores a 0,3 dB.

ID	Equipo	Marca	Modelo	Nº Serie	C. Verificación
SOLO01	Sonómetro, tipo 1	01dB	SOLO	60755	00S3393-2_2012
SOLO02	Sonómetro, tipo 1	01dB	SOLO	60756	00S3655-1_2012
SOLO03	Sonómetro, tipo1	01dB	SOLO	60758	00S3655-2_2012
SOLO04	Sonómetro, tipo1	01dB	SOLO	61027	00S3574-1_2012
LD52	Sonómetro, tipo1	L&D	2260	2576743	00S3393-1_2012
CAL01	Calibrador, tipo 1	RION	NC-74	34973213	00S3316-2_2012

Tabla 15. Relación de Sonómetros y calibradores empleados en la campaña de ensayos

ID	Equipo	Marca	Modelo	Nº Serie
GPS01	GPS	GARMIN	60CSX	16305807
PRO02	Estación meteorológica	DAVIS	VANTAGE PRO	A71203D59N
ETM03	Estación meteorológica	DAVIS	VANTAGE PRO	A71203D59N

Tabla 16. Relación de equipos auxiliares empleados en la campaña de ensayos



Ilustración 27. Ejemplo de instalación de sonómetro y estación meteorológica

Tiempo de integración

Conforme a las diferentes recomendaciones normativas y referencias consultadas, el tiempo medio de integración de cada intervalo de medida oscila entre 1-10 minutos de duración.

Aunque en un gran número de estudios acústicos de parques eólicos se opta por el empleo de “pares” de registros sincronizados de índices de ruido (L_{Aeq}/L_{90}) y velocidades de viento cada 10 minutos, es posible emplear intervalos de integración más reducidos (1-2 minutos) cuando el funcionamiento del parque eólico es estable (IEC, 2002; Ljunggren, 1997; Ontario Ministry of the Environment, 2008; The New Zealand Standard Institute, 2010) siempre y cuando se obtengan datos representativos del funcionamiento del parque eólico. Este método simplificado permite maximizar el número de registros para establecer una adecuada correlación entre los niveles sonoros y la

velocidad del viento y por tanto, optimizar el tiempo empleado en la monitorización del ruido del parque eólico. Este aspecto es fundamental cuando es necesario detener el funcionamiento de los aerogeneradores para valorar el ruido de fondo existente, ocasionando importantes pérdidas al promotor de las instalaciones.

En el presente estudio acústico, se ha optado por seleccionar un periodo de integración de cada medida de 1 minuto en base a los siguientes criterios:

- Es acorde con los requisitos establecidos en la Instrucción Técnica 2 del Decreto 6/2012 que establece que como mínimo el tiempo de cada serie de ensayos será de 5 segundos.
- El periodo de integración de 1 minuto permite la comparación de los registros sonoros obtenidos en la campaña de ensayos acústicos con los modelos de predicción sonora que se emplearan en la fase III.
- Los datos de viento (velocidad y dirección) proporcionados por las estaciones meteorológicas disponibles tiene una resolución máxima de 1 minuto, por lo que se maximiza la representatividad de los datos de viento y se reduce la variabilidad entre velocidad máxima y media de viento que surge cuando se emplean mayores periodos de integración.
- El filtrado de datos es más sencillo con intervalos de menor duración al tiempo que se minimiza el número de registros desechados por alteraciones ajenas al funcionamiento del parque (tráfico rodado, aéreo, actividades humanas o sonido de carácter natural).

Para garantizar una adecuada correlación entre los datos sonoros y las velocidades de viento es fundamental una adecuada sincronización entre los registros de los sonómetros y las estaciones meteorológicas. Los técnicos responsables de los ensayos procedieron a sincronizar los equipos con la hora del centro de control del parque eólico al inicio de cada jornada de medida, comprobando al final de la misma que no existían desviaciones al respecto.

Condiciones ambientales

En la realización de las mediciones para la evaluación de los niveles sonoros, se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Las condiciones de humedad y temperatura deberán ser compatibles con las especificaciones del fabricante del equipo de medida.
- Las mediciones en el medio ambiente exterior se realizarán usando equipos de medida con pantalla antiviento. Asimismo, cuando en el punto de evaluación la velocidad del viento sea superior a 5 metros por segundo, deberá garantizarse la protección del micrófono frente al ruido inducido por el viento.

En el caso del parque eólico, las condiciones meteorológicas se monitorizan junto con los registros sonoros tanto a nivel del punto de medida como a altura de buje y, de forma recomendable a 10 metros de altura conforme a los requisitos de la norma UNE-EN 61400-11:2004 (bien por medición *in situ*, bien por extrapolación desde alturas superiores).

En el presente estudio, la determinación de la velocidad de viento ha sido facilitada por el promotor del parque, con un anemómetro a la altura de buje, en el aerogenerador con mayor aportación al nivel de inmisión de cada punto de medida. Dado que la velocidad de viento se referencia a 10 metros de altura de acuerdo a la norma UNE-EN IEC61400-11, y esto facilita la normalización tanto de la potencia sonora como de las estrategias de modos de bajo ruido, será

necesario extrapolar los datos del anemómetro desde la altura de buje a 10 metros de altura, mediante la siguiente expresión (IEC, 2002):

$$W_{10} = W_h \frac{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}$$

Donde:

- w_{10} es la velocidad de viento estimada a 10 metros de altura.
- w_h es la velocidad de viento medida
- h es altura en metros desde la base del anemómetro
- z_0 es el coeficiente de rugosidad de la zona de estudio en metros (0,05 m de acuerdo a la norma UNE-EN IEC61400-11 para tierras de cultivo con vegetación).

De forma general se incluyen en las Tablas 17 y 18, un resumen de las condiciones meteorológicas registradas durante la campaña de ensayos acústicos empleadas para la valoración normativa del Decreto 6/2012:

	PUNTO DE MEDIDA 1		PUNTO DE MEDIDA 2	
	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE
Presión (mb)	960-891	963-960	893-886	891-890
Temperatura (°C)	18-7	7-6	16-9	7-6
Humedad (%)	88-56	87-80	81-53	84-78
Velocidad viento a 1,5 m (m/s)	7.7	7.6	4.9	5.3
Dirección viento predominante	Poniente			

Tabla 17. Condiciones ambientales registradas durante la campaña de corta duración

Fecha	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Presión (mb)	972-968	973-970	971-968	970-899	970-963	963-856	960-892	966-959	966-964	964-959
Temperatura (°C)	21-14	29-11	15-12	22-5	22-3	12-6	11-2	11-1	9-1	7-1
Humedad (%)	77-56	88-36	87-75	73-22	85-31	88-77	90-53	92-48	87-54	84-66
Velocidad viento 1,5 m (m/s)	2,1	4,1	3,5	3,1	3,1	3,2	5,8	7,2	6,8	4,6

Tabla 18. Condiciones ambientales registradas durante la campaña de larga duración

La temperatura y la humedad relativa son parámetros muy relevantes por su influencia sobre la absorción acústica de la atmósfera, por lo que requieren un análisis pormenorizado de su variación durante los ensayos. En la Imagen 28, se aprecia la variación intradiaria que sufren la temperatura y

humedad relativa en la zona de estudio, con descensos de temperatura e incremento de humedad durante el periodo nocturno.

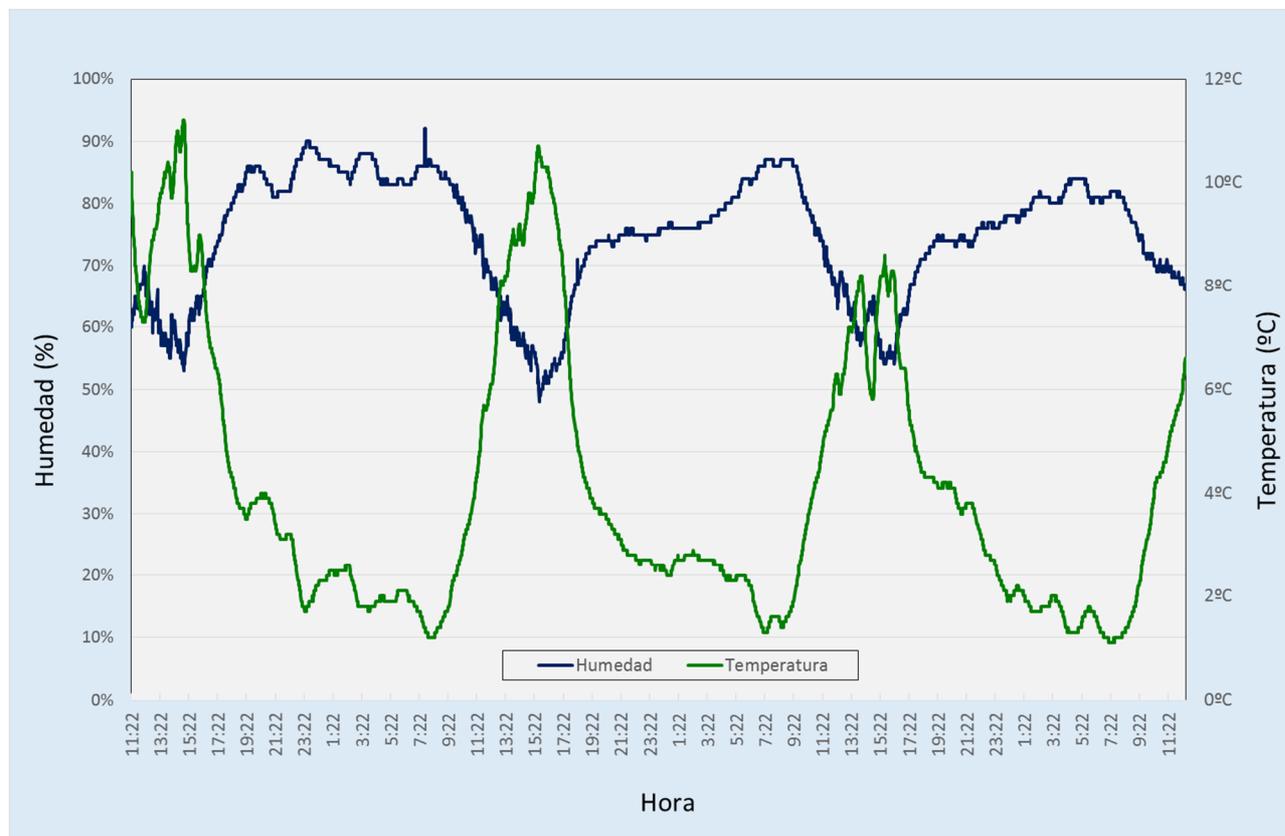


Ilustración 28 .Evolución horaria de la temperatura y humedad durante los ensayos acústicos

En base a los datos obtenidos, se han calculado los valores promedios de temperatura y humedad relativa para los periodos diurnos y nocturnos con vistas a ajustar en la fase III los valores de absorción acústica de la atmosfera conforme a la norma ISO9613-1:1993.

Periodo	Temperatura	Humedad
Diurno	10°C	71%
Noche	7°C	82%

Tabla 19. Valores promedios de temperatura y humedad para los periodos diurnos y nocturnos

Respecto a la dirección de viento (Tabla 20), se confirma que durante el monitorizado de viento, la dirección predominante fue Poniente (ONO) con leves variaciones cuando se analizan los registros meteorológicos de cada punto de medida y periodo de evaluación independientemente.

Punto de medida	Dirección de viento promedio (º)	
	Periodo día/tarde	Periodo Noche
Punto de medida 1	291,3º	293,8º
Punto de medida 2	299º	298.3º

Tabla 20. Dirección de viento promedio para cada punto de medida y periodo (Promotor del parque)

Condiciones de propagación favorables

Con vistas a reducir la incertidumbre asociada a la meteorología y permitir las comparaciones con los resultados de los modelos de predicción, se ha verificado que los ensayos se han realizado conforme a las condiciones de propagación favorables. Estas condiciones de propagación favorables (*downwind conditions*) son descritas en la norma ISO 1996-2:2007 e implican:

- Velocidad del viento, medida a una altura de entre 3 y 11 metros sobre el suelo, entre 2 m/s y 5 m/s durante el día o más de 0,5 m/s en la noche
- Viento soplando desde la fuente sonora dominante hacia el receptor (dentro de un ángulo de $\pm 60^\circ$ de día, y dentro de un ángulo de $\pm 90^\circ$ de noche)
- No existe gradiente negativo de temperatura ocurrido cerca del suelo, ej. cuando no hay sol brillante durante el día.

El primero de los requisitos queda garantizado por el rango de funcionamiento de los aerogeneradores, funcionando siempre a partir de velocidades iguales o superiores a 3 m/s valorados a 10 metros de altura. En la Imagen 23, se representa la ubicación de los puntos de medida respecto al parque eólico, así como las direcciones de viento predominantes durante el periodo día (flecha azul) y noche (flecha roja) y el ángulo formado respecto a la fachada de valoración. Se confirma que las direcciones de viento predominantes se corresponden con los requisitos de la norma.

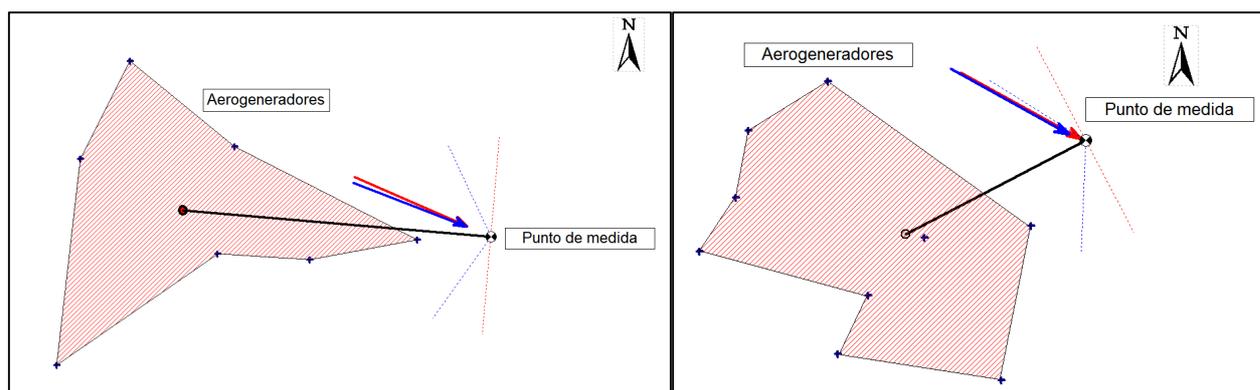


Ilustración 29. Confirmación del ángulo de incidencia del viento en periodo diurno (línea azul) y noche (línea roja) desde el punto central del parque eólico a los puntos de medida

Con respecto al tercer de los requisitos de la norma, no fue posible obtener de las estaciones meteorológicas los datos de cobertura de nubosidad para los días de medidas si bien los técnicos de campo verificaron *in situ* que durante los ensayos de forma general no predominaron situaciones de cielos despejados durante al día (estimación de al menos 1 octa durante el periodo diurno). Esta circunstancia junto con el cumplimiento de la ecuación 2 de la norma ISO 1996-2:2007, permiten justificar la existencia de condiciones favorables de propagación durante el día para velocidades de viento iguales o superiores a 3 m/s, tal y como la norma refiere.

Adicionalmente, la valoración de las condiciones de propagación favorables se han verificado en periodos de 30 minutos conforme recomienda el nuevo borrador de la norma ISO 1996-2 (ISO, 2015) y las conclusiones del proyecto IMAGINE (IMAGINE Work Group, 2011), extrapolando las conclusiones a cada uno de los intervalos minutales que conforman cada periodo.

Concluimos por tanto que, tras la confirmación de los requisitos de la norma ISO1996-2:2007, el monitorizado de ruido se realizó bajo condiciones predominantes de propagación favorables y los registros sonoros pueden ser empleados para su comparación con los modelos de predicción sonora considerando dicho escenario.

Valoración del ruido de fondo

Con vistas a sustraer la aportación energética correspondiente al ruido de fondo de la zona, es necesario realizar medidas del ruido de fondo utilizando los mismos procedimientos y bajo las mismas condiciones que la campaña de ensayos con el parque funcionando.

Para obtener un rango representativo de viento y dirección de viento se recomienda un mínimo de 10 días de monitorización en continuo (NZS6808:2010) que proporcionará suficientes registros para establecer una adecuada relación entre los niveles sonoros y la velocidad de viento. Además la duración de la medida podría verse incrementada si no existe una adecuada distribución de los puntos de medida, diferentes tendencias en función de la dirección del viento dominante y variaciones estacionales del ruido de fondo asociadas a factores naturales u otros focos de ruidos.

Habitualmente esta campaña de ensayos se realiza con anterioridad a la puesta en funcionamiento del parque eólico con vistas a evitar la parada de los aerogeneradores y la pérdida de producción del mismo.

En el caso objeto de estudio, no se llevó a cabo esta campaña de ensayos con anterioridad y fue necesario llevar a cabo la valoración del ruido de fondo procediendo a la parada forzada de los aerogeneradores durante periodos de corta duración en días no consecutivos para muestrear diferentes velocidades de viento de poniente, el predominante en la zona. Esta circunstancia es bastante habitual en los estudios acústicos de los parques eólicos en España y supone un reto a la hora de determinar la aportación real de los aerogeneradores respecto al ruido de fondo, especialmente a altas velocidades de viento con insuficientes registros sonoros. Sirva de referencia que el RPCCA exige únicamente una valoración de los niveles sonoros preoperacional de *al menos 24 horas de duración* para los parques eólicos, que se consideran insuficientes para abarcar la variabilidad en la dirección y velocidad de vientos y otros factores comentados con anterioridad que pueden influir en el ruido de fondo.

Valoración de la incertidumbre

La valoración de la incertidumbre se realiza conforme a la norma ISO/DIS 1996-2:2015 para cada uno de los escenarios monitorizados (combinación de ventanas de emisión y meteorología) conforme a la siguiente expresión, aplicando una probabilidad de cobertura del 95%:

$$U = 2 * \sqrt{U_{eq}^2 + U_{op}^2 + U_{loc}^2 + U_{met}^2 + U_{rf}^2}$$

Donde:

- U_{eq} : componente de incertidumbre debido al equipo de medida que el resultado de multiplicar el valor de la desviación asociada al equipo σ_{slm} (dBA para sonómetros de clase 1 conforme a ISO, 2015) multiplicado por un factor de sensibilidad C_L que viene dado por la fórmula F7 de la norma. Los valores obtenidos fueron los siguientes en función de las diferencias entre ruido total y ruido de fondo (Tablas 21 y 23).

Velocidad de viento (m/s)	C_L	σ_{slm} (dBA)	U_{eq} (dBA)
---------------------------	-------	----------------------	----------------

3	1,1	0,5	0,5
4	1,1	0,5	0,5
5	1,1	0,5	0,5
6	1,0	0,5	0,5
7-10	1,0	0,5	0,5

Tabla 21. Estimación de la incertidumbre asociada al equipo de medida en el punto de medida 1

Velocidad de viento (m/s)	C_L	σ_{slm} (dBA)	U_{eq} (dBA)
3	1,1	0,5	0,6
4	1,1	0,5	0,6
5	1,1	0,5	0,6
6	1,0	0,5	0,5
7-10	1,1	0,5	0,5

Tabla 22. Estimación de la incertidumbre asociada al equipo de medida en el punto de medida 2

- U_{op} : incertidumbre asociada a la variabilidad y condiciones de funcionamiento durante la ventana de emisión, calculado según la expresión $U_{op} = \sigma_{L_{AR}}$, donde $\sigma_{L_{AR}}$ es la desviación estándar de los niveles sonoros procedentes del foco ruidoso. Estos datos fueron obtenidos de sonómetros situados en las cercanías de los aerogeneradores con mayores aportaciones sobre los puntos de medida con una influencia mínima de las condiciones meteorológicas, obteniéndose los siguientes resultados. Se aplica un valor promedio a la incertidumbre puesto que los puntos de medida están influenciados por la emisión de varios aerogeneradores, siendo la media más representativa que la incertidumbre asociada al aerogenerador con mayor aportación.

Velocidad de viento (m/s)	Punto de medida 1	Punto de medida 2	Promedio
	$\sigma_{L_{AR}}$ (dBA)	$\sigma_{L_{AR}}$ (dBA)	U_{op} (dBA)
3	1,4	-	1,4
4	1,3	-	1,3
5	1,1	1,7	1,4
6	1,7	1,7	1,7
7-10	1,8	1,2	1,5

Tabla 23. Estimación de la incertidumbre asociada a las condiciones de funcionamiento de los aerogeneradores

- U_{loc} : componente de incertidumbre debido a la corrección realizada por ruido reflejado. En caso de ubicación de micrófono en la zona de 3dB, que tendrá valor 1 dB conforme a ISO, 2015.
- U_{met} : componente de incertidumbre debido a condiciones meteorológicas. Los ensayos realizados bajo condiciones de propagación favorables presentan un valor de 2 dBA conforme a ISO, 2015.
- U_{rf} : incertidumbre asociada a la medida de los niveles de ruido de fondo, conforme a la siguiente expresión:

$$U_{rf} = C_{res} * \sigma_{res}$$

donde σ_{res} es la desviación estándar de las medidas de ruido de fondo en el receptor y C_{res} es el coeficiente de sensibilidad del ruido de fondo en el receptor. A continuación, se incluye las incertidumbres asociadas a las diferentes ventanas de viento para cada punto de

medida, no siendo posible el cálculo independiente para cada periodo de valoración debido a la ausencia de registros suficientes.

Velocidad de viento (m/s)	C_{res}	σ_{res} (dBA)	U_{rf} (dBA)
3	0,09	0,5	0,0
4	0,09	2,6	0,2
5	0,09	2,6	0,2
6	0,00	4,7	0,0
7-10	0,04	3,1	0,1

Tabla 24. Estimación de la incertidumbre asociada al ruido de fondo en el punto de medida 1

Velocidad de viento (m/s)	C_{res}	σ_{res} (dBA)	U_{rf} (dBA)
3	0,1	1,2	0,2
4	0,1	2,0	0,3
5	0,1	3,8	0,5
6	0,0	3,0	0,1
7-10	0,1	4,0	0,4

Tabla 25. Estimación de la incertidumbre asociada al ruido de fondo en el punto de medida 2

Otras condiciones específicas de instalación

A continuación se especifican otras precauciones adoptadas durante la realización de los ensayos para garantizar la representatividad de los resultados conforme a otros estándares y recomendaciones nacionales e internacionales (Cueto Ancela et al., 2006; Ljunggren, 1997; Ontario Ministry of the Environment, 2008; The New Zealand Standard Institute, 2010).

Localización de los ensayos

Las diferentes técnicas de ensayos acústicos de parques eólicos persiguen la reducción de la influencia del ruido reflejado de superficies verticales (tales como fachadas de edificaciones, muros o cualquier paramento vertical) situando los puntos de medida bajo condiciones de campo libre (al menos a 5 metros de distancia a elementos reflectantes) o bien montando el micrófono sobre tableros sólidos que se sitúan sobre la fachada o sobre el suelo.

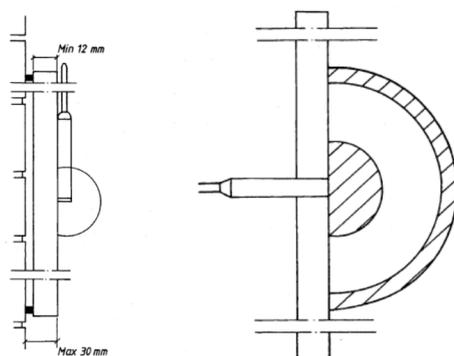
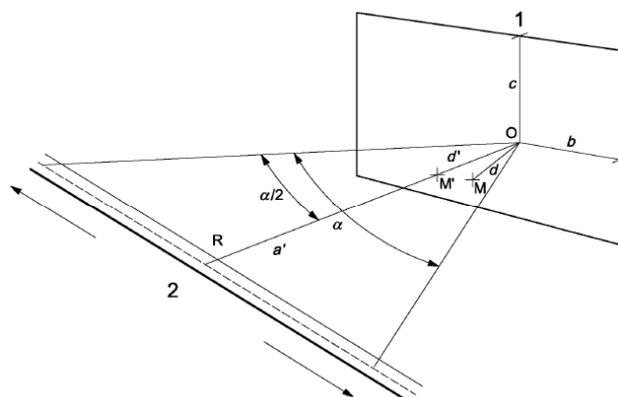


Ilustración 30. Instalación tipo de micrófono sobre tablero (ISO, 2007)

Sin embargo la necesidad de dar cumplimiento a una serie de requisitos normativos específicos (Instrucción Técnica 2 del Decreto 6/2012) obliga a situar el punto de medida a nivel de fachada de las edificaciones, en el centro de la ventana abierta de los recintos protegidos objetos de valoración o bien en la región de corrección de 3 dB establecida por la norma ISO 1996-2:2007. De

esta forma también se da respuestas a otros requerimientos de seguridad y control de los equipos de medida inherentes a este tipo de ensayos acústicos.

Los criterios establecidos para garantizar que el micrófono se encuentra en la región de 3 dB (esto, es que la energía incidente es igual a la reflejada) se especifican en la siguiente imagen. Las ubicaciones seleccionadas para los micrófonos en los dos puntos de medida verifican el cumplimiento de estas condiciones para la valoración global con ponderación A de los niveles sonoros, como se demuestra en las Tablas 26 y 27. Por tanto, será necesario sustraer 3 dBA a los valores globales registrados durante las campañas de medición para obtener el nivel sonoro incidente, en línea con los requisitos establecidos por el RPCCA.



- Leyenda
- 1 fachada del edificio u otra superficie reflectante
 - 2 fuente extendida
 - M posición del micrófono
 - d distancia perpendicular desde la posición del micrófono hasta la superficie reflectante, O
 - RO línea divisoria del ángulo, α

Ilustración 31. Diagrama de ubicación del punto de medida en relación con las reflexiones (ISO, 2007)

Parámetros (m)		Criterios ISO 1996-2:2007			Cumplimiento
		Medición espectral válida	$b \geq 4d$	$4 \geq 4$	
c	1,5		$c \geq 2d$	$1,5 \geq 2$	NO
b	4	Región 3 dB	$d' \leq 0.05a'$	$1 \leq 11,9$	SÍ
a'	238	Fuera Región 6 dB - Global A	$d' \geq 1$	$1 \geq 1$	SÍ
d'	1	Fuera Región 6 dB - Espectral	$d' \geq 5,4$	$1 \not\geq 5,4$	NO
Altura del receptor				4	m.
Altura de la fuente				78	m.

Tabla 26. Justificación de corrección de 3 dBA para punto de medida 1

Parámetros (m)		Criterios ISO 1996-2:2007			Cumplimiento
		Medición espectral válida	$b \geq 4d$	$4 \geq 4$	
c	3		$c \geq 2d$	$3 \geq 2$	SÍ
b	6	Región 3 dB	$d' \leq 0.05a'$	$1 \leq 14,8$	SÍ
a'	295	Fuera Región 6 dB- Global A	$d' \geq 1$	$1 \geq 1$	SÍ
d'	1	Fuera Región 6 dB - Espectral	$d' \geq 5,4$	$1 \not\geq 5,4$	NO
Altura del receptor				1,5	m.
Altura de la fuente				78	m.

Tabla 27. Justificación de corrección de 3 dBA para punto de medida 2

Además se tuvieron en cuenta otros aspectos significativos que pueden influir en la representatividad de los resultados:

- Los puntos de medida se encontraban a más de 3.5 metros de distancia de cualquier otra superficie reflectante diferente al suelo y la propia fachada del edificio.
- Es conveniente evitar fachadas que estén apantalladas por la existencia de otras edificaciones cercanas.
- Los niveles sonoros registrados en el punto de medida no estarán influenciados por corrientes o cursos de agua, especialmente si éstos presentan un carácter estacional.
- Siempre que sea posible, el micrófono no se localizará en las cercanías de arboledas que puedan afectar a los niveles sonoros, especialmente si se trata de árboles de hoja caduca que pueden introducir variaciones estacionales de importancia en el ruido de fondo existente.
- Aunque dependiendo de la localización del receptor esté este requisito puede ser inalcanzable, es altamente recomendable darle cumplimiento incluso valorando ubicaciones alternativas.
- En el caso de campañas de medición de corta duración bajo condiciones de viento concretas, éstas deberán abarcar al menos, el aerogenerador funcionando bajo la mayor capacidad de generación eléctrica.
- Podrán emplearse ubicaciones de micrófono a 4,0-4,5 metros en edificaciones con más de una planta construida en altura, especialmente para cumplir con requisitos específicos establecidos por la normativa de aplicación (por ejemplo, los objetivos de calidad acústica en el exterior establecidos por el Real Decreto 1367/07 y el Decreto 6/2012 que están referidos a una altura de 4 metros) o para aportar datos para la validación de un modelo de predicción sonora.

Protección frente al ruido inducido por el viento

Con vistas a obtener registros sonoros representativos de altas velocidades de viento, cuando el parque eólico presenta su máxima afección, se empleó una segunda pantalla protectora antiviento extra grande ya que es uno de los sistemas más extendidos para reducir el ruido inducido por la turbulencia del viento contra el micrófono y aumentar los niveles de señal/ruido, especialmente a baja frecuencia (Cueto Ancela et al., 2006; Donovan, 2009; Leclercq et al., 2008; Wang et al., 2012)

En concreto el sistema utilizado VAS21 presenta la siguiente mejora en las atenuaciones obtenidas a altas velocidades de viento respecto al micro sin protección (WS-03 en la Ilustración 32) con lo que se justifica técnicamente la representatividad de los datos obtenidos con velocidades de viento superiores a 5 m/s (Delaire et al., 2015) aunque no puedan ser empleados para certificar el cumplimiento normativo del parque (límite normativo de 5 m/s).

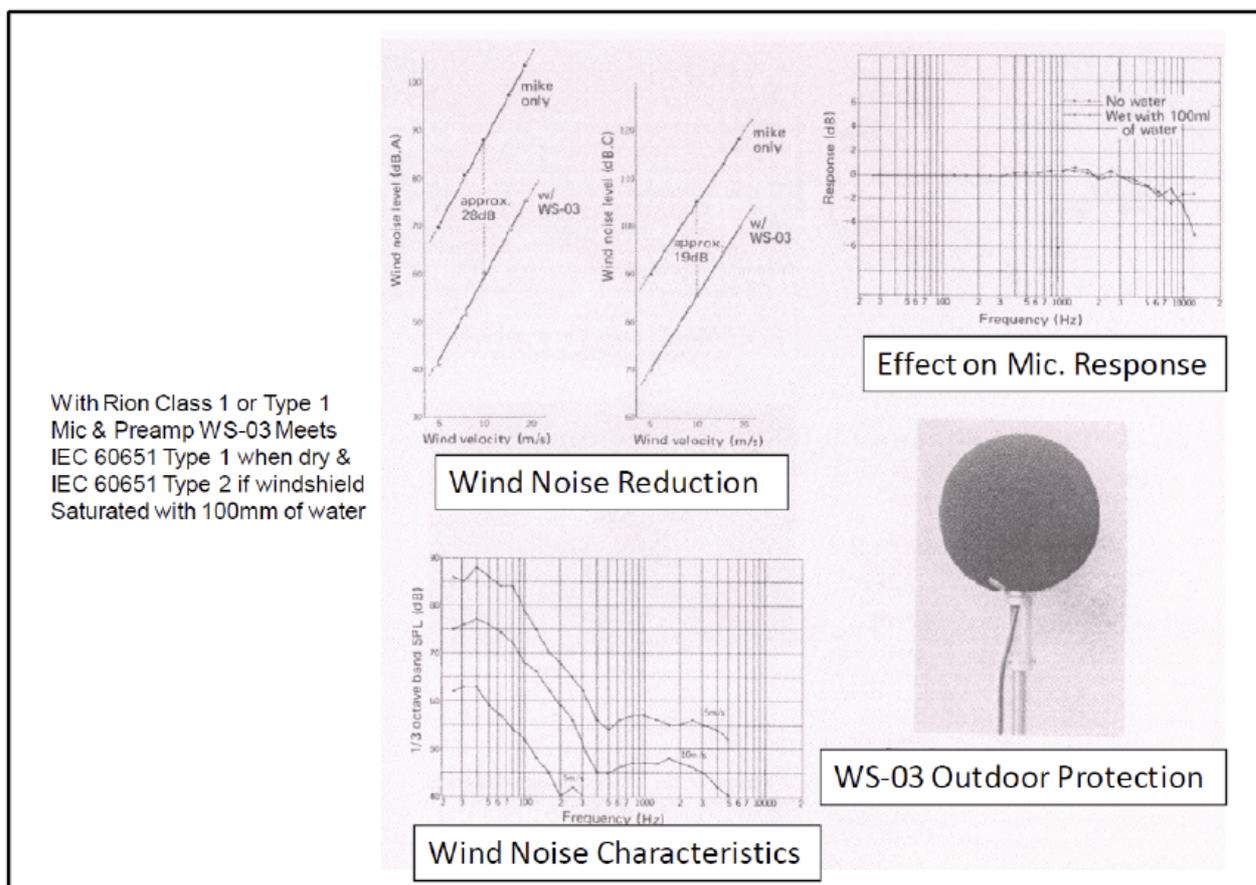


Ilustración 32. Respuesta de la borla antiviento empleada frente al viento y otras condiciones meteorológicas (01dB)

La efectividad de la segunda pantalla antiviento es especialmente relevante para velocidades de viento de hasta 5 m/s, siendo difícil identificar si a velocidades superiores los incrementos en los niveles sonoros en campo está condicionado por el ruido inducido sobre el micrófono o por el propio incremento en el ruido de fondo (Adcock et al., 2015). Siguiendo las recomendaciones generales sobre ensayos en parques eólicos (Cueto Ancela et al., 2006; Ljunggren, 1997), la utilización de esta segunda pantalla es suficiente para la valoración de valores globales A hasta velocidades de 10 m/s (Leclercq et al., 2008; Wang et al., 2012), sin ser relevante el filtrado específico para tener en cuenta la pérdida de inserción introducida por la pantalla antiviento (Adcock et al., 2015).

6.2 FASE II. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS SONOROS

El análisis de los bases de datos se ha llevado a cabo mediante el software Excel de Microsoft y SPSS de IBM para el análisis estadístico y mediante hojas de cálculos específicas. En primer lugar las bases de datos fueron sincronizadas incluyen los registros sonoros, datos meteorológicos y producción eléctrica del aerogenerador con mayor aportación en intervalos minutales. En segundo lugar, las bases de datos fueron filtradas con vistas a reducir la influencia de eventos ajenos al funcionamiento del parque eólico, tal y como se describe en el siguiente apartado.

Se emplearon las siguientes metodologías para el análisis de los registros sonoros:

- Método I. Análisis de registros sonoros discretos, conforme a la Instrucción Técnica 2 del Decreto 6/2012.
- Método II. Análisis por regresión polinomial de segundo orden.
- Método III. Método de agrupación por bins de viento.

La variación temporal de los niveles sonoros en los puntos de medida respecto a la velocidad de viento fue obtenida mediante regresión polinomial de segundo orden para cada punto de medida y periodo de valoración. En el caso del método agrupado por bins, los promedios y desviaciones estándar se obtuvieron para cada ventana meteorológica empleando las herramientas “Visual binning” y “Case Summaries” del software SPSS. Los datos obtenidos fueron representados gráficamente en Excel.

Filtrado de datos

Cualquier sonido externo ajeno al parque eólico o al propio ruido de fondo de la zona, causado por eventos sonoros puntuales, considerando precipitación, insectos, fauna y actividad humana tiene que ser identificado y removido de la base de datos de forma previa a su análisis normativo (ejemplo en la Ilustración 33).

Si el punto de medida se encuentra, por ejemplo, rodeado de árboles o cerca de un curso de agua, el ruido inducido por dichos elementos naturales podrá ser considerado como parte del ruido de fondo global de la zona. La influencia de otros factores como el ruido de tráfico ocasional deberá tendrá una influencia mínima en los registros de ruido de fondo, considerando periodos de medida en los que su intensidad se reduzca al mínimo (madrugada o primera hora de la mañana o la tarde).

Existen diferentes métodos para la identificación de eventos sonoros foráneos como el control *in situ* de los posibles focos de contaminación ajenos al parque eólico, análisis detallado de las series temporales del nivel de presión sonora o el análisis espectral de las medidas.

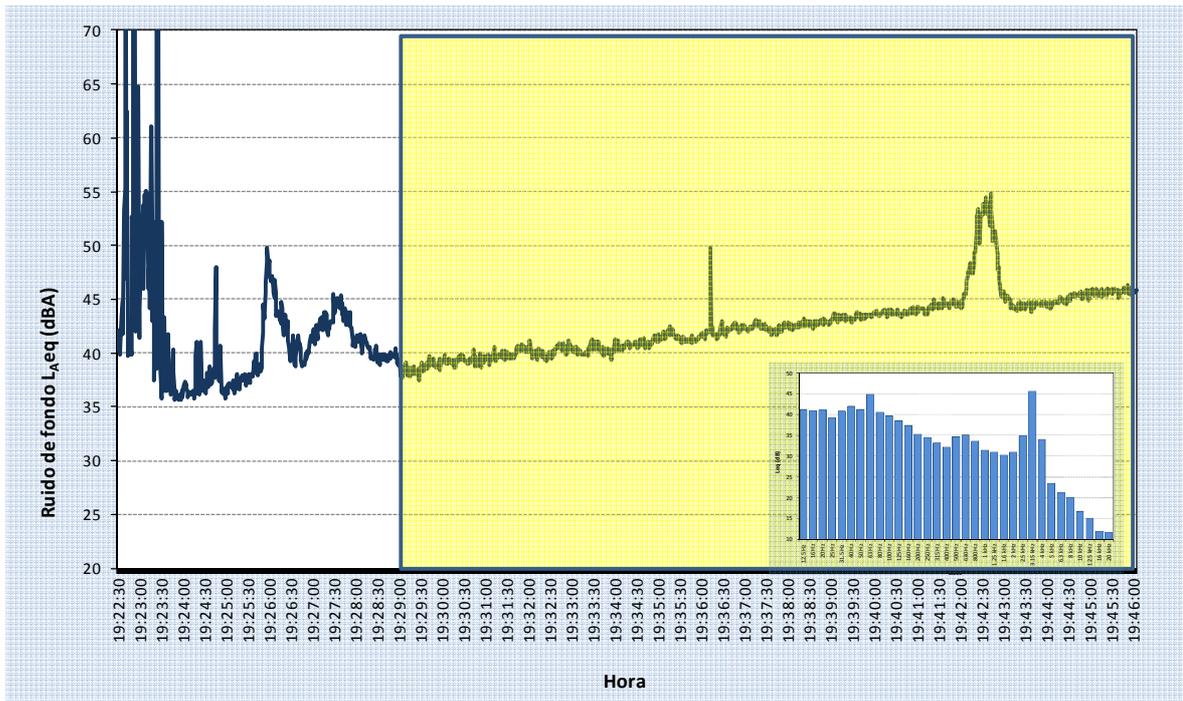


Ilustración 33. Ejemplo de identificación de eventos sonoros de carácter natural (influencia de ranas con tono en 3,15 kHz)

En el filtrado de datos, es especialmente útil el empleo del índice percentil L_{90} ya que no se ve influenciado por fenómenos esporádicos (ladridos de perros por ejemplo) y puede ser comparados con el nivel continuo equivalente L_{Aeq} , que sí refleja la aportación energética de ese tipo de eventos. En el presente estudio, se excluyeron aquellos registros cuya diferencia entre el nivel continuo equivalente y el nivel percentil L_{90} fuera superior a 5 dBA (Australian Standard, 2010). De esta forma se excluyen aquellos periodos con influencia antrópica, atendiendo a otros índices (L_{max}) para confirmar este hecho. Este criterio es consistente con las relaciones encontradas entre los niveles L_{Aeq} y L_{90} en otros estudios de 1,5-2 dBA (Cooper et al., 2012) y los resultados obtenidos en la campaña de mediciones (ver Ilustración 34), si bien se amplió este rango para cubrir la variabilidad en la emisión a los aerogeneradores. La puesta en marcha los sistemas de refrigeración de la góndola, las irregularidades en las palas o la desalineación de los aerogeneradores frente a la dirección predominante de viento pueden introducir variaciones en los niveles de emisión del aerogenerador que quedarían cubiertas en su gran mayoría dentro del rango de 5 dBA empleado.

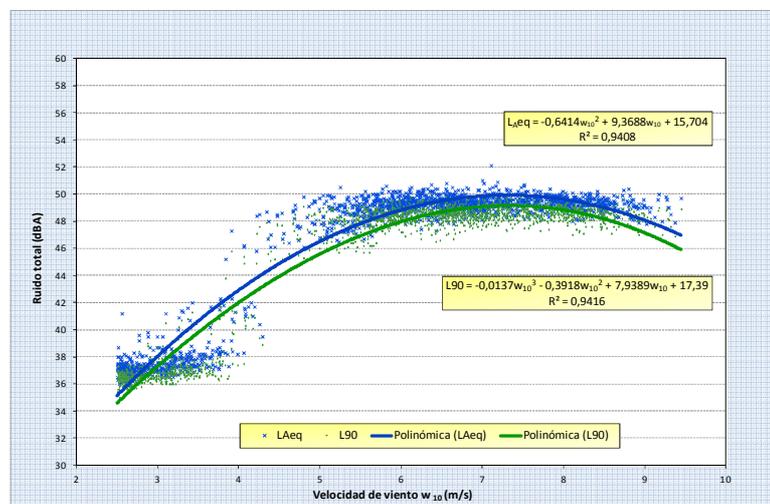


Ilustración 34. Comparativa entre el L_{Aeq} y L_{90} y su correlación con la velocidad de viento.

De forma complementaria, se empleó el software dBTrait de 01dB (versión 4903, 2003) para la identificación de todos aquellos eventos con niveles superiores a 60 dBA durante el periodo diurno y 55 dBA durante el periodo nocturno. Estos umbrales, basados en los niveles sonoros muestreados durante las medidas de corta duración, superan en más de 5 dBA la influencia acústica de los aerogeneradores estimada *in situ* por los técnicos de campo y sirvió como criterio complementario de filtrado. En base a las recomendaciones de Fredianelli et al., 2012, aquellos intervalos que presentan alteraciones durante más del 50% de la duración total fueron descartados. De esta forma, se verifica adicionalmente que el criterio de diferencias L_{Aeq} y L_{90} es aplicado correctamente (Adcock et al., 2012).

En los ensayos de corta duración, con vistas a garantizar la idoneidad de los registros seleccionados y verificar que los niveles sonoros procedían del funcionamiento de los aerogeneradores, se correlacionaron los niveles de inmisión a nivel de fachadas de edificaciones con los niveles de emisión a nivel de pie de aerogenerador. En la Ilustración 35 se aprecia la correlación entre dichos niveles sonoros y la identificación de periodos de actividad y de ruido de fondo.

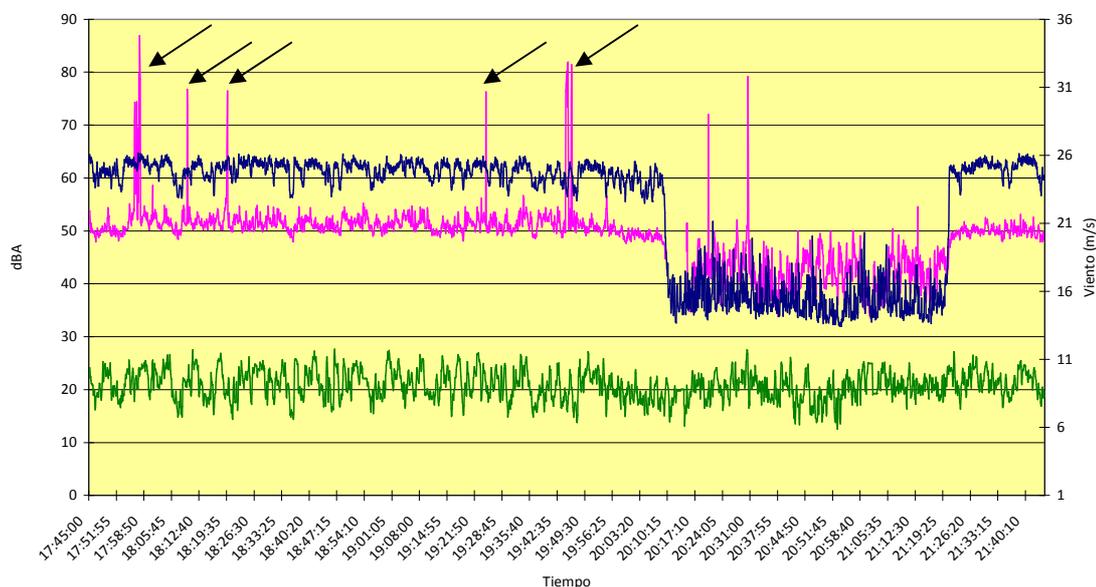


Ilustración 35. Ejemplo de sincronización entre los niveles sonoros a pie de aerogenerador (línea azul), a nivel de fachada (línea rosa) y velocidad de viento (línea verde) Nota: Las flechas negras marcan alteraciones sonoras en la fachada de las edificaciones que no están originadas por los aerogeneradores

Registros complementarios

El registro de la potencia generada por los aerogeneradores es importante ya que indica si la turbina estaba generando electricidad (en funcionamiento) y podría aportar información adicional sobre los siguientes aspectos:

- Correlación entre la producción eléctrica y los niveles sonoros, siendo recomendable seleccionar el aerogenerador con mayor aportación sobre los niveles globales del punto de medida valorado. Esta información será de especial utilidad para el análisis del impacto económico de estrategias de reducción de ruido y el cálculo del ratio “€/dBA atenuado”.
- Es un método alternativo para la determinación de la velocidad de viento a partir de la curva de potencia características de cada modelo de aerogenerador facilitado por el fabricante. Esta curva proporciona la relación entre la velocidad de viento a altura de buje y la potencia eléctrica neta que la turbina proporciona a la red, para una densidad de aire de 1.225 kg/m³.

La obtención de parámetros a la altura de buje como la velocidad de viento o la velocidad de rotación está empezando a ser empleados por diversos autores para correlacionar con mayor precisión la emisión de los aerogeneradores con el nivel de inmisión, reduciendo la influencia de la topografía o las variaciones en el perfil vertical de viento entre la fuente y el emisor (Van Den Berg, 2015; Fredianelli et al., 2012).

6.3 FASE III. CÁLCULO DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN SONORA

Los modelos de predicción sonora fueron desarrollados mediante software CadnaA de Datakustik (versión 4.5.151, 2015) que incorpora la implementación de las normas ISO9613-2:1996, CONCAWE, NORD2000 y CNOSSOS-EU.

El modelo digital del terreno fue obtenido a partir del modelo LiDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España, con un paso de malla de 5 metros. Esta resolución se considera adecuada conforme a la recomendaciones de algunos autores (Kaliski et al., 2014). La precisión de la topografía cobra especialmente importancia cuando el modelo emplea la altura media entre emisor y receptor para la integración de las correcciones planteadas por el IOA (Birchby et al., 2015).

La capa de edificaciones fue obtenida del producto BCN25[©] del Instituto Geográfico Nacional de España formada a partir de los ficheros digitales del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000. La altura de las edificaciones y su ubicación fue confirmada a través de las ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) más recientes disponibles y las observaciones *in situ* realizadas por los técnicos de campo.

Los aerogeneradores han sido representados mediante fuentes puntuales con una potencia acústica conforme a la emisión sonora facilitada por el fabricante acorde a la norma UNE-EN 61400-11:2004, implementada en forma de bandas de octava y a una altura relativa de 78 metros sobre el terreno.

En la Tabla 28 se muestra la configuración de cálculo general empleada para todos los escenarios calculados.

General	Error Máximo (dB)	0,00
	Radio máximo de búsqueda (m)	6.000
	Mínima distancia fuente-receptor (m)	0,00
Periodos de referencia	Periodo Día (min)	960
	Periodo Noche (min)	480
	Penalización (D/E/N) (dB)	0/0/0
Terreno	Modelo del terreno	Triangulación
	Altura estándar (m)	0.00
	Coefficientes barreras (C1/C2/C3)	3.0/20.0/0.0
	Límite atenuación barreras Dz (dB)	20/25
	Absorción del terreno G	Variable
Reflexiones	Número de reflexiones	6
	Radio de búsquedas de fuentes (m)	10
	Radio de búsquedas de receptores (m)	100
	Máxima distancia fuente-receptor (m)	2.000
	Mínima distancia fuente/receptor-reflector (m)	0.1
Industria	Difracción lateral	Algunos objetos
	Temperatura Día/Noche (°C)	10/7
	Humedad Día/Noche (%)	71/82
	Atenuación del terreno	Espectral

Tabla 28. Configuración general del software

Del análisis bibliográfico descrito en el apartado “Estado del arte”, se concluyen los siguientes parámetros claves que deben ser considerados en la implementación de los diferentes estándares de cálculo en los modelos de predicción sonora.

- La caracterización del terreno como completamente poroso parece inadecuada para la predicción sonora de parques eólicos por lo que se recomienda no emplear valores de $G=1$ para la aplicación de los diferentes modelos de predicción sonora en parques eólicos.
- Los valores de G entre 0 y 0.5 son internacionalmente reconocidos como más adecuados si bien algunos autores hace referencia a considerar diferentes atenuaciones del terreno en función de las características de impedancia reales del mismo para las regiones de la fuente, intermedia y del receptor. Esta aproximación es común a las recomendaciones y guías de buenas prácticas para la elaboración de mapas estratégicos de ruidos pero no existen referencias en este sentido en su aplicación a la predicción sonora de parques eólicos.
- La consideración de la topografía constituye un factor relevante a la hora de considerar la atenuación del terreno, siendo necesaria la incorporación de determinadas correcciones en aquellos casos en los que existen pendientes descendentes importantes desde el emisor al receptor o cuando los receptores se encuentren en un valle. En este sentido, el IOA establece una serie de recomendaciones en cuanto a dichas correcciones empleando un criterio basado

en la altura media (h_m) y limitando la atenuación por apantallamiento del terreno en base a criterios de visibilidad.

A continuación se describe la implementación de los tres parámetros de cálculo principales en el software empleado:

1. **Caracterización del parámetro de absorción del suelo:** Este parámetro puede ser modificado en el menú Configuración del programa CadnaA. Entre las diferentes opciones existe la posibilidad de implementar valores discretos del coeficiente de absorción para toda el área del modelo, o bien considerar un mapa de absorción de suelo, previamente definido por el usuario.

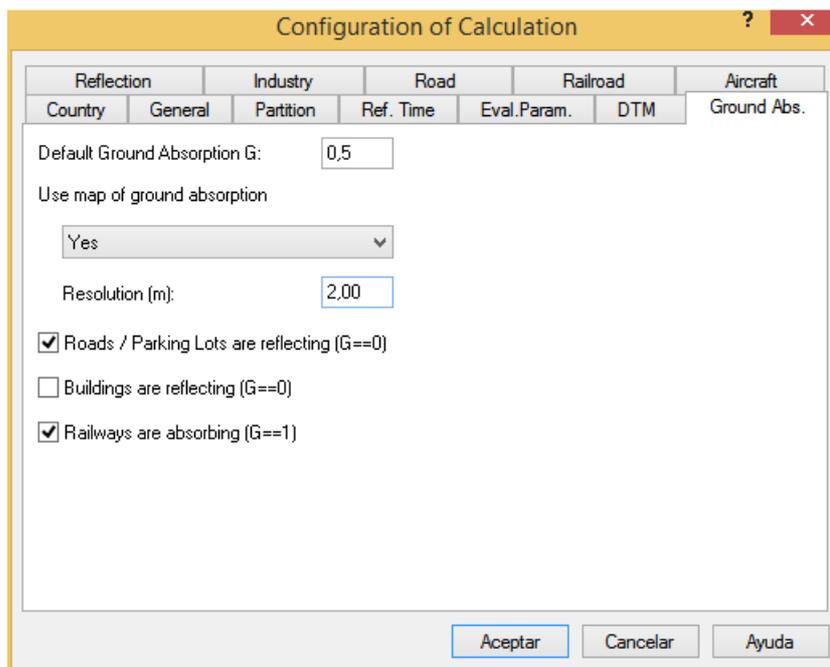


Ilustración 36. Configuración del coeficiente de absorción del suelo

Para la definición del mapa de absorción en función de los usos o coberturas de suelos se podrían emplear las correlaciones establecidas por diferentes recomendaciones a nivel europeo (European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise, 2007; R.Nota et als., 2005) así como las propias recomendaciones de los desarrolladores del software.

General Guidance from Software Developers		WG-AENv2		HARMONOISE/ IMAGINE	
Ground Cover Type	Absorption Coefficient	Land Use	Absorption Coefficient	Ground Cover Type	Absorption Coefficient
Pavement	0.0	Forest	1.0	Soft (Snow / Moss)	1.0
Packed Ground	0.1	Agriculture	1.0	Soft Forest Floor (dense heather or thick moss)	1.0
Water	0.0	Park	1.0	Non-compacted, loose ground (turf, grass, loose soil)	1.0
Forest Leaves	0.7 – 0.9	Heath Land	1.0	Normal non-compacted ground (forest floors, pasture fields)	1.0
Ploughed Field	0.7 – 0.9	Paving	0.0	Compacted field and gravel (compacted lawns, parks)	0.75
Lawn	0.6 – 0.8	Urban	0.0	Compacted dense ground (gravel road, parking lot)	0.3
Field Grass	0.6 – 0.8	Industrial	0.0	Hard surface (dense asphalt, concrete, water)	0.0
Fresh Snow	1.0	Water	0.0		
Crusted Snow or Ice	0.0	Residential	0.5		

Ilustración 37. Resumen de recomendaciones relevantes sobre coeficiente G (AMEC Environment & Infrastructure, 2012)

Otra opción sería emplear la base de datos *EAA CORINE Land Cover* (EAA, 2006) que permite identificar las diferentes coberturas del suelo mediante un inventario de 44 clases diferentes. La base de datos CLC es un producto vectorial de usos de suelos a escala europea obtenida a partir de imagen satélites (SPOT-4/5 and IRS P6 LISS III). Esta base de datos fue desarrollada con vistas a disponer de un inventario digital de coberturas de suelos y es empleado en numerosas políticas ambientales y diferentes estrategias de desarrollo regional.



Ilustración 38. Cobertura CORINE Land Cover en Europa (EAA, 2006)

El inventario CLC fue iniciado en el año 1985 y diferentes actualizaciones se han realizado en los años 2000 y 2006, encontrándose la última (2012) bajo realización pero sin cobertura para España en la actualidad. El inventario tiene una resolución de 100 metros con una Unidad Mínima de Mapeado (MMU) de 25 Ha. y una precisión geométrica inferior o igual a 50 m (EAA, 2006). Se ha optado por adoptar esta fuente (CLC 2006, última versión disponible) de acuerdo a las recomendaciones de Agencia de Protección Ambiental de Irlanda (Northern Ireland EPA, 2009) ya que fue testeada con importantes reducciones en los tiempos de cálculo, asegurando que la incertidumbre dentro de los resultados en los niveles de ruido estaba limitada a 2 dBA con un 95% de intervalo de confianza. Si bien esta estrategia fue definida para la elaboración de mapas estratégicos de ruidos (alcance y altura de las fuentes muy diferentes al estudio de parques eólicos), permite la categorización de la absorción acústica de forma más específica en la predicción en campo lejano atendiendo a la impedancia acústica real del terreno.

El grado de actualización (CLC 2006) no debe constituir un problema dado que mediante el análisis de las fotografías aéreas disponibles del área objeto de estudio, no ha habido cambios en los usos de suelos relevantes entre Abril de 2005 y Junio de 2011 salvo la propia instalación del Parque Eólico, siendo el año 2012 el año de realización de los ensayos acústicos.



Ilustración 39. Imagen satélite 2005 (izquierda) y 2011 (derecha) (Google Earth, 2015)

El coeficiente de absorción G fue establecido en base a las diferentes categorías de usos de suelo en CORINE, conforme a la correlación de la siguiente Ilustración, estableciéndose diferentes categorías entre las absorciones completamente reflexivas (áreas urbanas) y las completamente absorbentes (bosques densos).

CORINE Land Use Category	L_G (Ground Absorption Categories)
AgriculturalLandWithSignifAreasOfNaturaIVeg	0.9
Airports	0.4
BareRocks	0.1
BeachesDunesSands	0.5
BroadLeavedForest	1
ComplexCultivationPatterns	0.7
ConiferousForest	1
ConinuousUrbanFabric	0
DiscontinuousUrbanFabric	0.3
DumpSites	0.7
GreenUrbanAreas	0.7
IndustrialOrCommercialUnits	0.1
InlandMarshes	0.3
IntertidalFlats	0.5
MineralExtractionSites	0.4
MixedForest	1
MoorsAndHeathland	1
MotorwaysUnderConstruction	0
NaturalGrasslands	1
NonirrigatedArableLand	0.7
Pastures	0.7
PeatBogs	0.5
PortAreas	0.1
RoadandRailNetworks	0
SaltMarshes	0.7
SparselyVegetatedAreas	0.7
SportAndLeisureFacilities	0.7
TransitionalWoodlandShrub	1
WaterBodies	0.1
WaterCourses	0.1

Ilustración 40 . Correlación entre usos de suelos y coeficiente G (AMEC Environment & Infrastructure, 2012)

El área objeto de estudio se caracteriza el predominio de áreas agrícolas (cultivo extensivo de frutales y olivar) y áreas forestales seminaturales con un valor promedio de G de 0,71 para el área objeto de estudio (definido por el rectángulo de color rojo en la Ilustración 41). La información aportada por CLC2006 fue importada al software CadnaA como áreas de absorción empleando la extrapolación entre categorías y valores de G propuesta por EPA, 2012, empleando este mapa de absorción con una resolución de 2 metros para el cálculo de los niveles sonoros.

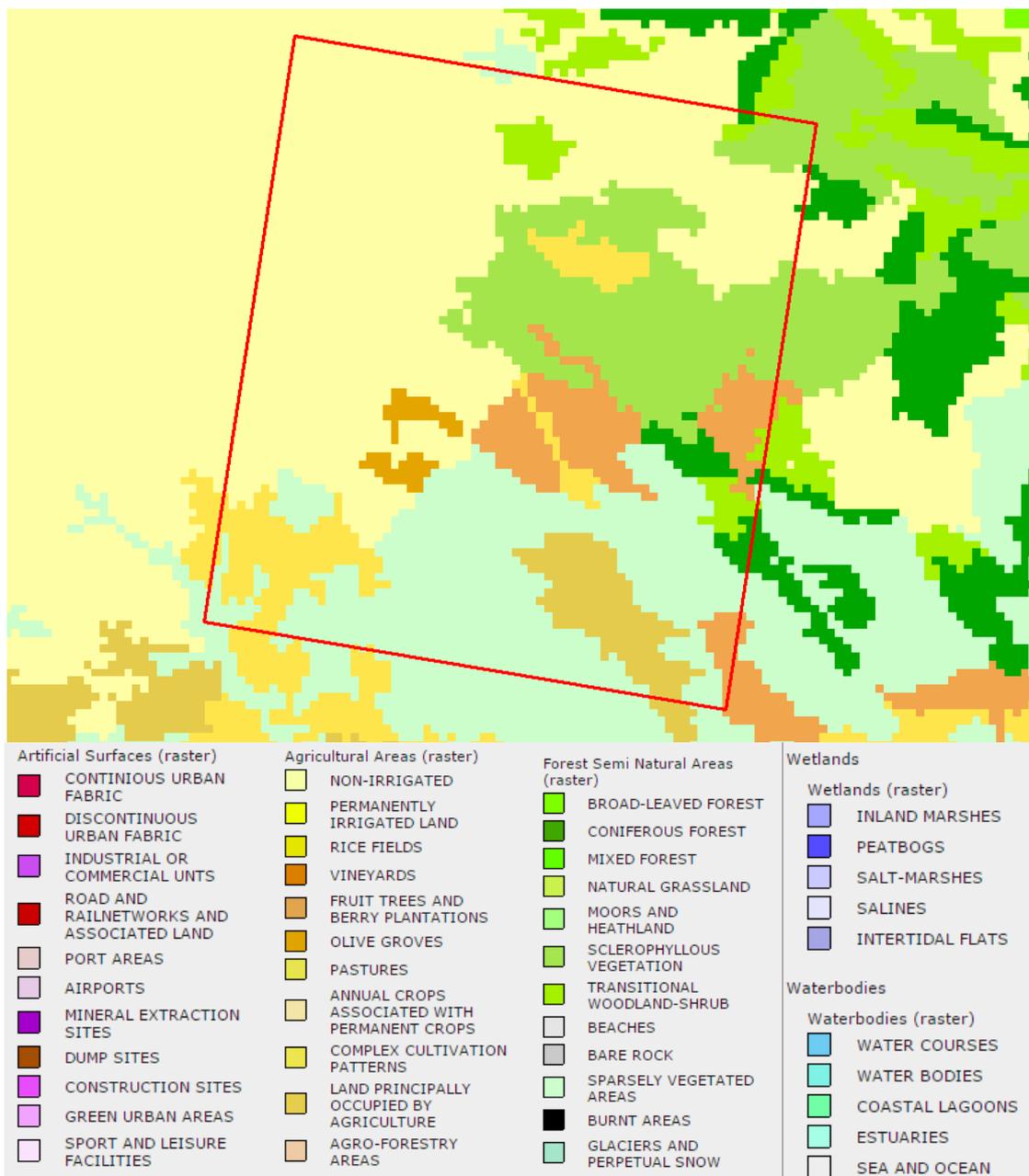


Ilustración 41 . CORINE Land Cover 2006 para el área objeto de estudio (EAA, 2006)

2. **Limitación del efecto de apantallamiento del terreno (A_{bar}):** De acuerdo con las recomendaciones de IOA (Institute of Acoustics, 2013) el efecto de apantallamiento del terreno (determinado por la ecuación 12 de ISO 9613-2) debería estar limitado a una reducción no superior a 2 dB y exclusivamente cuando no haya línea de visión directa entre el punto más alto de la turbina y el receptor. Si existiese un apantallamiento significativo procedente del terreno en las cercanías del receptor (talud pronunciado cerca de un edificio por ejemplo), mayores valores de atenuación podrían ser considerados (hasta -10 dB) pero tales correcciones deberían estar técnicamente justificadas. Dado que en nuestro caso de estudio no se dan tales circunstancias, se procesaron los protocolos de cálculo para limitar el valor de A_{bar} a un máximo de 2 dB cuando el aerogenerador no era visible desde el punto receptor. Para ello se aplicó el procedimiento descrito en la Ilustración 42.

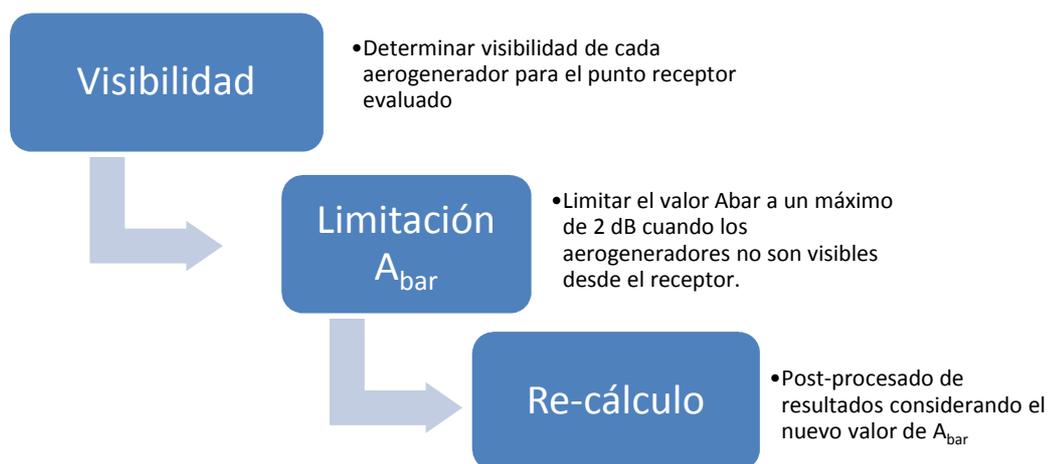


Ilustración 42 . Procedimiento para la limitación del apantallamiento del terreno

El procedimiento incluye la importación del protocolo de cálculo para su procesamiento mediante una hoja de cálculo externa al programa (ya que no es posible su implementación en el propio software) y la determinación de la visibilidad de los aerogeneradores para cada uno de los receptores en base al modelo topográfico tridimensional, empleando una variable específica del software CadnaA (PO_UNDRGND) que permite identificar cuando la línea que une emisor-receptor se encuentra por debajo del terreno.

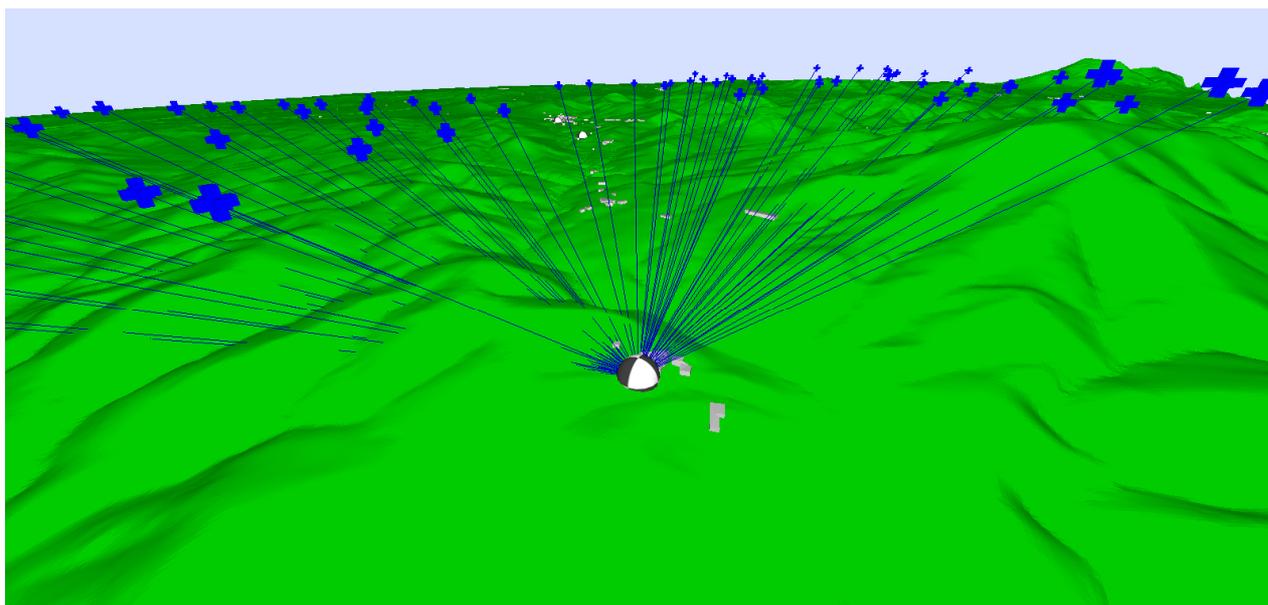


Ilustración 43 . Ejemplo gráfico de determinación de visibilidad para un punto receptor

3. **Corrección por efecto de múltiples reflexiones en valles:** De acuerdo con las recomendaciones de IOA, una corrección de 3 dBA cuando $G=0,5$ (1,5 dBA cuando $G=0$) debe ser aplicada al valor global obtenido en dBA cuando la propagación se produce a través de un valle, esto es, existe un perfil topográfico cóncavo o el terreno descendiendo significativamente desde el aerogenerador hacia el receptor. El criterio de aplicación viene dado por la altura media h_m (Figura 3 ISO9613-2) y las altura de la fuente h_s y receptor h_r [$h_m \geq 1.5 \times (\text{abs}(h_s - h_r) / 2)$]. La aplicación de esta corrección se explica por la reducción de la atenuación del suelo y el potencial incremento en las reflexiones que se puede producir y que están soportadas por recientes estudios (Bullmore et al., 2009).

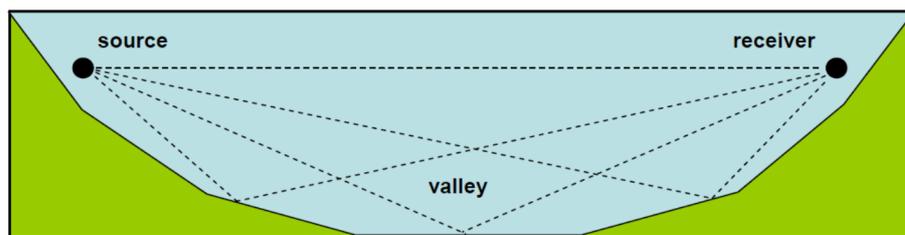


Ilustración 44. Diagrama esquemático de las múltiples vías de reflexión a través de un perfil de terreno cóncavo y correcciones aplicables (Institute of Acoustics, 2013)

La aplicación de esta corrección no se puede realizar de forma directa en el software de predicción por lo que fue necesaria la edición de los protocolos de cálculo proporcionados por el programa y su postprocesado posterior en una hoja de cálculo independiente, tal y como se especifica en el siguiente diagrama.

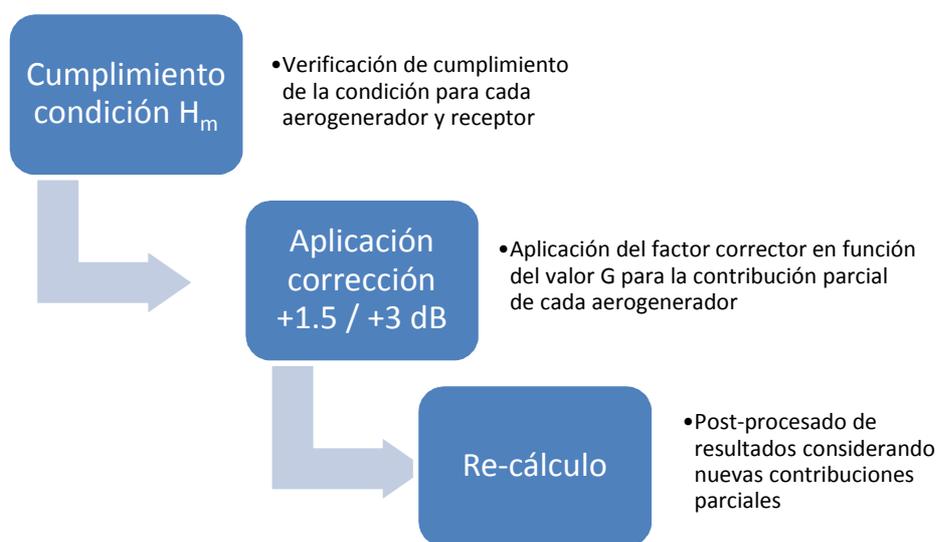


Ilustración 45. Procedimiento para la aplicación de correcciones por terreno cóncavo

A continuación se identifican aquellos aerogeneradores que cumplen con la cláusula del IOA para la aplicación de reflexiones múltiples en función de la topografía existente entre emisor y receptor y a la altura media calculada según cada norma de cálculo.

Punto de medida	Número de aerogeneradores que cumplen cláusula de altura media		
	ISO9613/CONCAWE	NORD2000	CNOSSOS
Punto de medida 1	3	3	3
Punto de medida 2	1	2	2

Tabla 29. Aerogeneradores que cumplen los requisitos para la consideración de correcciones IOA por reflexiones múltiples

En base a estas conclusiones, se definen las siguientes variantes de cálculo (Tabla 30) para la aplicación de la norma ISO 9613-2 en el caso objeto de estudio, en base a los parámetros de cálculo más importantes identificados en el análisis de la norma y de las diferentes referencias bibliográficas consultadas.

Variante	Absorción del terreno Valor de G	Limitación Abar ≤2	Corrección topografía hm
ISO9613-2	0/0.5/CORINE	SÍ	SÍ
CONCAWE	0/CORINE	SÍ	SÍ
NORD2000	0/0.5/CORINE	NO*	SÍ
CNOSSOS-EU	0/0.5/CORINE	NO*	SÍ

Tabla 30. Definición de escenarios para cada estándar de cálculo

* La limitación de la atenuación por apantallamiento en función de la visibilidad ha sido excluida en los modelos que consideran la refracción de las ondas sonoras ya que la consideración de rayos curvos no permite invalidar los criterios de visibilidad establecidos por el IOA.

A continuación se resumen las principales características de los estándares de cálculo empleados, en particular en relación con la atenuación debida a la absorción del terreno y su implementación en el software de predicción.

Norma ISO 9613-2:1996 Atenuación del Ruido en Propagación de Exteriores.

El método desarrollado por la ISO9613 consiste específicamente en un algoritmo de bandas de octava (63 Hz-8 kHz) para el cálculo del ruido que se origina desde una fuente puntual que puede ser móvil o estática. El modelo introduce factores de corrección específicos para la divergencia geométrica, la absorción acústica, el efecto del suelo, la reflexión sobre superficies y el apantallamiento de obstáculos, así como información adicional sobre la influencia de otros factores (como la atenuación a través de áreas edificadas, follaje o plantas industriales) que serán descartados en el presente estudio, dada las características del ámbito de estudio, aunque puede ser de interés para otros parques eólicos.

El nivel continuo equivalente en un determinado receptor bajo condiciones favorables de propagación $L_{FT}(DW)$ puede ser calculado para cada fuente puntual y su fuente imagen y para cada banda de octava desde 63 Hz hasta 8 kHz mediante la siguiente ecuación:

$$L_{fT}(DW) = L_w + D_c - A$$

Donde

- L_w es la potencia sonora en bandas de octava en decibelios producida por la fuente puntual.
- D_c es la corrección por directividad, en decibelios, que describe como se desvía la fuente puntual en una dirección específica de los niveles emitidos por una fuente omnidireccional con el mismo nivel de potencia sonora. Para una fuente puntual omnidireccional radiando en campo libre, $D_c = 0$ dB.
- A es la atenuación en bandas de octava, en decibelios, que ocurre durante la propagación del ruido desde el emisor hasta el receptor. Esta atenuación viene dada por la siguiente ecuación.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$$

Donde

- A_{div} es la atenuación debido a la divergencia geométrica;

- A_{atm} es la atenuación debido a la absorción atmosférica;
- A_{gr} es la atenuación debido al efecto del suelo;
- A_{bar} es la atenuación debido a la atenuación de las barreras;
- A_{misc} es la atenuación debido a otros efectos (follaje, áreas edificadas y plantas industriales) que como se comentó con anterioridad serán excluidos en nuestro modelo de cálculo.

El nivel continuo equivalente ponderado A bajo condiciones favorables de propagación es obtenido mediante la suma de la contribución obtenida por las anteriores ecuaciones para cada fuente puntual, para cada fuente imagen y para cada banda de octava.

$$L_{AT}(DW) = 10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^8 10^{0,1[L_{fr}(ij)+A_f(j)]} \right] \right\} dB$$

Donde

- n es el número de contribuciones i (fuentes y vías de propagación);
- j es un índice indicando las frecuencias centrales de bandas de octava desde 63 Hz hasta 8 kHz;
- A_f denota el filtro de ponderación A estándar conforme IEC651;

Para el cálculo del promedio temporal a largo plazo $L_{AT}(LT)$ se emplea un factor de corrección meteorológica denominado C_{met} conforme a la siguiente ecuación:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met}$$

Dado que en el presente estudio, los niveles obtenidos en la predicción sonora serán comparados con los registros sonoros obtenidos bajo condiciones favorables de propagación, se evaluarán las predicciones bajo condiciones favorables de propagación o, lo que es lo mismo, se considerará un factor de corrección meteorológica nulo (100% de condiciones favorables de propagación).

A continuación se describe aquellos parámetros más relevantes en relación con el caso de estudio:

1. Atenuación atmosférica (A_{atm}): Referida a la atenuación debida a la absorción atmosférica durante la propagación a través de una distancia d , en metros, es dada en decibelios por la siguiente ecuación:

$$A_{atm} = [\alpha d / 1000] dB$$

Donde

- α es el coeficiente de absorción atmosférica, en decibelios por kilómetro, para cada banda de octava en las frecuencias centrales.

Los valores de atenuación atmosférica vienen dados por la norma ISO 9613-1:1993 y dependen en gran medida de la frecuencia del sonido, de la temperatura y humedad relativa y en menor medida, de la presión atmosférica. De acuerdo a las recomendaciones de la norma, el coeficiente de absorción atmosférica deben estar basado en los valores promedios del clima relevante de la localidad de estudio. Dado que en el presente estudio el objetivo es realizar una comparación entre niveles predictivos y ensayos acústicos, con vistas a representar fidedignamente

las condiciones existentes durante la campaña de ensayos, se considerarán las temperaturas y humedades exteriores registradas por las estaciones meteorológicas instaladas.

En base a los datos obtenidos, se han ajustado los valores de absorción acústica de la atmosfera conforme a la norma ISO9613-1:1993, aplicándose los siguientes coeficientes en función de los valores promedios de temperatura y humedad relativa para los periodos diurnos y nocturnos.

Periodo	Temperatura	Humedad	Coeficiente de absorción atmosférica α (dB/km)								
			31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Diurno	10°C	71%	0,03	0,12	0,41	1,04	1,94	3,64	9,56	32,30	115,36
Noche	7°C	82%	0,03	0,12	0,38	0,96	1,75	3,43	9,42	32,42	115,36

Tabla 31. Coeficientes de absorción atmosféricas aplicables al área de estudio durante los ensayos acústicos (Elaboración propia)

2. Atenuación del suelo (A_{gr}): La atenuación del suelo es principalmente el resultado de la reflexión del sonido a través de la superficie del suelo que interfiere directamente con la vía de propagación directa entre fuente y receptor. La curva de propagación bajo condiciones favorables permiten asegurar que esta atenuación es determinada principalmente por las superficies cercanas a la fuente y el receptor. Este método de cálculo del efecto del suelo es aplicable únicamente a terrenos llanos, casi horizontales o con una pendiente constante. Tres regiones desde el punto de vista de la atenuación acústica pueden ser identificados conforme a la siguiente figura:

- a. Región de la fuente, definida por una distancia de la fuente de 30 veces la altura del emisor h_s en dirección al receptor, con una distancia máxima d_p (distancia proyectada en el plano entre emisor y receptor).
- b. Región del receptor, definida por una distancia del receptor de 30 veces la altura del receptor h_r en dirección a la fuente, con una distancia máxima d_p .
- c. Región media, definida por la distancia entre la región de la fuente y del receptor. No existe cuando existe solape entre dichas regiones ($d_p < [30h_s + 30h_r]$)

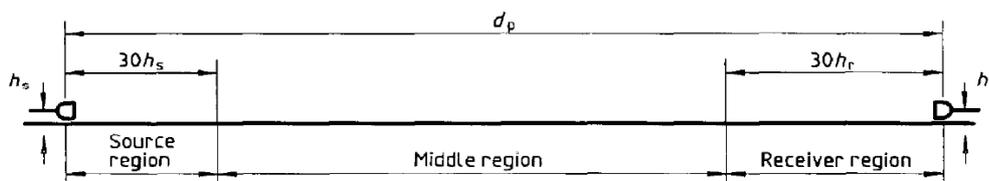


Ilustración 46. Distinción de las tres regiones para la determinación de la atenuación del suelo (ISO, 1996)

Bajo este esquema, la atenuación del suelo no incrementa con el tamaño de la región media sino que es mayoritariamente dependiente de las propiedades de las regiones de la fuente y el receptor. En el caso de los aerogeneradores, la región de la fuente es dominante en la mayoría de casos ya que para una altura estándar de buje (78 metros, por ejemplo), la región de la fuente abarcaría más de dos kilómetros de distancia mientras que la región del receptor apenas 450 metros (altura del receptor 1,5 metros), no existiendo en la mayoría de situaciones región media.

Las características acústicas de cada región son tenidas en cuenta a través de un factor G, que presenta tres categorías de reflexividad:

- a. Suelo duro (G=0) que incluye pavimentos, agua, hielo y hormigón y todas aquellas superficies con baja porosidad.
- b. Suelo poroso (G=1) que incluye suelos vegetados con hierba, árboles u otros tipos de vegetación y otras terrenos agrícolas.
- c. Suelos mixtos (0<G<1), cuando los terrenos presentan tanto superficies porosas como duras, el valor de g dependerá de la fracción porosa del mismo.

Para calcular la atenuación acústica de una específica banda de octava, primeramente se calcula la componente de atenuación A_s , A_r y A_m para la región fuente, receptor y media respectivamente atendiendo a su absorción acústica G_s , G_r y G_m , conforme a las siguientes ecuaciones:

Nominal midband frequency Hz	A_s or A_r ¹⁾ dB	A_m dB
63	- 1,5	- 3q ²⁾
125	- 1,5 + G × a'(h)	- 3q(1 - G _m)
250	- 1,5 + G × b'(h)	
500	- 1,5 + G × c'(h)	
1 000	- 1,5 + G × d'(h)	
2 000	- 1,5(1 - G)	
4 000	- 1,5(1 - G)	
8 000	- 1,5(1 - G)	
<p>NOTES</p> <p>$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2})$</p> <p>$b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$</p> <p>$c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$</p> <p>$d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$</p> <p>1) For calculating A_s, take $G = G_s$ and $h = h_s$. For calculating A_r, take $G = G_r$ and $h = h_r$. See 7.3.1 for values of G for various ground surfaces.</p> <p>2) $q = 0$ when $d_p \leq 30(h_s + h_r)$</p> <p>$q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}$ when $d_p > 30(h_s + h_r)$</p> <p>where d_p is the source-to-receiver distance, in metres, projected onto the ground planes.</p>		

Ilustración 47. Expresiones para el cálculo de la atenuación del suelo en bandas de octava (ISO, 1996)

Posteriormente se suman para obtener la atenuación del suelo en la banda de octava estudiada.

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m$$

Identificación de los parámetros de cálculo

A continuación se describe la implementación de los principales parámetros de cálculo principales en el software empleado:

1. Caracterización del parámetro de absorción del suelo: La absorción del terreno se ha modificado, empleando para ello los valores de G 0, 0,5 y valor asociado a los usos según CLC.

2. Limitación del efecto de apantallamiento del terreno (A_{bar}) y Corrección por efecto de múltiples reflexiones en valles: Ambos factores se aplicarán de acuerdo con las recomendaciones de IOA (IOA, 2013) como se describió previamente para la norma ISO9613-2. En el caso de correcciones por múltiples reflexiones, los factores de corrección de 1,5 dB para suelos duros y 3 dBA para suelos mixtos se consideraron adecuados puesto que están en línea con las recomendaciones de la norma.

Por defecto, los cálculos de acuerdo con la norma ISO9613-2 cubre el rango de frecuencias de 63 a 8000 Hz mientras que el programa de cálculo CadnaA ofrece resultados de la banda de octava de 31,5 Hz adicionalmente. Para la predicción de esta banda de octava, se aplican las siguientes reglas:

- Absorción atmosférica A_{atm} obtenidas a partir de las ecuaciones de cálculo de la norma ISO 9613-1.
- Atenuación del terreno A_{gr} calculadas con las ecuaciones correspondientes a la banda de octava de 63 Hz (aplicables también para atenuación debido a la vegetación y a las áreas edificadas).
- Atenuación de la barrera (D_z) calculada del mismo modo que para el resto de bandas de frecuencias.
- Reflexiones: Los requisitos para la consideración de las reflexiones se aplican de igual forma considerando la longitud de onda de la banda de 31,5 Hz.

Método CONCAWE. Propagación del Ruido desde Complejos Petroleros y Petroquímicos a las Comunidades Vecinas

De forma simplificada, el modelo define que el nivel de presión sonora en un punto remoto (L_p) puede ser relacionado con la potencia acústica de la fuente de la siguiente manera:

$$L_p = L_w + D - \sum k$$

Donde

- L_w es la potencia sonora en decibelios producida por la fuente puntual.
- D_c es el índice de directividad de la fuente en dB.
- $\sum k$ es la suma de las pérdida por atenuación mediante los principales mecanismos:
 - K_1 es la atenuación debido a la divergencia geométrica;
 - K_2 es la atenuación debido a la absorción atmosférica;
 - K_3 es la atenuación debido al efecto del suelo;
 - K_4 es la atenuación debido a efectos meteorológicos;
 - K_5 es la atenuación debido al efecto de la altura de la fuente;
 - K_6 es la atenuación debido a las barreras;
 - K_7 es la atenuación por apantallamiento en el interior de la planta (con nula aplicabilidad en el caso de parques eólicos).

Con vistas a realizar un análisis comparativo entre la norma de referencia y el modelo CONCAWE, se ha realizado la siguiente tabla atendiendo a los aspectos fundamentales de los diferentes modelos de predicción sonora.

Efectos de propagación	ISO9613-2	CONCAWE
Calculo Niveles Ponderado A	Sí	Sí
Cálculo espectral	Bandas de octava 63 Hz a 8Khz (extendido en CadnaA hasta 31,5 Hz)	Bandas de octava 63 Hz a 8Khz (extendido en CadnaA hasta 31,5 Hz)
Atenuación geométrica	Esférica ($4\pi r^2$)	Esférica ($4\pi r^2$)
Atenuación absorción atmosférica	Basada en absorción atmosférica ISO9613-1	Tabla con datos de absorción atmosférica
Reflexiones del terreno	Algoritmo que incluye la corrección por absorción del terreno. No usa fuentes imágenes.	Algoritmo específico. No usa fuentes imágenes.
Reflexiones de obstáculos	Fuentes imágenes sin limitaciones en el número máximo de obstáculos. La condición para la reflexión considera el tamaño de la fuente en relación con la longitud de onda. La potencia acústica de la fuente imagen incluye la pérdida por absorción del reflector.	Igual ISO 9613
Atenuación del suelo	Método general espectral aplicable con terrenos aproximadamente llanos o con pendientes constantes. Método alternativo para valores ponderado A.	Corrección -3 dB para todas las bandas de octava cuando G=0. Aplica método espectral en bandas de octava 63 Hz a 8Khz (extendido en CadnaA hasta 31,5 Hz) para suelos mixtos en base a tabla específica de atenuación.
Atenuación debido a apantallamiento	Para difracción simple y doble basada en la diferencia entre la vía directa de propagación y a través del obstáculo.	Emplea el número de Fresnel basándose en la diferencia entre las vías de propagación.
Difracción lateral	Consideración de dos rayos laterales por difracción en los bordes verticales del obstáculo incluyendo la atenuación del suelo.	No disponible
Múltiples obstáculos en la vía de propagación	Método específico de CadnaA "ribbon band method" para el cálculo de la diferencia entre las vías de propagación	Método específico de CadnaA "ribbon band method" para el cálculo de la diferencia entre las vías de propagación
Efecto meteorología	Calculado en base a factor C_0	Categorías meteorológicas específicas basadas en estabilidad atmosférica, velocidad de viento y dirección.
Áreas de absorción de suelo	Procedimiento dependiente de la frecuencia, aplicando tres regiones (emisor, receptor e intermedia) basado en altura de la fuente, del emisor y la distancia.	No consideradas

Tabla 32. Comparativa entre norma ISO9613-2 y modelo CONCAWE (Datakustik GmbH, 2015)

Nos centraremos pues en aquellos factores de atenuación que introduce CONCAWE respecto a la norma de referencia (ISO 9613) y que justifican su empleo para la predicción de ruidos en parques eólicos:

- Atenuación debida a la absorción atmosférica (K_2): La absorción del sonido se realiza siguiendo las recomendaciones de American National Estándar. Esta referencia establece diferentes valores

de absorción de atmosférica para diferentes temperatura y humedad relativa del ambiente pero su implementación en el software impide la aplicación de valores específicos de temperatura y humedad para los periodos diurno y nocturno respectivamente como era posible con la norma ISO 9613. Por esta razón, se ha procedido considerar aquellos valores más cercanos para el periodo día (10°C y 70% de humedad relativa) y noche (5°C y 80% de humedad relativa).

- Atenuación debida al efecto del suelo (K_3): Se hacen dos correcciones debido a la influencia del suelo. Para superficies acústicamente duras ($G=0$), la corrección es simplemente -3 dBA para todas las bandas de frecuencias y distancias, lo cual provee una radiación semiesférica de la fuente. Para situaciones más complejas con suelos mixtos (básicamente $G \neq 0$ de acuerdo con la implementación en CadnaA), una relación empírica fue establecida entre atenuación del suelo, frecuencia y distancia (Ilustración 48). Las curvas de atenuación del suelo con la distancia para cada banda de octava en el rango 63 Hz- 4kHz fue establecido en base a los análisis experimentales de Parkin y Scholes, 1964, 1965.

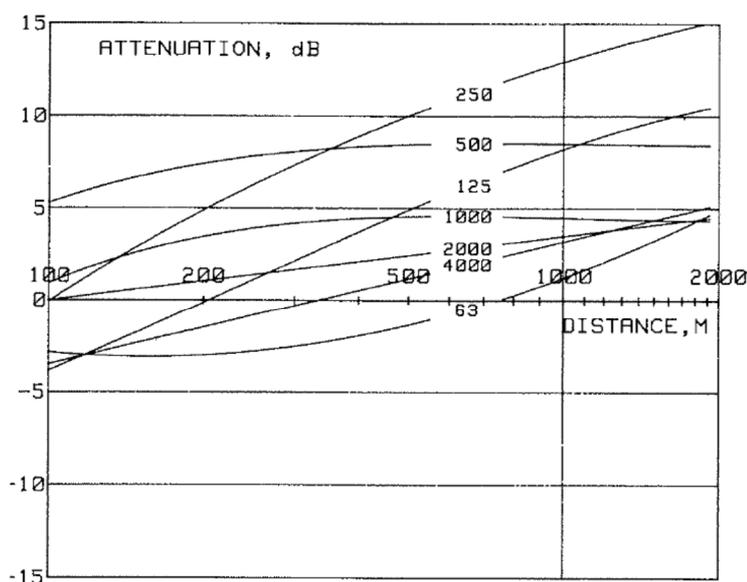


Ilustración 48. Valores de atenuación del suelo (Manning, 1981)

- Atenuación debida a efectos meteorológicos (K_4): La refracción del sonido por la velocidad de viento y el gradiente de temperatura tiene un importante efecto en los niveles de presión sonora en el receptor. Dada la gran variación de las condiciones meteorológicas, es necesario el desarrollo de una técnica de ingeniería para simplificar estos efectos. Las referencias empleadas por el método CONCAWE en este sentido (Parkin y Scholes, 1964, 1965) muestran que diferentes categorías meteorológicas deberían definirse basándose en los dos parámetros citados: velocidad de viento y gradiente de temperatura. Las curvas de corrección proporcionan un valor de K_4 obtenido por comparación de los datos registrados durante condiciones meteorológicas neutras (definido por un valor nulo del vector viento y el gradiente de temperatura) con otras categorías meteorológicas. Para superficies acústicamente duras, una relación simple de $K_4=3$ dB fue establecida para condiciones favorables de propagación.

Con posterioridad, el modelo fue mejorado desarrollando diferentes categorías meteorológicas que permitiesen el cálculo del factor K_4 para terrenos con diferente impedancia acústica. La evaluación del gradiente de temperatura atmosférica se realiza mediante las categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill (Pasquill, 1983). Estas categorías definen el estado de la atmósfera baja en términos de viento, cobertura de nubes y radiación solar y permiten una

estimación del gradiente de temperatura. Las categorías definidas por Pasquill, que habitualmente se empleaban para medir la dispersión de materiales por vía aérea se especifican en la siguiente tabla:

Wind Speed * m/s	Day Time, Incoming Solar Radiation (mW/cm ²)				1 hour before Sunset or after Sunrise	Night-Time, Cloud Cover (octas)		
	> 60	30-60	< 30	Overcast		0-3	4-7	8
≤1.5	A	A-B	B	C	D	F or G**	F	D
2.0 - 2.5	A-B	B	C	C	D	F	E	D
3.0 - 4.5	B	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

Notes:

*: wind speed is measured to the nearest 0.5 m/s

** : category G is restricted to night-time with less than 1 octa of cloud and a wind speed of less than 0.5 m/s

Ilustración 49 . Clases de estabilidad atmosférica según Pasquill (Manning, 1981)

Partiendo de las categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill y de la velocidad de viento, el modelo define seis categorías de estabilidad atmosféricas, cuya atenuación se describe en la siguiente tabla y donde la categoría 4 representa el estado atmosférico con influencia nula en la propagación.

↓ decreasing attenuation	Meteorological Category	Pasquill Stability Category		
		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		-	$v > +3.0$	$+0.5 < v < +3.0$

Notes:

*: category with assumed zero meteorological influence

Ilustración 50 . Clases de categorías meteorológicas (Manning, 1981)

La atenuación según distancia debido a efectos meteorológicos de acuerdo a las seis categorías definidas, se especifica en la norma en función de las bandas de octava y la distancia al emisor.

- Atenuación debida a la altura de la fuente (K₅): Diferentes referencias (Pierce et al., 1977; Scholes y Parkin, 1967) han demostrado que el efecto del suelo conforme se ha definido anteriormente es modificado en función del ángulo de incidencia del rayo reflejado sobre el suelo recibido en el receptor, por la distancia de separación y por la propia altura de receptor y emisor. Esto puede ser especialmente importante cerca del foco ruidoso cuando éstas presentan gran altura (como es el caso de los aerogeneradores). De acuerdo a Piercy et al., el efecto del suelo decrece

exponencialmente con el incremento del ángulo de incidencia desde 0° hasta 5 ° cuando tiende a cero.

La reducción en la atenuación debido a la altura de la fuente, cuando ésta es mayor de 2 metros, puede ser obtenida de la siguiente expresión:

- Cuando $K_3+K_4>-3$, $K_5 = (K_3 + K_4 + 3)(\gamma - 1)$
- Cuando $K_3+K_4\leq-3$, $K_5 = 0$

γ es obtenido de la Gráfica 51 como una función del ángulo de incidencia φ donde $\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{h_s+h_r}{d} \right]$ siendo h_s y h_r la altura de la fuente y receptor respectivamente y d la distancia entre ellos.

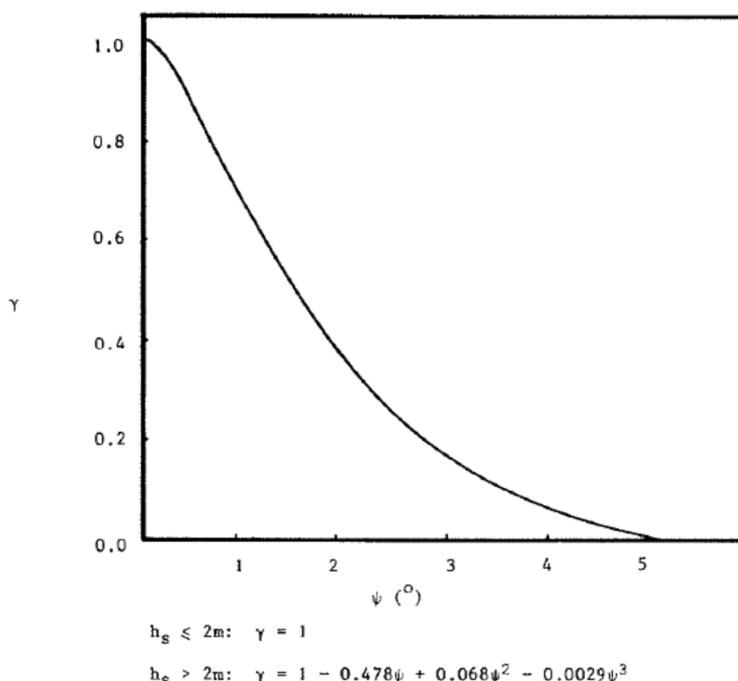


Ilustración 51. Función γ para diferentes valores del ángulo de incidencia, usado en la determinación de la reducción de atenuación debido a la altura de la fuente (Manning, 1981)

El modelo ha sido validado para altura de receptores de 1,2 metros, pudiendo emplearse la citada fórmula para el cálculo a diferentes elevaciones. Cuando la propagación se produce hacia un receptor ubicado en la ladera de una montaña o en un valle, la norma recomienda que el valor de K_5 debería ser reducido hasta 3 dB para tener en cuenta las múltiples reflexiones con las laderas.

A continuación se detallan algunos aspectos de la implementación de la norma en el software CadnaA:

- Para el cálculo del término K_3 dos situaciones pueden ser representadas. La primera de ellas es suelo duro $G=0$ que conlleva la aplicación de un valor K_3 de -3 dB mientras que la segunda opción es la consideración de un suelo absorbente cuando $G>0$. En este caso, la atenuación resultante está basado en la longitud del rayo pasando a través del terreno absorbente.
- Aunque la especificación del Anexo II de CONCAWE, establece que no es posible emplear las curvas de atenuación para distancia por debajo de 100 metros, CadnaA interpola el valor K_3 hasta 0 dB desde 100 metros hasta la localización de la fuente.

- La función γ usando el ángulo de incidencia φ está limitado a valores superiores o iguales a 0 (no existiendo valores negativos para γ). CadnaA asume para estos casos, el valor nulo de γ dado que es asintomático y no hay ninguna especificación al respecto.
- CadnaA no aplica el recálculo del término K5 (sección 2.7) basado en la altura de la barrera y de la distancia respecto al receptor debido a que produciría “saltos” en los niveles sonoros. Este aspecto no es relevante en los casos objeto de estudio debido a la disposición de los obstáculos en el entorno de los receptores.
- Dado que el modelo CONCAWE no especifica claramente si la distancia d es calculada en 2 o 3 dimensiones, el criterio empleado por CadnaA es el siguiente:
 - El término de atenuación K1 es calculado basado en distancia 3D.
 - El término de atenuación K4 es basado en distancia 2D.
 - El término de atenuación K5 es basado en distancia 2D.
- CONCAWE no especifica los datos de viento que deben ser especificado (valores medios, valores pico, etc...) ni la altura a la que debe ser evaluado. Dado que la altura de evaluación más común de establecida por la norma IEC61400 parte 11 y 14 es 10 metros, esta altura fue tomada de referencia para la consideración de los parámetros meteorológicos y para la verificación de los modelos de cálculo.

Identificación de los parámetros de cálculo

A continuación se describe la implementación de los principales parámetros de cálculo principales en el software empleado:

1. Caracterización del parámetro de absorción del suelo: La absorción del terreno se ha modificado mediante el mismo procedimiento descrito para la Norma ISO 9613-2, empleando para ello los valores de G 0 y 0,5.
2. Limitación del efecto de apantallamiento del terreno (A_{bar}) y Corrección por efecto de múltiples reflexiones en valles: Ambos factores se aplicarán de acuerdo con las recomendaciones de IOA (IOA, 2013) como se describió previamente para la norma ISO9613-2. En el caso de correcciones por múltiples reflexiones, los factores de corrección de 1,5 dB para suelos duros y 3 dBA para suelos mixtos se consideraron adecuados puesto que están en línea con las recomendaciones de la norma.
3. Categorización meteorológica: La caracterización meteorológica se ha realizado conforme a los bins de viento analizados, considerando la altura de medida de 10 metros y los datos de irradiancia solar promedios (DNI , *Direct Normal Irradiance*) para los periodos de medida, obtenidos en las bases de datos públicas (JRC, 2014).

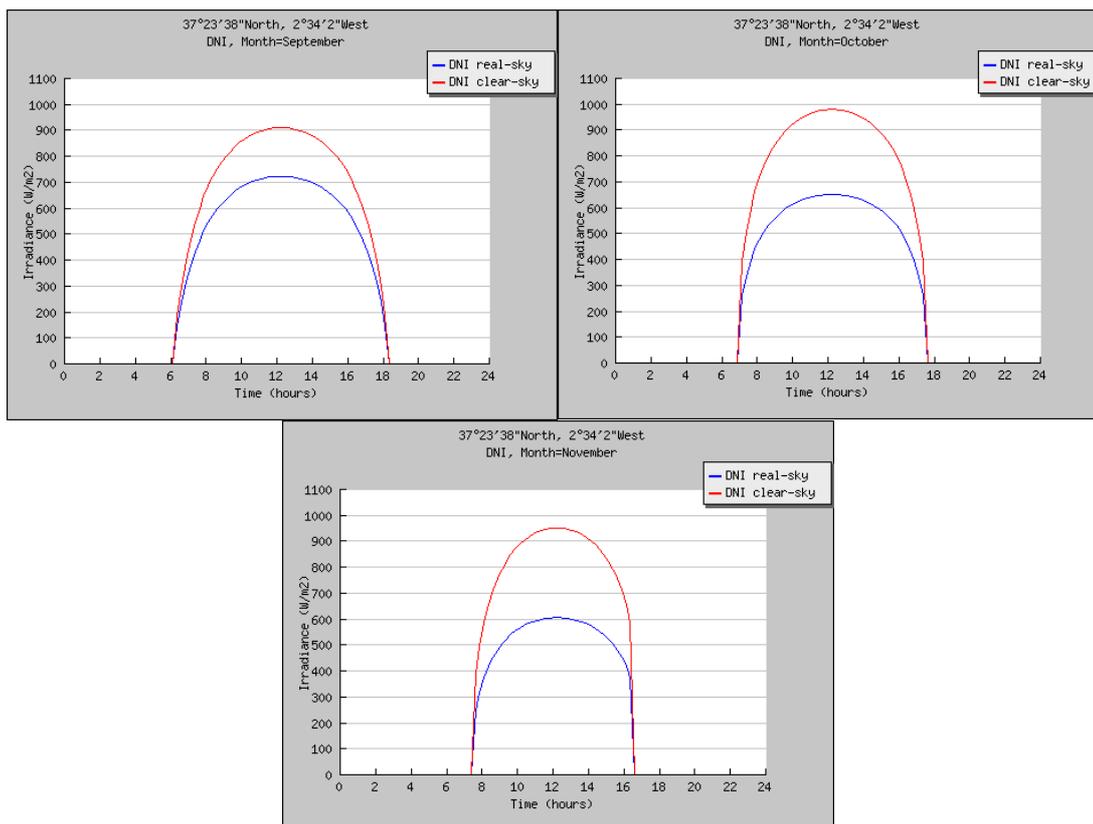


Ilustración 52. Datos promedio de irradiancia para los meses de medida en la zona objeto de estudio (JRC, 2014)

Tomando como bases estos datos y en base a las categorías de estabilidad atmosférica, se obtienen las siguientes categorías meteorológicas de propagación para los periodos diurnos y nocturnos. Cabe destacar que durante el periodo nocturno, la cobertura de nubes tiene una influencia prácticamente nula en la determinación de estas categorías para velocidades de viento superiores a 3 m/s.

Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Irradiancia (mW/cm2)	48,2							
Categorías Estabilidad Atmosférica Pasquill	C	C-D	D	D	D	D	D	D
Categorías Meteorológicas	5	6	6	6	6	6	6	6

Ilustración 53. Categorización meteorológica durante el periodo día/tarde

Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Cobertura de nubes	No relevante para velocidades superiores a 3 m/s							
Categorías Estabilidad Atmosférica Pasquill	D	D	D	D	D	D	D	D
Categorías Meteorológicas	6	6	6	6	6	6	6	6

Ilustración 54. Categorización meteorológica durante el periodo noche

La implementación de estos parámetros se hace directamente en el menú de *Configuración>Industria* del software, indicando para cada escenario de simulación, la velocidad de viento a 10 metros de altura, la dirección de viento y la categoría de estabilidad de Pasquill, calculando automáticamente el software la categoría meteorológica de propagación correspondiente. Dado que el software no permite la diferenciación de parámetros para diferentes puntos de medida, se realizaron cálculos independientes para cada punto de medida, incorporando las direcciones de viento promedios (en grados) en base a los datos meteorológicos existentes en el aerogenerador con mayor aportación durante la campaña de ensayos:

Punto de medida	Dirección de viento promedio (°)	
	Periodo día/tarde	Periodo Noche
Punto de medida 1	291,3°	293,8°
Punto de medida 2	299°	298.3°

Ilustración 55. Dirección de viento promedio para cada punto de medida (Fte: Cliente, 2012)

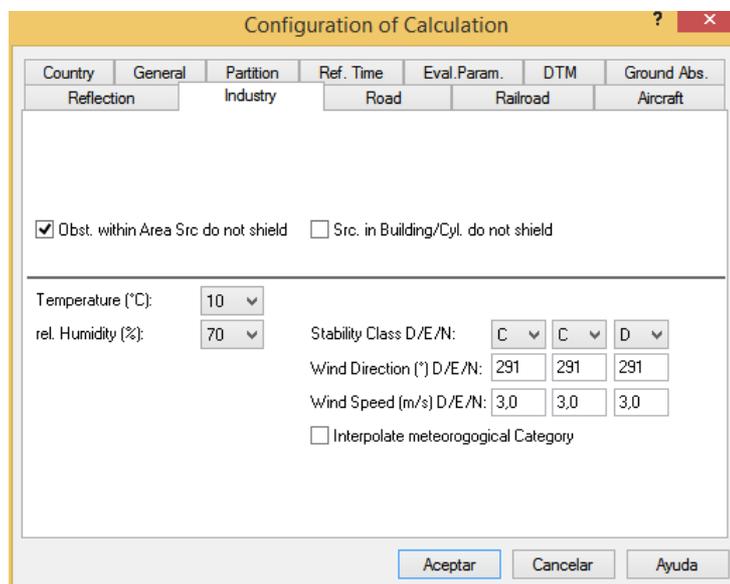


Ilustración 56. Implementación de parámetros de cálculo CONCAWE en el software CadnaA

Modelo Nórdico de Predicción de Ruido Ambiental Nord 2000

El método nórdico NORD2000 de propagación proporciona resultados en bandas de octava de frecuencia desde 25 Hz hasta 10 kHz. El modelo permite el cálculo para condiciones meteorológicas específicas incluyendo movimientos turbulentos de la atmósfera. Por lo tanto, el modelo puede aplicarse para niveles sonoros en periodos cortos de menos de 30 minutos o una hora. Para periodos de tiempo superiores, el modelo debe incorporar correcciones meteorológicas que muestren el efecto de la variación meteorológica a larga escala.

El modelo de propagación sonora está basado en la teoría geométrica de rayos y la teoría de difracción para el cálculo de los efectos combinados de atenuación del terreno y apantallamiento y una aproximación estadística cuando estudia la dispersión acústica en áreas edificadas y zonas forestales.

Los parámetros meteorológicos como el viento y el gradiente de temperatura son usados para aproximar el perfil vertical de la velocidad efectiva del sonido. Si la velocidad del sonido varía con la altura (el gradiente difiere de 0), existirá refracción atmosférica. La refracción es el efecto que sufre una onda sonora al curvarse hacia el suelo cuando la velocidad del sonido es baja. Esto ocurre cuando el viento está soplando desde la fuente hacia el receptor (condiciones favorables de propagación) o si la temperatura decrece con la altitud (inversión térmica) lo que ocurre frecuentemente durante la noche (*downwind refraction*). Por otra parte, si el viento está soplando desde el receptor a la fuente (*upwind conditions*) o si la temperatura decrece con la altitud (gradiente positivo), lo que ocurre frecuentemente durante días soleados, la onda sonora tiende a curvarse hacia arriba (*upward refraction*).

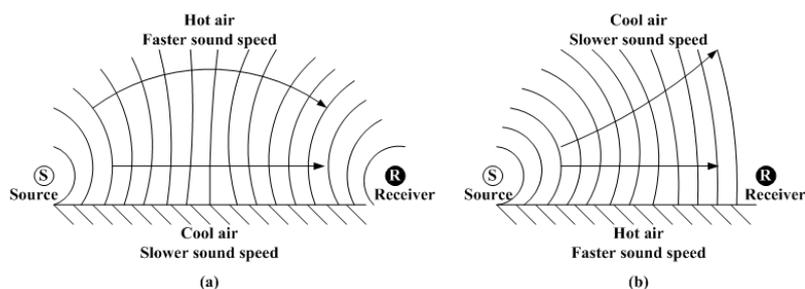


Ilustración 57. Refracción de ondas sonoras en la atmósfera debido al gradiente de temperatura (Bolen y Bass, 1981)

Nord2000 modela la refracción usando rayos sonoros curvos. La curvatura de los rayos depende del perfil vertical de la velocidad del sonido y son determinadas usando un cálculo semianalítico, que tiene en cuenta la relación lineal entre la velocidad del sonido y la altura sobre el suelo y la adapta para diferentes condiciones meteorológicas en base a observaciones de corta duración y diferentes parámetros de turbulencias.

Los inputs del modelo para la propagación según Nord 2000 son:

- Perfil topográfico definido por los diferentes segmentos y por la resistividad al flujo y rugosidad del suelo para cada uno de ellos.
- Altura de la fuente y del receptor sobre el suelo
- Rugosidad aerodinámica del suelo (usado para definir el perfil de la velocidad de viento)
- Velocidad media del viento en la dirección de propagación y la altura de medida.
- Desviación estándar de las variaciones del gradiente de temperatura.
- Parámetro de medida del nivel de turbulencias debido al viento y temperatura
- Humedad relativa del aire.

Dado que algunos de los parámetros no son fácilmente obtenidos se han obtenidos categorías básicas de cálculo para facilitar la implementación de la norma para las circunstancias más habituales. Particularmente, la desviación estándar de la velocidad de viento, la desviación estándar del gradiente de temperatura y la potencia de la turbulencia no son parámetros fácilmente accesibles y requieren ser fijados con valores apropiados. Algunos del resto de parámetros pueden ser obtenidos indirectamente, en base a la descripción del tiempo meteorológico. La resistividad al flujo del terreno y la rugosidad del suelo también puede ser categorizada en base a un descriptivo de tipos de suelos.

De forma simplificada, el modelo define que el nivel de presión sonora en un punto remoto (L_p) puede ser relacionado con la potencia acústica de la fuente de la siguiente manera:

$$L_R = L_w + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r$$

Donde

- L_w es la potencia sonora en decibelios dentro de la banda de frecuencia considerada.
- ΔL_d es el efecto de propagación debido a la divergencia esférica de la energía sonora.
- ΔL_a es el efecto de propagación debido a la absorción del aire.
- ΔL_t es el efecto de propagación del terreno (suelo y barreras).
- ΔL_s es el efecto de propagación de zonas de dispersión.
- ΔL_r es el efecto de propagación debido a las dimensiones de obstáculos y propiedades de la superficie cuando se calcula la contribución del ruido reflejado por un obstáculo.

En la siguiente tabla se muestra un resumen comparativo de los principales parámetros de la norma NORD2000 en relación con la norma de referencia europeo ISO9613:1996.

Efectos de propagación	ISO9613-2	NORD2000
Calculo Niveles Ponderado A	Sí	Sí
Cálculo espectral	Bandas de octava 63 Hz a 8Khz (extendido en CadnaA hasta 31,5 Hz)	Bandas de octava 25 Hz a 10Khz (aplicado en CadnaA 31,5 Hz a 8 kHz)
Atenuación geométrica	Esférica ($4\pi r^2$)	Esférica ($4\pi r^2$)
Atenuación absorción atmosférica	Basada en absorción atmosférica ISO9613-1	Basada en absorción atmosférica ISO9613-1 con un factor corrector para determinar la atenuación del tercio octava en función de la banda central.
Reflexiones del terreno	Algoritmo que incluye la corrección por absorción del terreno. No usa fuentes imágenes.	Algoritmo específico con cálculo específico de difracción sobre los bordes del obstáculo.
Reflexiones de obstáculos	Fuentes imágenes sin limitaciones en el número máximo de obstáculos. La condición para la reflexión considera el tamaño de la fuente en relación con la longitud de onda. La potencia acústica de la fuente imagen incluye la pérdida por absorción del reflector.	Fuentes imágenes en línea con la norma ISO9613-2 aplicando método propio de propagación, aplicable a diferentes tipos de perfiles mediante simplificación.
Atenuación del suelo	Método general espectral aplicable con terrenos aproximadamente llanos o con pendientes constantes. Método alternativo para valores ponderado A.	Método específico basado en elipsoide de Fresnel en dos dimensiones, aplicable a diferentes tipos de perfiles mediante simplificación.
Atenuación debido a apantallamiento	Para difracción simple y doble basada en la diferencia entre la vía directa de propagación y a través del obstáculo.	Procedimiento análogo a la atenuación por obstáculos.
Difracción lateral	Consideración de dos rayos laterales por difracción en los bordes verticales del obstáculo incluyendo la atenuación del suelo.	No disponible
Múltiples obstáculos en la vía de propagación	Método específico de CadnaA "ribbon band method" para el cálculo de la diferencia entre las vías de propagación	Método específico de cálculo.
Efecto meteorología	Calculado en base a factor C_0	Categorías meteorológicas específicas basadas en estabilidad atmosférica, velocidad de viento y dirección.
Áreas de absorción de suelo	Procedimiento dependiente de la frecuencia, aplicando tres regiones (emisor, receptor e intermedia) basado en altura de la fuente, del emisor y la distancia.	Absorción acústica determinada por la impedancia acústica normalizada y rugosidad de la zona Fresnel definida por el elipsoide.

Tabla 33. Comparativa entre norma ISO9613-2 y modelo NORD2000 (Datakustik GmbH, 2015)

Nos centraremos pues en aquellos factores de atenuación que introduce CONCAWE respecto a la norma de referencia (ISO 9613) y que justifican su empleo para la predicción de ruidos en parques eólicos:

- Efecto del terreno y obstáculos: El modelo para incluir el efecto del terreno y los obstáculos es básicamente bidimensional donde la forma del terreno es determinada por el perfil vertical en la vía de propagación entre la fuente y el receptor. Sin embargo, la tercera dimensión es considerada cuando se analiza el efecto de pantallas finitas y para la determinación de las superficies del terreno.

El perfil del terreno puede ser simplificado mediante segmentos rectos, que están caracterizados por la impedancia del terreno y su rugosidad. El método para predecir el efecto combinado del efecto del terreno y los obstáculos está basado en el concepto de zonas Fresnel, asumiendo que sólo los dos bordes más eficientes son tenidos en cuenta.

El concepto de zonas Fresnel ha sido ampliamente empleado en el desarrollo de modelos de propagación asume que el campo sonoro en el receptor está determinado por las condiciones de la superficie en la región alrededor del punto de reflexión, denominada Zona Fresnel. El elipsoide Fresnel está definido por el lugar geométrico de los puntos P definidos en la siguiente ecuación, donde S es la fuente, R el receptor y F es una fracción de la longitud de onda. Los focos del elipsoide están localizados en la fuente y el receptor.

$$|SP| + |RP| - |SR| = F_{\lambda} \cdot \lambda$$

Cuando el campo sonoro es reflejado por una superficie plano, la forma elíptica de la zona Fresnel es definida por la intersección entre el plano y la elipsoide Fresnel con focos en la fuente imagen S' y el receptor como se muestra en la siguiente imagen.

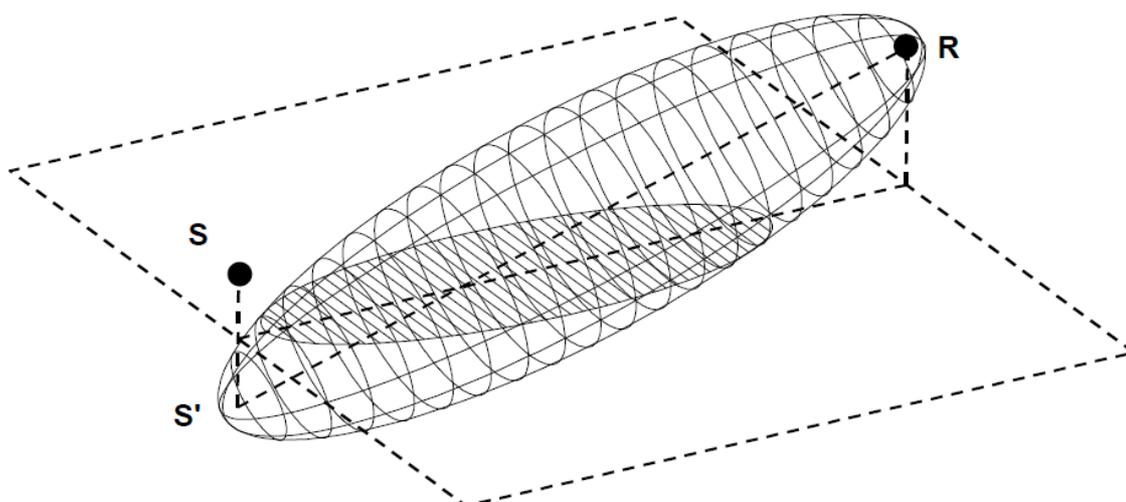


Ilustración 58. Definición del elipsoide y zona Fresnel (Plovsing, 2006a)

Por razones prácticas y dado que la forma elíptica no es conveniente para el cálculo, se trabaja con el rectángulo circunscrito a dicha elipse. El tamaño de la zona Fresnel rectangular es

definido por el tamaño del elipsoide en la dirección de propagación y perpendicular a esta. El tamaño de una subárea dentro de la zona Fresnel en relación con el tamaño total es usado para determinar una ponderación w_i sobre la importancia relativa de esa subárea.

$$w_i = \frac{S_i}{S_{Fz}} \tag{7}$$

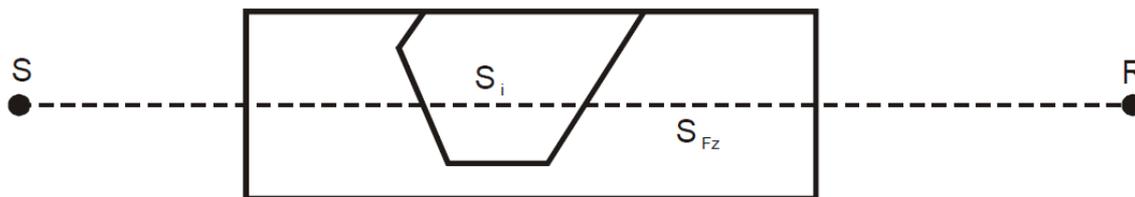


Ilustración 59. Vista superior de la zona Fresnel y cálculo de la ponderación w_i (Plovsing, 2006a)

De acuerdo a las recomendaciones de la norma, el valor F igual a 1/16 de la longitud de onda proveen los mejores resultados para el método de interpolación Fresnel para terrenos llanos, mientras que cuando se quiere determinar la eficiencia de la dispersión acústica de una zona, o la eficiencia de un obstáculo vertical un valor de 1/8 es considerado más apropiado. Para terrenos llanos con superficies variantes y para terrenos

El modelo de cálculo NORD2000 presenta una mayor complejidad de cálculo, por lo que se resumirán a continuación los principales fundamentos del modelo de propagación. El modelo teórico de detalle se describe en la referencia 162 para la propagación sin refracción, mientras que en la referencia 164 se describen las modificaciones para incluir el efecto de la refracción:

- Refracción: En atmósferas con moderada refracción, el modelo líneas descrito es modificado para incluir el efecto de la refracción atmosféricas, incluyendo curvatura a los rayos sonoros. Esta modificación asume que la velocidad del sonido varía linealmente con la altura sobre el suelo, generando arcos circulares en la propagación del sonido. El perfil vertical de la velocidad del sonido vendrá dado por la siguiente fórmula donde $c(0)$ es la velocidad del sonido en el suelo, z es la altura relativa y $\Delta c/\Delta z$ es el gradiente de velocidad del sonido.

$$c(z) = c(0) + \frac{\Delta c}{\Delta z} z$$

Ilustración 60. Cálculo del gradiente de velocidad del sonido (Plovsing, 2006b)

En los casos donde el sonido se propaga sobre una superficie plano con una impedancia dada, la modificación de los rayos se produce tanto para la vía directa como para la reflejada tal y como se muestra en las siguientes imágenes. Cuando el gradiente $\Delta c/\Delta z$ es positivo, existen condiciones favorables de propagación y los rayos se curvan de forma descendente. Cuando este gradiente es negativo, se denominan condiciones desfavorables, y la refracción curvas los rayos de forma ascendente, generando zonas de sombras.

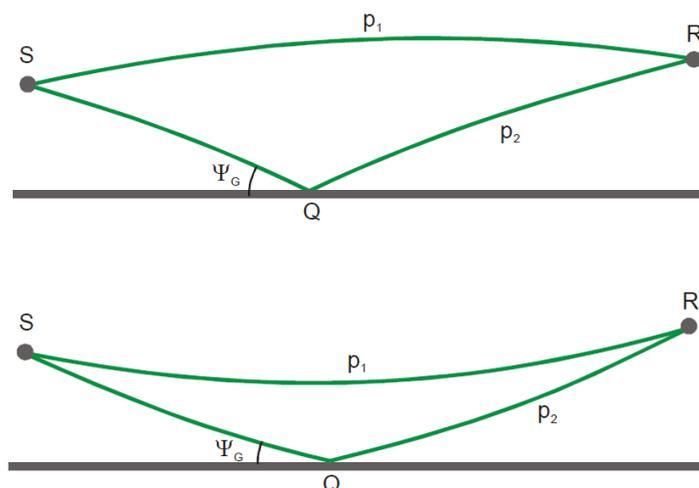


Ilustración 61. Cálculo del gradiente de velocidad del sonido (Plovsing, 2006b)

La modificación del rayo directo se realiza sustituyendo la distancia lineal en la atenuación por divergencia atmosférica por la distancia R medida a lo largo del rayo curvado. El nivel de presión sonora está condicionado además durante la refracción por la frecuencia angular ω ($2\pi f$ donde f es la frecuencia) y el tiempo de viaje a través del rayo τ . En el caso de fuertes refracciones, el modelo basado en la modificación geométrica de los rayos es completado con el efecto de múltiples reflexiones, mientras que el modelo también tienen en cuenta las zonas de sombras que se produce cuando la refracción sonora curva los rayos hacia arriba, no alcanzando los receptores.

Identificación de los parámetros de cálculo

La revisión bibliográfica realiza ha puesto de manifiesto que una de las principales dificultades de la implementación del modelo Nord2000 es la adecuada caracterización de las variables meteorológicas. Algunos de los autores (Evans y Cooper, 2012) aplican las condiciones de cálculo por defecto aunque conscientes de que la precisión del modelo pueda verse afectada mientras que en los estudios de validación del modelo, realizados por el propio desarrollador del mismo (DELTA, 2006, 2009) se ha procedido a la valoración *in situ* de los parámetros meteorológicos mediante instrumentación de alta resolución (método doppler-LiDAR).

Respecto a la absorción del terreno, la tendencia es la consideración de suelos mixtos conforme a las coberturas existentes en la realidad, aunque existen referencias a la consideración de suelos duros (Siponen et al., 2013; The Finnish Ministry of The Environment, 2012) especialmente para terrenos llanos susceptibles de congelación. No se ha encontrado ninguna referencia a suelo completamente absorbente aunque la caracterización de cobertura de usos de suelo (ej. CORINE) podría conllevar la adopción de dicho valor.

A continuación se describe la implementación de los principales parámetros de cálculo principales en el software empleado:

1. Caracterización del parámetro de absorción del suelo: La absorción del terreno se ha modificado mediante el mismo procedimiento descrito para la Norma ISO 9613-2, empleando para ello los valores de G 0, 0,5 y valor asociado a los usos según CLC.
2. Corrección por efecto de múltiples reflexiones en valles: Se aplicará de acuerdo con las recomendaciones de IOA (IOA, 2013) como se describió previamente para la norma ISO9613-2, para la altura media calculada para esta norma de cálculo. En el caso de

correcciones por múltiples reflexiones, los factores de corrección de 1,5 dB para suelos duros y 3 dBA para suelos mixtos se consideraron adecuados.

3. Categorización meteorológica: Aunque en la actualidad, el software no permite la selección de diferentes categorías de estabilidad atmosférica según la clasificación de Pasquill, la norma ha sido implementada por Datakustik bajo la categoría D que es la existente en todos los casos de estudio y bins de vientos, exceptuando el bin de 3 m/s para el periodo diurno. Las posibles desviaciones que puedan producirse en este bin serán valoradas de forma detallada.
4. La velocidad de viento se especificará para cada bin estudiado en el rango 3-10 m/s valorada a 10 metros de altura. La desviación estándar de la velocidad de viento se ha considerado nula siguiendo las recomendaciones de DELTA (170). Este parámetro tiene en cuenta las fluctuaciones en la velocidad de viento, que pueden ser desestimadas cuando se valoran niveles instantáneos de niveles sonoros (como es el caso, intervalo de medición de 60 segundos).
5. Las variables de temperatura y humedad han sido diferenciadas para los periodos diurnos y nocturnos y para cada punto receptor se han evaluados las direcciones de viento promedio.
6. La rugosidad es usada para cuantificar la irregularidad del segmento del terreno y es la desviación estándar de las variaciones del terreno dentro el segmento. El efecto de la rugosidad del terreno puede ser interpretado como una transformación para considerar los efectos de las irregularidades del modelo respecto al perfil vertical simplificado. El coeficiente de rugosidad ha sido valorado conforme a los usos de suelos existentes ($z_0=0,05$ m) en el terreno, determinados por la base de datos CORINE y tomando como referencia las recomendación de Datakustik.

z_0 in m	Classes according to the CORINE cadastre
0.01	Beaches, dunes, sands (331); Water bodies (512)
0.02	Dump sites (132); Pastures (231); Natural grasslands (321); Sparsely vegetated areas (333); Salt marshes (421); Intertidal flats (423); Water courses (511); Estuaries (522)
0.05	Mineral extraction sites (131); Sport and leisure facilities (142); Non-irrigated arable land (211); Glaciers and perpetual snow (335); Coastal lagoons (521)
0.10	Airports (124); Inland marshes (411); Peat bogs (412); Sea and ocean (523)
0.20	Road and rail networks and associated land (122); Green urban areas (141); Vineyards (221); Complex cultivation patterns (242); Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation (243); Moors and heathland (322); Bare rocks (332)
0.50	Port areas (123); Fruit trees and berry plantations (222); Transitional woodland-shrub (324)
1.00	Discontinuous urban fabric (112); Industrial or commercial units (121); Construction sites (133); Coniferous forest (312)
1.50	Broad-leaved forest (311); Mixed forest (313)
2.00	Continuous urban fabric (111)

Ilustración 62. Coeficiente de rugosidad recomendado en función de cobertura de suelo según clasificación CORINE (Datakustik GmbH, 2015)

7. El gradiente de temperatura ha sido categorizado de acuerdo a las categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill y los valores de referencia del gradiente de temperatura vertical (171). Tomando estos valores como referencia un valor de 0.015 °/km para condiciones favorables de propagación (3-6 m/s durante el periodo día/tarde) y 0.03 °/km para condiciones muy favorables de propagación (resto de situaciones) predominando los criterios establecidos por la nueva norma ISO 1996-2 (ISO, 2015).

Stability Class	Typical Occurrence	Vertical Temp Gradient C°/100m
A	Unstable. Sunny day with light winds	<-1.9
B	Mildly unstable	-1.8
C	Weakly unstable	-1.6
D	Neutral: Overcast conditions regardless of wind speed	0
E	Weakly stable	1.5
F	Stable: Clear sky, light winds and moderate temperature inversion present	3.0
G	Extremely unstable: Found in arid rural areas. Strong temperature inversion present	≥ 4

Ilustración 63. Gradiente vertical de temperatura según clases de estabilidad Pasquill (Environmental Protection Authority NSW Australia, 2000)

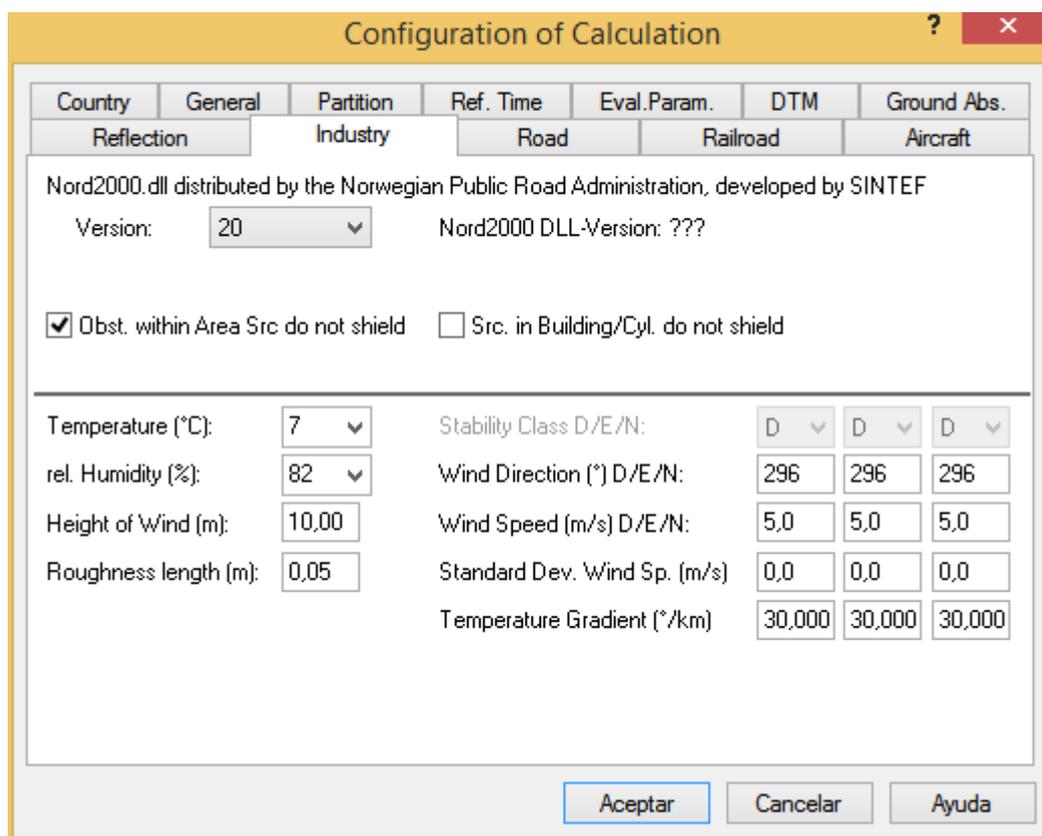


Ilustración 64. Implementación de parámetros de cálculo NORD2000 en el software CadnaA.

Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (CNOSSOS-EU)

Las normas que han servido como bases para el desarrollo del modelo CNOSSOS han sido HARMONOISE (R.Nota et als., 2005)/IMAGINE (IMAGINE Work Group, 2003) y NORD2000 (Plovsing, 2010) por lo que tiene en cuenta las condiciones de refracción sonora existente bajo condiciones favorables de propagación. El modelo cuenta con un modelo de propagación único para la fuentes de tráfico rodado, ferroviario e industrial, una vez las potencias acústicas de estas fuentes sonoras ha sido establecida.

El modelo calcula la atenuación del ruido durante su propagación en exteriores, atendiendo a dos tipos particulares de condiciones atmosféricas:

- Condiciones de propagación por refracción descendentes (pendiente vertical positiva de la celeridad acústica efectiva) desde la fuente al receptor,
- Condiciones atmosféricas homogéneas (pendiente vertical nula de celeridad acústica efectiva) con respecto al área completa de propagación.

El método de cálculo no ofrece resultados en condiciones de propagación por refracción ascendente (pendiente vertical negativa de velocidad acústica efectiva) pero estas condiciones se aproximan mediante condiciones homogéneas al calcular índices a largo plazo.

De forma simplificada, el modelo define que el nivel de presión sonora en condiciones favorable (L_F) para un trayecto (S,R) es relacionado con la potencia acústica de la fuente de la siguiente manera:

$$L_F = L_{w,0,dir} + A_F$$

El término A_F representa la atenuación total a lo largo del trayecto de propagación en condiciones favorables y se desglosa como sigue:

$$A_F = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,F}$$

- A_{div} es la atenuación por divergencia geométrica.
- A_{atm} es la atenuación por absorción atmosférica.
- $A_{boundary,F}$ es la atenuación por el límite del medio de propagación en condiciones favorables. Puede contener los siguientes términos:
 - $A_{ground,F}$ es la atenuación por el terreno en condiciones favorables
 - $A_{dif,F}$ es la atenuación por la difracción en condiciones favorables.

Cabe destacar que sólo las atenuaciones debido al efecto suelo (A_{ground}) y a la difracción (A_{dif}) se ven afectadas por las condiciones meteorológicas.

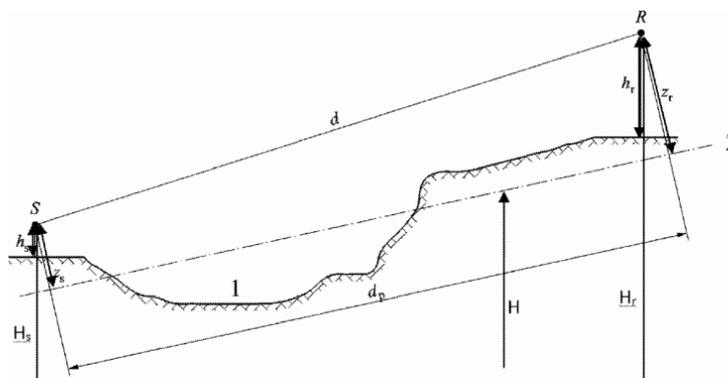
En la siguiente tabla se muestra un resumen comparativo de los principales parámetros de la norma CNOSSOS en relación con la norma ISO9613:1996.

Efectos de propagación	ISO9613-2	CNOSSOS
Calculo Niveles Ponderado A	Sí	Sí
Cálculo espectral	Bandas de octava 63 Hz a 8Khz (extendido en CadnaA hasta 31,5 Hz)	Bandas de octava 63 Hz a 8Khz. La frecuencia de 31,5 Hz está expresamente excluida.
Atenuación geométrica	Esférica ($4\pi r^2$)	Esférica ($4\pi r^2$)
Atenuación absorción atmosférica	Basada en absorción atmosférica ISO9613-1	Basada en absorción atmosférica ISO9613-1 con un factor corrector para determinar la atenuación del tercio octava en función de la banda central.
Reflexiones del terreno	Algoritmo que incluye la corrección por absorción del terreno. No usa fuentes imágenes.	Método específico de cálculo para condiciones favorables y homogéneas.
Reflexiones de obstáculos	Fuentes imágenes sin limitaciones en el número máximo de obstáculos. La condición para la reflexión considera el tamaño de la fuente en relación con la longitud de onda. La potencia acústica de la fuente imagen incluye la pérdida por absorción del reflector.	Método de fuentes imágenes con atenuación basada en la absorción del obstáculo.
Atenuación del suelo	Método general espectral aplicable con terrenos aproximadamente llanos o con pendientes constantes. Método alternativo para valores ponderado A.	Método específico de cálculo para condiciones favorables y homogéneas.
Atenuación debido a apantallamiento	Para difracción simple y doble basada en la diferencia entre la vía directa de propagación y a través del obstáculo.	Método de cálculo para la difracción individual. Las cubiertas parciales y obstáculos que se inclinan más de 15º respecto a la vertical están fuera del ámbito de aplicación de este método de cálculo.
Difracción lateral	Consideración de dos rayos laterales por difracción en los bordes verticales del obstáculo incluyendo la atenuación del suelo.	Cálculo mediante método propia en base a la longitud del trayecto de propagación y las atenuaciones del terreno y atmosféricas.
Múltiples obstáculos en la vía de propagación	Método específico de CadnaA "ribbon band method" para el cálculo de la diferencia entre las vías de propagación	Método específico de cálculo tratando las rutas como un conjunto de difracciones individuales.
Efecto meteorología	Calculado en base a factor C_0	Categorías meteorológicas específicas basadas en estabilidad atmosférica, velocidad de viento y dirección.
Áreas de absorción de suelo	Procedimiento dependiente de la frecuencia, aplicando tres regiones (emisor, receptor e intermedia) basado en altura de la fuente, del emisor y la distancia.	Absorción acústica en base a la porosidad y definición de regiones de emisor y receptor.

Tabla 34. Comparativa entre norma ISO9613-2 y modelo CNOSSOS-EU (Datakustik GmbH, 2015)

Nos centraremos pues en aquellos factores de atenuación que introduce CNOSSOS respecto a la norma de referencia (ISO 9613-2), centrándonos en las condiciones favorables de propagación que son las que encontramos en el caso objeto de estudio:

- Cálculo del plano medio: Las alturas equivalentes se obtienen del plano medio del suelo entre la fuente y el receptor. Esto sustituye el plano real por un plano ficticio que representa el perfil medio del terreno.



- 1: Orografía real
2: Plano medio

Ilustración 65. Cálculo del plano medio (Comisión Europea, 2015)

En el plano de trayecto, la topografía (incluidos el terreno, montículos, terraplenes y otros obstáculos artificiales, los edificios, etc.) puede describirse mediante un conjunto ordenado de puntos discretos. Este conjunto de puntos define una polilínea, o de manera equivalente, una secuencia de segmentos rectos. El plano medio se representa mediante una aproximación mínima cuadrática.

- Efecto suelo: La atenuación por el efecto suelo principalmente es el resultado de la interferencia entre el sonido reflejado y el sonido propagado directamente desde la fuente al receptor. Está físicamente vinculada a la absorción acústica del suelo sobre el cual se propaga la onda sonora. No obstante, también depende significativamente de las condiciones atmosféricas durante la propagación, ya que la curvatura de los rayos modifica la altura del trayecto por encima del suelo y hace que los efectos suelo y el terreno ubicado cerca de la fuente resulten más o menos importantes. En el caso de que la propagación entre la fuente y el receptor se vea afectada por algún obstáculo en el plano de propagación, el efecto suelo se calcula por separado con respecto a la fuente y el receptor.

La caracterización acústica del terreno se realiza en base a la porosidad del terreno, expresando los coeficientes de absorción conforme a la siguiente tabla:

Descripción	Tipo	(kPa · s/m ²)	Valor G
Muy blando (nieve o con hierba)	A	12,5	1
Suelo forestal blando (con brezo corto y denso o musgo denso)	B	31,5	1
Suelo blando no compacto (césped, hierba o suelo mullido)	C	80	1
Suelo no compacto normal (suelo forestal y suelo de pastoreo)	D	200	1
Terreno compactado y grava (césped compactado y zonas de parques)	E	500	0,7
Suelo denso compactado (carretera de grava o aparcamientos)	F	2 000	0,3
Superficies duras (concreto y asfalto más normal)	G	20 000	0
Superficies muy duras y densas (asfalto denso, concreto y agua)	H	200 000	0

Ilustración 66. Valores de G para diferentes tipos de suelo (Comisión Europea, 2015)

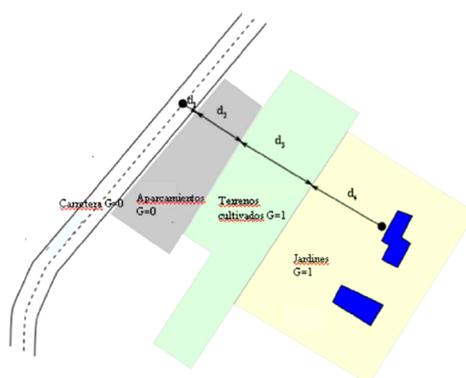
Cuando la fuente y el receptor están cerca de modo que $d_p \leq 30 (z_s + z_r)$, la distinción entre el tipo de terreno ubicado cerca de la fuente y el tipo de terreno ubicado cerca del receptor es insignificante. Para tener en cuenta esta circunstancia, el factor de suelo G_{path} se corrige en última instancia como sigue:

$$G'_{path} = \begin{cases} G_{path} \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} + G_s \left(1 - \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} \right) & \text{if } d_p \leq 30 (z_s + z_r) \\ G_{path} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ilustración 67. Consideración del área (Comisión Europea, 2015)

Donde G_s es el factor del suelo en el área de la fuente (dependiente del tipo de fuente), d_p es la distancia total entre emisor y receptor, z_s la altura de la fuente y z_r la altura del receptor respecto al plano medio.

La determinación del coeficiente del suelo G_{path} sobre una trayectoria de propagación se pondera en función de la distancia que recorre el rayo a través de la vía de propagación. Obsérvese un ejemplo en la siguiente imagen.



$$d_p = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

$$G_{path} = \frac{(0 \cdot d_1 + 0 \cdot d_2 + 1 \cdot d_3 + 1 \cdot d_4)}{d_p} = \frac{(d_3 + d_4)}{d_p}$$

Ilustración 68. Determinación del coeficiente suelo sobre un trayecto de propagación (Comisión Europea, 2015)

- La atenuación del efecto suelos se calcula para condiciones favorables $A_{ground,F}$ según diferentes métodos si existe o no difracción. Entre los aspectos más destacados se encuentran:
 - Las alturas respecto al plano medio se aplican corregidas para transmitir el efecto de la flexión acústica del rayo y el efecto de la turbulencia.
 - El límite inferior de la atenuación del efecto suelo $A_{ground,F}$, depende de la geometría del trayecto. Cuando el suelo es duro ($G_{path}=0$) la atenuación del efecto suelo es la atenuación mínima que se describe en la siguiente ecuación.

$$A_{ground,F,min} = \begin{cases} -3(1-\overline{G}_m) & \text{if } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ -3(1-\overline{G}_m) \cdot \left(1 + 2 \left(1 - \frac{30(z_s + z_r)}{d_p}\right)\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ilustración 69. Cálculo de la atenuación por efecto suelo mínima bajo condiciones favorables (Comisión Europea, 2015)

El cálculo del factor \overline{G}_m varía si existe difracción en el camino de propagación. Cuando no existe, toma el valor de G'_{path} tal y cómo se ha explicado con anterioridad.

Identificación de los parámetros de cálculo

Dada la reciente publicación de la versión final del modelo CNOSSOS y la ausencia de experiencias relacionadas con la simulación acústica de parques eólicos usando este modelo, no existen referencias en los parámetros de cálculo para este modelo.

A continuación se describe la implementación de los principales parámetros de cálculo principales en el software empleado:

1. Caracterización del parámetro de absorción del suelo: La absorción del terreno se ha modificado mediante el mismo procedimiento descrito para la Norma ISO 9613-2, empleando para ello los valores de G 0, 0,5 y valor asociado a los usos según CLC.
2. Corrección por efecto de múltiples reflexiones en valles: Se aplicará de acuerdo con las recomendaciones de IOA (IOA, 2013) como se describió previamente para la norma ISO9613-2, para la altura media calculada para esta norma de cálculo. En el caso de correcciones por múltiples reflexiones, los factores de corrección de 1,5 dB para suelos duros y 3 dBA para suelos mixtos se consideraron adecuados.
3. Categorización meteorológica: En la actualidad, CadnaA implementa un modelo básico a partir de la aplicación DLL facilitada dentro del proyecto CNOSSOS. La parametrización de las predicciones está limitada por esta razón aunque la categorización meteorológica puede ser seleccionada (homogénea/favorable) tal y como establece la norma. En el caso de estudio, se seleccionó las condiciones favorables de propagación.

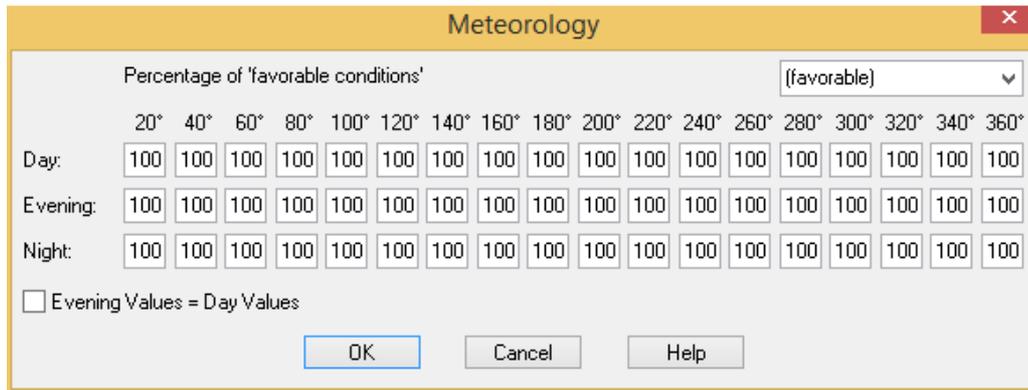


Ilustración 70. Implementación de parámetros de cálculo NORD2000 en el software CadnaA.

4. Las variables de temperatura y humedad han sido diferenciadas para los periodos diurnos y nocturnos del mismo modo que en casos anteriores

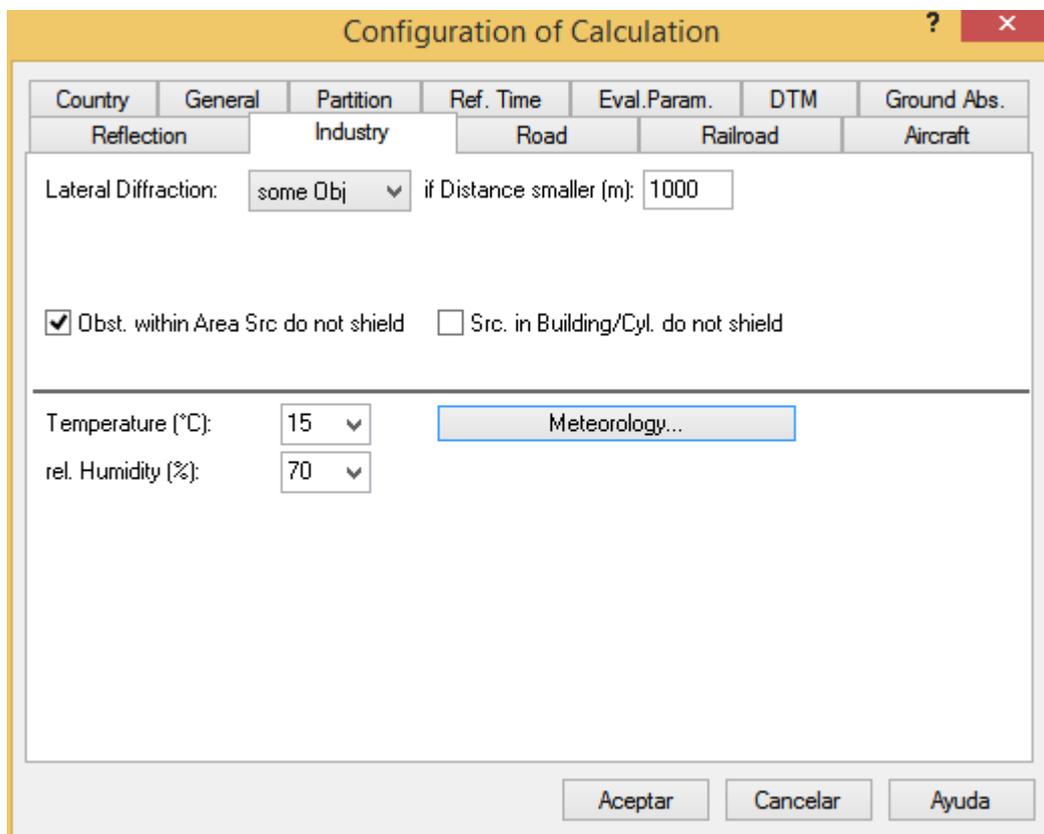


Ilustración 71. Implementación de parámetros de cálculo NORD2000 en el software CadnaA.

7. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos tanto en la fase de monitorización de los niveles sonoros en el parque eólico objeto de estudio así como los resultados de la fase de modelización acústica mediante los diferentes modelos de predicción empleados. La valoración se ha realizado agrupando los periodos día y tarde (bajo un mismo periodo, denominado diurno, que comprende desde las 07:00 horas hasta las 23:00 horas) y el periodo noche comprendido entre las 23:00 horas y las 07:00 horas. Todos los registros sonoros obtenidos mediante el monitorizado se refieren al nivel sonoro incidente, una vez sustraída la corrección por reflexiones.

7.1 RESULTADO DE LA FASE DE MONITORIZADO DE RUIDO

Método I. Análisis de Registros Discretos según Decreto 6/2012 de Andalucía

A continuación se especifican los registros sonoros seleccionados para el cumplimiento normativo para cada periodo de valoración y cada punto de medida.

PUNTO DE MEDIDA 1 - PERIODO DIURNO			Actividad en funcionamiento Ruido total				Actividad parada Ruido de fondo			
Velocidad viento 10 m (m/s)	Fecha inicio	Duración	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{Ieq} (dBA)	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{Ieq} (dBA)
6	31-10-12	00:01:00	21:36:00	52.9	63.6	55.4	22:46:00	29.2	46.2	30.9
7	31-10-12	00:01:00	21:12:00	53.5	64.8	56.9	22:08:00	30.9	47.9	36.4
7	31-10-12	00:01:00	21:26:00	54.1	65.3	56.3	22:29:00	34.5	55.8	37.7
8	31-10-12	00:01:00	20:10:00	53.9	65.6	56.6	17:49:00	37.0	58.4	42.4
$L_{Aeq,Ti} = 10 \log \left[10^{\frac{L_{TAeq,Ti}}{10}} - 10^{\frac{L_{RFAeq,Ti}}{10}} \right]$										
Parámetros			PUNTO DE MEDIDA 1 DIURNO - DIFERENTES VELOCIDADES DE BUJE W _b							
L _{Aeq,Ti AR} (dBA)			52.9		53.5		54.1		53.8	
Incertidumbre (dBA)			3.2		3.2		3.2		3.2	
Corrección por reflexiones(K _{refx})			3		3		3		3	
NIE=L_{Aeq,Ti AR} -K_{refx} (dBA)			49.9		50.5		51.1		50.8	
Nivel referencial			58.2		62.4		62.8		62.6	
Velocidad viento a 1,5 m (m/s)			2-1		4-3		5-4		5	
Velocidad viento altura buje W _b (m/s)			8		9		10		11	
Velocidad viento 10 m w ₁₀ (m/s)			6		7		7		8	

Tabla 35. Resultados del Nivel de Inmisión al Exterior durante el periodo diurno en el punto de medida 1

PUNTO DE MEDIDA 1 PERIODO NOCHE			Actividad en funcionamiento Ruido total				Actividad parada Ruido de fondo			
Velocidad viento 10 m (m/s)	Fecha inicio	Duración	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{Ieq} (dBA)	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{Ieq} (dBA)
7	01-11-12	00:01:00	02:59:00	44.4	60.3	45.8	23:55:00	32.8	50.0	34.2
8	01-11-12	00:01:00	02:21:00	45.5	63.6	47.1	23:05:00	34.8	60.8	38.0
9	01-11-12	00:01:00	02:32:00	45.9	63.9	47.4	23:07:00	33.5	57.0	36.4
$L_{Aeq,Ti} = 10 \log \left[10^{\frac{L_{TAeq,Ti}}{10}} - 10^{\frac{L_{RFAeq,Ti}}{10}} \right]$										
Parámetros			PUNTO DE MEDIDA 1 NOCHE- DIFERENTES VELOCIDADES DE BUJE W _b							
L _{Aeq,Ti AR} (dBA)			44.1		45.1		45.6		45.6	
Incertidumbre (dBA)			3.2		3.2		3.2		3.2	
Corrección por reflexiones(K _{refx})			3		3		3		3	
NIE=L_{Aeq,Ti AR} -K_{refx} (dBA)			41.1		42.1		42.6		42.6	
Nivel referencial			53.9		56.9		54.8		54.8	
Velocidad viento a 1,5m(m/s)			4-3		5		4		4	
Velocidad viento altura buje W _b (m/s)			10		11		12		12	
Velocidad viento 10 m w ₁₀ (m/s)			7		8		9		9	

Tabla 36. Resultados del Nivel de Inmisión al Exterior durante el periodo nocturno en el punto de medida 1

PUNTO DE MEDIDA 2 - PERIODO DIURNO			Actividad en funcionamiento Ruido total				Actividad parada Ruido de fondo			
Velocidad viento 10 m (m/s)	Fecha inicio	Duración	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{leq} (dBA)	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{leq} (dBA)
6	31-10-12	00:01:00	21:44:00	52.3	64.6	54.2	22:49:00	36.9	49.2	39.9
7	31-10-12	00:01:00	21:36:00	53.4	65.5	57.4	17:54:00	42.1	61.0	43.8
8	31-10-12	00:01:00	21:23:00	52.8	67.4	54.7	22:15:00	39.8	60.2	41.4
9	31-10-12	00:01:00	20:56:00	53.3	68.4	54.8	17:41:00	41.9	60.1	43.3
10	31-10-12	00:01:00	20:58:00	53.2	65.9	54.8	17:36:00	43.9	62.6	45.7
$L_{Aeq,Ti} = 10 \log \left[10^{\frac{L_{TAeq,Ti}}{10}} - 10^{\frac{L_{RFAeq,Ti}}{10}} \right]$										
Parámetros			PUNTO DE MEDIDA 2 DIURNO- DIFERENTES VELOCIDADES DE BUJE W _b							
L _{Aeq,Ti} AR (dBA)			52.2	53.1	52.7	53	52.7			
Incertidumbre (dBA)			3.2	3.2	3.2	3.2	3.2			
Corrección por reflexiones(K _{refx})			3	3	3	3	3			
NIE=L_{Aeq,Ti} AR -K_{refx} (dBA)			49.2	50.1	49.7	50	49.7			
Nivel referencial			59.4	61	61.5	61.3	61.9			
Velocidad viento a 1,5m(m/s)			3-1	4-3	4-3	5-4	5-3			
Velocidad viento altura buje W _b (m/s)			9	10	11	12	13			
Velocidad viento 10 m (m/s)			6	7	8	9	10			

Tabla 37. Resultados del Nivel de Inmisión al Exterior durante el periodo diurno en el punto de medida 2

PUNTO DE MEDIDA 2 - PERIODO NOCHE			Actividad en funcionamiento Ruido total				Actividad parada Ruido de fondo			
Velocidad viento 10 m (m/s)	Fecha inicio	Duración	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{leq} (dBA)	Hora de inicio	L _{Aeq} (dBA)	L _{Ceq} (dBA)	L _{leq} (dBA)
8 m/s	01-11-12	00:01:00	02:32:00	50.6	65.3	51.9	23:32:00	39.3	58.9	40.5
10 m/s	01-11-12	00:01:00	01:46:00	51.8	68	53	23:24:00	41.5+	61.6	43.6
$L_{Aeq,Ti} = 10 \log \left[10^{\frac{L_{TAeq,Ti}}{10}} - 10^{\frac{L_{RFAeq,Ti}}{10}} \right]$										
Parámetros			PUNTO DE MEDIDA 2 NOCHE- DIFERENTES VELOCIDADES BUJE W _b							
L _{Aeq,Ti} AR (dBA)			50.3				51.4			
Incertidumbre (dBA)			3.2				3.2			
Corrección por reflexiones(K _{refx})			3				3			
NIE=L_{Aeq,Ti} AR -K_{refx} (dBA)			47,3				48,4			
Nivel referencial			59.3				60			
Velocidad viento a 1,5m(m/s)			4-3				6-5			
Velocidad viento altura buje W _b (m/s)			11				13			
Velocidad viento 10 m w ₁₀ (m/s)			8				10			

Tabla 38. Evaluación del Nivel de Inmisión al Exterior durante el periodo noche en el punto de medida 2

Durante los ensayos, se obtuvieron registros suficientes para caracterizar los Niveles de Inmisión al Exterior de acuerdo a los requisitos de la Instrucción Técnica 2 del Decreto 6/2012 en los siguientes bins de viento (Tabla 35).

Periodo día/tarde (07:00-23:00 horas)					
Punto de medida	Velocidad de viento w_{10}				
	6	7	8	9	10
Punto 1					
Punto 2					
Periodo noche (23:00-07:00 horas)					
Punto 1					
Punto 2					

Tabla 39. Bines de viento con registros válidos (fondo verde)

Dado que el modelo de aerogenerador del parque eólico presenta su máxima potencia sonora a partir de velocidades de viento superiores a 6 m/s, los Niveles de Inmisión al Exterior registrados corresponden a una capacidad de producción eléctrica del 95% o superior. Sin embargo, los resultados obtenidos no aportan información sobre la dispersión o variabilidad de los niveles sonoros más allá de la propia variación que pueda existir durante el intervalo de medición.

Por tanto, los resultados sólo pueden ser interpretados como una “instantánea” de la situación acústica existente durante la realización de los ensayos, sin que sea posible determinar si son las condiciones más habituales o más desfavorables de funcionamiento a ciencia cierta.

Con respecto a la implementación de las medidas de mitigación, en el punto de medida 1 si aparece una tendencia clara de reducción de los niveles sonoros durante el periodo nocturno para velocidades superiores a 6 m/s (aproximadamente unos 8 dBA). En el punto de medida 2, las reducciones oscilan entre 1,3 y 2,4 dBA, pero no se han obtenidos suficientes muestras para confirmar esta circunstancia.

Método II. Análisis por Regresión Polinomial

El volumen de datos minutales obtenidos en la campaña de ensayos operacional es muy representativo con más de 65 horas de valoración durante el periodo diurno y más de 27 horas durante el periodo nocturno en todos los puntos de medida. Además la distribución de los registros en los bins de viento es adecuada y en todos los rangos se superan el mínimo de 20 intervalos que establecía el estándar sueco aplicado en el método II. Los registros han sido intencionadamente seleccionados a partir de la velocidad de corte de 3 m/s, eliminándose aquellos registros a velocidades extremas que pueden introducir grandes desviaciones en el ajuste de la regresión.

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	Número de registros válidos			
	Punto de medida 1		Punto de medida 2	
	Día/Tarde	Noche	Día/Tarde	Noche
3	989	204	1097	404
4	419	134	339	84
5	648	313	396	136
6	658	513	573	439
7	436	337	544	425
8	373	116	380	325
9	301	48	426	87
10	125	-	374	-
Total	3949	1665	4129	1900

Tabla 40. Número de registros válidos en cada punto de medida para cada periodo temporal y rango de velocidades de viento.

Conforme a estos resultados, el rango de velocidades estudiado durante el periodo diurno comprende velocidades de viento de 3 m/s a 10 m/s mientras que durante el periodo nocturno se restringe desde 3 m/s a 9 m/s. A continuación se muestran los resultados del ajuste por regresión polinomial de segundo orden del ruido total registrado en cada punto de medida:

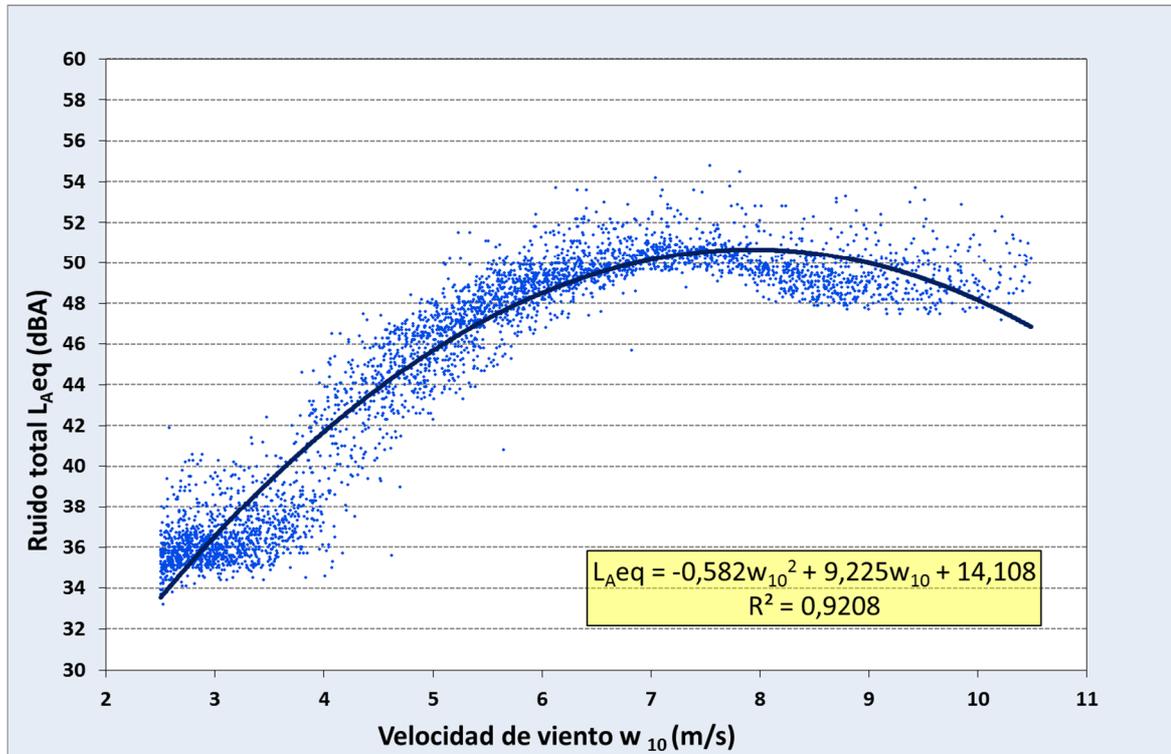


Ilustración 72. Ruido total en el punto de medida 1 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

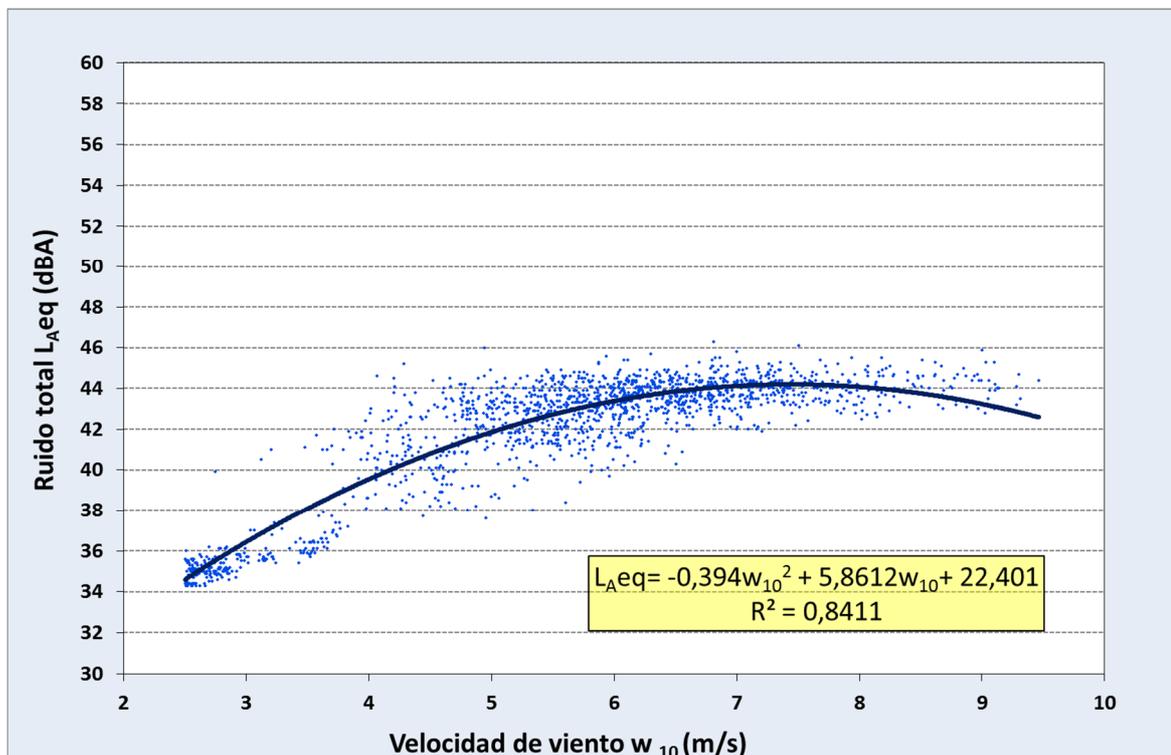


Ilustración 73. Ruido total en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas)

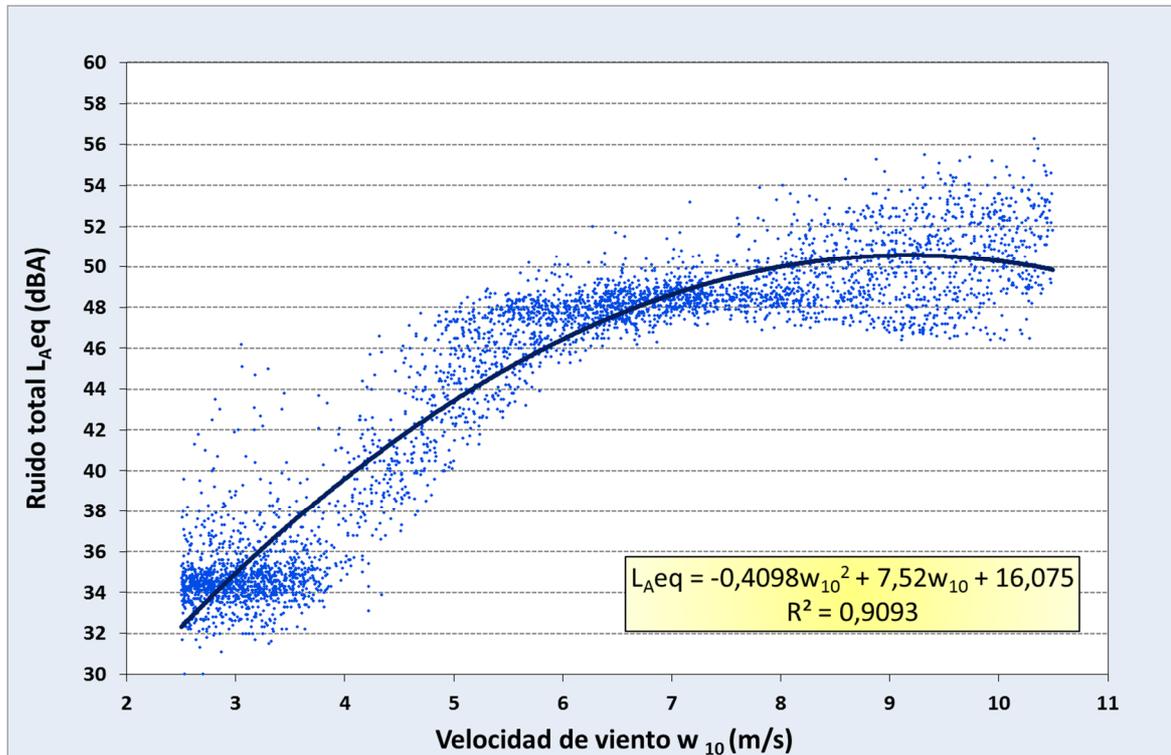


Ilustración 74. Ruido total en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

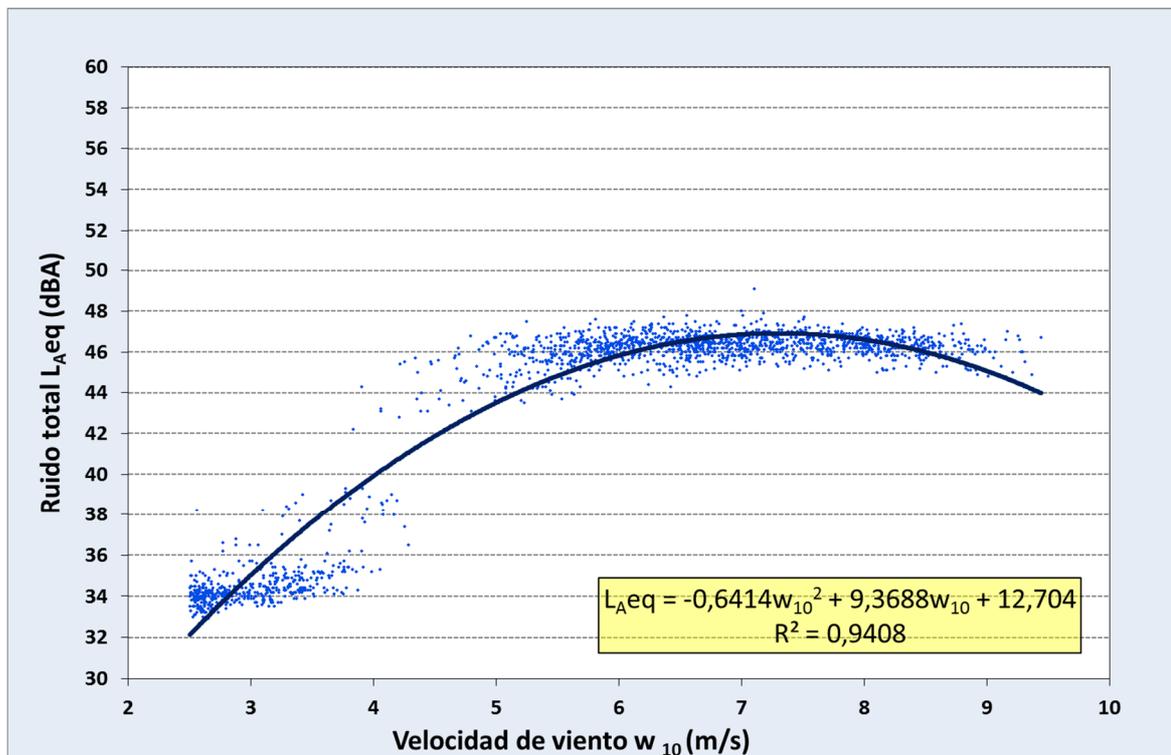


Ilustración 75. Ruido total en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

Gracias al elevado número de registros obtenidos durante el monitorizado de ruido, hemos obtenido una correlación adecuada entre el ruido total y la velocidad de viento a 10 metros de altura (R^2 superior a 0,84) en todos los casos estudiados.

	Punto de medida 1		Punto de medida 2	
	Día/Tarde	Noche	Día/Tarde	Noche
Coefficiente de determinación R^2	0,92	0,84	0,91	0,94

Tabla 41. Coeficientes de correlación asociados al ajuste por regresión para cada punto de medida y periodo

Además, se observa como el ruido total del periodo diurno aumenta de forma homogénea con la velocidad de viento hasta alcanzar aproximadamente 7 m/s, momento en el que se estabiliza. Esta tendencia responde a la evolución de la potencia acústica del aerogenerador de la Ilustración 23. En el periodo nocturno, se observa como esta estabilización se alcanza a velocidades inferiores (5 y 6 m/s respectivamente para el punto de medida 1 y 2), fruto de la entrada en funcionamiento de las estrategias de bajo ruido y paradas de la tabla 14.

Método III. Análisis Agrupado por Bines de Viento

El análisis agrupado por bienes de viento se ha realizado a partir de los mismos registros minutales empleados en el método II, contando con más de 65 horas de valoración durante el periodo diurno y más de 27 horas durante el periodo nocturno en todos los puntos de medida (Tabla 40). Dado que el método empleado recomienda que al menos existan 60 registros para cada bin de viento, se descarta el análisis del punto de medida 1 para velocidades de viento de 9 m/s.

Conforme a estos resultados, el rango de velocidades estudiado durante el periodo diurno comprende velocidades de viento de 3 m/s a 10 m/s mientras que durante el periodo nocturno se restringe desde 3 m/s a 8 m/s en el punto de medida 1 y hasta 9 m/s en el punto de medida 2.

En la siguientes tablas (Tablas 42-45) se muestran la media aritmética del ruido total (expresado como L_{Aeq}) y la desviación estándar para cada bin de viento analizado.

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	N	Media	Desviación estándar
3	989	36,3	1,3
4	419	40,0	3,2
5	648	46,0	1,8
6	658	49,1	1,3
7	436	50,4	0,9
8	373	50,1	1,4
9	301	49,3	1,1
10	125	49,4	1,2
Total	3949	47,7	5,9

Tabla 42. Análisis estadístico de los registros correspondiente al punto de medida 1 durante el periodo diurno

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	N	Media	Desviación estándar
3	204	35,4	1,0
4	134	40,0	2,3
5	313	42,3	1,6
6	513	43,2	1,1
7	337	43,8	0,8
8	116	44,0	0,7
9	48	35,4	1,0
Total	1665	42,0	3,0

Tabla 43. Análisis estadístico de los registros correspondiente al punto de medida 1 durante el periodo noche

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	N	Media	Desviación estándar
3	1097	34,7	1,8
4	339	37,2	2,9
5	396	44,4	2,7
6	573	47,6	1,2
7	544	48,5	0,8
8	380	49,2	1,4
9	426	49,9	2,0
10	374	50,9	2,1
Total	4129	43,8	6,7

Tabla 44. Análisis estadístico de los registros correspondiente al punto de medida 2 durante el periodo diurno

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	N	Media	Desviación estándar
3	404	34,4	0,9
4	84	37,5	3,5
5	136	45,4	1,0
6	439	46,2	0,6
7	425	46,4	0,5
8	325	46,3	0,5
9	87	46,1	0,6
Total	1900	43,3	5,1

Tabla 45. Análisis estadístico de los registros correspondiente al punto de medida 1 durante el periodo noche

Las tablas agrupadas por ventanas de viento proporcionan información de gran interés sobre el valor medio más probable así como la dispersión de las muestras en ese intervalo. De forma general y al igual que ocurre en el método II, la variación de los promedios aritméticos se incrementa con la velocidad de viento en el periodo diurno. Durante el periodo nocturno, se identifica más claramente el momento en que entran en funcionamiento las medidas de mitigación: bin de 5 m/s en tabla 43 para el punto de medida 1, igual a 42,3 dBA y bin de 6 m/s en la tabla 45 con un valor promedio de 47,6 dBA.

Con respecto a las desviaciones estándar observadas se aprecia que son superiores durante el periodo diurno que durante el periodo nocturno, lo cual podría estar justificado por la mayor estabilidad de las condiciones de propagación durante el periodo nocturno y la mayor influencia del ruido de fondo durante el día (que no haya sido filtrado eficazmente).

A continuación se muestran los resultados gráficamente agrupado por bins de viento, indicando la línea central la media aritmética de los registros de la muestra y las líneas superior (roja) e inferior (verde) el resultado de añadir o sustraer el valor de la desviación estándar respectivamente:

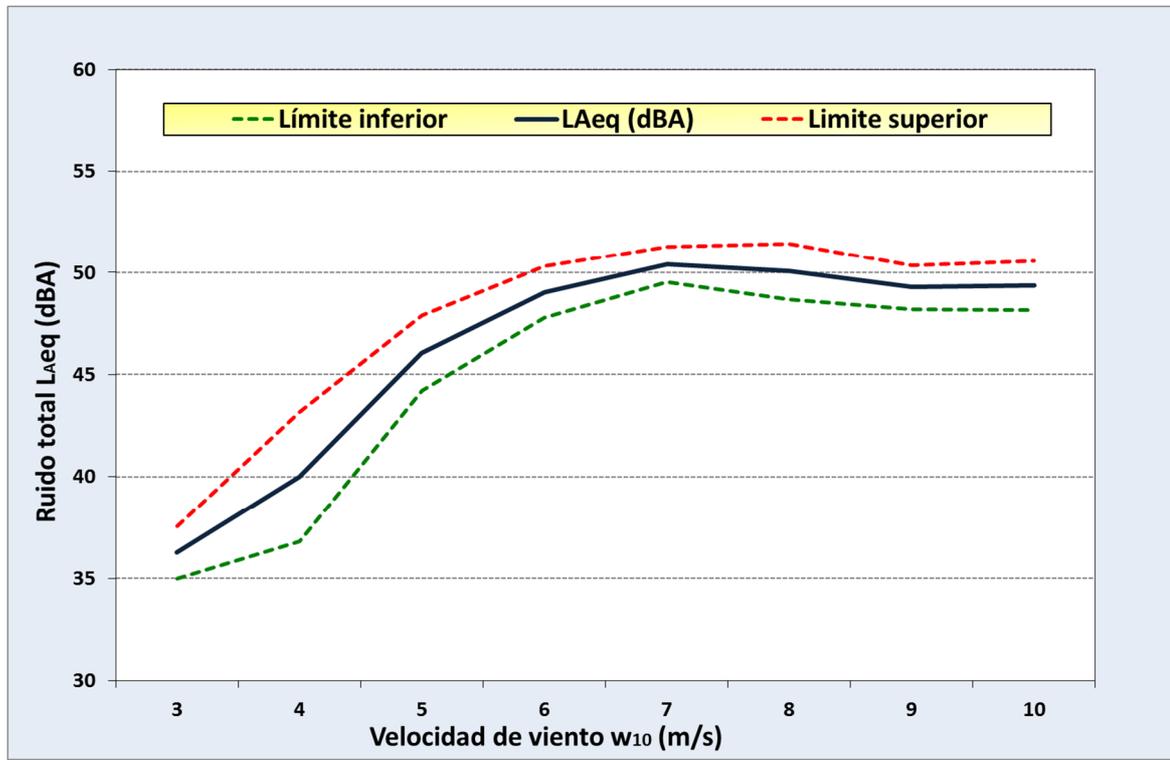


Ilustración 76. Ruido total en el punto de medida 1 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

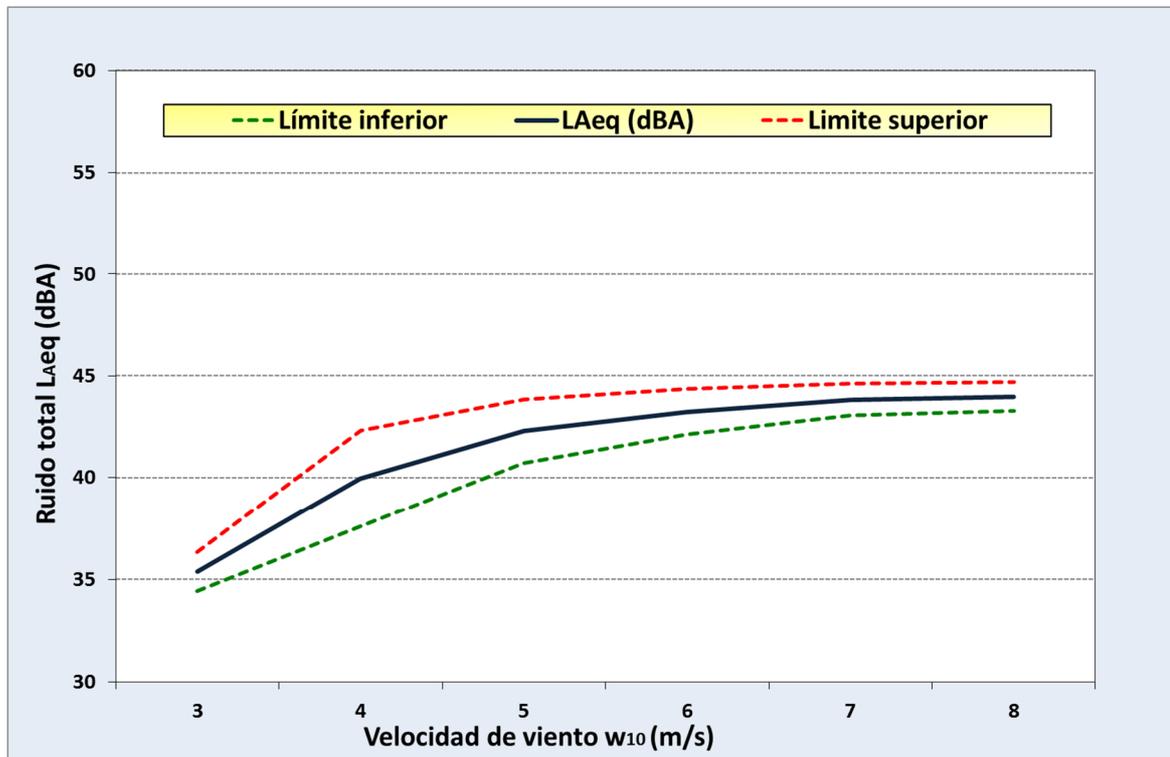


Ilustración 77. Ruido total en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas)

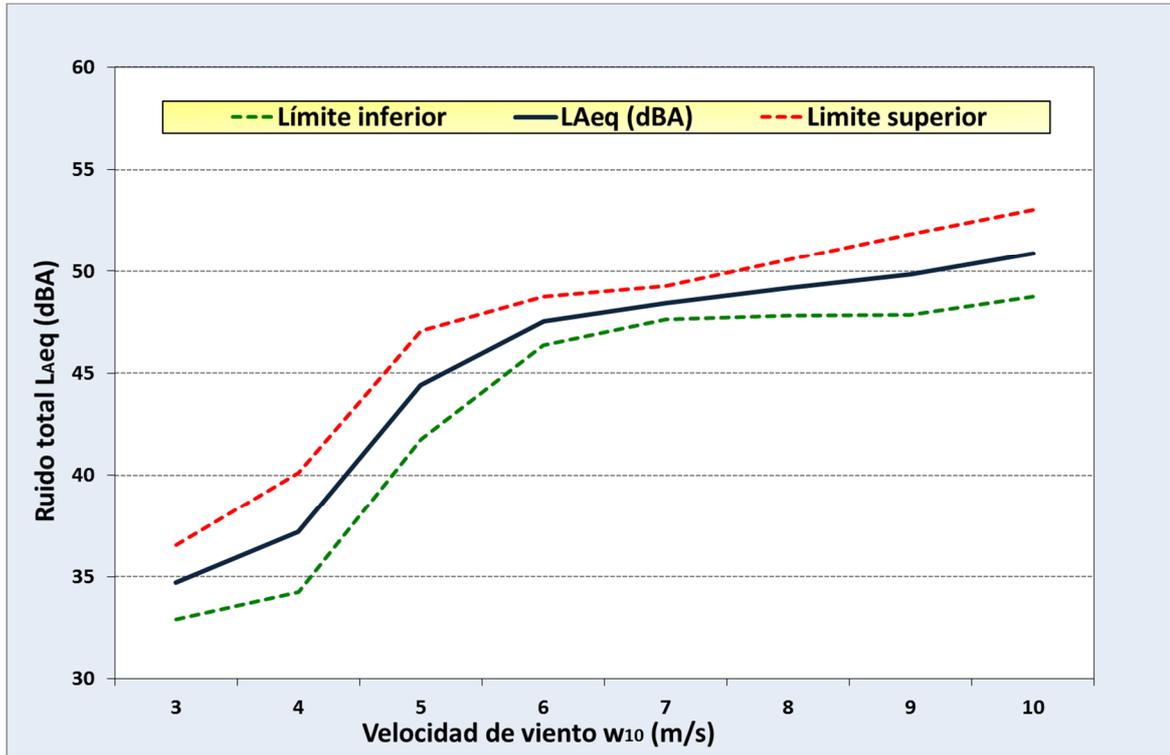


Ilustración 78. Ruido total en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

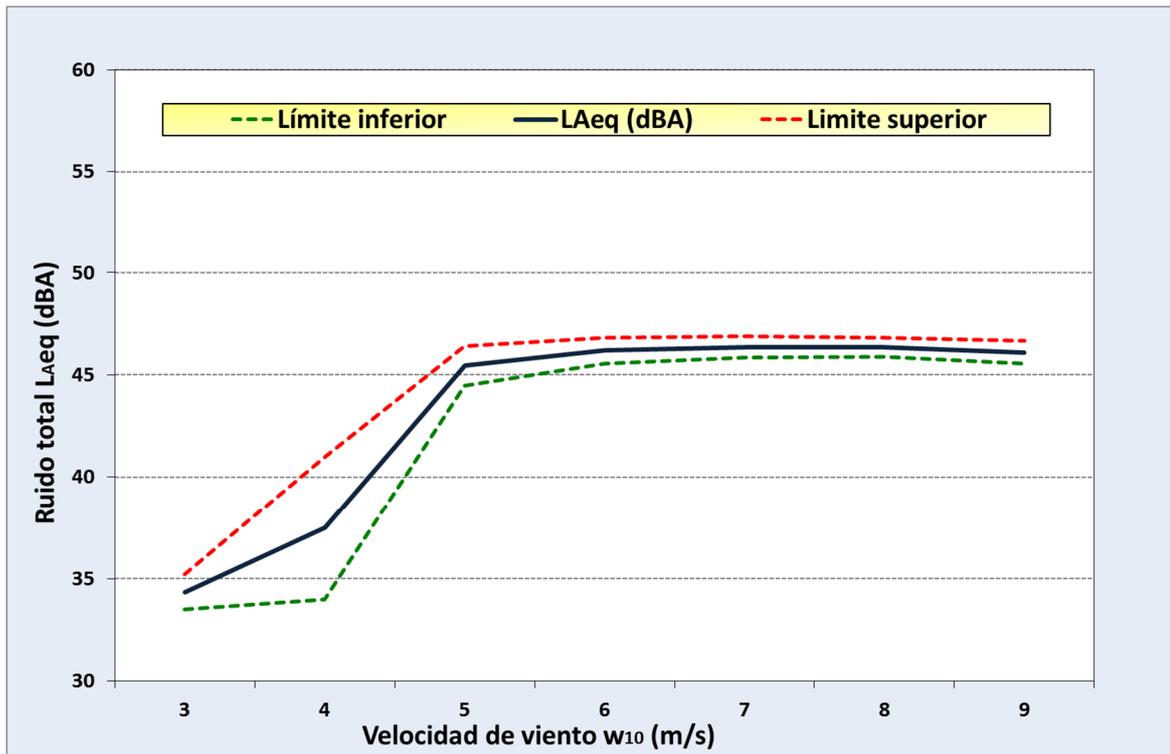


Ilustración 79. Ruido total en el punto de medida 2 durante el periodo nocturno (23:00-07:00 horas)

Evaluación del ruido de fondo

Durante la campaña de monitorizado de ruido fue posible detener el parque eólico durante periodos reducidos de tiempo siendo la duración total de la medida de cuatro horas en cada punto de medida. Tras el filtrado de datos, proporcionaron aproximadamente 120 registros minutales válidos para la caracterización del ruido de fondo en cada punto de medida.

La duración de los ensayos de corta duración para la valoración del ruido de fondo con el parque eólico parado se ha demostrado insuficiente (R^2 inferiores a 0,3) para obtener registros sonoros que permitan establecer una correlación del ruido de fondo con la velocidad de viento.

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	Número de registros válidos			
	Punto de medida 1		Punto de medida 2	
	Día/Tarde	Noche	Día/Tarde	Noche
Total	120	116	135	102

Tabla 46. Número de registros válidos por punto de medida y periodo de valoración

Por lo expuesto en las Ilustraciones 80 a 83, se concluye que la campaña de ensayos de ruido de fondo no fue representativa (salvo para la valoración de registros discretos) y no será posible determinar la aportación del ruido de fondo sobre el ruido total monitorizado en base a las siguientes afirmaciones:

- El rango de velocidades estudiado no comprende el intervalo registrado durante el monitorizado de ruido total (3-10 m/s para el periodo diurno y 3-9 m/s para el periodo nocturno).
- La dispersión de los datos obtenidos no permite alcanzar el número mínimo de muestras (20) para cada bin de velocidades de viento.
- Para los datos obtenidos no existe una adecuada correlación entre los niveles de ruido de fondo y la velocidad de viento (coeficientes de determinación $R^2 < 0,8$).
- La influencia de la actividad humana en el punto de medida 1 durante el periodo día sin duda fue un factor determinante en la alta variabilidad de los datos obtenidos.

A continuación se incluyen la nube de dispersión de datos y curvas de regresión polinomial de segundo orden (en aquellos casos que se identifica un patrón de correlación) para todos los periodos y puntos de medida valorados.

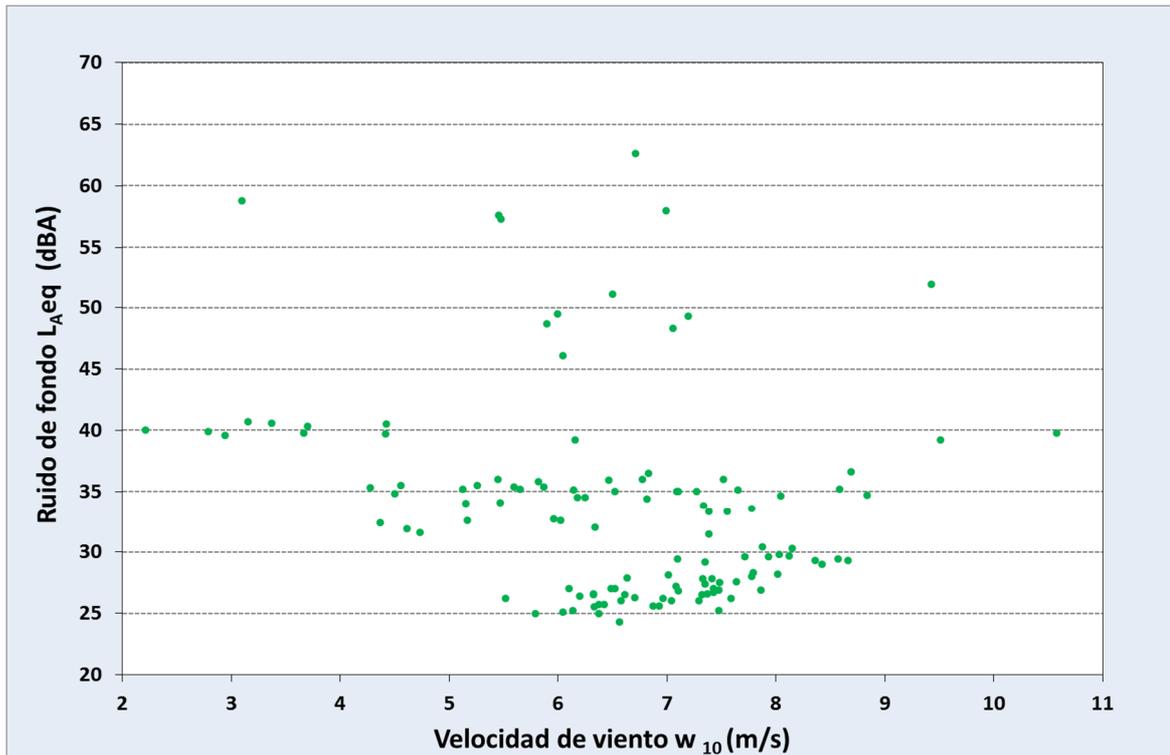


Ilustración 80. Ruido de fondo en el punto de medida 1 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

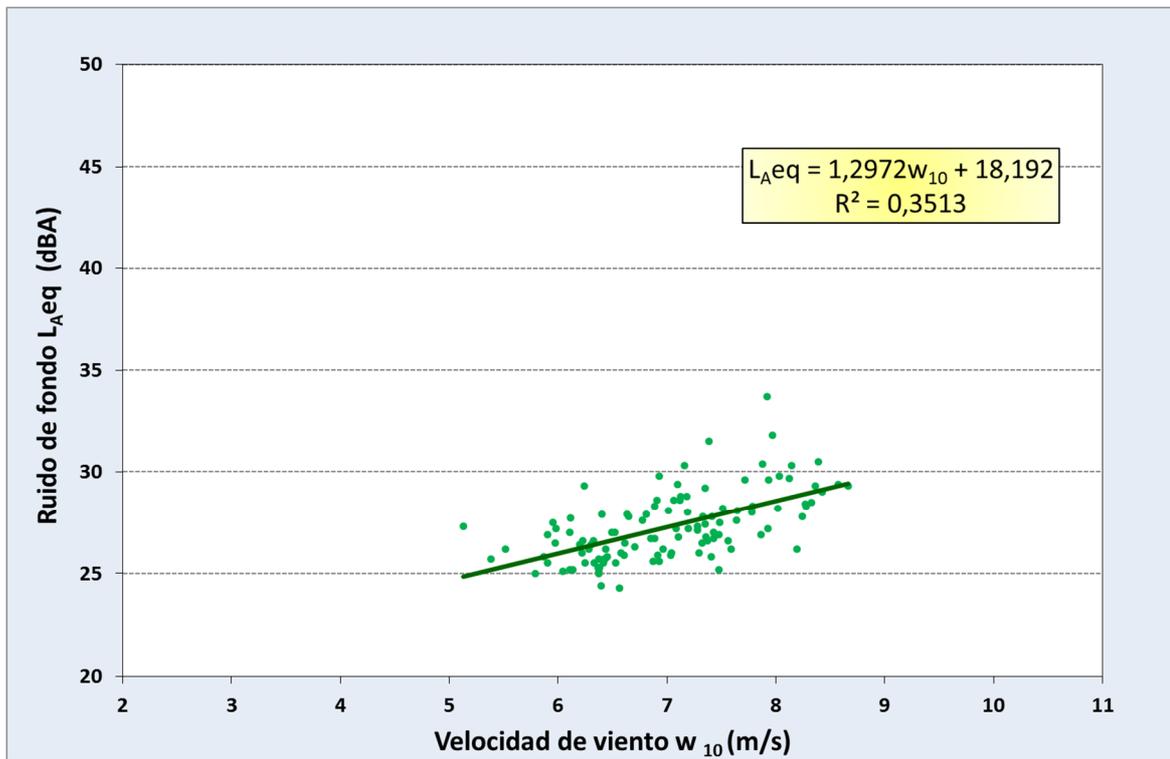


Ilustración 81. Ruido de fondo en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas)

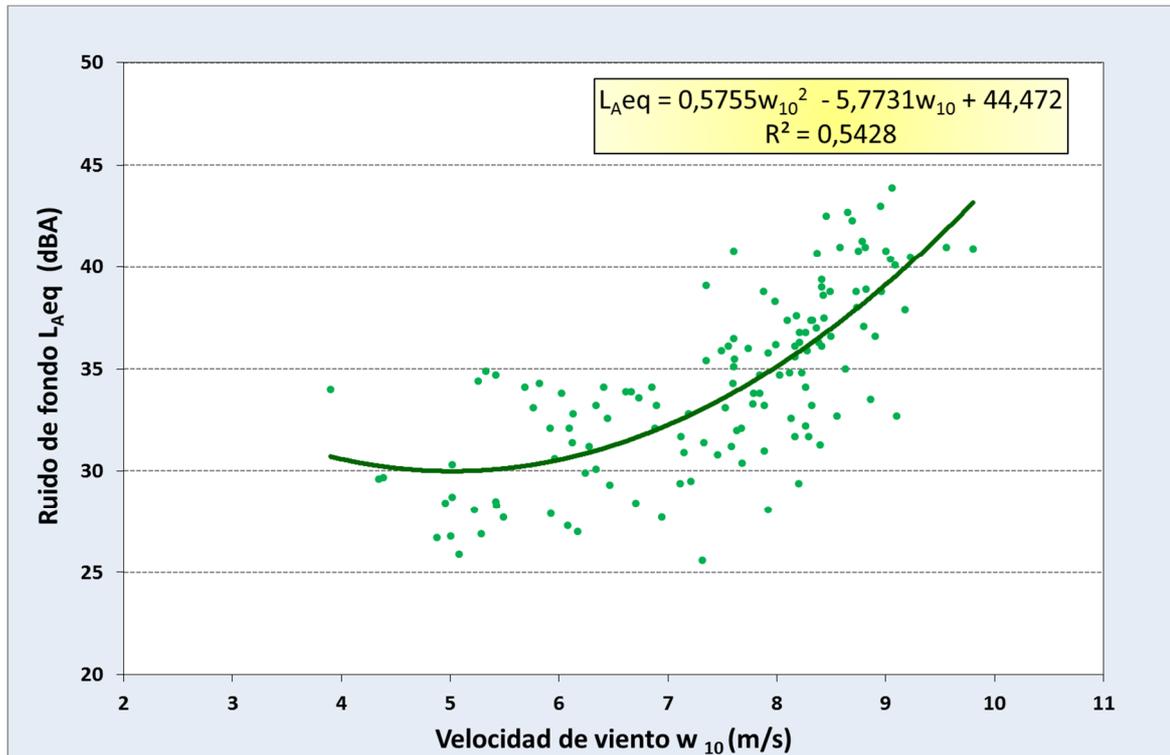


Ilustración 82. Ruido de fondo en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

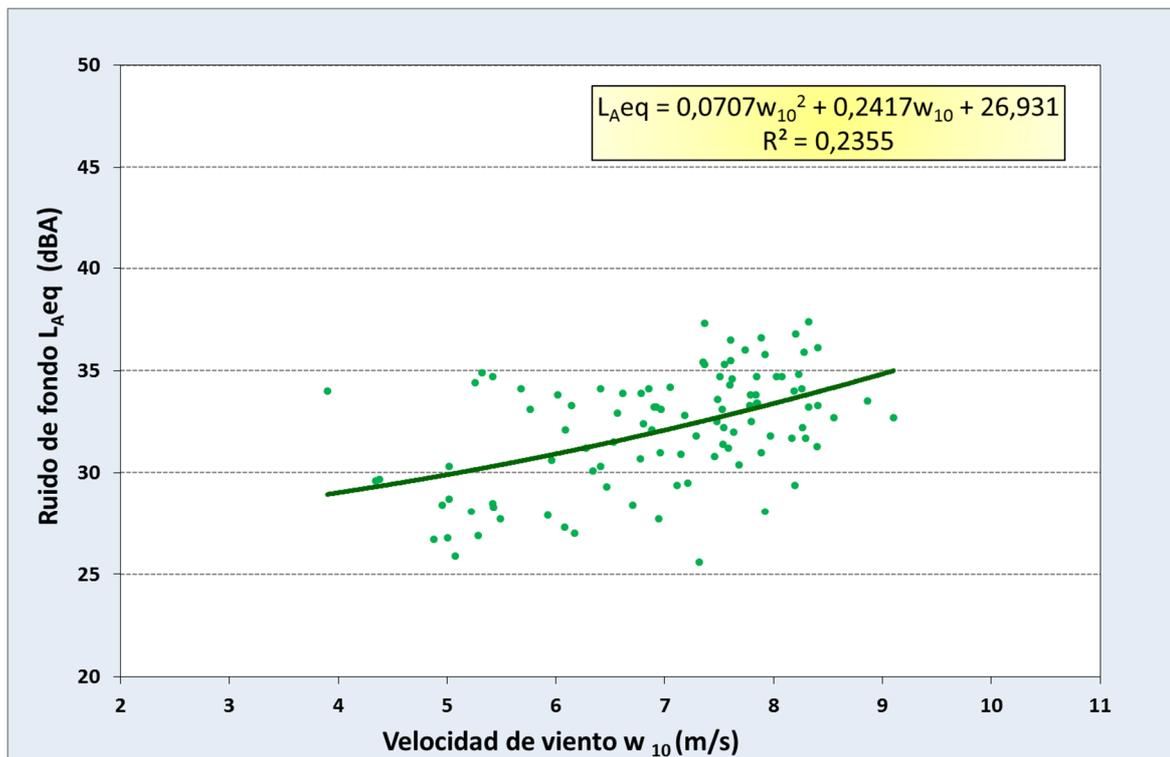


Ilustración 83. Ruido de fondo en el punto de medida 2 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas)

Con vistas a analizar el impacto del ruido de fondo en los niveles sonoros registrados, se ha procedido a analizar las diferencias entre ruido total y ruido de fondo obtenidas en las medidas de corta duración realizadas para cada punto de medida. En la siguiente tabla, se resumen las

diferencias encontradas entre ambos valores así como su influencia sobre los niveles de inmisión sonora para cada velocidad de viento.

Periodo	Velocidad de viento (m/s)	Diferencia aritmética (dBA) $L_{AeqT}-L_{Aeqrf}$	Contribución del ruido de fondo (dBA)
Diurno	6	23,7	0,0
	7	22,6	0,0
	7	19,6	0,0
	8	16,9	0,1
Nocturno	7	11,6	0,3
	8	10,7	0,4
	9	12,4	0,3
Promedio		16,8	0,2

Tabla 47. Contribución del ruido de fondo sobre el ruido total registrado en el punto de medida 1

Periodo	Velocidad de viento (m/s)	Diferencia aritmética (dBA) $L_{AeqT}-L_{Aeqrf}$	Contribución del ruido de fondo (dBA)
Diurno	6	15,4	0,1
	7	11,3	0,3
	8	13,0	0,2
	9	11,4	0,3
	10	9,3	0,5
Nocturno	11	11,3	0,3
	13	10,3	0,4
Promedio		11,7	0,3

Tabla 48. Contribución del ruido de fondo sobre el ruido total registrado en el punto de medida 2

Los resultados muestran unas diferencias promedio superiores a 17 dBA en el punto de medida 1 y a 11 dBA en el punto de medida 2, con contribuciones al ruido total de 0,2 y 0,3 dBA respectivamente. La mayor contribución observada es de 0,5 dBA en el bin de viento de 10 m/s en el periodo diurno en el punto de medida 2 que se encontraba habitado durante la realización de los ensayos.

En base a estos resultados, se concluye que es consistente la consideración del ruido total como contribución sonora exclusiva del parque eólico con un margen muy bajo de desviación. Esta afirmación se fundamenta en:

1. Las diferencias promedios entre ruido total y ruido fondo superiores a 10 dBA en los puntos de medida con una influencia máxima de 0,5 dBA sobre los niveles registrados;
2. El proceso de filtrado al que se verán sometidos los registros sonoros para eliminar la influencia de eventos ajenos al funcionamiento del parque.
3. La selección de los puntos de medidas alejados de vegetación y otros elementos que puedan introducir mayores niveles de ruido de fondo a medida que se incrementa la velocidad del viento.
4. El elevado número de muestras obtenidas para cada ventana meteorológica.

Evaluación de la incertidumbre

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos para la incertidumbre expandida para cada punto de medida y ventana de viento, con una probabilidad de cobertura del 95%.

Velocidad de viento	U_{eq} (dBA)	U_{op} (dBA)	U_{loc} (dBA)	U_{met} (dBA)	U_{rf} (dBA)	U_T (dBA)
3	0,5	1,4	1	2,0	0,0	5,4
4	0,5	1,3	1	2,0	0,2	5,3
5	0,5	1,4	1	2,0	0,2	5,4
6	0,5	1,7	1	2,0	0,0	5,7
7-10	0,5	1,5	1	2,0	0,1	5,5

Tabla 49. Estimación de la incertidumbre expandida para el punto de medida 1

Velocidad de viento	U_{eq} (dBA)	U_{op} (dBA)	U_{loc} (dBA)	U_{met} (dBA)	U_{rf} (dBA)	U_T (dBA)
3	0,6	1,4	1	2,0	0,2	5,4
4	0,6	1,3	1	2,0	0,3	5,3
5	0,6	1,4	1	2,0	0,5	5,5
6	0,5	1,7	1	2,0	0,1	5,7
7-10	0,5	1,5	1	2,0	0,4	5,5

Tabla 50. Estimación de la incertidumbre expandida para el punto de medida 2

El rango de incertidumbres obtenidos responde en su mayor parte a la variabilidad en la propagación que introduce la meteorología así como en la variabilidad de emisión de la fuente. De esta forma el bin de viento de 6 m/s es el que presentan mayores incertidumbres debido a la variabilidad en la operación de los aerogeneradores registradas a dicha velocidad.

Es conveniente destacar que la influencia del ruido de fondo en base a los muestras discretas obtenidas es muy poco significativo (valor máximo de 0,2 dBA en el punto de medida 1 y 0,5 dBA en el punto 2 según tablas 49 y 50) por lo que podemos asumir el ruido total como procedente del parque eólico con un rango de error mínimo.

7.2 RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN SONORA

Norma ISO 9613-2:1996 Atenuación del Ruido en Propagación de Exteriores. Método General de Cálculo

Las siguientes graficas representan los resultados obtenidos aplicando un modelo base según la Norma 9613 así como las correcciones recomendadas por la metodología IOA para cada uno de los puntos de medidas y periodos considerados. En concreto la denominación “Corrección A_{bar} ” se refiere a la limitación del apantallamiento del terreno a no más de 2 dBA cuando el rotor de los aerogeneradores no está visible y “Corrección IOA” cuando además se introducen correcciones para la consideración de reflexiones múltiples por la topografía del perfil vertical entre el aerogenerador y el receptor.

Los resultados se presentan ordenados en función de la absorción del terreno considerada en el modelo de predicción, comenzando por el valor más bajo $G=0$ (suelo duro), intermedio ($G=0,5$) y finalmente la absorción de acuerdo a los diferentes usos de suelos (coberturas según CORINE LAND COVER – CLC, en adelante).

En el Anexo II se encuentra los resultados numéricos para cada uno de los escenarios estudiados.

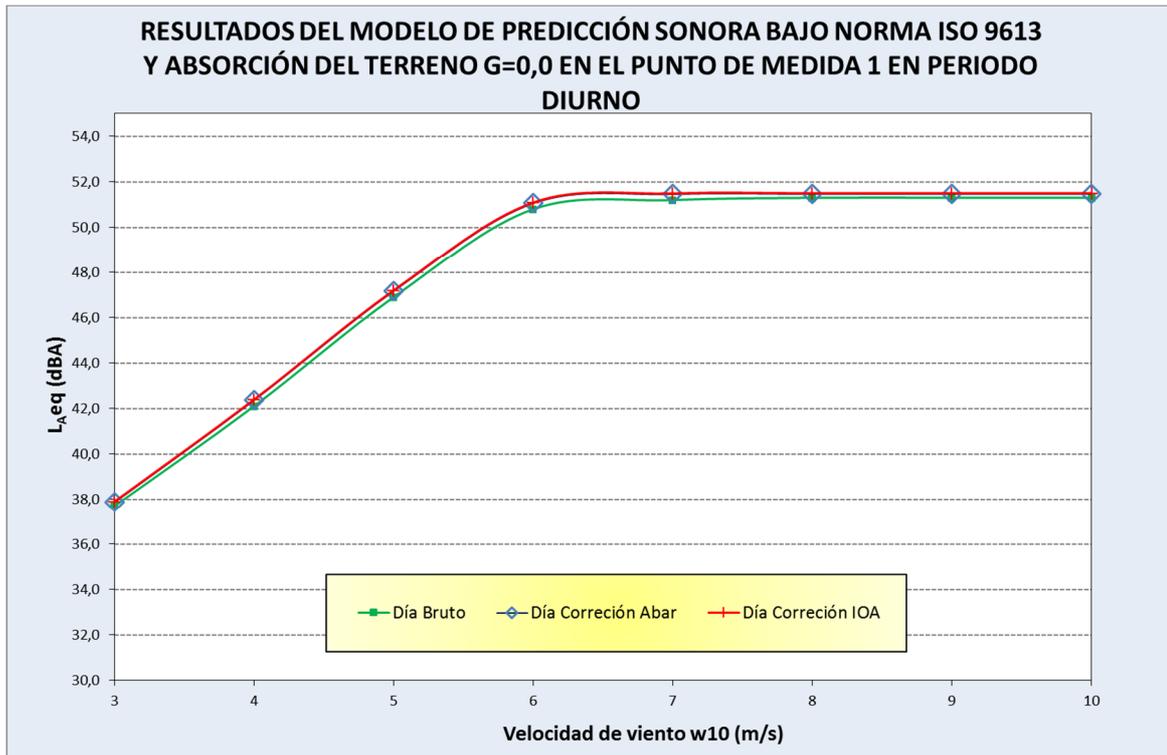


Ilustración 84. Resultados ISO9613 para el punto de medida 1 de día y G=0

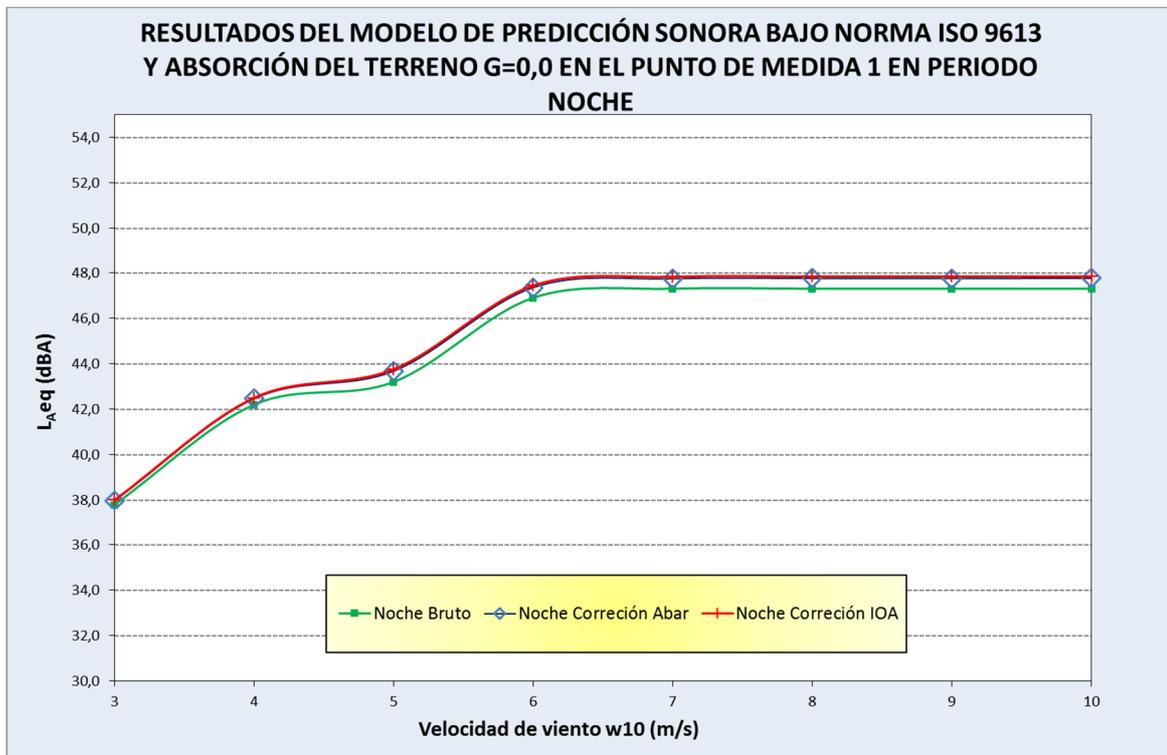


Ilustración 85. Resultados ISO9613 para el punto de medida 1 de noche y G=0

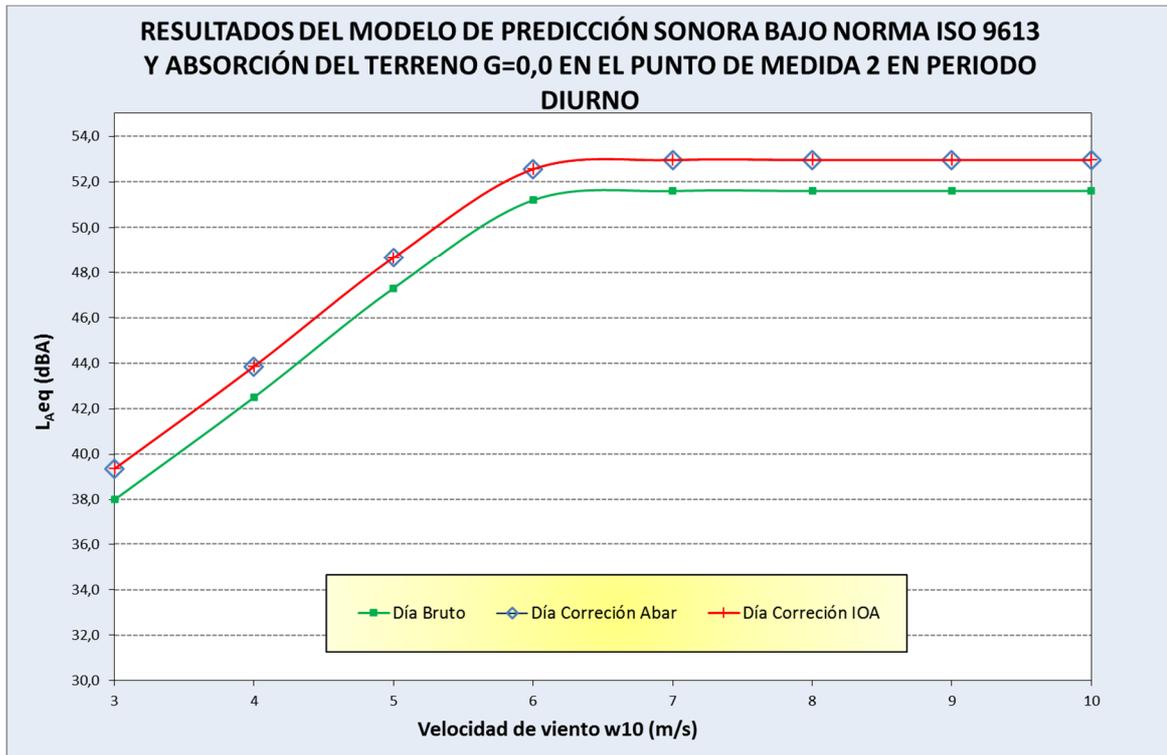


Ilustración 86. Resultados ISO9613 para el punto de medida 2 de día y G=0

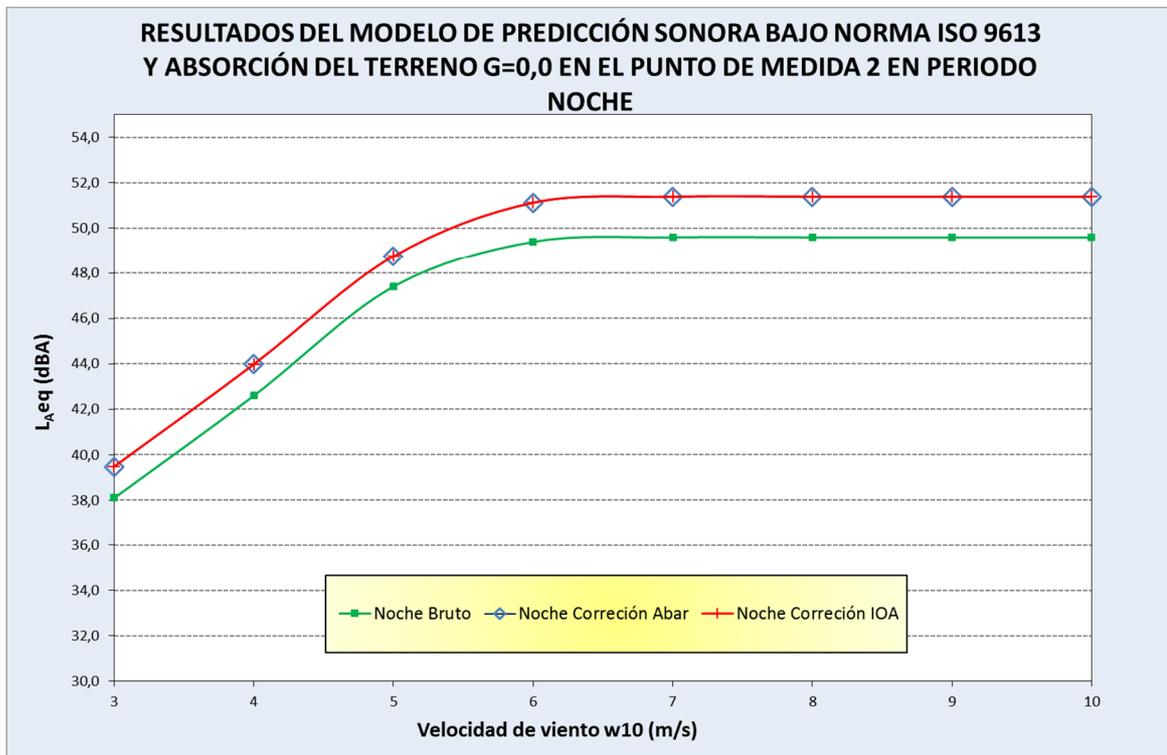


Ilustración 87. Resultados ISO9613 para el punto de medida 2 de noche y G=0

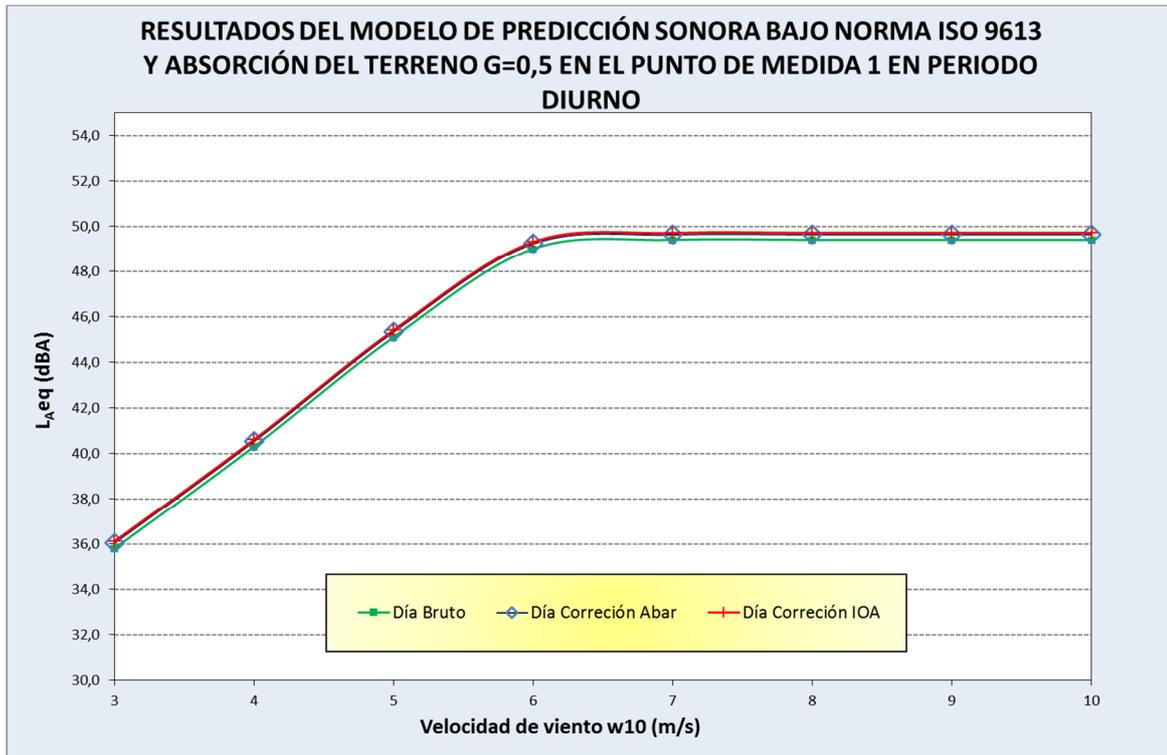


Ilustración 88. Resultados ISO9613 para el punto de medida 1 de día y G=0,5

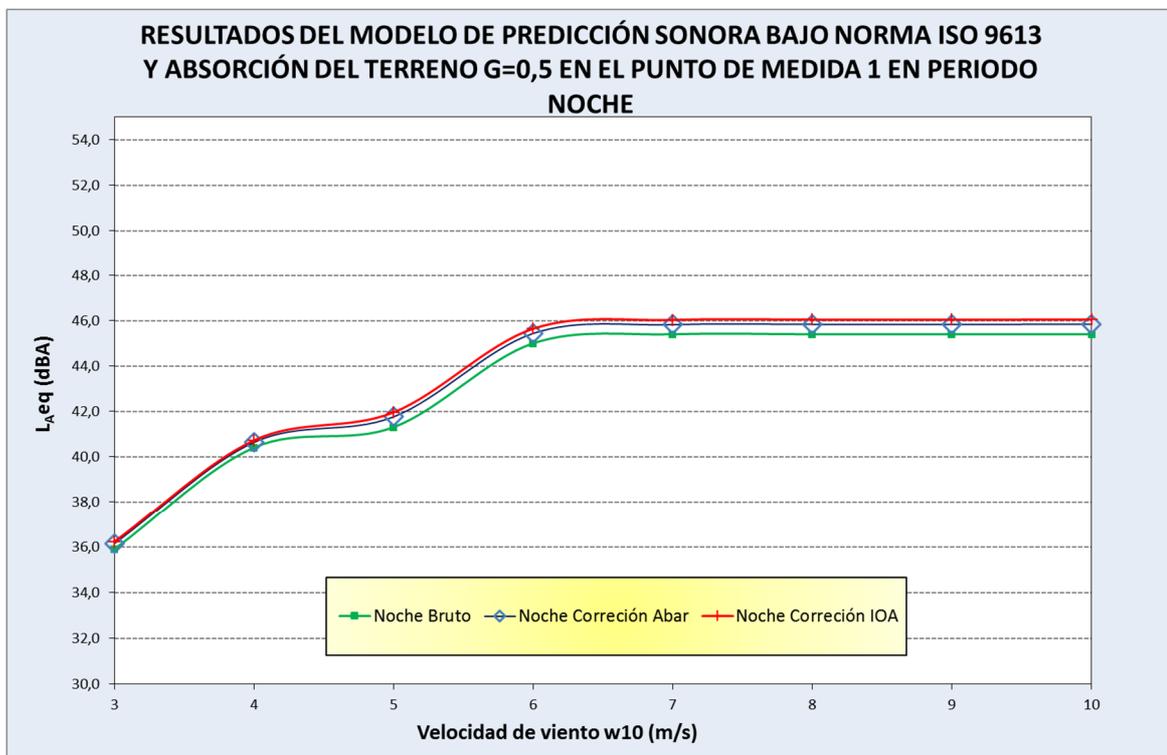


Ilustración 89. Resultados ISO9613 para el punto de medida 1 de noche y G=0,5

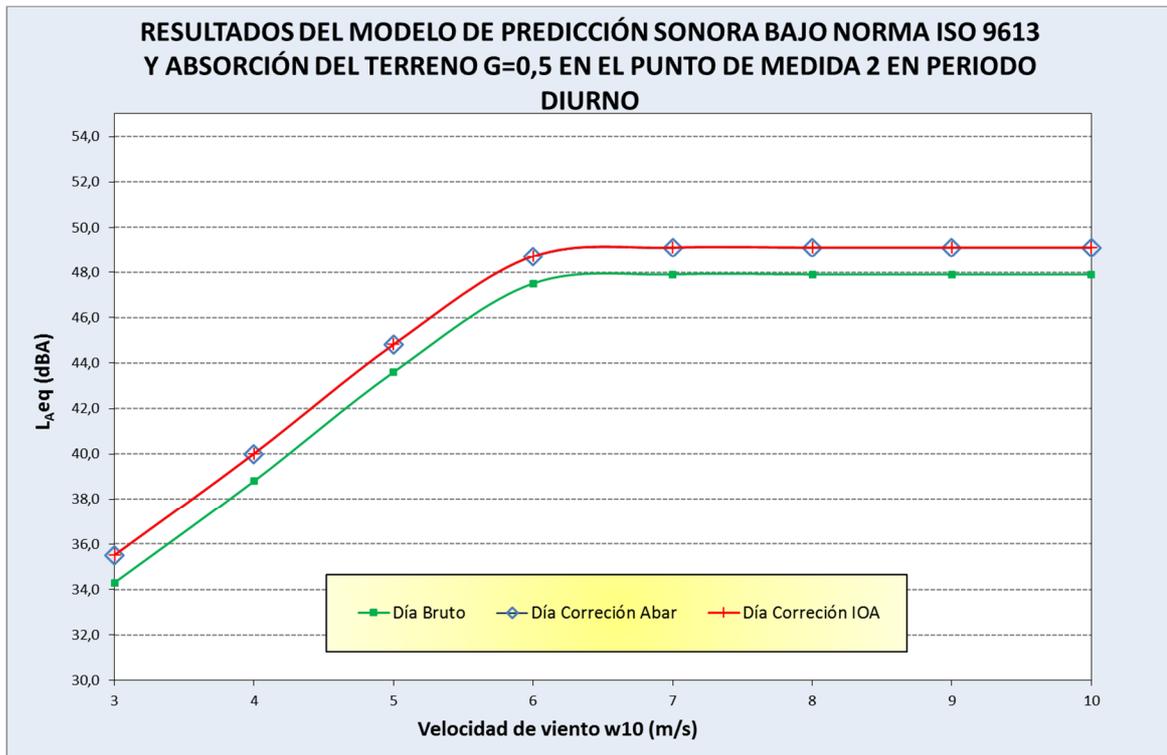


Ilustración 90. Resultados ISO9613 para el punto de medida 2 de día y G=0,5

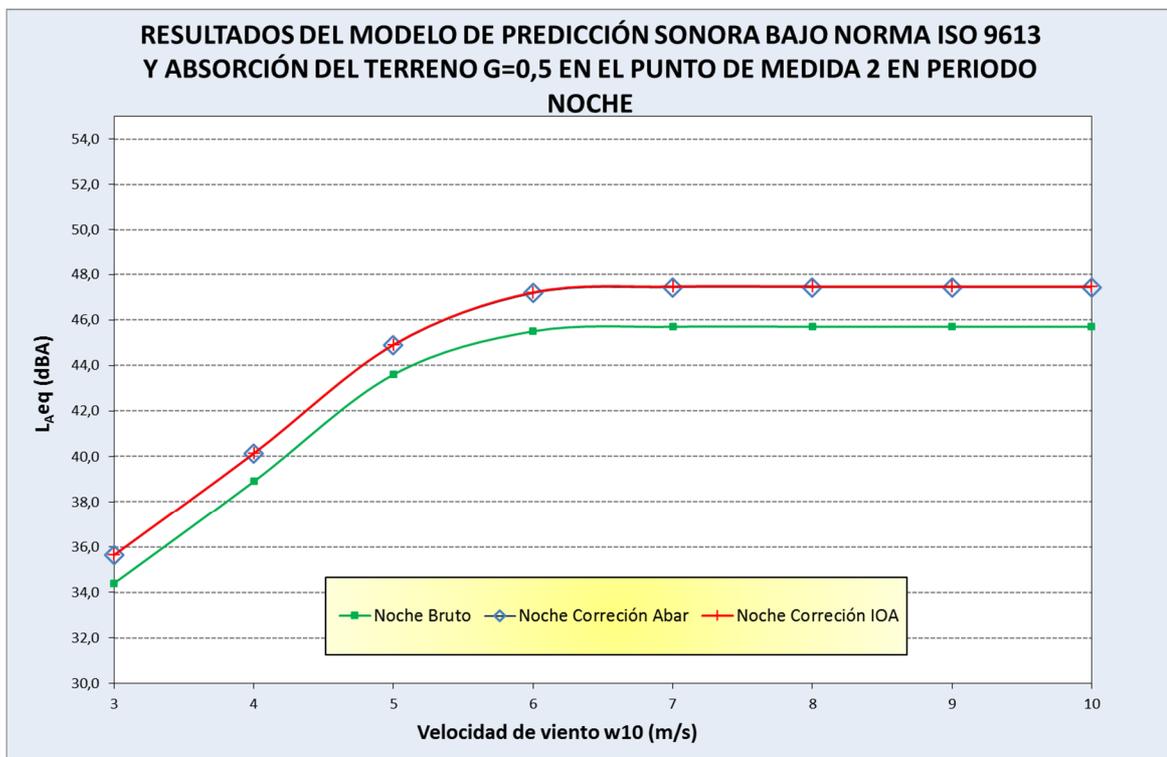


Ilustración 91. Resultados ISO9613 para el punto de medida 2 de noche y G=0,5

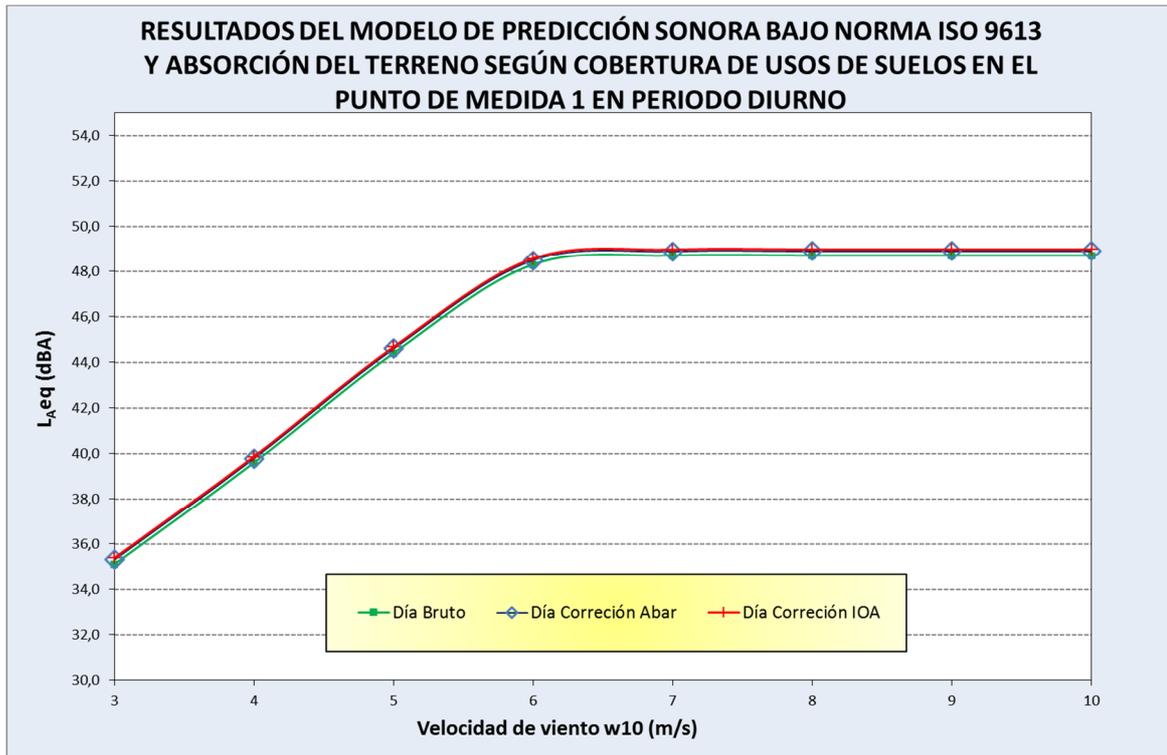


Ilustración 92. Resultados ISO9613 para el punto de medida 1 de día y factor G según CORINE

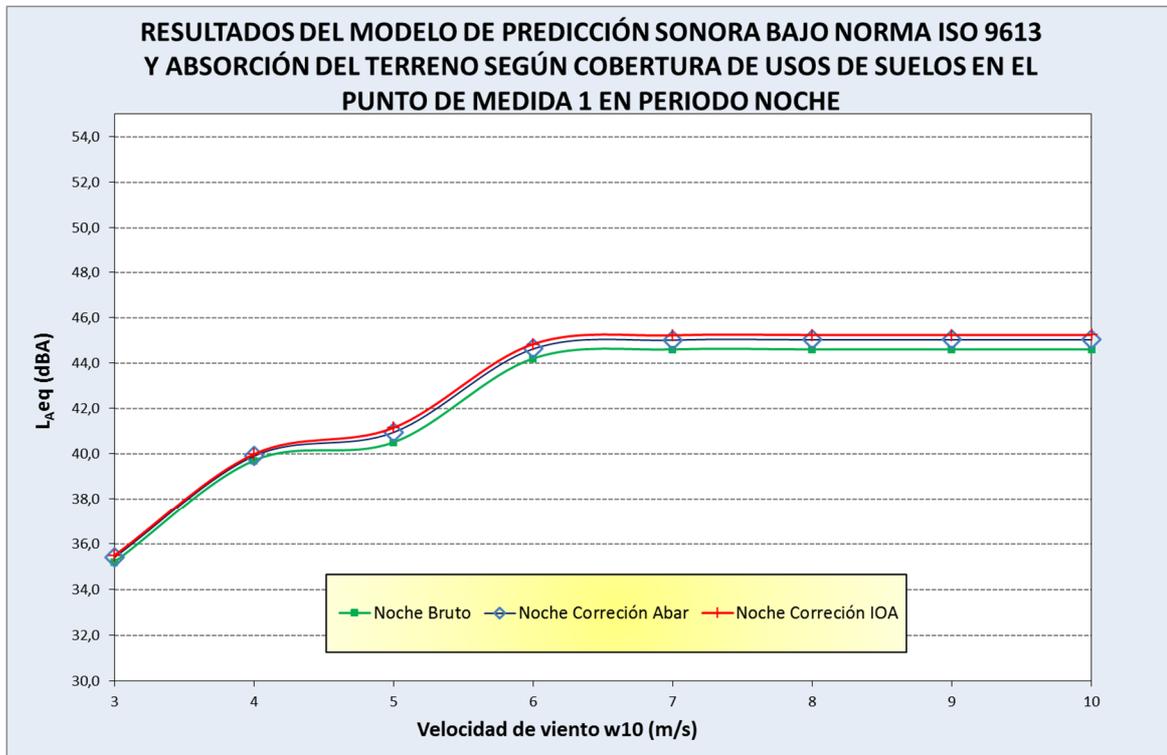


Ilustración 93. Resultados ISO9613 para el punto de medida 1 de noche y factor G según CORINE

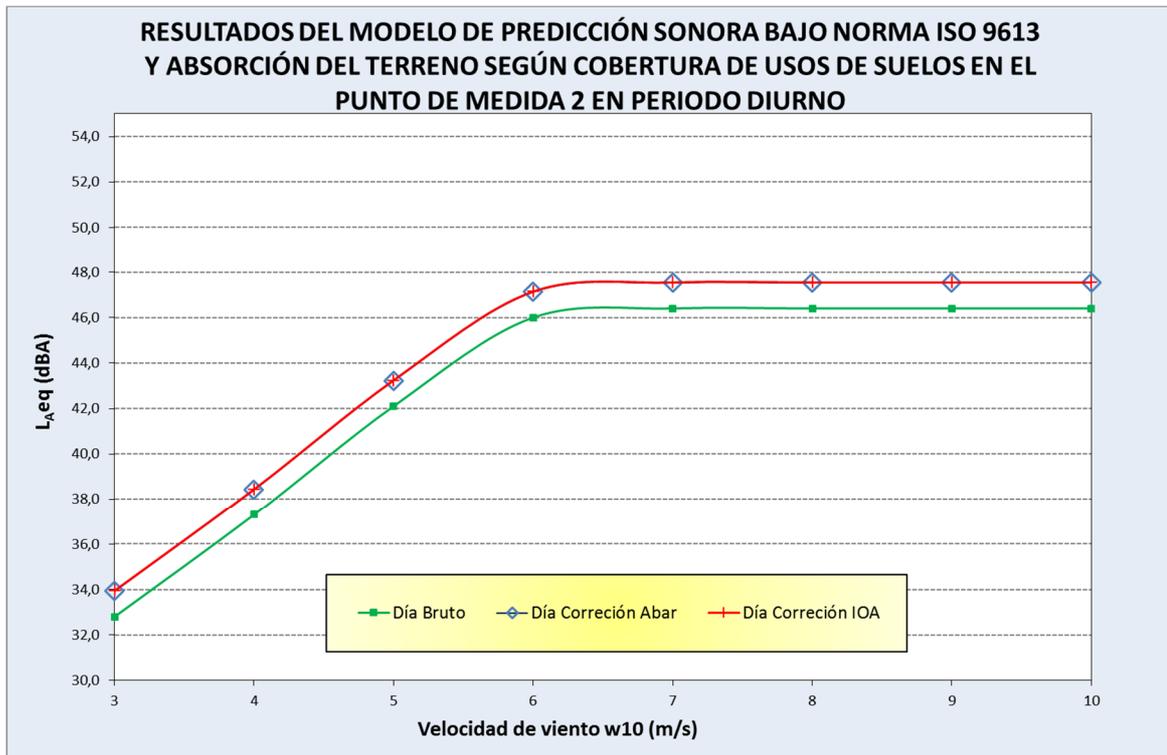


Ilustración 94. Resultados ISO9613 para el punto de medida 2 de día y factor G según CORINE

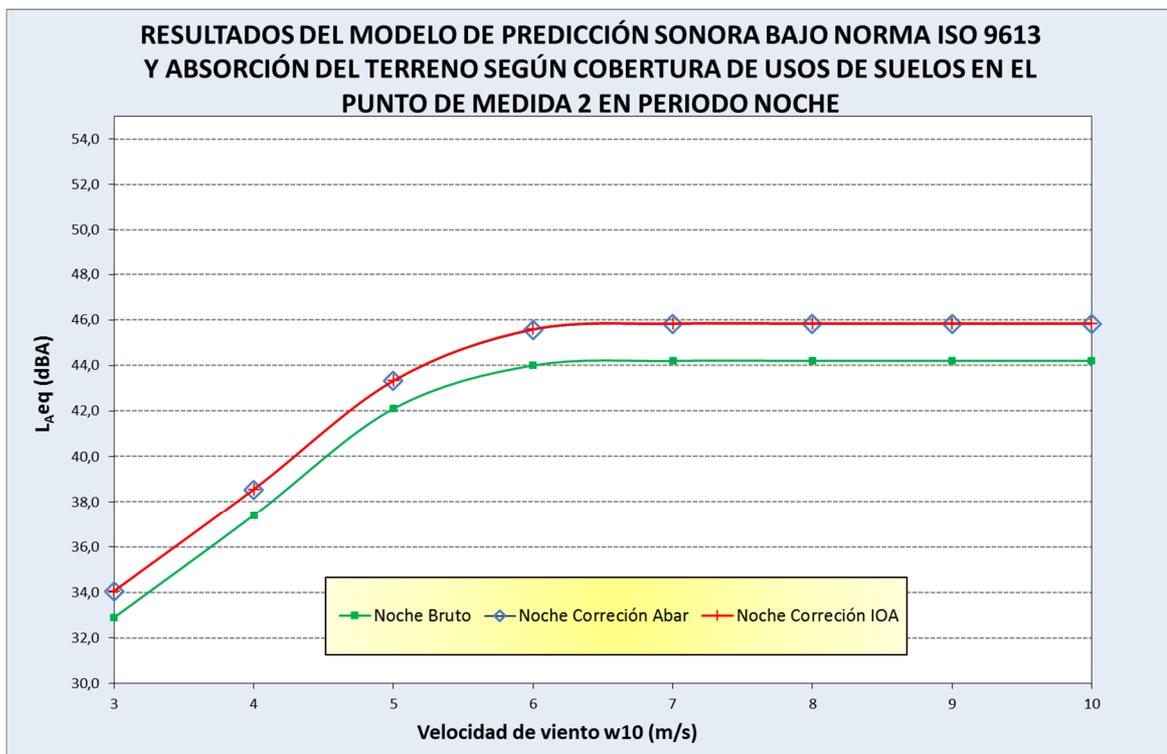


Ilustración 95. Resultados ISO9613 para el punto de medida 2 de noche y factor G según CORINE

Las predicciones de los niveles sonoros en los puntos de medida 1 y 2 se ajustan a la variación de la potencia acústica de los aerogeneradores en función de la velocidad de viento, tal y como se especifica en la ilustración 23. En el periodo diurno, cuando no se encuentran implementada ningún modo de bajo ruido, el nivel sonoro se incrementa desde la velocidad de arranque hasta alcanzar el valor máximo de potencia acústica a una velocidad de viento de 7 m/s (variación de niveles sonoros en un rango de 12 dBA). Durante la noche, los niveles sonoros se ajustan a las estrategias de bajo ruido implementadas para cada una de las viviendas analizadas tal y como se explica en el apartado de condiciones de funcionamiento del parque eólico. Estas estrategias fueron diseñadas para no superar un nivel sonoro aproximado de 45 dBA a nivel de las edificaciones y los modos de bajo ruido se activan a partir de velocidades de 5 m/s en el punto de medida 1 y a partir de velocidades de 6 m/s en el punto de medida 2. La reducción de potencia acústica asociada a estas estrategias se pone de manifiesto con una disminución del nivel sonoro con la velocidad de viento hasta alcanzar el nivel sonoro máximo objetivo de 45 dBA (de forma aproximada).

A continuación se presenta las diferencias existentes respecto al modelo base cuando se aplican las correcciones derivadas de la aplicación de las recomendaciones del IOA. La influencia debida a la aplicación de corrección por reflexiones múltiples ha sido calculada a partir de los resultados según la metodología IOA y el incremento asociado a la limitación de la atenuación del terreno.

INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA A LIMITACIÓN A_{bar} (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
ISO 9613 G=0	0,2	0,4	0,3	1,4	1,6	1,5	0,8	1,0	0,9
ISO 9613 G=0,5	0,2	0,4	0,3	1,2	1,5	1,3	0,7	1,0	0,8
ISO 9613 G=CLC	0,2	0,3	0,3	1,1	1,4	1,3	0,7	0,9	0,8
INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA CORRECCIÓN IOA (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
ISO 9613 G=0	0,2	0,4	0,3	1,4	1,6	1,5	0,8	1,1	0,9
ISO 9613 G=0,5	0,3	0,5	0,4	1,2	1,5	1,4	0,8	1,1	0,9
ISO 9613 G=CLC	0,3	0,5	0,4	1,1	1,4	1,3	0,7	1,0	0,8
INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA A CORRECCIÓN IOA POR REFLEXIONES MÚLTIPLES (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
ISO 9613 G=0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ISO 9613 G=0,5	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
ISO 9613 G=CLC	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1

Tabla 51. Incrementos de los niveles sonoros respecto al escenario base fruto de la aplicación de la metodología IOA para la norma ISO9613

Analizando los resultados se obtienen las siguientes conclusiones sobre la implementación de la metodología IOA:

- Los incrementos de los niveles sonoros según IOA respecto al modelo base son significativos para el punto de medida 2 (en torno a 1,1-1,6 dBA) mientras que son pocos representativos en el punto de medida 1 (iguales o inferiores a 0,5 dBA).

- La aplicación de la metodología IOA al caso de estudio ha puesto de manifiesto que la mayor parte de la corrección está asociada a la limitación del apantallamiento del terreno (A_{bar}), mientras que la consideración de reflexiones múltiples es mínima (con un máximo de 0,2 dBA).
- La limitación del apantallamiento del terreno A_{bar} genera mayores incrementos en los niveles sonoros con terreno duro que con terrenos blancos, aunque las diferencias son mínimas (0,1-0,2 dBA). Esta tendencia no se observa en la corrección por reflexiones múltiples.
- El periodo nocturno presenta mayores incrementos en ambos puntos de medidas que en el periodo diurno, promediando niveles sonoros 0,3 dBA superiores.

Método CONCAWE. Propagación del Ruido desde Complejos Petroleros y Petroquímicos a Las Comunidades Vecinas

Las siguientes graficas representan los resultados obtenidos aplicando un modelo base según la Norma 9613 así como las correcciones recomendadas por la metodología IOA para cada uno de los puntos de medidas y periodos considerados. Las denominaciones “Corrección A_{bar} ” y “Corrección IOA” guardan el mismo significado que en la norma anterior.

Los resultados se presentan ordenados en función de la absorción del terreno considerada en el modelo de predicción, presentando en primer lugar los resultados del valor más bajo $G=0$ (suelo duro) y en segundo lugar el resto de escenarios $G \neq 0$ puesto que la atenuación debido al terreno A_{ground} es homogénea para valores diferentes a 0 ($G=0,5$ y CLC representados en la misma gráfica).

En el Anexo II se encuentran los resultados numéricos para cada uno de los escenarios estudiados.

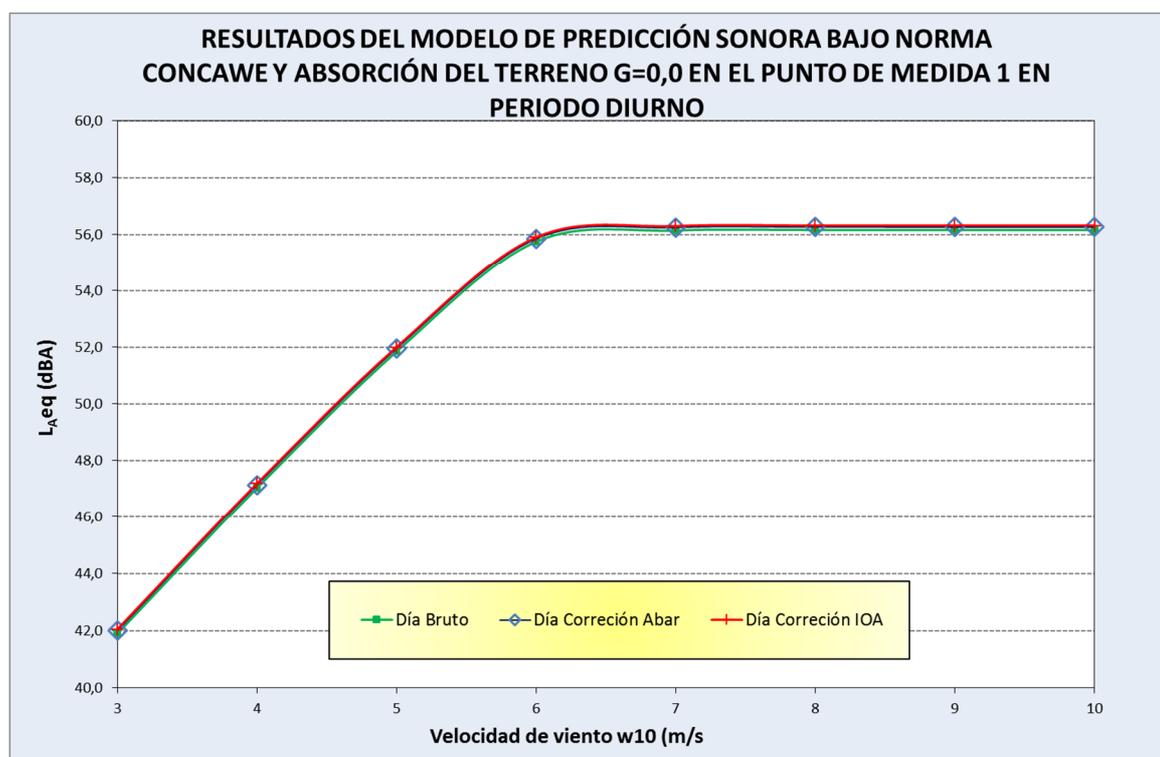


Ilustración 96. Resultados CONCAWE para el punto de medida 1 de día y $G=0$

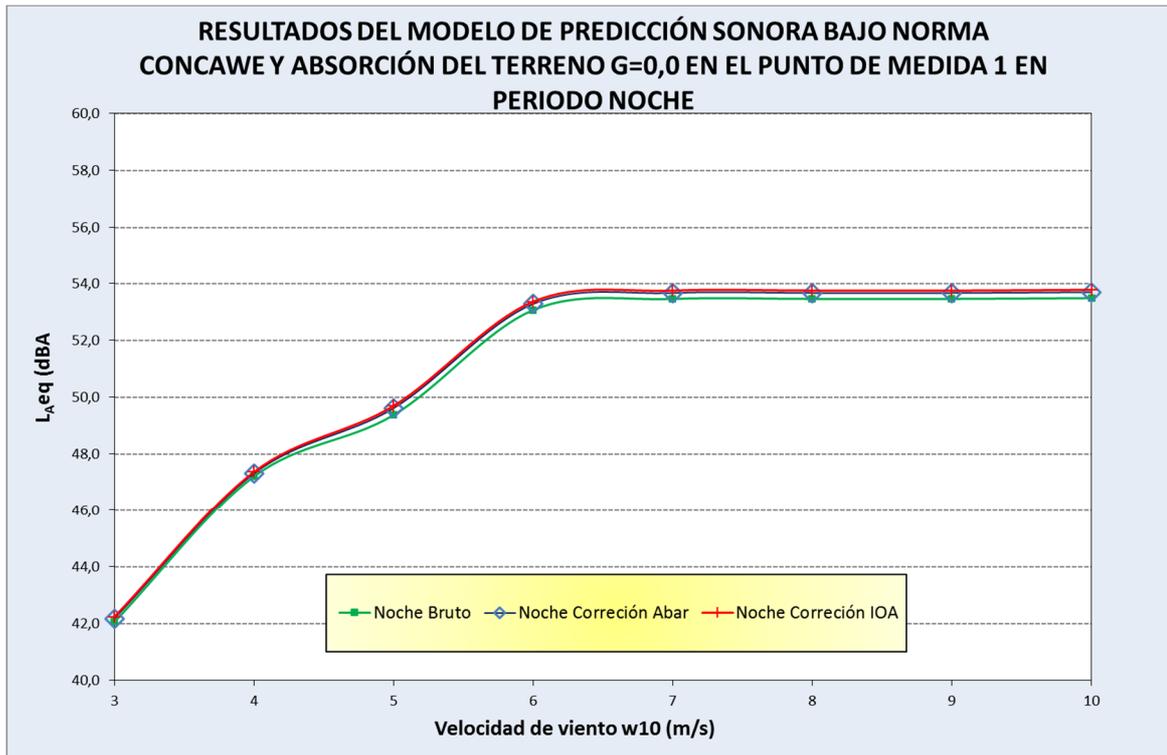


Ilustración 97. Resultados CONCAWE para el punto de medida 1 de noche y G=0

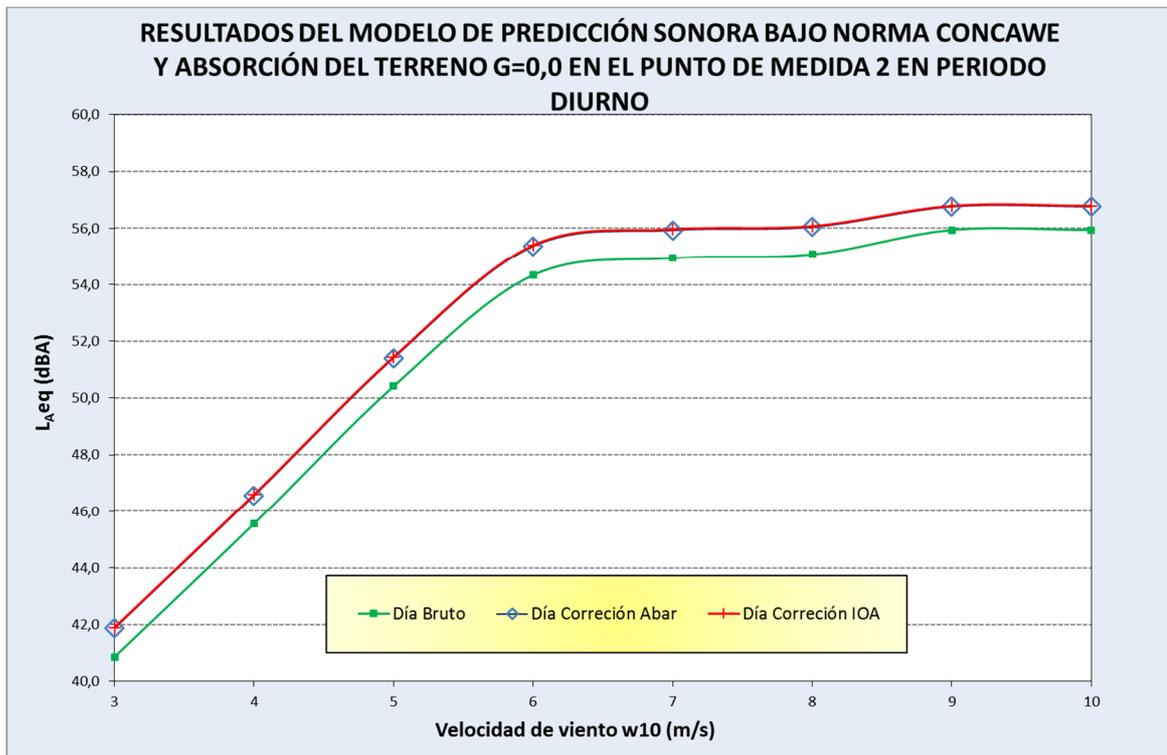


Ilustración 98. Resultados CONCAWE para el punto de medida 2 de día y G=0

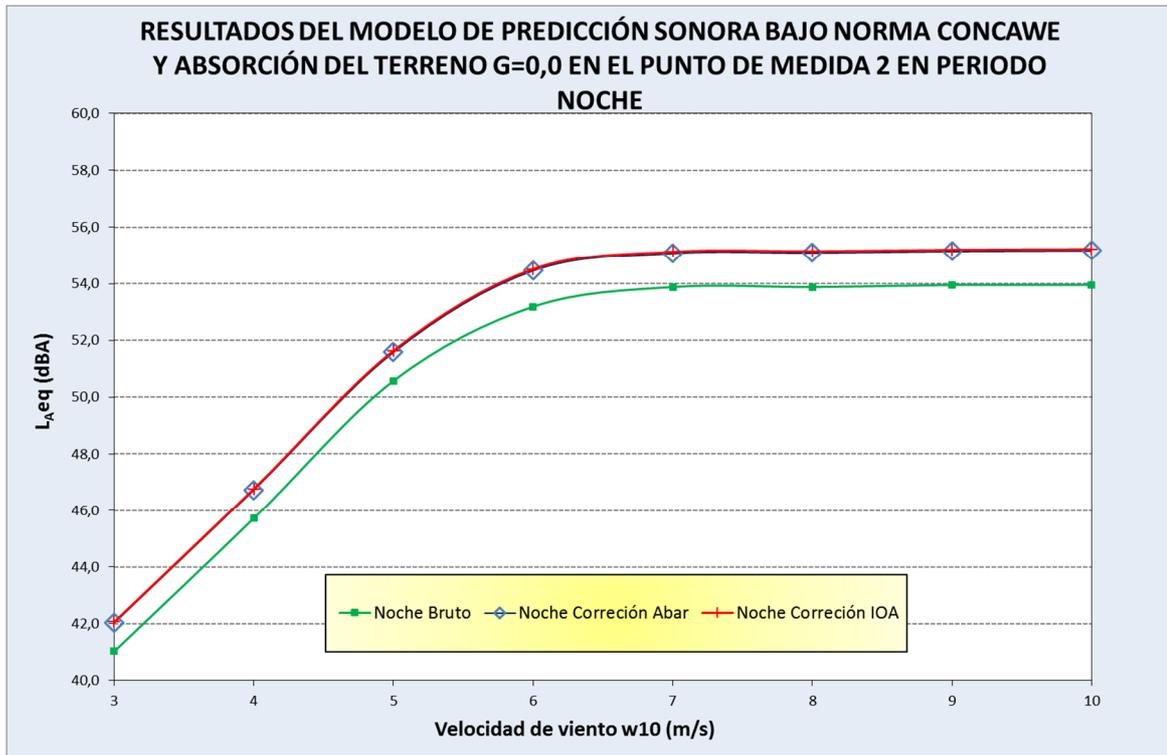


Ilustración 99. Resultados CONCAWE para el punto de medida 2 de noche y G=0

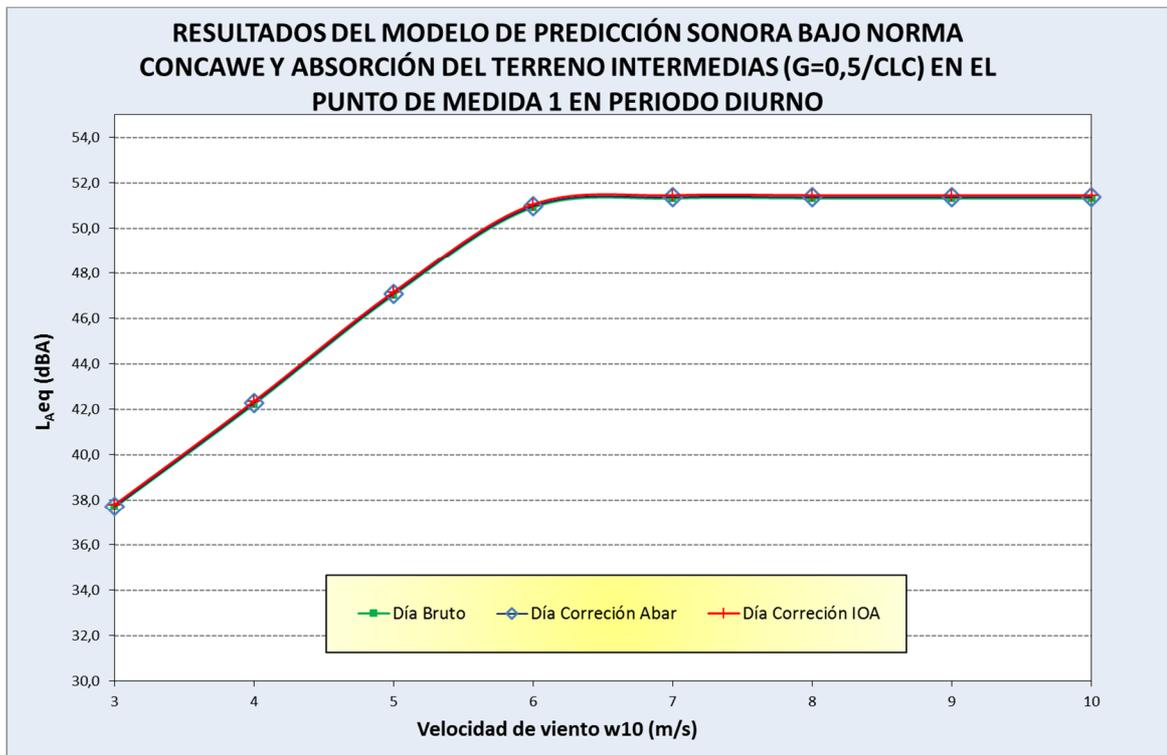


Ilustración 100. Resultados CONCAWE para el punto de medida 1 de día y G=0,5/CLC

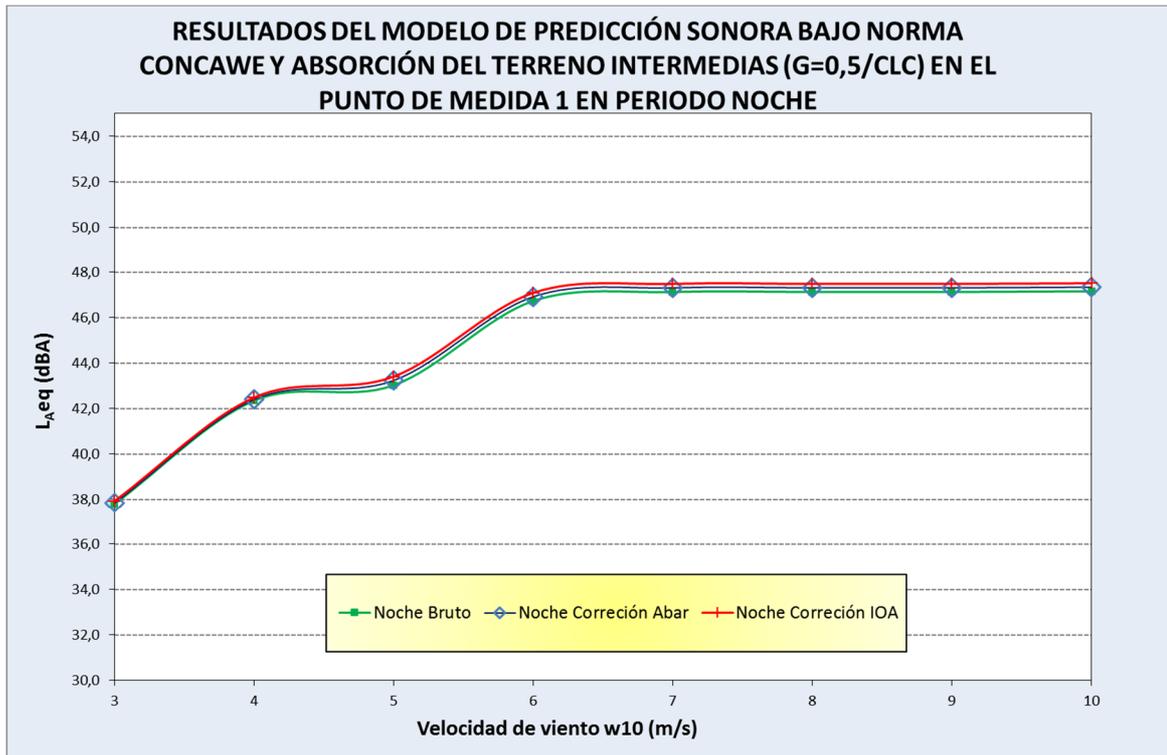


Ilustración 101. Resultados CONCAWE para el punto de medida 1 de noche y G=0,5/CLC

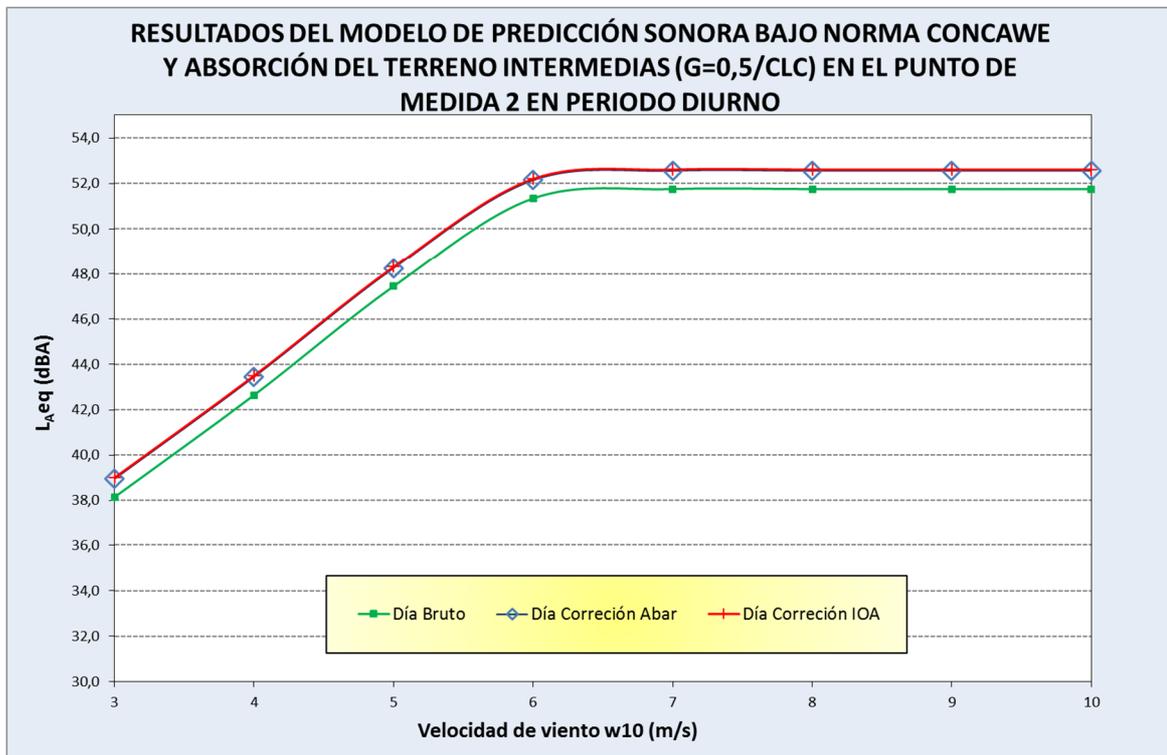


Ilustración 102. Resultados CONCAWE para el punto de medida 2 de día y G=0,5/CLC

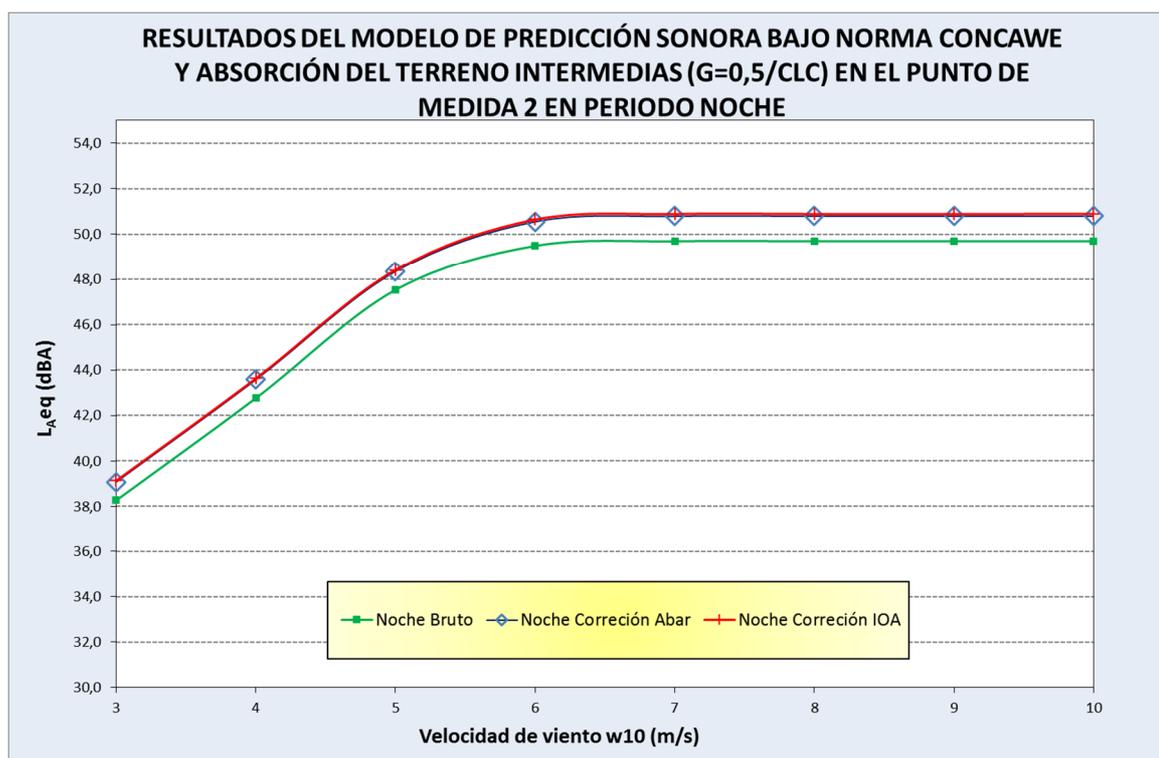


Ilustración 103. Resultados CONCAWE para el punto de medida 2 de noche y G=0,5/CLC

Las predicciones de los niveles sonoros en los puntos de medida 1 y 2 se ajustan a la variación de la potencia acústica de los aerogeneradores en función de la velocidad de viento, tal y como se especifica en la gráfica 23. Sin embargo, el modelo CONCAWE presente una particularidad respecto a las otras normas empleadas, porque el rango de los niveles sonoros (nivel máximo-nivel mínimo de cada escenario) varía en función de la absorción del terreno en hasta 2,1 dBA (ver tabla 52), lo cual se explica por el método de cálculo de la atenuación del terreno (ver apartado 1.8, método CONCAWE, Ilustración 48).

RANGO DE VARIACIÓN DE LOS NIVELES SONOROS (dBA)				
Punto de medida	Punto de medida 1		Punto de medida 2	
	Día/Tarde	Noche	Día/Tarde	Noche
CONCAWE G=0	14,3	11,4	15,1	12,9
CONCAWE G=0,5/CLC	13,6	9,3	13,6	11,4

Tabla 52. Rango de variación de los niveles sonoros en función de la absorción del terreno para el modelo CONCAWE

En el periodo diurno, cuando no se encuentran implementada ningún modo de bajo ruido, el nivel sonoro se incrementa desde la velocidad de arranque hasta alcanzar el valor máximo de potencia acústica a una velocidad de viento de 7 m/s. En este periodo cabe destacar la evolución que sufren los niveles sonoros en el punto de medida 2 en el periodo diurno en los bins de viento de 9 y 10 m/s, con incrementos de 0,8 dBA respecto a velocidades de viento de 8 m/s sin que se deba a un incremento en la potencia acústica de los aerogeneradores (máxima potencia constante para velocidades de viento superiores a 7 m/s). Esta tendencia se observa exclusivamente en este periodo y punto de medida y desaparece cuando la absorción acústica del terreno difiere de cero (como se puede comprobar en la gráfica 98 correspondiente al mismo puntos de medida y periodo con absorción G=0,5).

Durante la noche, los niveles sonoros se ajustan a las estrategias de bajo ruido implementadas para cada una de las viviendas analizadas tal y como se explica en el apartado 4.1. Estas estrategias fueron diseñadas para no superar un nivel sonoro de 45 dBA a nivel de las edificaciones y los modos de bajo ruido se activan a partir de velocidades de 5 m/s en el punto de medida 1 y a partir de velocidades de 6 m/s en el punto de medida 2. La reducción de potencia acústica asociada a estas estrategias se pone de manifiesto con una disminución del nivel sonoro con la velocidad de viento hasta alcanzar el nivel sonoro máximo, si bien en esta caso los niveles superan el objetivo establecido en 45 dBA.

A continuación se presenta las diferencias existentes respecto al modelo base cuando se aplican las correcciones derivadas de las aplicación de las recomendaciones de la metodología IOA.

INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA A LIMITACIÓN A_{bar} (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
CONCAWE G=0	0,1	0,2	0,1	1,0	1,1	1,0	0,5	0,7	0,6
CONCAWE G=0,5	0,0	0,1	0,1	0,8	1,0	0,9	0,4	0,6	0,5
CONCAWE G=CLC	0,0	0,1	0,1	0,8	1,0	0,9	0,4	0,6	0,5
INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA METODOLOGÍA IOA (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
CONCAWE G=0	0,2	0,3	0,2	1,0	1,2	1,1	0,6	0,8	0,7
CONCAWE G=0,5	0,1	0,3	0,2	0,9	1,1	0,9	0,5	0,7	0,6
CONCAWE G=CLC	0,1	0,3	0,2	0,9	1,1	0,9	0,5	0,7	0,6
INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA A CORRECCIÓN IOA POR REFLEXIONES MÚLTIPLES (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
CONCAWE G=0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
CONCAWE G=0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
CONCAWE G=CLC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabla 53. Incrementos de los niveles sonoros respecto al escenario base fruto de la aplicación de la metodología IOA para el modelo CONCAWE

Analizando los resultados se obtienen las siguientes conclusiones sobre su influencia:

- Los incrementos de los niveles sonoros según IOA respecto al modelo base son relevantes para el punto de medida 2 (en torno a un promedio de 1 dBA) mientras que son pocos significativos en el punto de medida 1 (iguales o inferiores a 0,3 dBA).
- La aplicación de la metodología IOA al caso de estudio ha puesto de manifiesto que la mayor parte de la corrección está asociada a la limitación del apantallamiento del terreno (A_{bar}), mientras que la consideración de reflexiones múltiples es prácticamente nula (con un máximo de 0,1 dBA).
- Las diferencias entre terrenos duros y mixtos en la limitación del apantallamiento del terreno A_{bar} son irrelevantes, al igual que en el caso de las correcciones por reflexiones múltiples.

- El periodo nocturno presenta mayores incrementos en ambos puntos de medidas que en el periodo diurno, promediando niveles sonoros 0,2 dBA superiores.

Modelo Nórdico de Predicción de Ruido Ambiental NORD 2000

A continuación se muestran los resultados obtenidos por la Norma NORD2000 y la aplicación de la corrección por reflexiones múltiples según metodología IOA para cada uno de los puntos de medidas y periodos considerados. Cabe destacar (tal y como se explicó en el apartado de metodología) que en los modelos que consideran la refracción del rayo de propagación no es posible la limitación de la atenuación del terreno atendiendo a los criterios de visibilidad establecidos por el IOA.

Los resultados se presentan ordenados en función de la absorción del terreno considerado, comenzando por el valor inferior $G=0$ (suelo duro), intermedio ($G=0,5$) y finalmente la absorción de acuerdo a los diferentes usos de suelos (CLC).

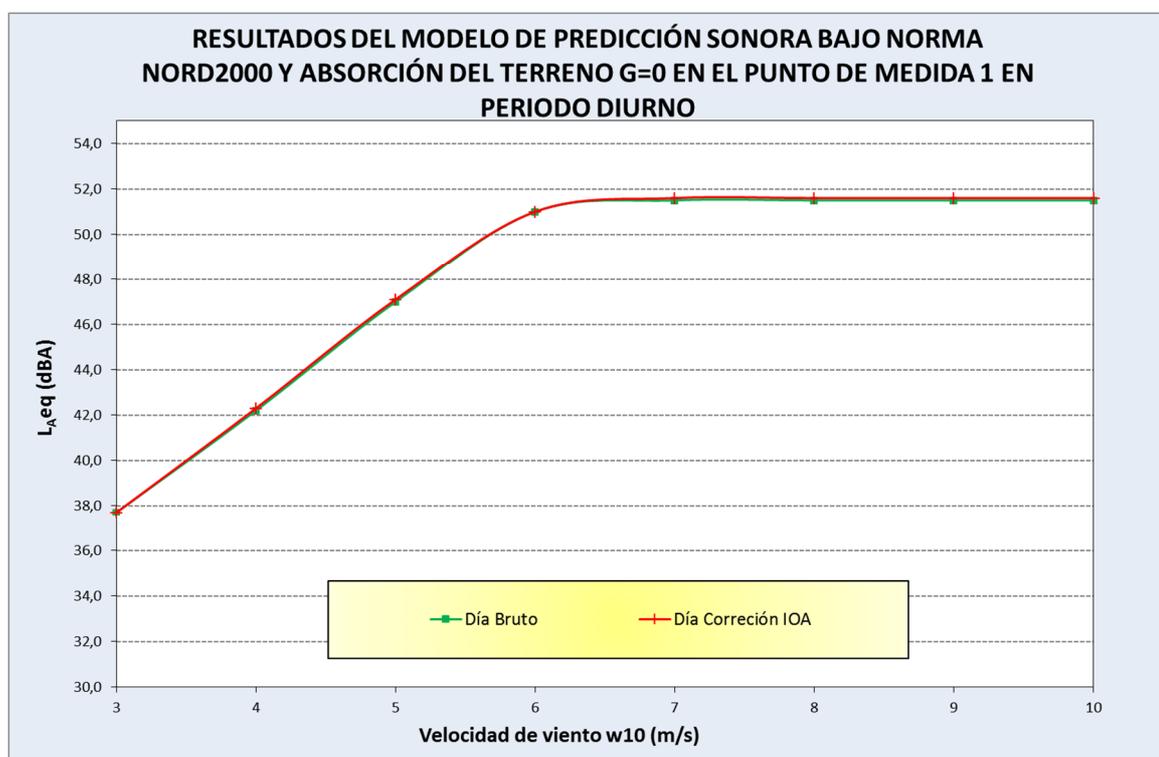


Ilustración 104. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de día y $G=0$

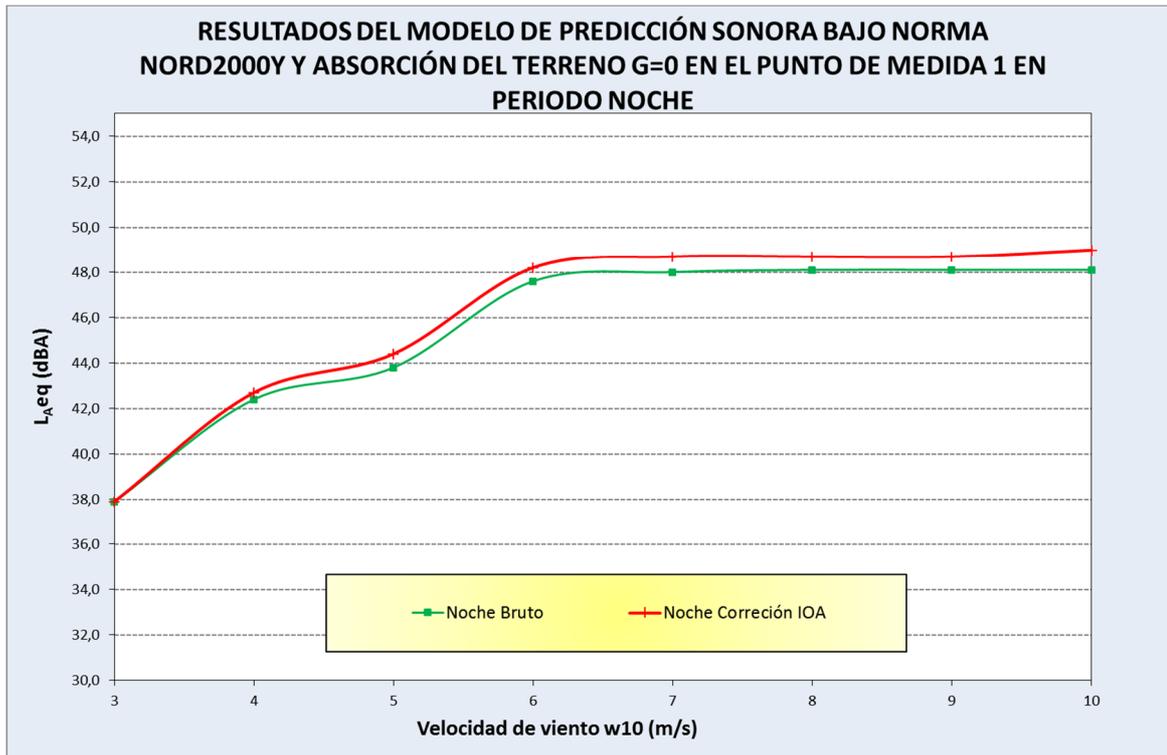


Ilustración 105. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de noche y G=0

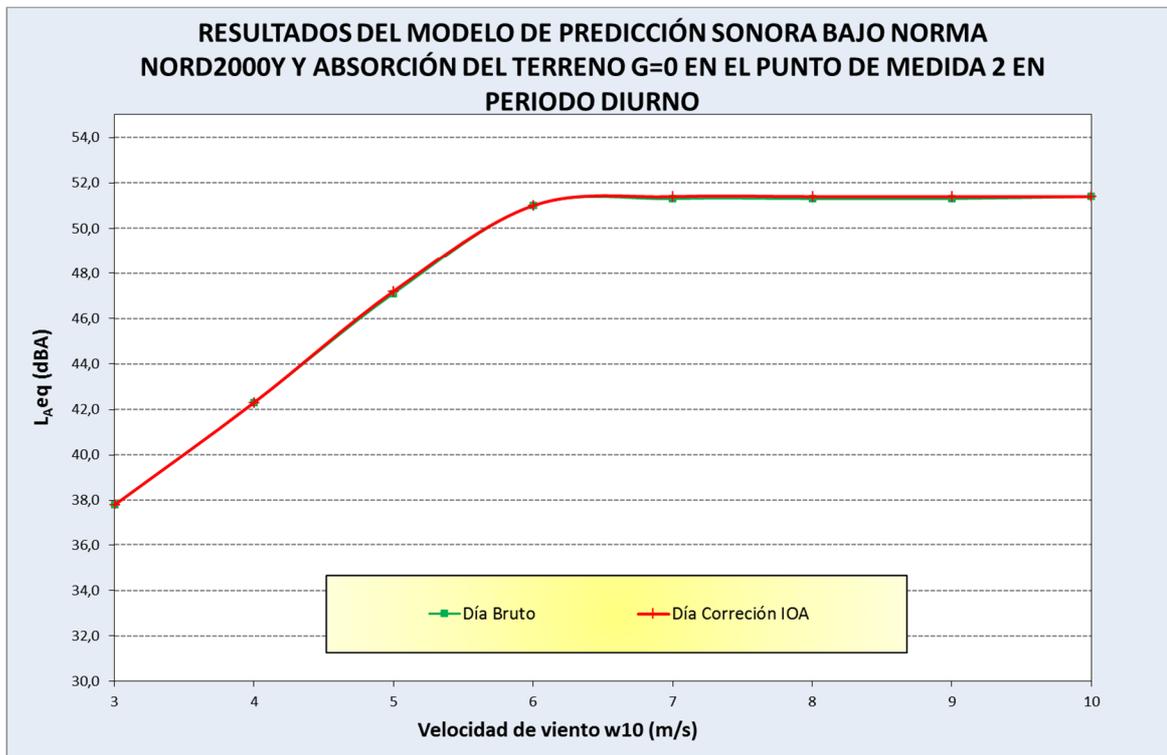


Ilustración 106. Resultados NORD2000 para el punto de medida 2 de día y G=0

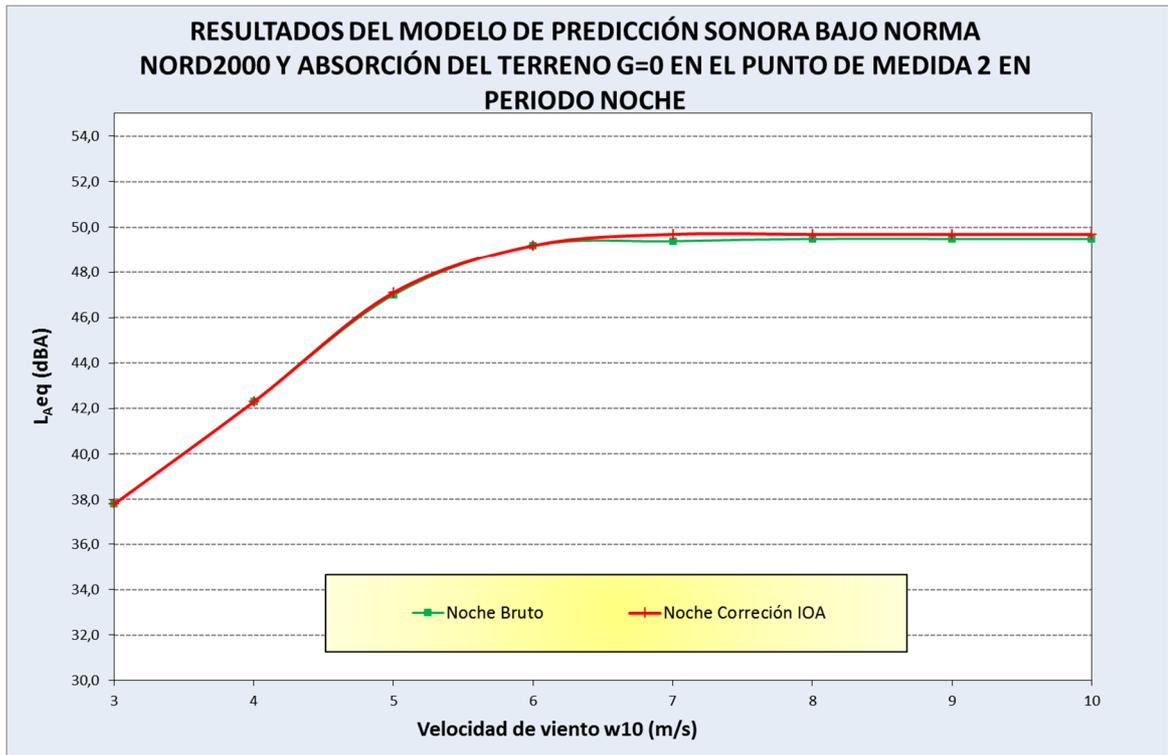


Ilustración 107. Resultados NORD2000 para el punto de medida 2 de noche y G=0

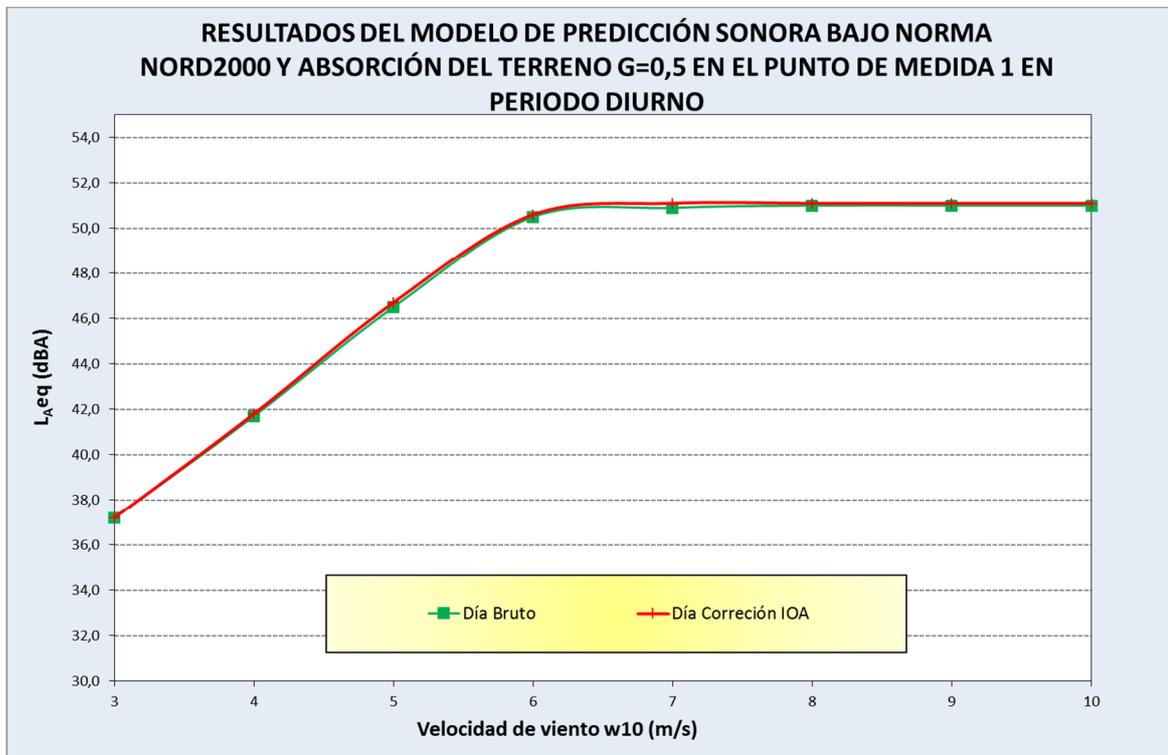


Ilustración 108. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de día y G=0,5

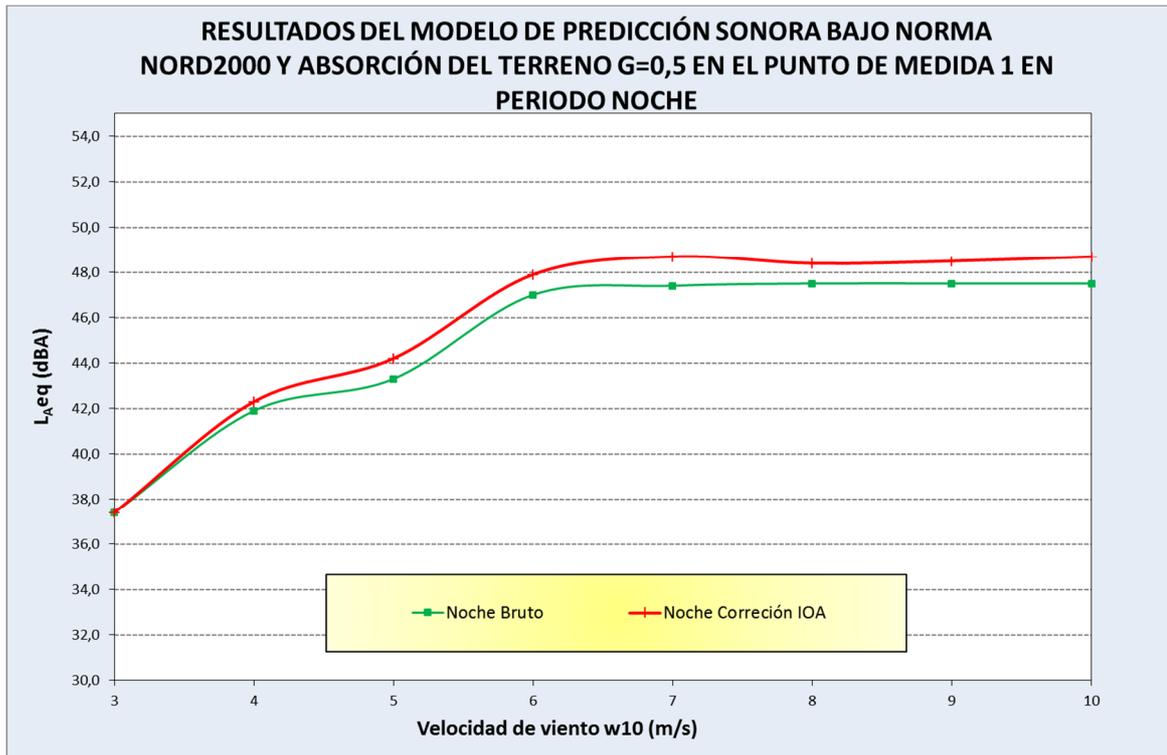


Ilustración 109. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de noche y G=0,5

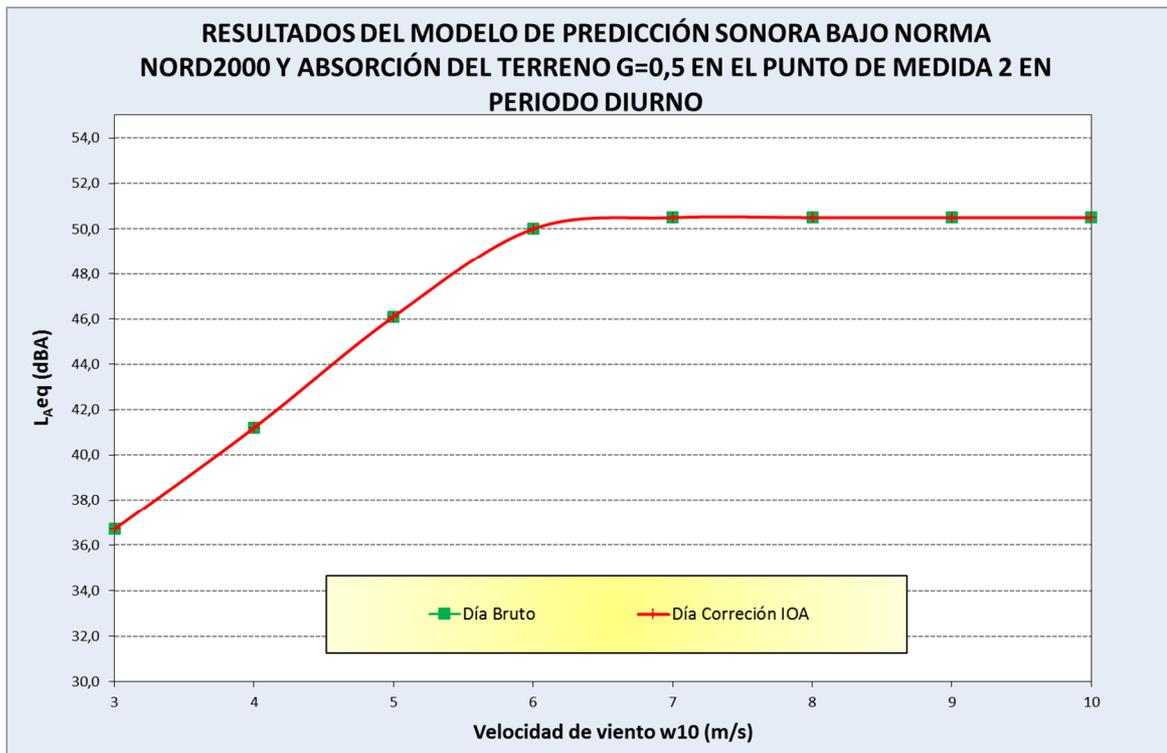


Ilustración 110. Resultados NORD2000 para el punto de medida 2 de día y G=0,5

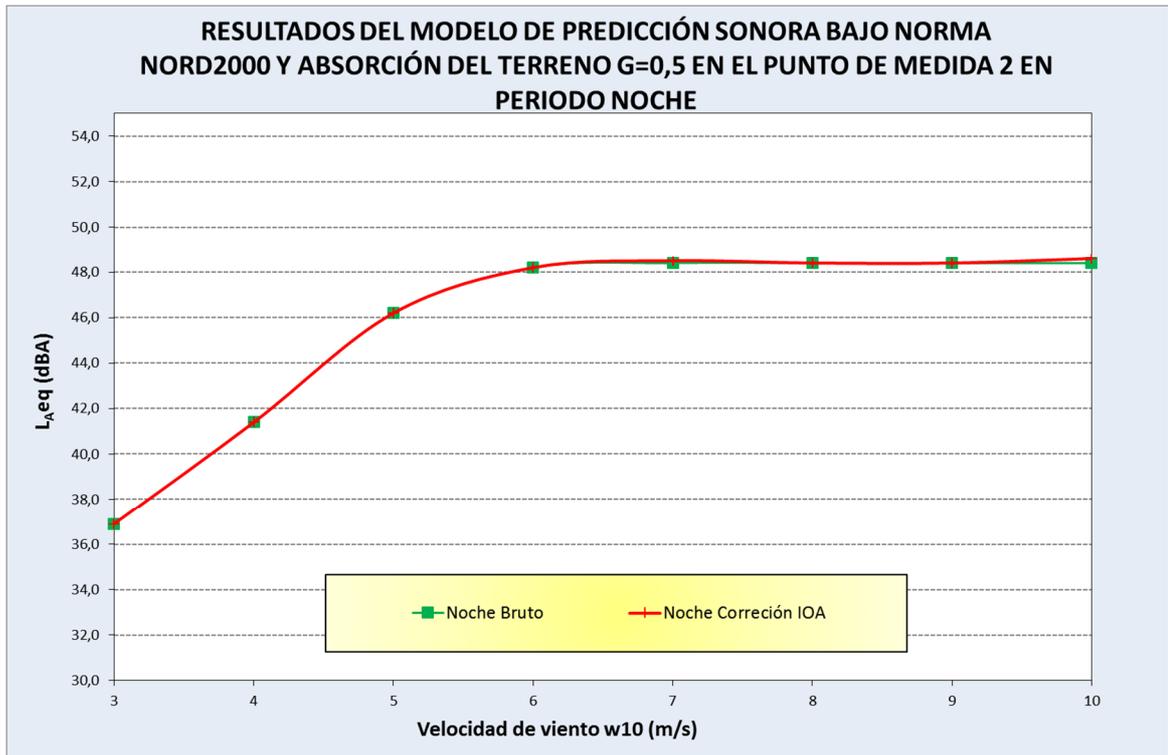


Ilustración 111. Resultados NORD2000 para el punto de medida 2 de noche y G=0,5

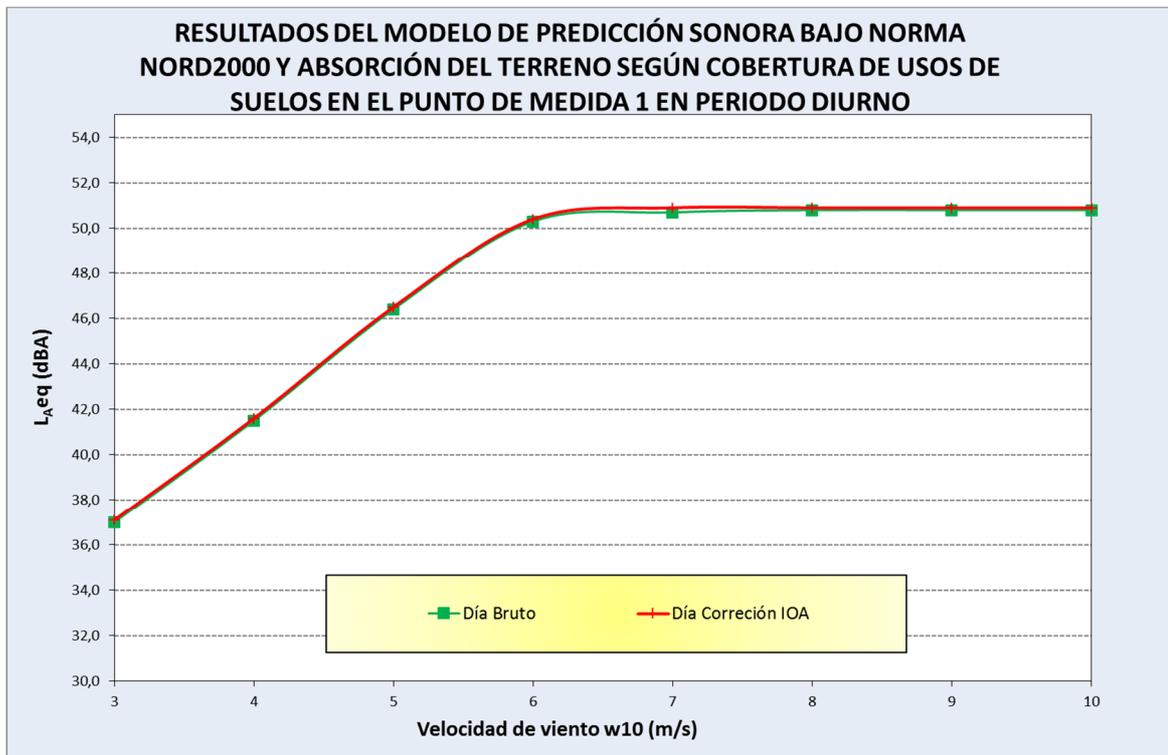


Ilustración 112. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de día y factor G según CORINE

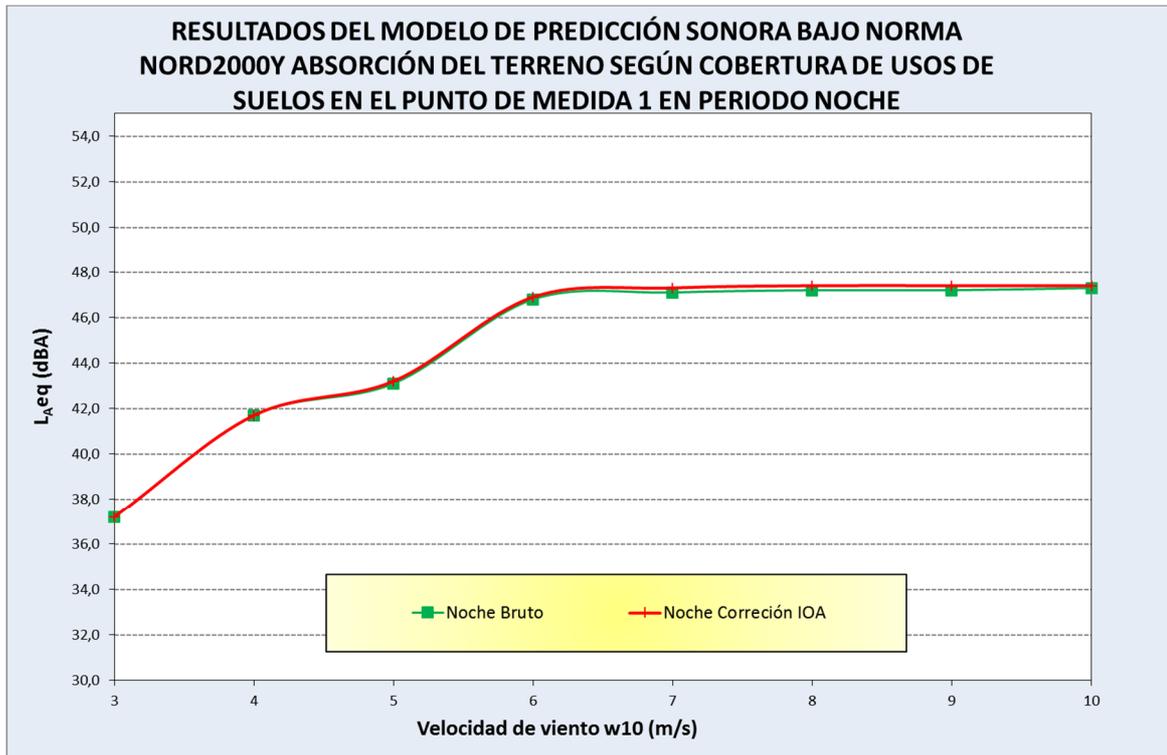


Ilustración 113. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de noche y factor G según CORINE

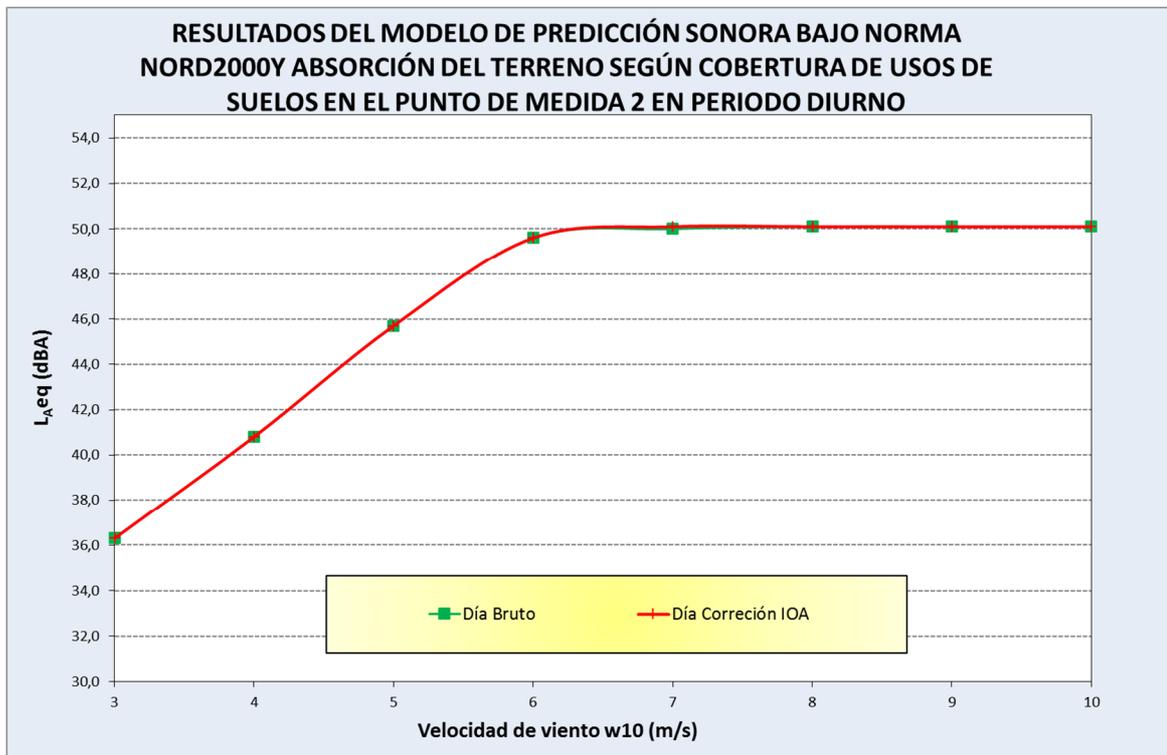


Ilustración 114. Resultados NORD2000 para el punto de medida 2 de día y factor G según CORINE

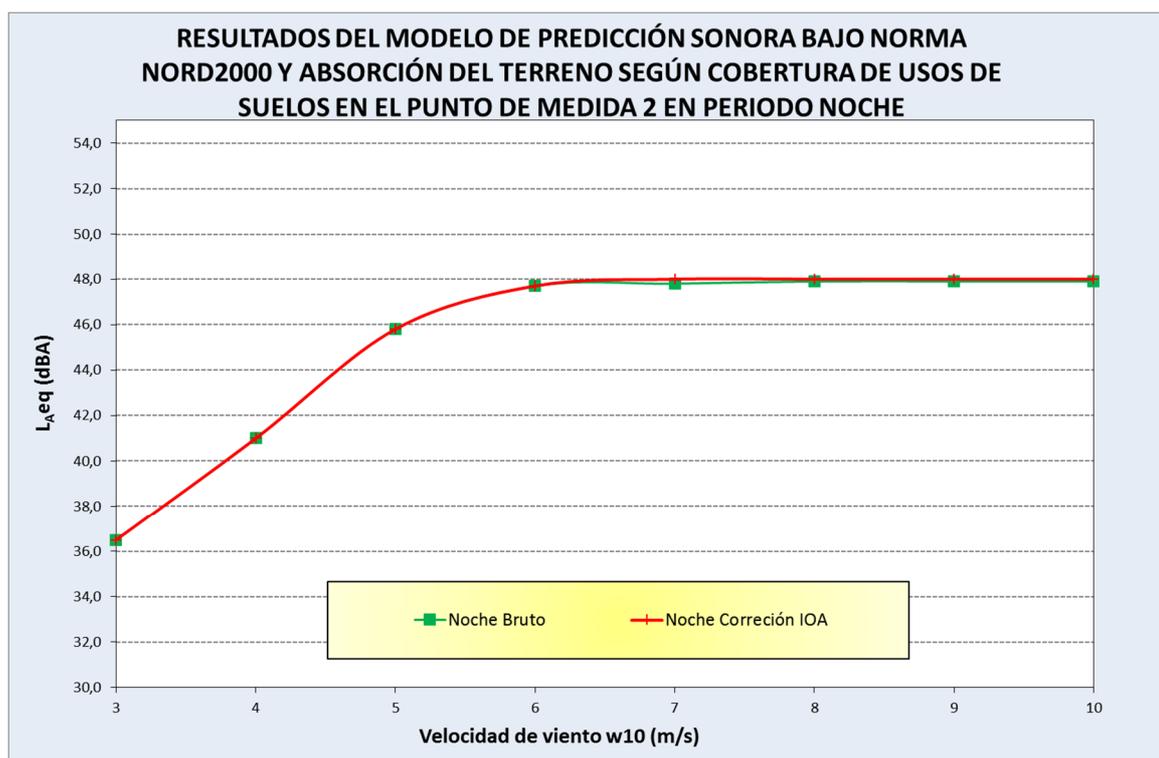


Ilustración 115. Resultados NORD2000 para el punto de medida 2 de noche y factor G según CORINE

Las predicciones de los niveles sonoros en los puntos de medida 1 y 2 se ajustan a la variación de la potencia acústica de los aerogeneradores en función de la velocidad de viento, tal y como se especifica en la Ilustración 23, no existiendo variaciones importantes respecto a otros modelos en cuanto al rango de variación entre velocidades de viento máximas y mínimas.

No se observan alteraciones reseñables en los niveles sonoros respecto a la velocidad de viento salvo las esperadas conforme a las estrategias de bajo ruidos implementadas durante el periodo nocturno. Esto es, una reducción de los niveles sonoros a partir del bin de viento de 5 m/s.

A continuación se presenta las diferencias existentes respecto al modelo base cuando se aplican las correcciones derivadas de la aplicación del factor de corrección asociado a terrenos concavos entre la fuente y el receptor recomendada por la metodología IOA para la consideración de reflexiones múltiples.

INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA A CORRECCIÓN IOA POR REFLEXIONES MÚLTIPLES (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
Periodo	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
NORD2000 G=0	0,1	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2
NORD2000 G=0,5	0,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2
NORD2000 G=CLC	0,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2

Tabla 54. Incrementos de los niveles sonoros respecto al escenario base fruto de la aplicación de la corrección por reflexiones múltiples del IOA para el modelo NORD2000

Analizando los resultados se obtienen las siguientes conclusiones sobre su influencia.

- Los incrementos de los niveles sonoros con la consideración de reflexiones múltiples respecto al modelo base son irrelevantes en el punto de medida 2, mientras que en el punto

de medida 1 son significativas en el periodo nocturno (0,5-0,7 dBA de incremento frente a los 0,1 dBA del periodo diurno).

- El incremento promedio por reflexiones múltiples es más significativo en el caso de suelos mixtos (en torno a 0,2 dBA) que en el caso de suelos duros para el punto de medida 1, tendencia que no se observa en el punto de medida 2.

Métodos Comunes de Evaluación del Ruido (CNOSSOS-EU)

A continuación se muestran los resultados obtenidos por la Norma CNOSSOS y la aplicación de la corrección por reflexiones múltiples según metodología IOA para cada uno de los puntos de medidas y periodos considerados. Al igual que en el caso de la norma, no es posible la limitación de la atenuación por apantallamiento A_{bar} atendiendo a criterios de visibilidad debido a que el modelo considera la refracción descendente en la propagación.

Los resultados se presentan ordenados en función de la absorción del terreno considerado, comenzando por el valor inferior $G=0$ (suelo duro), intermedio ($G=0,5$) y finalmente la absorción de acuerdo a los diferentes usos de suelos (CLC).

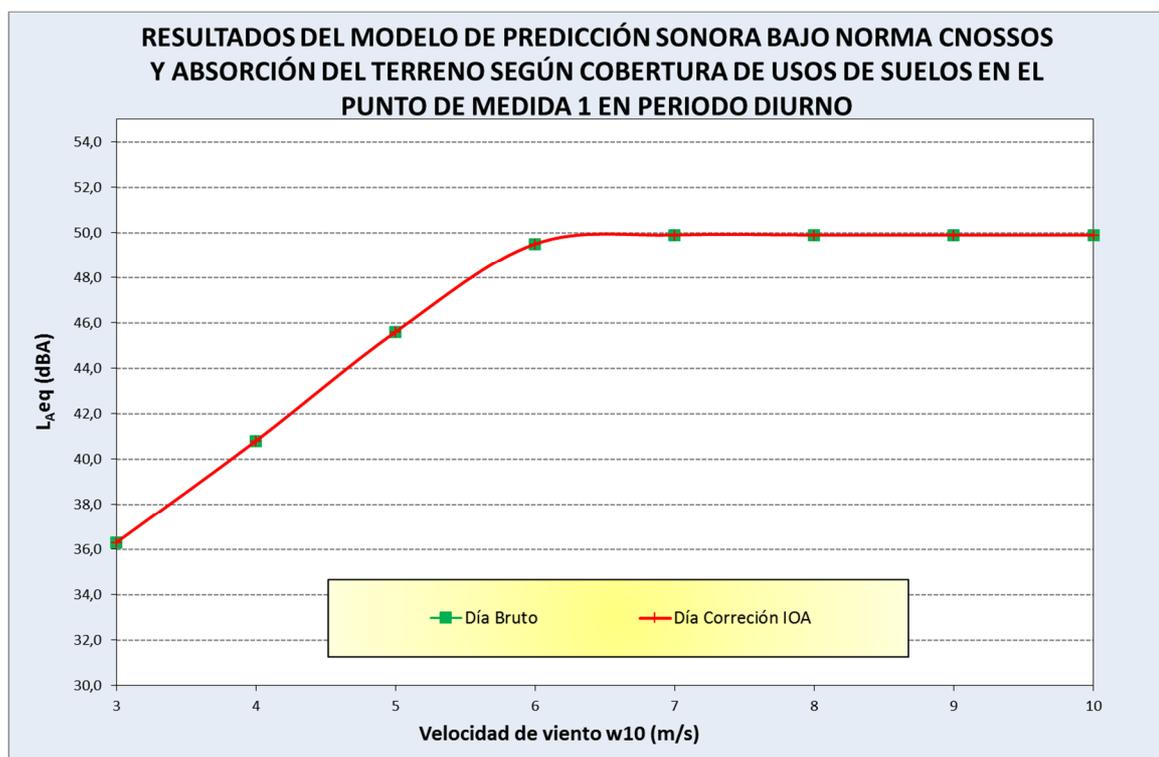


Ilustración 116. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 1 de día y $G=0$

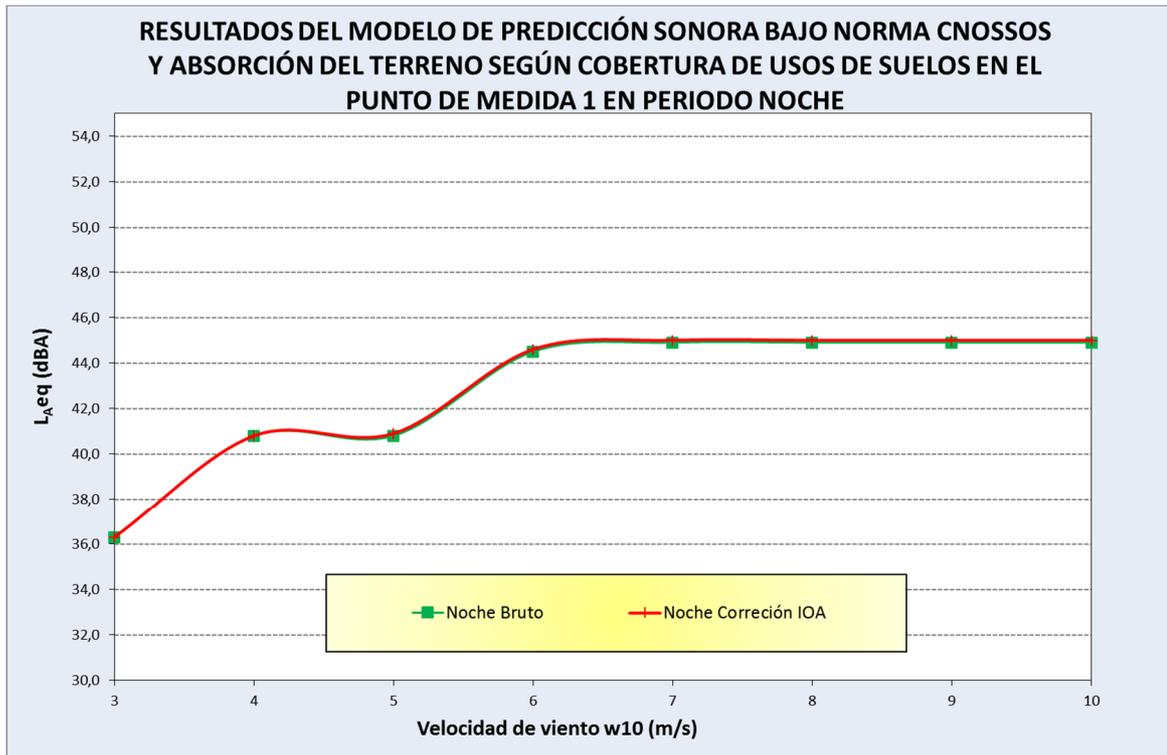


Ilustración 117. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 1 de noche y $G=0$

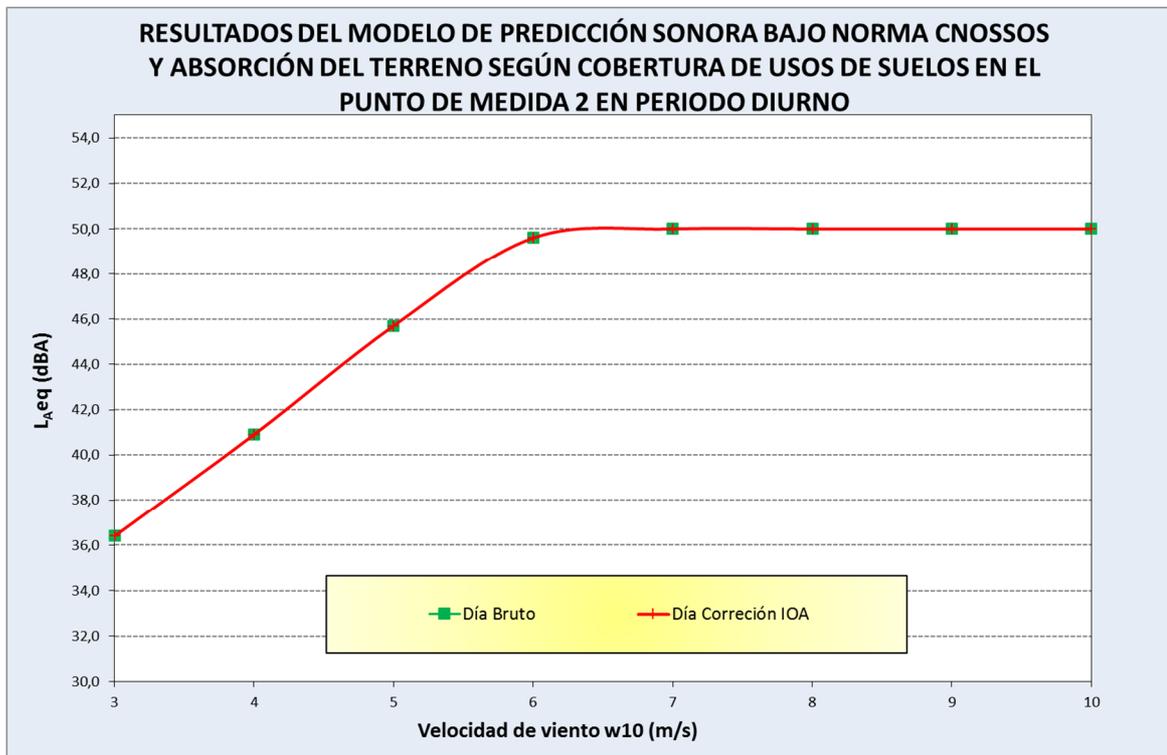


Ilustración 118. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 2 de día y $G=0$

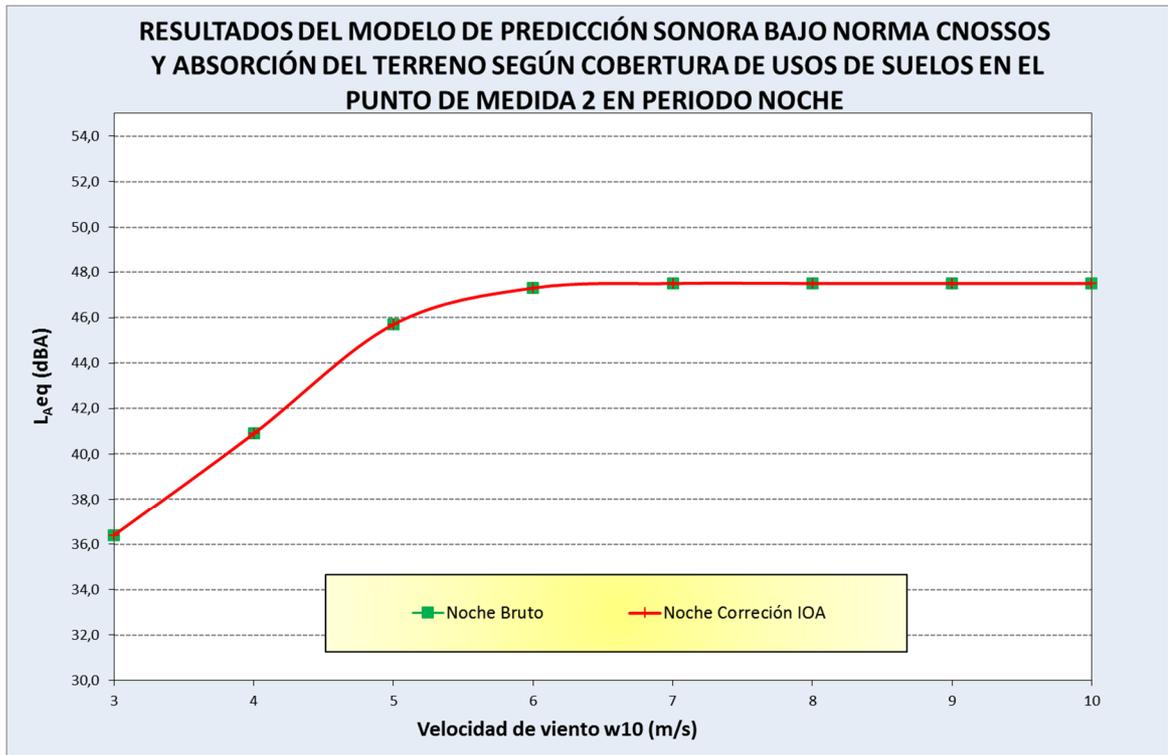


Ilustración 119. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 2 de noche y $G=0$

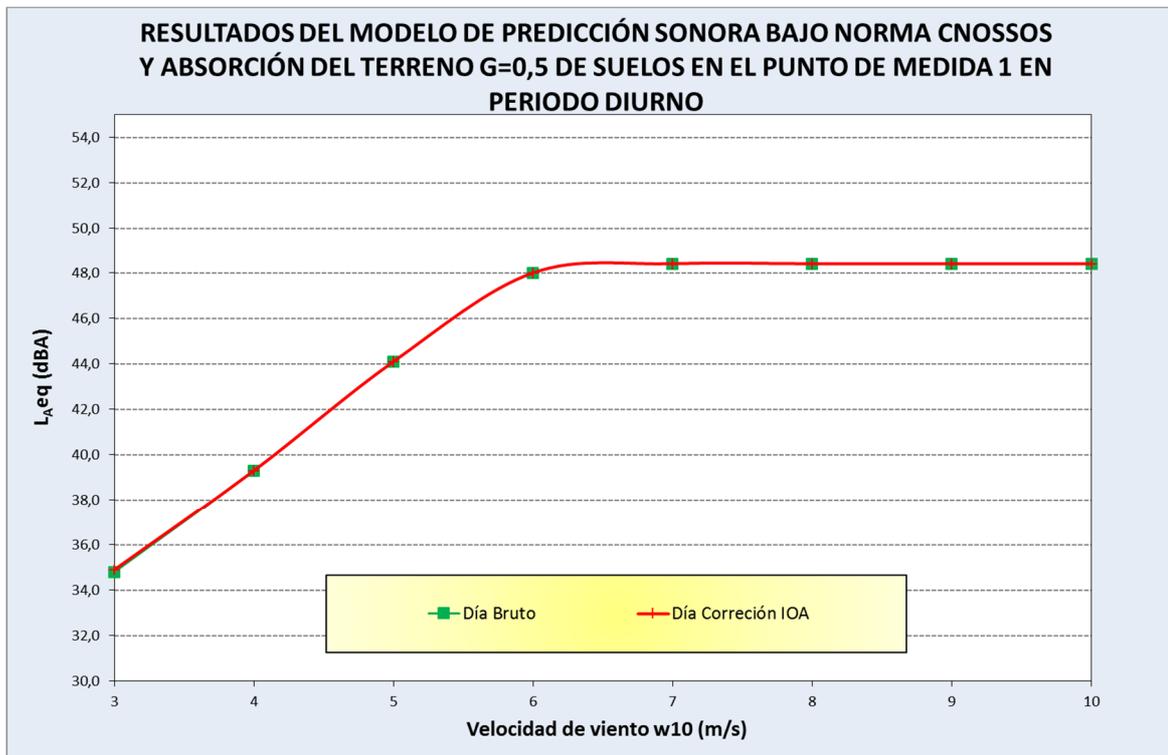


Ilustración 120. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 1 de día y $G=0,5$

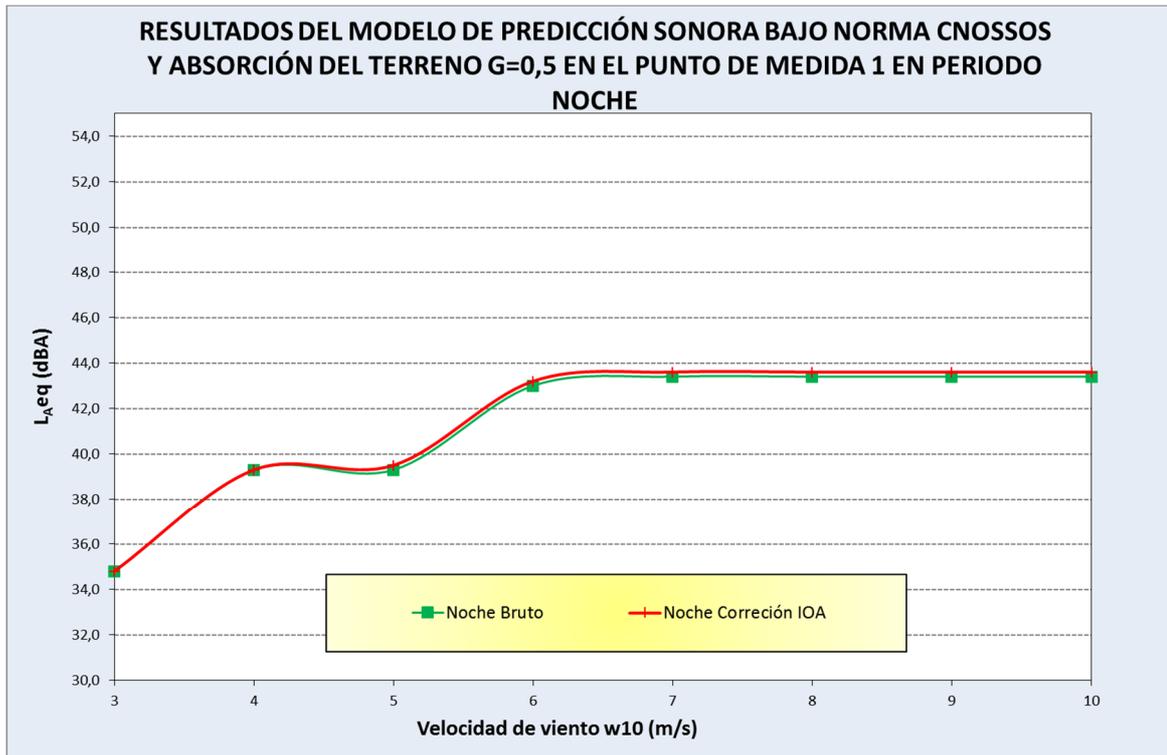


Ilustración 121. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 1 de noche y G=0,5

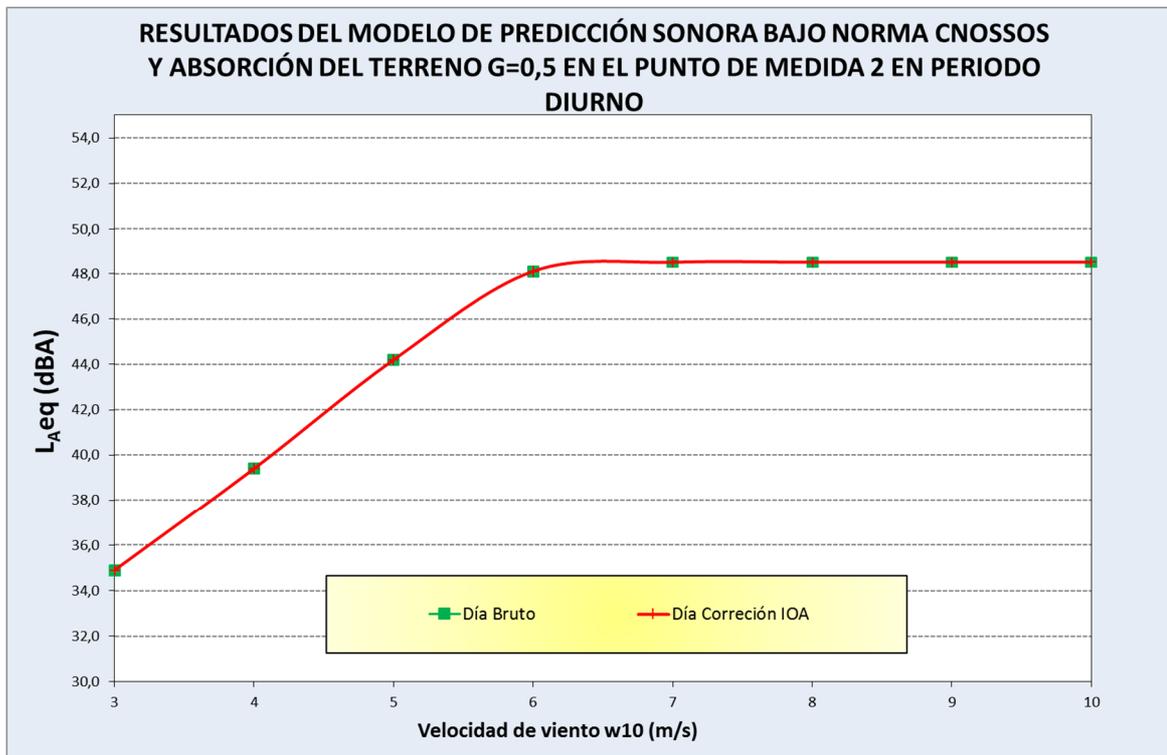


Ilustración 122. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 2 de día y G=0,5

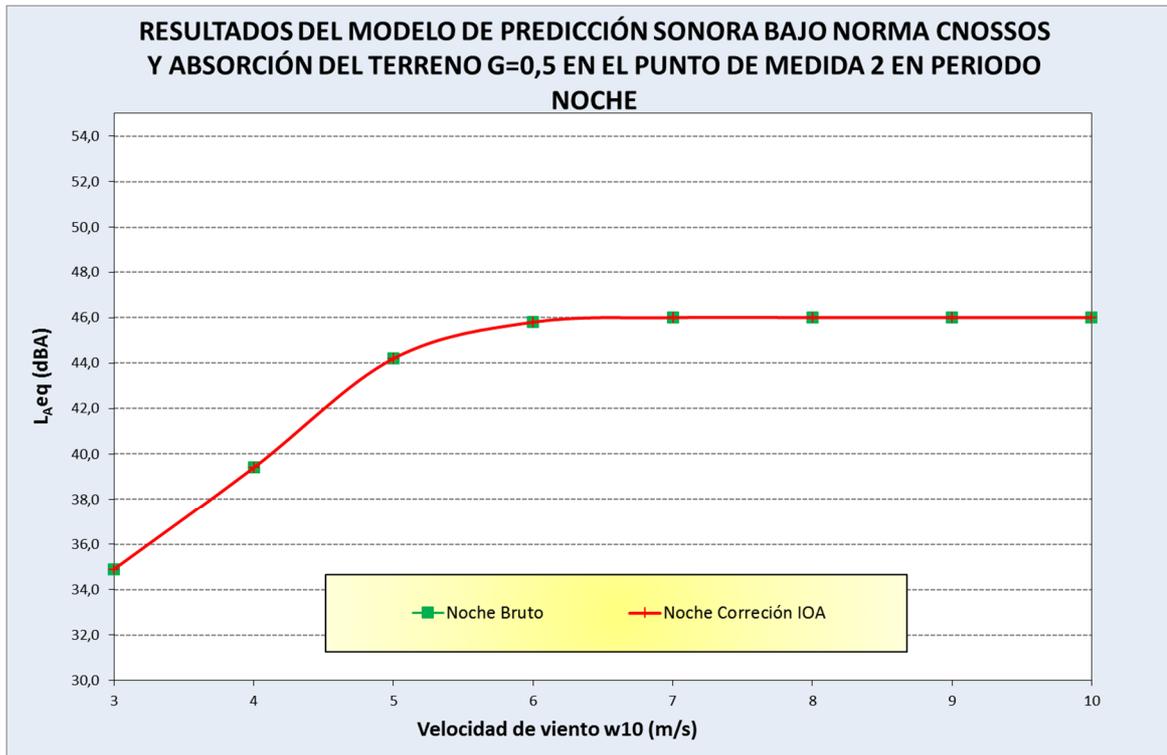


Ilustración 123. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 2 de noche y G=0,5

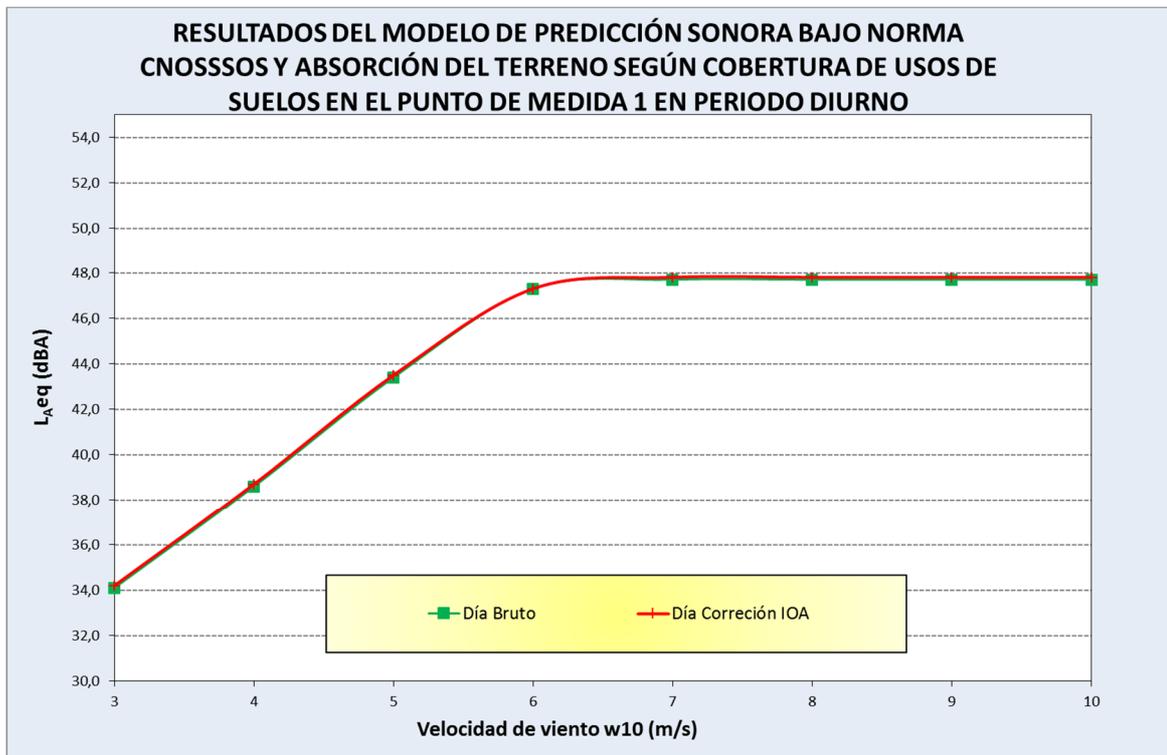


Ilustración 124. Resultados NORD2000 para el punto de medida 1 de día y factor G según CORINE

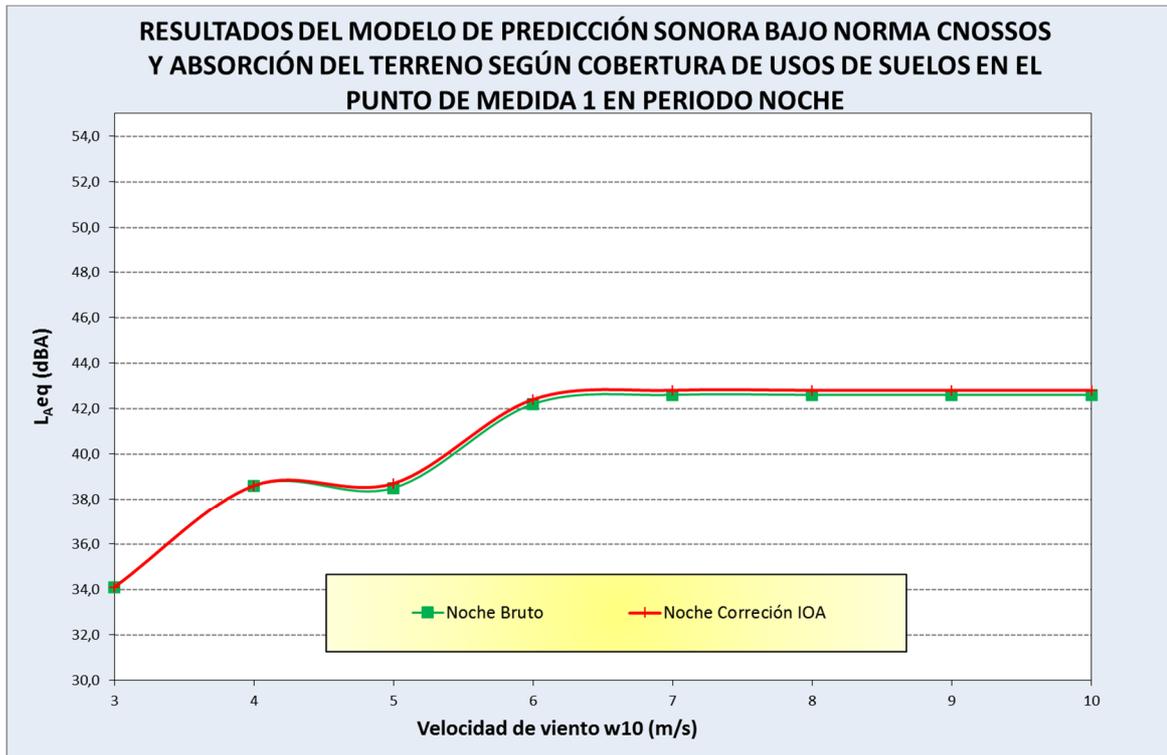


Ilustración 125. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 1 de noche y factor G según CORINE

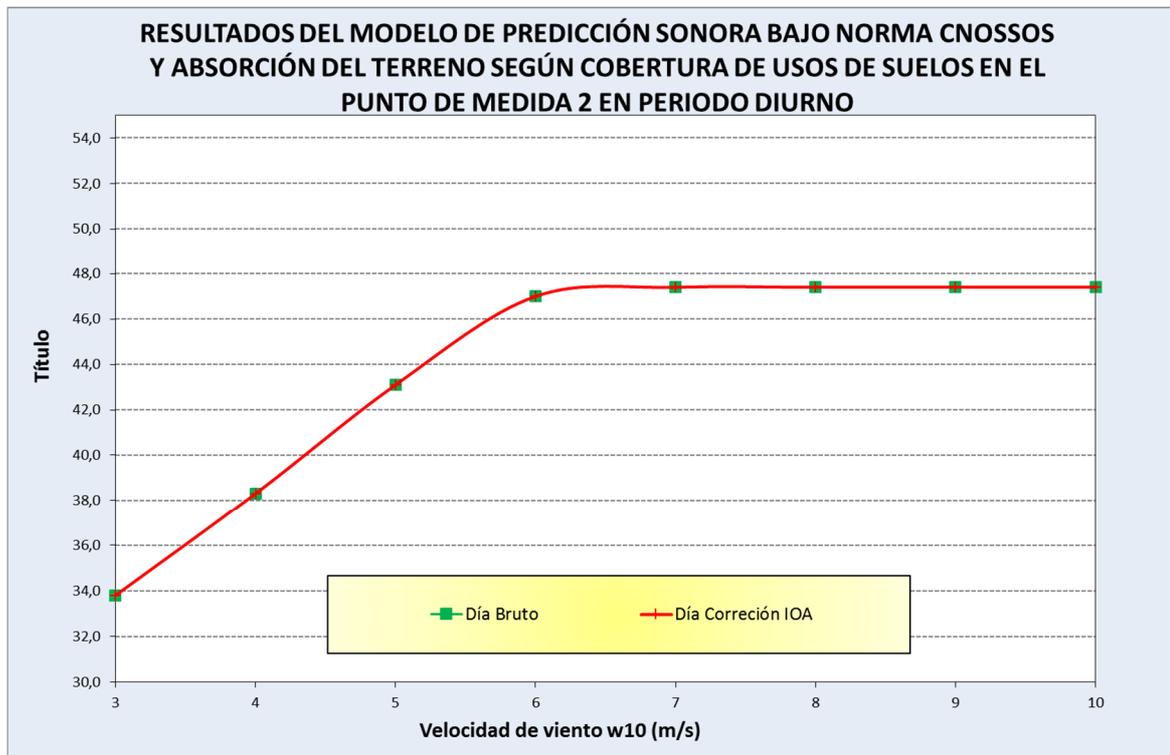


Ilustración 126. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 2 de día y factor G según CORINE

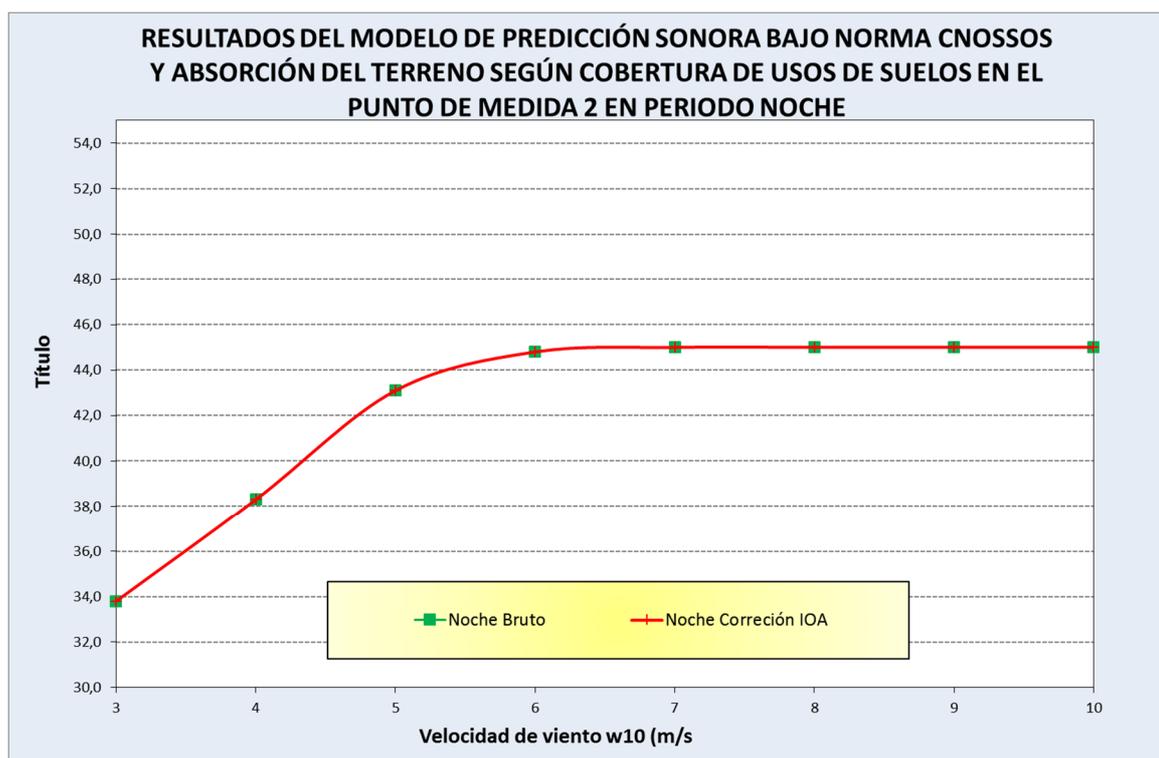


Ilustración 127. Resultados CNOSSOS para el punto de medida 2 de noche y factor G según CORINE

Las predicciones se ajustan de forma general a la evolución de la potencia acústica respecto a la velocidad de viento durante el periodo diurno y nocturno, salvo en el caso del punto de medida 1. En esta localización y para velocidades de viento de 5 m/s durante el periodo nocturno, existe un cambio de tendencia. Como se comentó anteriormente, durante el periodo nocturno, diferentes estrategias de bajo ruido fueron implementadas con vistas a reducir la potencia acústica del parque con vistas a no superar un nivel sonoro objetivo, incluyendo la parada total de aerogeneradores durante ese periodo. Los resultados de las predicciones muestran que cuando entran en funcionamiento dichas medidas de mitigación (incluyendo el aerogenerador con mayor aportación) en el punto de medida 1, los niveles sonoros permanecen constantes entre los bins de viento de 4 y 5 m/s, sin variaciones o incluso con descenso de los niveles de 0,1 dBA para la máxima absorción del terreno (cobertura CLC). En otros modelos el incremento en los niveles sonoros en el bin 5m/s respecto a 4 m/s se situaba en el rango 0,7-2,2 dBA.

A continuación se presenta las diferencias existentes respecto al modelo base cuando se aplican las correcciones derivadas de las aplicación del factor de corrección asociado a terrenos concavos entre la fuente y el receptor recomendada por la metodología IOA para la consideración de reflexiones múltiples.

INCREMENTO DE NIVELES SONOROS ASOCIADA A CORRECCIÓN IOA POR REFLEXIONES MÚLTIPLES (dBA)									
Punto de medida	Punto de medida 1			Punto de medida 2			Ambos		
	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos	Día/Tarde	Noche	Ambos
CNOSSOS G=0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CNOSSOS G=0,5	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
CNOSSOS G=CLC	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1

Tabla 55. Incrementos de los niveles sonoros respecto al escenario base fruto de la aplicación de la corrección por reflexiones múltiples del IOA para el modelo CNOSSOS

Analizando los resultados se obtienen las siguientes conclusiones sobre su influencia.

- La influencia de la corrección por reflexiones múltiples en la predicción sonora en el punto de medida 1 es irrelevante (0,1 dBA) mientras que en el punto de medida 2 es nula.
- Al igual que en el modelo de predicción NORD2000, aparentemente el incremento promedio por reflexiones múltiples es ligeramente superior en el caso de suelos mixtos que en el caso de suelos duros pero el rango de variación en mínimo (0,1 dBA y restringido a determinados periodos) por lo que no se puede confirmar esta tendencia.

8. DISCUSIÓN CIENTÍFICA

En este octavo y último capítulo se presenta la discusión científica en la interpretación de los resultados y la aproximación metodológica desarrollada para la evaluación del impacto acústico de parques eólico, en base a la influencia de los principales parámetros de cálculo y la correlación entre las simulaciones y el monitorizado de ruidos.

La discusión científica se plantea a partir de las hipótesis de partida para abordar finalmente las conclusiones del estudio en cuando a las mejores técnicas disponibles para el asesoramiento acústico de parques eólicos.

8.1 METODOLOGÍA DE MONITORIZADO DE RUIDOS EN PARQUES EÓLICOS

Hipótesis: Las técnicas de ensayos basadas en muestreos discretos son insuficientes para cubrir la variabilidad de emisión de los aerogeneradores y los diferentes escenarios de propagación en función de la meteorología. Un monitoreo en continuo y su procesamiento posterior permitirá garantizar un correcto análisis de la inmisión de un parque eólico bajo las condiciones más desfavorables.

En el presente estudio se han aplicado dos procedimientos específicos para la valoración del impacto acústico del parque eólico, basados en normas y estándares internacionales, comparando los resultados con la obtención de registros de corta duración según la Instrucción Técnica del RPCCA (Método I. Análisis de Registros discretos). En concreto se han empleado los procedimientos descritos en las siguientes referencias normativas y bibliográficas:

- Método II: Análisis por regresión polinomial conforme a las directrices establecidas por el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo (Institute of Acoustics, 2013; Ljunggren, 1997; Ministries of Environ. & Energy of British Columbia, 2012; entre otros).
- Método III: Análisis agrupado por bins de viento conforme a la Guía para la Evaluación y Medición Acústica de Parques eólicos de Ontario (MOE, 2009).

Ambos procedimientos están basados en el análisis de un conjunto amplio de registros sonoros obtenidos durante el monitorizado de ruidos del parque eólico. Por tanto, obtienen un valor representativo del índice de ruidos dentro de la variabilidad de la muestra mediante diferentes procedimientos estadísticos a partir de registros sonoros reales. De esta manera, no sólo se valoraría la situación más desfavorable desde el punto de vista acústico (mayor exposición), sino también la situación más representativa y con mayor probabilidad de ocurrencia.

Valoración de la representatividad del Método I: Análisis discreto de registros

La aplicación de la Instrucción Técnica II del RPCCA durante ensayos de 9 horas de duración, nos ha permitido obtener un muestreo que cubre tan sólo parcialmente los rangos de funcionamiento del aerogenerador, sin que exista ninguna muestra en el rango de vientos para el rango de 3-6 m/s durante el periodo diurno y 3-7 m/s para el periodo nocturno. Además existen deficiencias y ventanas de viento sin información en ambos puntos de medida y periodo (por ejemplo, sin datos para velocidades superiores a 8 m/s en periodo día en el punto de medida 1). Sí se puede afirmar, que estas muestras son representativas del periodo de máxima emisión del aerogenerador que se alcanza a partir de la velocidad de viento de 7 m/s, cuando produce la máxima potencia eléctrica.

PERIODO DÍA/TARDE					
Receptor	Velocidad de viento w10				
	6	7	8	9	10
Punto 1	49,9	51,1	50,8		
Punto 2	49,2	50,1	49,7	50	49,7
PERIODO NOCHE					
Punto 1		41,1	42,1	42,6	
Punto 2			47,3		48,4

Tabla 56. Resumen de resultados del Nivel de Inmisión al Exterior método I

En las Ilustraciones 127 y 128 se resumen los resultados obtenidos en los puntos de medida 1 y 2 para todos los periodos y rangos de viento estudiados. Los valores indicados se corresponden con

la aportación real del parque eólico, una vez sustraída la aportación energética del ruido de fondo y aplicada la corrección por reflexiones.

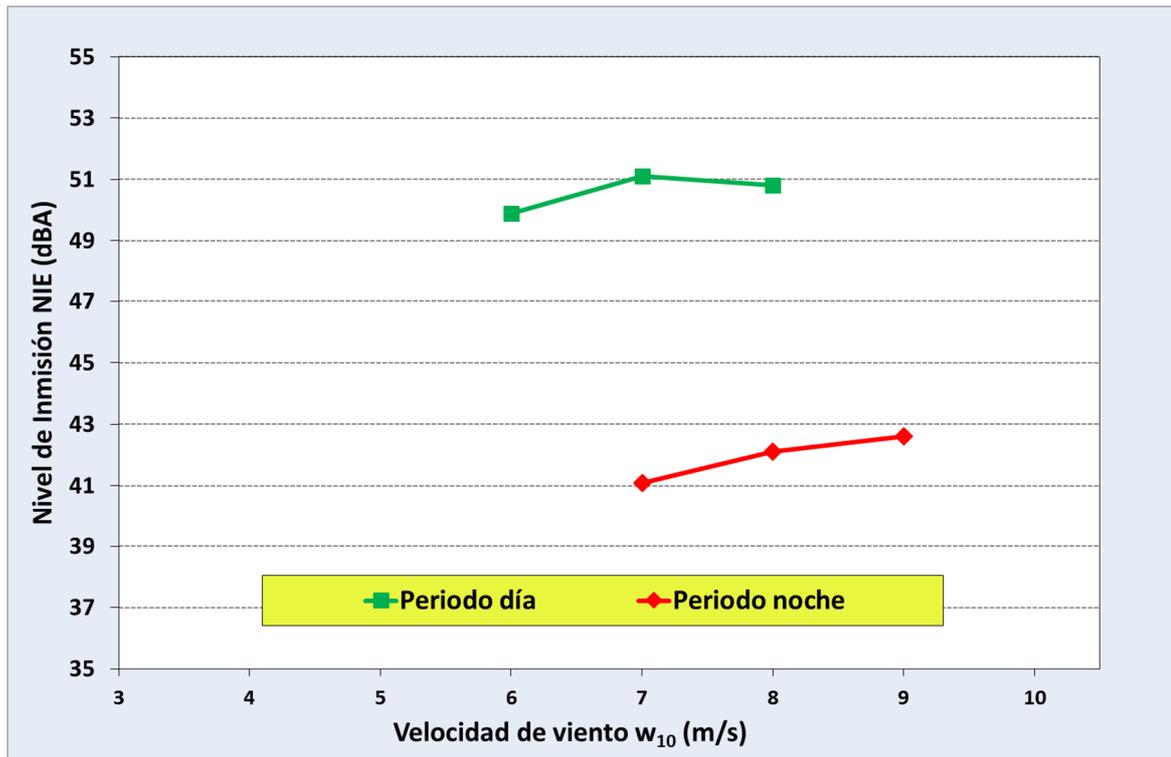


Ilustración 128. Niveles de Inmisión al Exterior según Método I en punto de medida 1

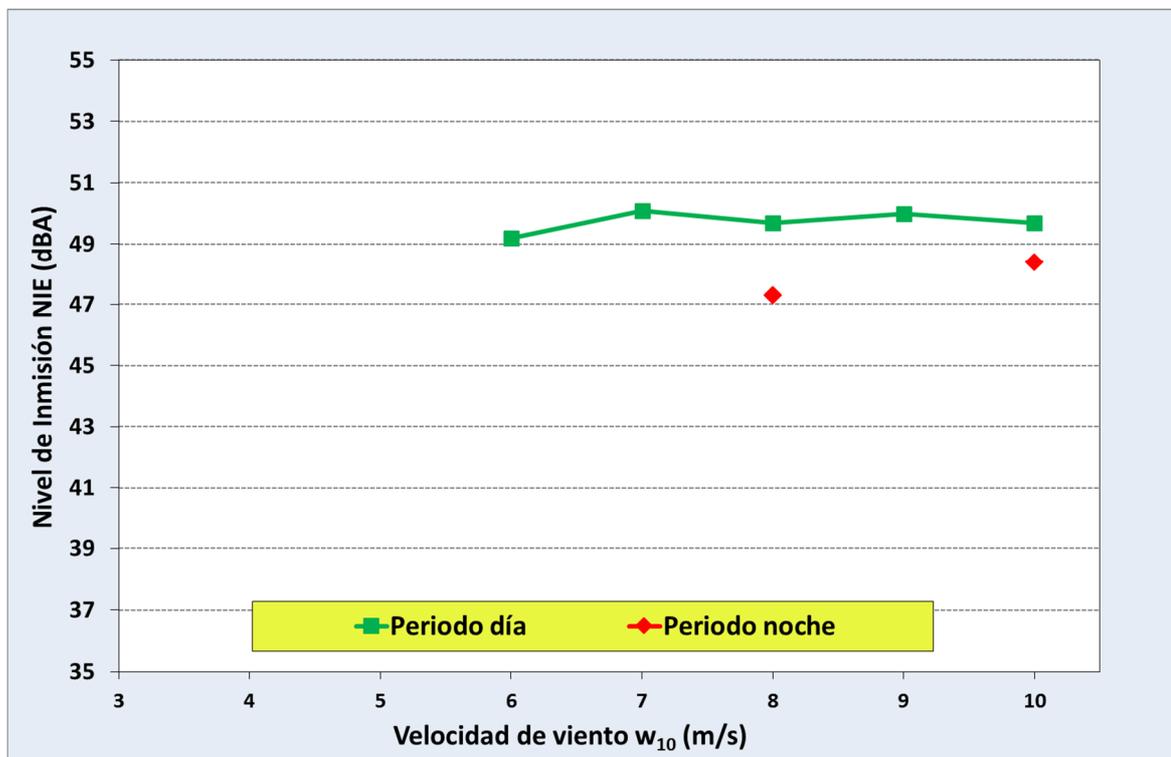


Ilustración 129. Niveles de Inmisión al Exterior según Método I en punto de medida 2

De entre todos los resultados obtenidos durante la campaña, fueron seleccionados aquellos con valores superiores para cada ventana de viento, dentro de las condiciones meteorológicas

existentes durante la realización de los ensayos (temperatura, humedad y dirección de viento predominante). Por tanto estos resultados, pueden ser interpretados como una “foto” fija de la situación acústica más desfavorable existente bajo las condiciones de propagación existente el día de la campaña. Esta valoración instantánea aporta información limitada sobre el impacto acústico del parque, reducida al día de los ensayos pero sin información sobre la variabilidad existente dentro de la propia ventana de condiciones favorables de propagación. Esta circunstancias era esperada, cuando se recomiendan periodos de monitorizado de entre 10 y 15 días (Institute of Acoustics, 2013; The New Zealand Standard Institute, 2010) para cubrir un amplio rango de condiciones meteorológicas.

Los resultados muestran una reducción en los niveles sonoros entre el periodo diurno y nocturno de unos 8 dBA en el caso del punto 1 y de 1 dBA en el punto de medida 2, fruto de la implementación de las estrategias de mitigación de ruidos. Estos datos sugieren que las medidas de mitigación están siendo efectivas, pero no permiten garantizar su efectividad dada la escasa representatividad de la muestras. Más aún, cuando en el punto de medida 2, la variación se encontraría en el rango de variación de la incertidumbre de ensayo en ese punto (5,5 dBA).

Valoración de la representatividad del Método II: Análisis por Regresión Polinomial

La aplicación de este método nos ha permitido ampliar la representatividad de la muestra y el rango de velocidades de viento estudiado respecto al análisis de bins discretos y nos permite extrapolar los resultados a cualquier velocidad dentro de dicho rango gracias al ajuste por regresión polinomial. En las siguientes gráficas (Ilustraciones 130-133), se aprecia los registros discretos obtenidos por el procedimiento normativo (método I) y la aplicación del alcance del estudio obtenido con la aplicación del método II gracias al monitorizado de los niveles sonoros en la zona.

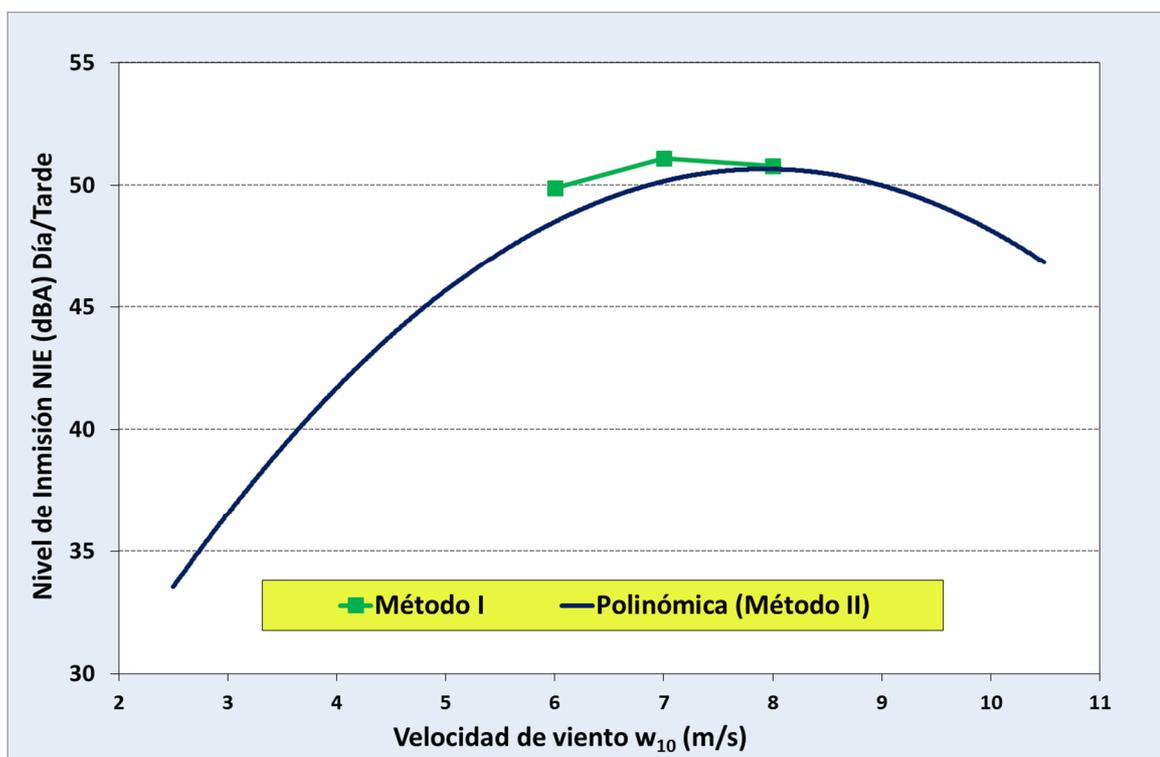


Ilustración 130. Comparativa entre los resultados del Método I y II en el punto de medida 1 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas).

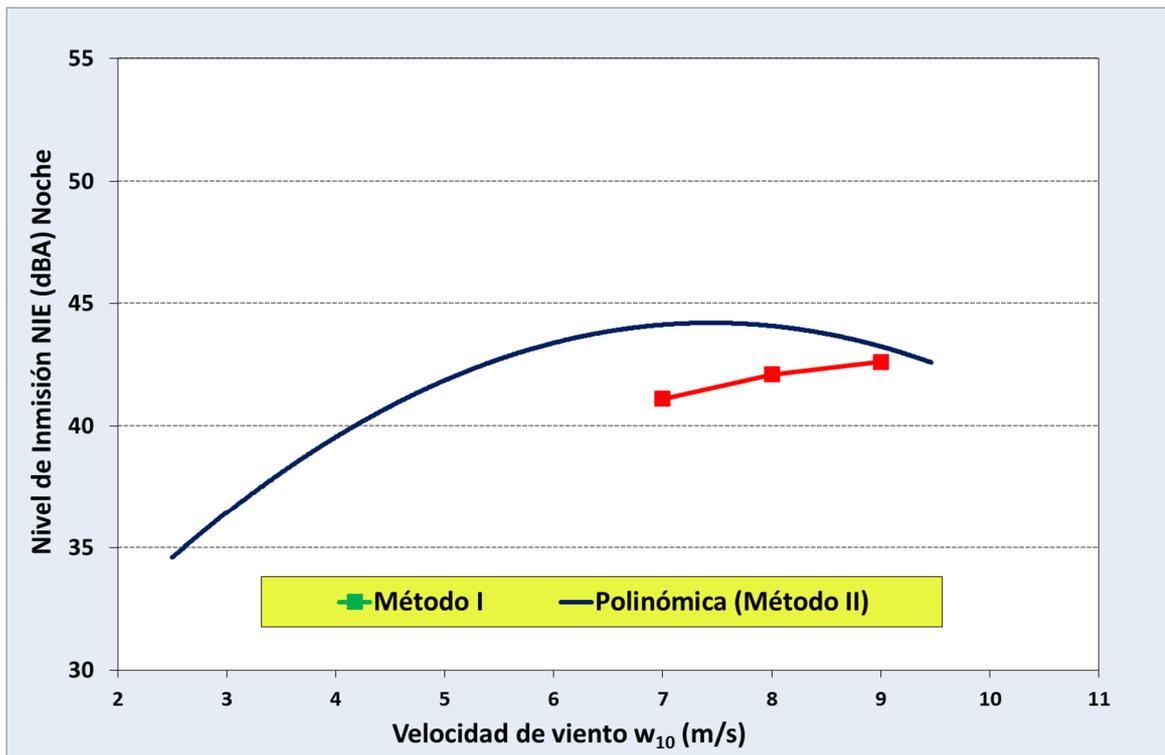


Ilustración 131. Comparativa entre los resultados del Método I y II en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

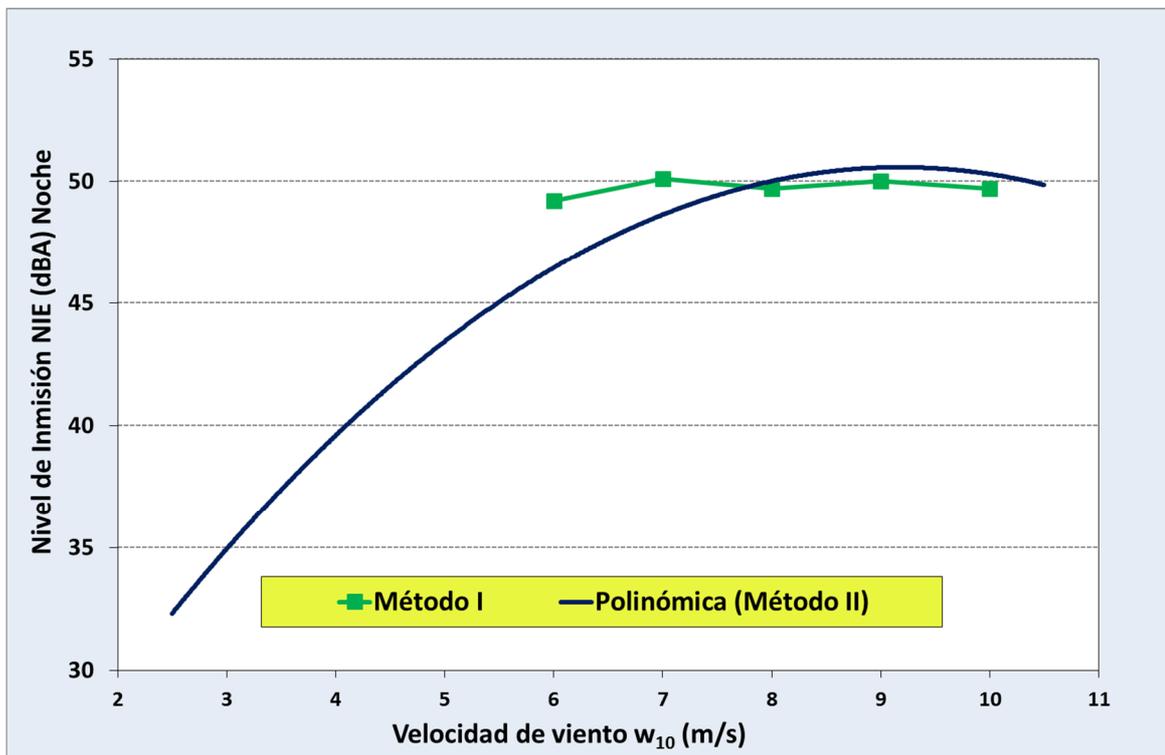


Ilustración 132. Comparativa entre los resultados del Método I y II en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas).

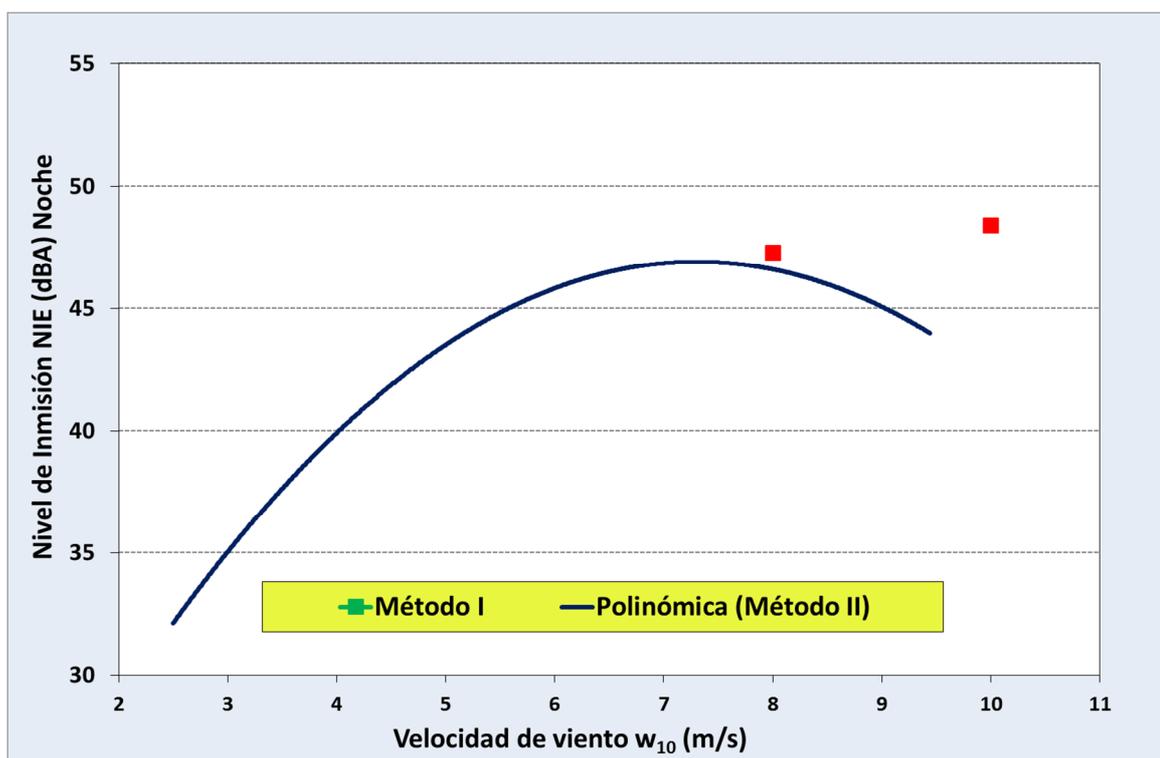


Ilustración 133. Comparativa entre los resultados del Método I y II en el punto de medida 2 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

La comparativa de los resultados indica que tal y como se esperaba, el método I ha valorado tanto situaciones más desfavorables (niveles de inmisión superiores) como menos desfavorables (niveles inferiores) de la afección del parque eólico, frente al valor medio o más probable que representan la extrapolación de los niveles de inmisión obtenida mediante el método II.

En el punto de medida 1 se observa que durante el día, el método I registró valores en un rango de 1 dBA superiores al valor aproximado por regresión para todo el rango de medidas mientras que en el periodo nocturno se obtuvieron valores sensiblemente menores en un rango de hasta 3 dBA para el bin de viento de 7 m/s. En este caso, la aplicación de la Instrucción Técnica 2 del Decreto 6/2012 supondría una valoración estricta durante el periodo día pero una importante subestimación de los niveles de inmisión durante la noche.

En el punto de medida 2, la valoración normativa se considera adecuada para el rango de viento entre 8 y 10 m/s con desviaciones inferiores a 1 dBA durante el día, pero con importantes subestimaciones para menores velocidades de viento (6-7 m/s) que superan los 2,5 dBA. Durante el periodo nocturno, destaca la valoración del bin de viento de 10 m/s (circunstancia no registrada durante el monitorizado de ruido), donde se observa una importante desviación entre la tendencia de la regresión polinomial y el valor medido *in situ*.

La gran diferencia existente entre la extrapolación del punto de medida 2 durante el periodo noche a velocidades superiores a 8 m/s y el nivel de inmisión medido *in situ* a 11 m/s sin duda está influenciada por el incremento en la desviación en los extremos de la curva de regresión, una de las principales limitaciones de este método. En este caso, la desviación está asociada a la metodología de regresión polinomial, que introduce desviaciones en los extremos de la curva debido a la disminución del número de registros en esos rangos de viento. Esta circunstancia es habitual en otros estudios (Moles et al., 2010; Salmon y Corby, 2012) y algunas recomendaciones sugieren el ajuste de la curva hacia los extremos, como se muestra en la siguiente imagen.

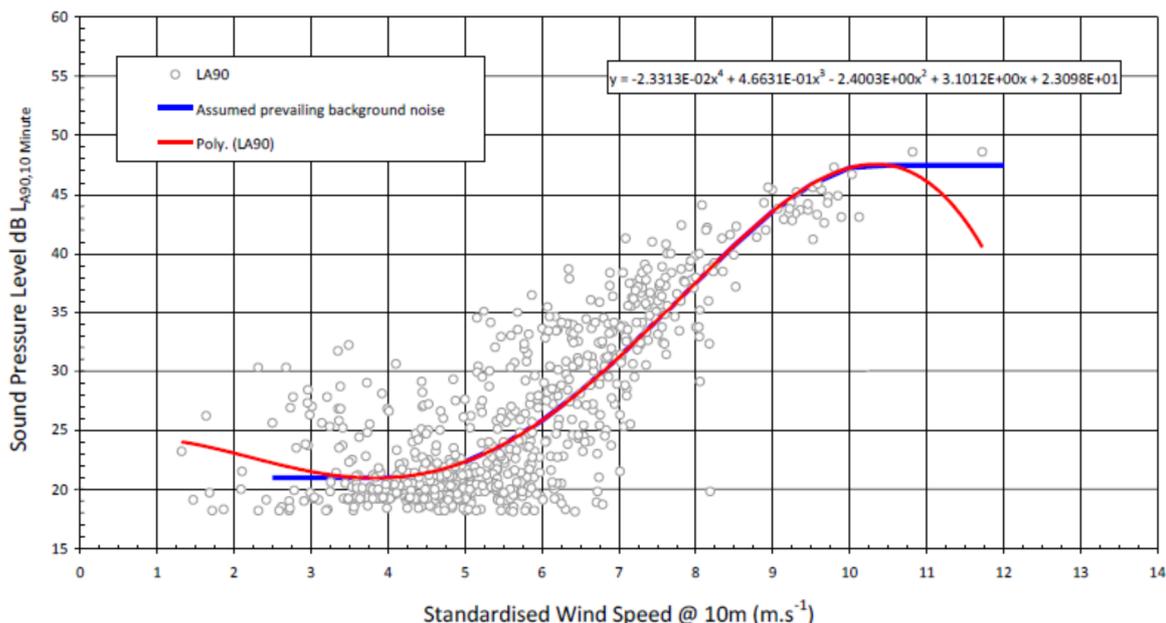


Ilustración 134. Corrección sugerida para los extremos de curva de regresión polinomial (Institute of Acoustics, 2013)

Sin embargo, dado que el método empleado será utilizado para declarar conformidad respecto a la normativa de aplicación, no se considera adecuada la aplicación de este tipo de corrección sin un criterio definido y estable para todos los casos. Con vistas a minimizar esta desviación en los extremos del rango de velocidades estudiado, se procedió a seleccionar el mejor ajuste de la curva, bien de segundo o tercer orden, para cada punto de medida y periodo estimado. Aún con este criterio, no se aprecia ninguna mejora en la correlación por lo que debe considerarse una desviación propia del método empleado y es recomendable descartar los valores extrapolados de los extremos de la tabla.

A pesar de estas desviaciones, el ajuste por regresión obtenido se considerado muy adecuado conforme a las recomendaciones de Smith y Chiles, 2010 que establece un coeficiente de correlación mínimo de 0,8 para las cercanías del aerogenerador.

	Punto de medida 1		Punto de medida 2	
	Día/Tarde	Noche	Día/Tarde	Noche
Coefficiente de determinación R ²	0,92	0,84	0,91	0,94

Tabla 57. Coeficientes de correlación obtenidos en la aplicación del método II.

Los coeficientes de determinación R² obtenidos nos permiten afirmar que, en todos los casos estudiados, al menos el 84% de la variación producida en el Nivel de Inmisión al Exterior, está explicada por la variación de la velocidad de viento.

En línea con las experiencias a nivel internacional, el método II es adecuado para la representación de los niveles sonoros esperados en función de la velocidad de viento con la única salvedad de las desviaciones existentes en los extremos de la curva que deberían ser descartados o bien, completados con nuevas campañas de monitorizado. Aunque el método ofrece una idea sobre la dispersión de la muestra mediante la nube de puntos, no facilita ningún indicador fijo que pueda ser empleado para la evaluación normativa.

Valoración de la representatividad del Método III: Agrupación por bins

El análisis agrupado por bins de viento además de ampliar el rango de velocidades estudiado, integra la variabilidad registrada dentro de los niveles sonoros medidas en la campaña de ensayos, siendo posible establecer un límite superior e inferior de la afección sonora sobre los receptores considerando la desviación estándar calculada para cada bin de viento. De esta forma, considerando el conjunto de situaciones más desfavorables de funcionamiento del parque eólico (media aritmética del nivel de inmisión más desviación estándar), podemos establecer un límite máximo de inmisión sonora que el parque eólico no superará con alta probabilidad.

En las siguiente gráficas (Ilustraciones 135-138), se realiza una comparativa entre los registros discretos obtenidos mediante el método I y los resultados de la aplicación del método agrupado por bins.

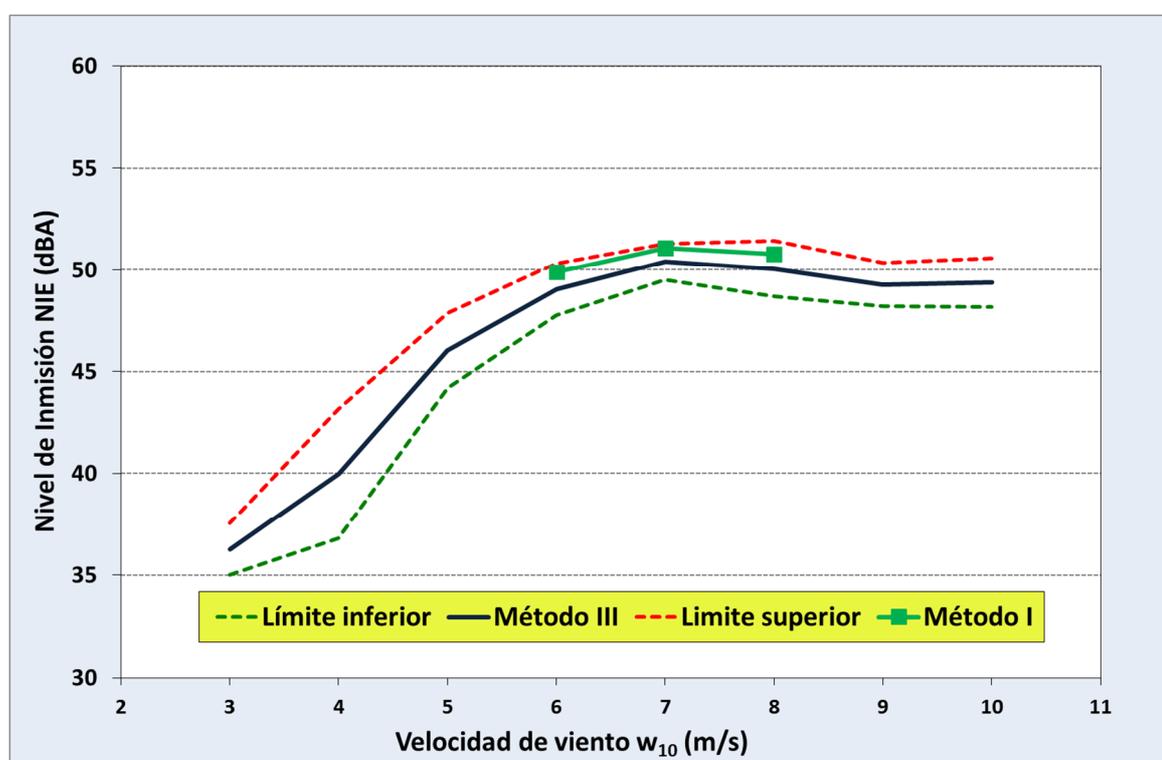


Ilustración 135. Comparativa entre los resultados del Método I y III en el punto de medida 1 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas).

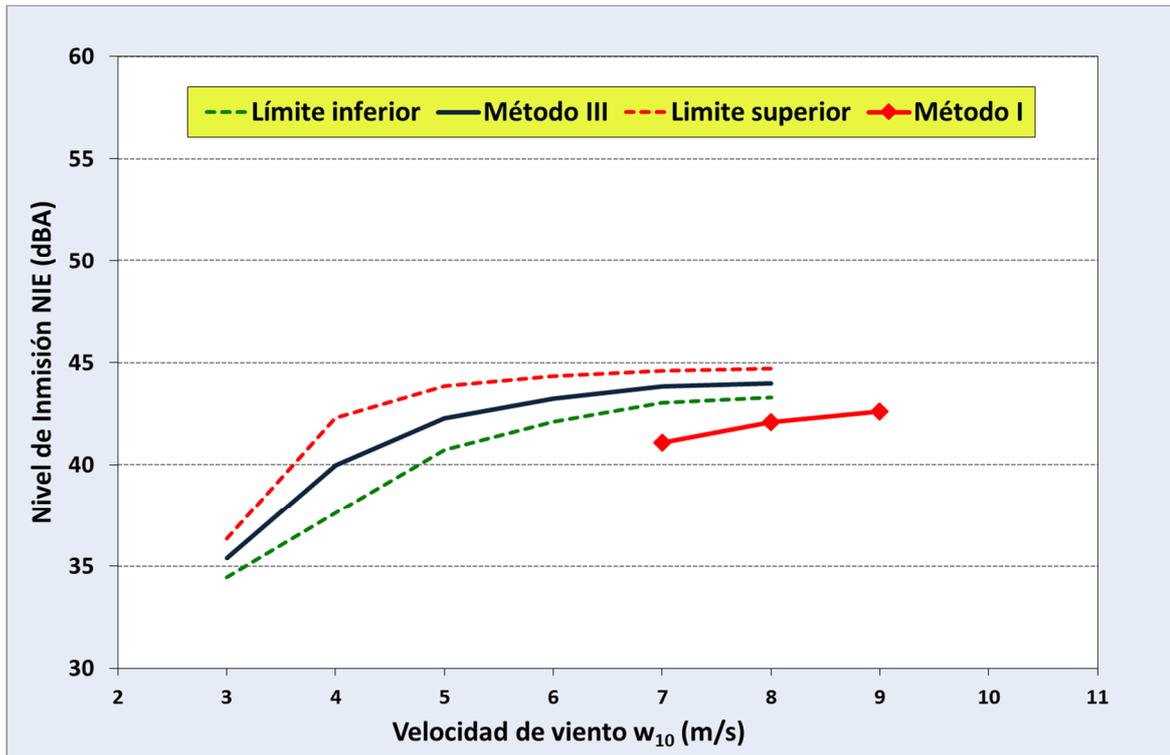


Ilustración 136. Comparativa entre los resultados del Método I y III en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

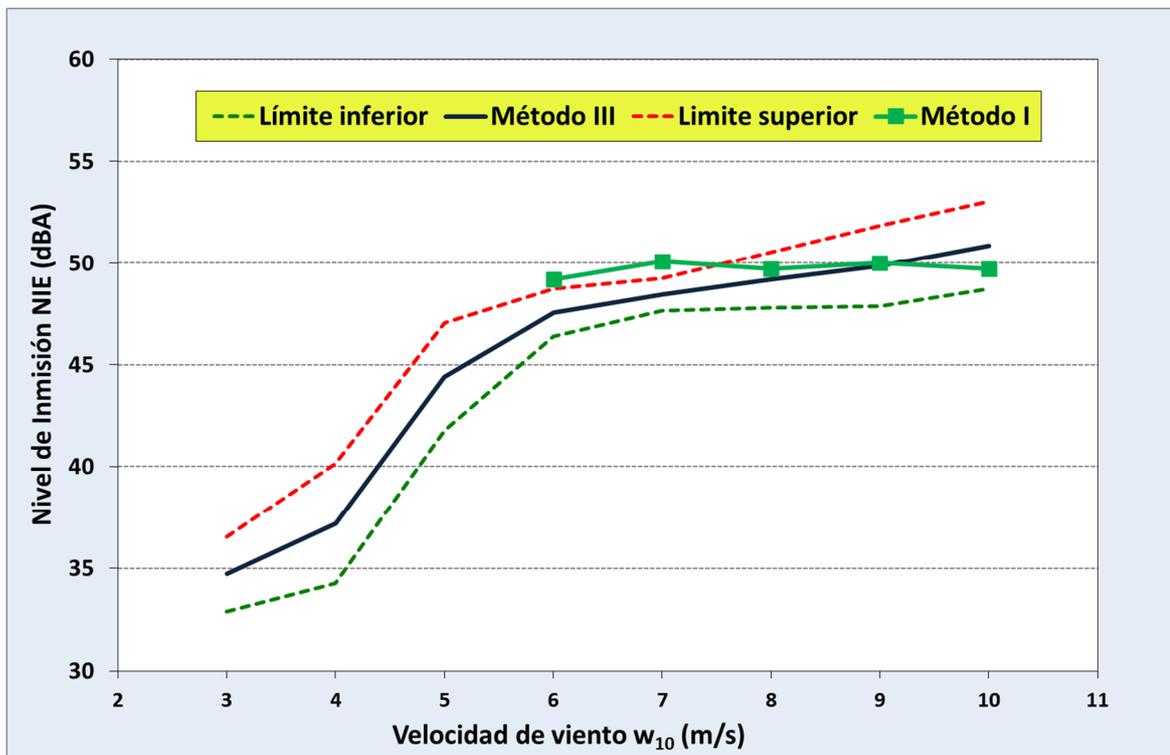


Ilustración 137. Comparativa entre los resultados del Método I y III en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas).

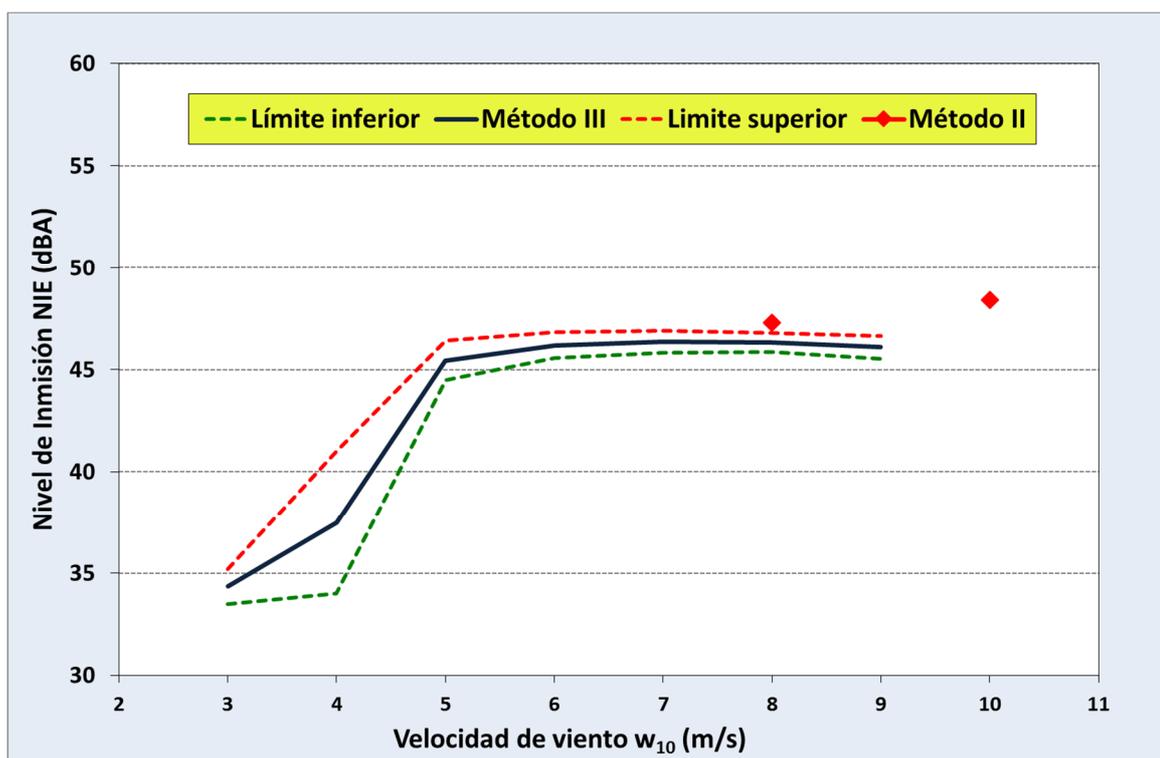


Ilustración 138. Comparativa entre los resultados del Método I y III en el punto de medida 2 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

El análisis comparativo entre el método I y III ponen de manifiesto que todas las valoraciones obtenidas mediante ensayos *in situ* se engloban dentro del análisis agrupado por bins de viento, con las siguientes particularidades:

- El único caso (Ilustración 18) en el que los valores medidos *in situ* superan el límite superior obtenido por el método III (punto de medida 2 para velocidades de viento de 7 m/s durante el periodo diurno) se obtienen en bins de vientos donde el número de muestras es muy representativo (más de 520 registros minutales) y la desviación estándar se minimiza (0,8 dBA). No es posible determinar si esta circunstancia se debe a errores en los ensayos o en la implementación de las medidas de mitigación (más probable según informa el promotor).
- Las condiciones de los ensayos en el punto de medida 1 durante el periodo noche sin duda fueron diferentes de los existentes durante la campaña de monitorizado de ruido, en los que se basa el análisis del método III, ya que existen importantes diferencias entre ambos. La similitud entre los resultados de los métodos II y III indican que hubo alguna alteración durante la campaña de ensayos *in situ* de corta duración (Ilustración 139).

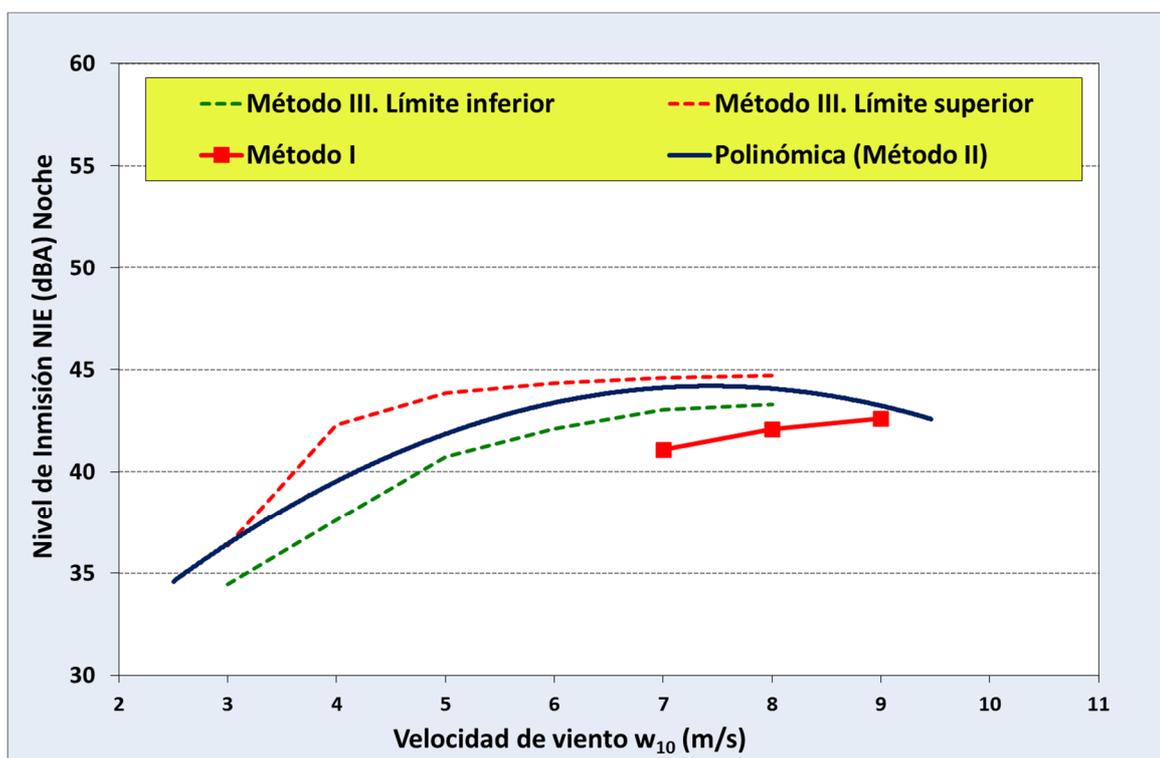


Ilustración 139. Comparativa entre los resultados del Método I, II y III en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

No es posible comparar aquellos valores medidos que están fuera del rango de estudio del método III como por ejemplo el bin de viento de 9 m/s que se muestra en la Ilustración 139. Aunque se dispone de medidas concretas, no entra dentro el rango de medida (Método III) o extrapolación válida (Método II) por la falta de muestras suficientes.

Un análisis en conjunto de las desviaciones estándar muestra que la mayor variabilidad de los datos se encuentra a velocidades de viento de 4 m/s a pesar de que no es el rango en el que el tamaño de la muestra es menor (fue necesario excluir el bin de viento de 9 m/s durante el periodo noche en el punto de medida 1 porque sólo presentaba 48 registros y su desviación estándar era de 0,74).

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	Punto de medida 1 Desviación estándar	Punto de media 2 Desviación estándar
3	1,275	1,819
4	3,178	3,4927
5	1,839	2,651
6	1,27	1,185
7	0,882	0,808
8	1,377	1,379
9	1,081	1,987
10	1,208	2,145

Tabla 58. Desviación estándar máxima para cada bin de viento

Sin duda, este incremento en la desviación estándar para el bin de viento de 4 metros está motivado por la distribución de los registros, concentrándose los registros en los extremos del rango como se aprecia en la siguiente gráfica.

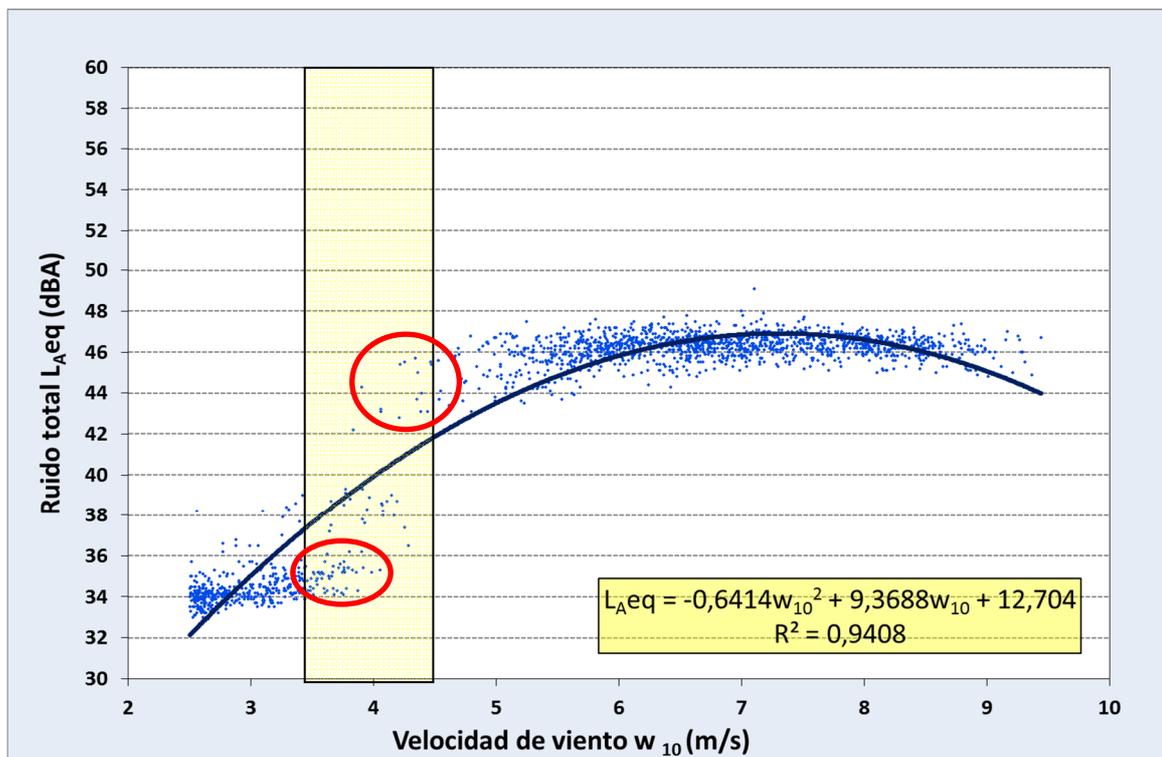


Ilustración 140. Ruido total en el punto de medida 2 durante el periodo nocturno (23:00-07:00 horas)

La ampliación de los ensayos en este bin de velocidad permitiría mejor probablemente la incertidumbre en este rango de viento, si bien es posible correlacionar estas desviaciones a la entrada en funcionamiento de la parada programada del aerogenerador con mayor aportación a esa velocidad de viento. Esta circunstancia es análoga a las desviaciones cuando el aerogenerador está funcionando a baja capacidad, asociada a la velocidad de arranque del aerogenerador, tal y como está reportado por otros autores (Botha, 2012; Evans y Cooper, 2011)

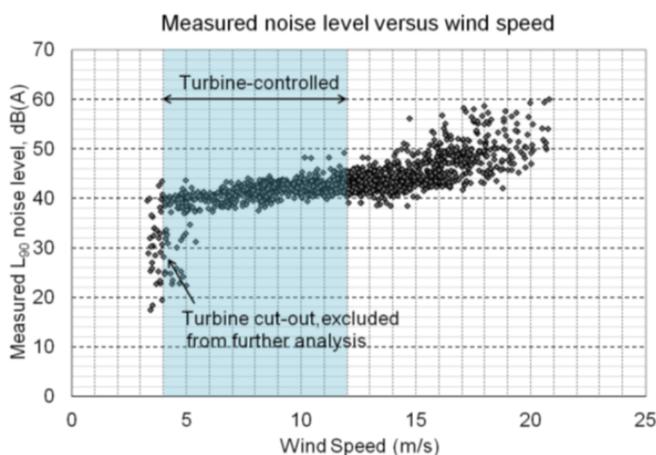


Ilustración 141. Identificación de aerogeneradores parados en la correlación entre niveles sonoros y velocidad de viento (Evans and Cooper, 2011)

La comparativa entre la potencia sonora del aerogenerador y las desviaciones estándar máximas obtenidas en cada punto de medida (correspondientes al periodo diurno, Ilustración 142) ponen de manifiesto que la mayor dispersión de datos se corresponden para una velocidades de viento de entre 4 y 5 m/s, disminuyendo ésta sensiblemente cuando el aerogenerador produce al mínimo y máximo de su capacidad. Se observa también un incremento en la desviación estándar a altas velocidades en los que el ruido inducido por el viento depende fundamentalmente de ráfagas de viento a nivel de micrófono, que no están correlacionadas con la velocidad de viento a una altura de 10 metros (bines de viento de 9 y 10 m/s en la Ilustración 142)..

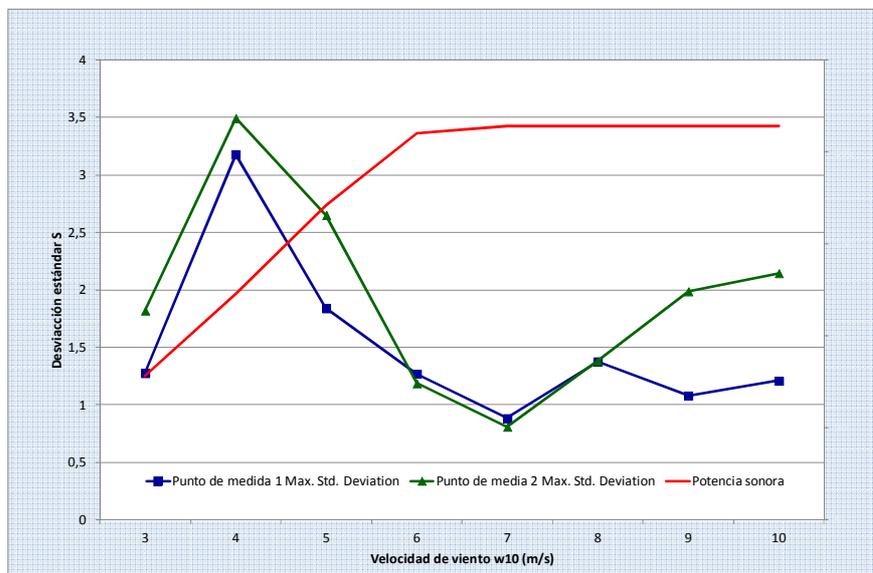


Ilustración 142. Comparativa entre la desviación estándar máxima y la potencia sonora del aerogenerador

Los resultados observados se consideran altamente representativos, especialmente para altas velocidades de viento (igual o superior a 7 m/s) durante el periodo nocturno cuando la desviación estándar es inferior a 1 (Tabla 40).

En base a estos, se puede afirmar las principales ventajas del análisis agrupado por bins de viento son:

- Fácil interpretación de los resultados que refleja la variabilidad entorno a un valor promedio del nivel de inmisión al exterior
- La definición de un límite superior e inferior estimado del Nivel de Inmisión facilita la gestión del parque, permitiendo la realización de un análisis de sensibilidad del impacto acústico en función de la velocidad de viento y concentrar las estrategias de bajo ruido en aquellas situaciones de superación normativa.
- No presenta desviaciones en los extremos del rango de velocidades estudiadas siempre y cuando se dispongan de registros suficientes.

El principal inconveniente es la necesidad de obtener una muestra representativa para cada bin de viento (al menos 60 registros) lo cual implica una importante inversión en campañas de monitorizado de ruido. La representatividad de la desviación estándar puede verse afectada sensiblemente por la incidencia de otros focos ruidosos por lo que este sistema es más adecuado para zonas tranquilas de campo abierto. En zonas donde existan otros focos ruidosos con influencia en los niveles sonoros ambientales, será necesario reforzar los esfuerzos en un filtrado adecuado de los datos obtenidos.

Procedimiento de monitorizado de ruido

El procedimiento normativo mediante el análisis de un pequeño número de registros obtenidos *in situ* mediante el control del funcionamiento de los aerogeneradores (*on/off*) se demuestra suficiente para certificar el cumplimiento de la normativa de aplicación para ese instante en concreto, exclusivamente para las condiciones meteorológicas y de funcionamiento del parque en ese momento.

Sin embargo, la variabilidad de la afección sonora de un parque eólico asociada a la intensidad y dirección de viento, hace necesario un estudio que vaya más allá de una “instantánea” del ruido existente en un determinado momento, ampliando los alcances a todo el rango de velocidades de viento esperado dentro de las direcciones más desfavorables y considerando la variabilidad registrada para una misma intensidad de viento.

El monitorizado del ruido del parque eólico mediante campañas de ensayos de larga duración se presenta como la mejora alternativa para conseguir este objetivo y reducir la incertidumbre de los ensayos, de forma que se reducen los riesgos de errores cuanto más larga sea la duración de los ensayos (Bigot y Farotto, 2011). Aunque los resultados obtenidos con una campaña de siete (7) días de duración han sido satisfactorias, puede ser recomendable para minimizar la incertidumbre prolongar estos ensayos hasta los diez (10) días. Tras el filtrado de datos y la restricción de las velocidades de viento estudiadas, la campaña de ensayos proporcionó un total de 65 horas de registros durante el periodo día y tarde y 27 horas durante el periodo noche.

El factor determinante de la duración final de la campaña de ensayos vendrá determinada del periodo de integración de las medidas que oscila desde un mínimo de un minuto (Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 2012; Boletín Oficial del Estado, 2005a; IEC, 2002; Ontario Ministry of the Environment, 2008; The New Zealand Standard Institute, 2010) para parques eólicos con una afección sonora continua hasta intervalos de 10 minutos, empleados como norma general en la mayoría de países (por ejemplo Suecia, Irlanda del Norte, Nueva Zelanda, Australia etc.). Es evidente que la selección de un periodo de integración de 10 minutos, implica la obtención de un 10% de las muestras que podrían obtenerse con un periodo de integración de 1 minuto.

El análisis de los datos obtenidos durante la campaña de monitorizado de ruido han puesto de manifiesto que la selección de un periodo de integración de 1 minuto es adecuada para establecer la correlación entre los niveles de inmisión y la velocidad de viento para el caso estudiado, en el que la afección del parque eólico tiene un carácter continuo, existiendo una tendencia a la reducción del tiempo de integración incluso a valores inferiores de hasta 10 segundos (IEC, 2012).

Las ventajas de este sistema son evidentes en cuanto a la optimización de los recursos empleados y la facilidad del filtrado de datos, obtenido mayor número de registros válidos que empleando periodos de integración mayores.

Los requisitos normativos sobre la duración de los ensayos varían según los diferentes estándares de cada país, desde las veinticuatro (24) horas recomendadas en Andalucía para la valoración el ruido de fondo hasta los diez (10) días de monitorizado propuesto en la norma NZS6808:2010 y otros requisitos más estrictos propuestos por otras normativas (12 meses de monitorización en Irlanda del Norte (Northern Ireland EPA, 2010). Además en las autorizaciones ambientales se podrán establecer requisitos específicos para garantizar el cumplimiento normativo, como por ejemplo en el caso del parque eólico *West Wind Project* en Wellington (Nueva Zelanda) donde la declaración de impacto exigía un monitorizado de dos años en cinco puntos de medida tras la puesta en marcha de la instalación (Botha, 2012). De cualquier forma, la duración final de los resultados vendrá determinada por las propias condiciones del área de estudio y la

representatividad de los registros que se vayan obteniendo. En este sentido, es especialmente útil la utilización de estaciones de medida con transmisión telemática vía módem (McDonald et al., 2011) que permite determinar mediante el análisis prácticamente a tiempo real de los registros cuándo se puede dar por concluida la medición, una vez obtenidos suficientes datos.

Valoración del ruido de fondo

La valoración del ruido de fondo existente en la zona objeto de estudio debería llevarse a cabo mediante el mismo procedimiento que el monitorizado de ruido con el parque eólico funcionando hasta obtener suficientes registros representativos para el rango de velocidades de viento que se pretende valorar.

Sin embargo, la realidad es que habitualmente los estudios acústicos de los parques eólicos se ciñen al requisito mínimo establecido por el RPCCA de ensayos preoperacionales de 24 horas de duración (Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 2003, 2012). En otros casos, el estudio acústico viene motivado por denuncias y molestias por ruidos de los propietarios de edificaciones cercanos por lo que la valoración del ruido de fondo debe realizarse mediante una parada técnica controlada de los aerogeneradores. Dado que estas paradas técnicas de las instalaciones generan importantes pérdidas para el promotor del parque, en ocasiones la duración está limitada a unas pocas horas en las que no es posible obtener un ruido de fondo representativo para todo el rango de velocidades de viento estudiado, como se ha puesto de manifiesto en el presente trabajo donde la correlación entre el ruido de fondo y la velocidad de viento o no existía o sólo se explicaba en un 50% de los casos registrados (Ilustraciones 80-83).

Se concluye por tanto fruto de la experiencia de monitorizado de ruido y de la aplicación del método *on/off* (parada controlada de los aerogeneradores para valorar el impacto acústico inmediatamente antes o después) en el parque eólico estudiado, que el requerimiento establecido en el RPCCA de ensayos preoperacionales con una duración de 24 horas son insuficientes para caracterizar adecuadamente el ruido de fondo de la zona de estudio, no sigue las recomendaciones específicas de otras normativas y referencias bibliográficas (Bigot y Farotto, 2011) y tan sólo permitiría obtener registros validos de ruido de fondo para la certificación acústica del parque bajo las mismas condiciones en las que se realizaron los ensayos preoperacionales.

Por tanto, se recomienda el monitorizado del ruido de fondo con carácter previo a la construcción del parque eólico y durante un periodo mínimo de diez (10) días, abarcando periodo con velocidades de viento por encima de 4 m/s ya que es crítico para valorar el funcionamiento a plena potencia de los aerogeneradores (Ashtiani y Titus, 2011). Es importante atender a las posibles variaciones en el ruido ambiental de carácter estacional, ya que están descritas alteraciones de hasta 17 dB asociadas al ciclo biológico de insectos y otro tipo de fauna (especialmente grillos y ranas) (Savery y Queensland, 2011). Además se hace necesario ejecutar un muestreo espacial de la zona de estudio mediante el establecimiento de diferentes localizaciones para los puntos de medida, ya que está demostrada la existencia de importantes diferencias en función de la orientación del micrófono, apantallamiento de edificaciones, orográfica y vegetación, especialmente en zonas con importantes cambios de elevación (Bonsma y Munro, 2009).

También es importante identificar aquellos casos en los que el ruido de fondo está condicionado por la dirección del viento, lo que puede obligar a establecer diferentes correlaciones por sectores de la rosa de vientos.

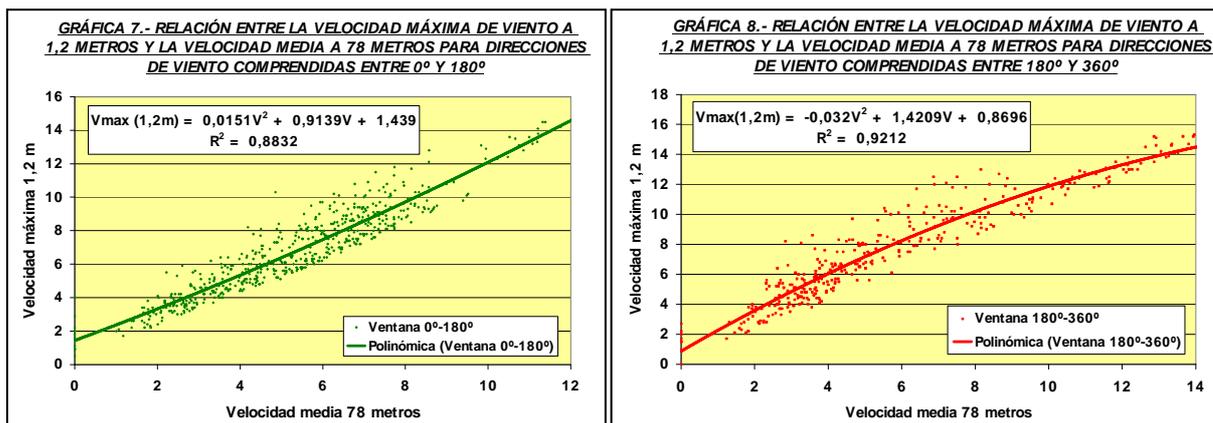


Ilustración 143. Ejemplo de correlación entre el ruido de fondo y la velocidad de viento en función de la dirección del viento (INASEL, 2009)

Esta circunstancia puede hacer necesario ampliar la duración de los ensayos abarcando al menos diez (10) días de medición para cada uno de los sectores de viento que determinan el ruido de fondo.

En el caso de estudio y ante la imposibilidad de valorar el ruido de fondo con paradas técnicas, se considera que el ruido total es representativo de la aportación sonora del parque y por tanto, los niveles de inmisión registrados serán considerados para la valoración normativa sin sustraer la aportación energética del ruido de fondo. La adopción de este criterio está basada en las siguientes afirmaciones:

- La afección acústica del funcionamiento de los aerogeneradores sobre los puntos receptores seleccionados es considerable dada su cercanía a los mismos. La valoración del ruido de fondo mediante un número discreto de intervalos minutales, pone de manifiesto que su aportación al ruido total para el rango de viento comprendido entre 8 y 12 m/s es prácticamente nula con diferencias entre el ruido total y el ruido de fondo de al menos 10 dBA. Por tanto, el ruido total se puede asimilar como la aportación sonora real de los aerogeneradores, con escasa influencia del ruido de fondo. Para el caso de estudio la incertidumbre asociada al ruido de fondo existente es igual o inferior a 0,5 dBA en todos los casos, con contribuciones máximas de 0,5 dBA al ruido total registrado.
- Este método es conservador ya que elimina la aportación sonora del ruido de fondo inducido por el viento que podría ser relevante especialmente a altas velocidades.
- Es un método que permite exclusivamente si un parque eólico cumple la normativa acústica cuando el ruido total, considerando las penalizaciones correspondientes por componentes especiales, no supera el límite normativo. En caso de superación de los niveles límite, no se podría garantizar si esa superación es debida al funcionamiento de los aerogeneradores o si es debida a la aportación energética del ruido de fondo.
- No permite la valoración de las correcciones por componentes tonales emergentes o de baja frecuencia que deberán ser valoradas mediante procedimiento específicos y considerando el ruido de fondo existente.
- Sólo es de aplicación en el caso de zonas tranquilas en campo abierto ya que la existencia de otros focos ruidosos puede impedir cualquier valoración normativa al tener una influencia evidente en el ruido total de la zona, especialmente durante el periodo nocturno.
- Las comparativas y validaciones realizadas con los resultados de los modelos de predicción sonora, deben tener en cuenta la contribución del ruido de fondo en este sentido.

El método de evaluación normativa considerando el ruido total registrado como aportación sonora de la actividad se plantea como una alternativa para la certificación del cumplimiento normativo del RPCCA en Andalucía sin necesidad de realizar paradas técnicas en el parque eólico.

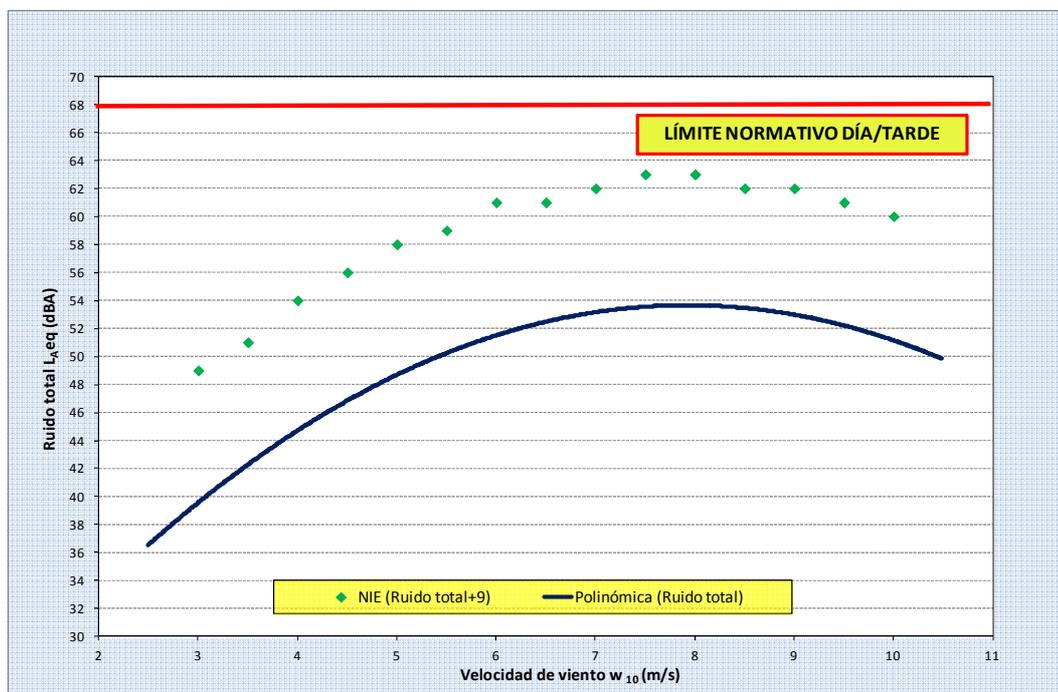


Ilustración 144. Ejemplo del cumplimiento normativo considerando la penalización máxima normativa (9 dBA) durante el periodo diurno para otro caso de estudio

En caso de que se registrasen incumplimientos normativos mediante esta metodología, sería necesario llevar a cabo una campaña específica de valoración del ruido de fondo y/o cálculo de penalizaciones por componentes tonales emergentes, de baja frecuencia o impulsivas en aquellos bins de viento en los que se registre superación.

Algunos autores (Hessler, 2011) plantean la posibilidad de ejecutar las medidas de ruido de fondo en otras ubicaciones cercanas no afectadas por el parque eólico ya que en campo abierto serán representativas ya que los niveles suelen oscilar entre 25-55 dBA en función de la velocidad de viento. Sin embargo, cuando se trata de evaluaciones normativas es necesario disponer de garantías en la representatividad de los resultados y la valoración de las penalizaciones por componentes especiales del ruido por lo que se recomienda emplear este sistemática cuando la aportación sonora del parque eólico sea predominante en el punto de valoración en todo el rango de viento estudio y cuando no existan otros focos ruidosos en la zona de estudio.

Con vistas a evaluar la consistencia del método empleado, se ha estudiado la correlación entre el índice L_{90} y el L_{Aeq} , que algunos autores consideran un buen indicador sobre la influencia de eventos de corta duración sobre el ruido total, como podrían ser los causados por ráfagas de viento u otro tipo de ruido residual (Chiles, 2010; Dickinson, 2009a). De forma general, son esperadas diferencias aproximadas de 1,5-2 dBA (Australian Standard, 2010; Evans y Cooper, 2012). En el punto de medida 2, que presentaba las mayores contribuciones debidas al ruido de fondo (0,5 dBA de acuerdo con la tabla 24-25), la diferencia entre ambos valores es menor de 0,8 dBA para velocidades inferiores a 8 m/s y en torno a 1 dBA para velocidades superiores.

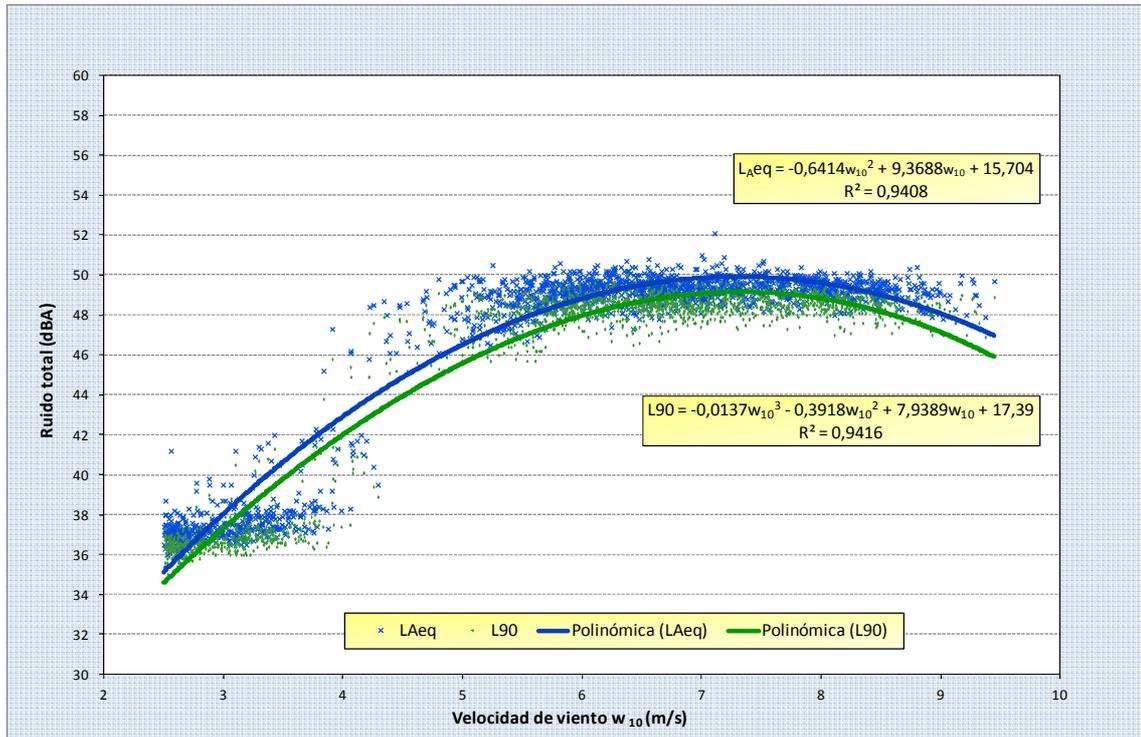


Ilustración 145. Comparativa entre el L_{Aeq} y L_{90} y su correlación con la velocidad de viento en el punto de medida 2 en periodo nocturno

Podemos confirmar la robustez de la metodología empleada considerando el ruido total como contribución exclusiva del parque eólico, dado que las desviaciones encontradas son significativamente inferiores a las encontradas por otros autores en parques eólicos monitorizados a largo plazo y donde se realizaron correcciones por ruido de fondo. Sin embargo, las incertidumbres asociadas a la contribución del ruido de fondo (0,5 dBA) deberán ser consideradas durante la validación de los modelos de predicción.

8.2 DISPERSIÓN DE LA MUESTRA Y DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

Hipótesis: La variabilidad de la inmisión sonora de un parque eólico en función de las condiciones de propagación dificulta en gran medida la verificación del cumplimiento normativo. Las técnicas de monitorizado deberían proporcionar algún parámetro o indicador sobre dicha variación con vistas a permitir declarar conformidad del cumplimiento de la normativa con suficientes garantías.

La evaluación del cumplimiento normativo de un parque eólico está muy influenciada por las condiciones de propagación, principalmente asociada a la meteorología, y el ruido de fondo, que pueden introducir una gran variabilidad en los índices normativos registrados. En el anterior apartado quedó demostrada la necesidad de ampliar los muestreos en el entorno de parques eólicos, dada la ineficacia de los procedimientos basados en tomas de muestras discretas durante ensayos de corta duración.

En este sentido, existen diferentes interpretaciones en relación con los escenarios que deben ser objeto de evaluación normativa en un parque eólico. Algunas normativas persiguen la valoración del escenario *más desfavorable desde el punto de vista acústico*, esto es, condiciones de máxima emisión y exposición de los receptores. Esta metodología es habitual en legislaciones con valores límites fijos (no basado en ruido de fondo), de aplicación en un amplio número de países europeos y estados norteamericanos. El objetivo último es establecer desde un punto de vista legal y objetivo si el emisor cumple con la normativa de aplicación, bajo un escenario de máxima protección sobre el receptor. Sin embargo, la realidad muestra que dependerá del momento seleccionado para la realización de los ensayos que se consiga ese objetivo, cobrando especial relevancia el muestreo temporal previo a la organización de la campaña de ensayos.

Con vistas a superar estas dificultades, otros países (Australia, Nueva Zelanda, Ontario, Columbia Británica y las Islas Británicas entre otros) optaron por desarrollar metodologías basadas en análisis estadísticos de campañas de monitorizado de larga duración. De esta forma, la muestra cubre un amplio abanico de condiciones de propagación (incluyendo las más desfavorables) y los límites de ruidos están basados en la exposición más probable o promedio para cada escenario. Aunque a priori, podría hacer pensar que esta estrategia reduce la protección del usuario, la implementación de límites basados en el ruido de fondo garantiza el confort acústico incluso en áreas tranquilas con muy bajo ruido de fondo.

En España, el marco regulatorio no contempla ningún procedimiento específico y la declaración de conformidad se establece conforme a la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95%. Dado que el rango de incertidumbre estimada para los ensayos realizados oscila en el rango 5,3 – 5,7 dBA (ver tablas 49 y 50), la declaración de conformidad supondría en un sentido estricto, la aplicación de valores límite 6 dBA inferiores a los establecidos en la normativa (por efecto del redondeo). Esta circunstancia, especialmente habitual en parques eólicos sometidos a un rígido control por parte de la Administración debido a la existencia de quejas por parte de los vecinos, supondría la paralización efectiva de numerosos aerogeneradores y la pérdida de productividad de numerosas instalaciones.

Aunque el criterio es válido para otro tipo de instalaciones industriales en las que las mediciones se realizan bajo condiciones más controladas y a mayor distancia, es evidente que necesitaría otro indicador de la dispersión de los datos, si el fin último es la declaración de conformidad (Hathaway y Kaliski, 2006). Con este fin, se han implementado las metodologías denominada II y III que proporcionan una idea de la dispersión de los datos. Aunque el método de regresión polinomial proporciona una nube de dispersión que permite identificar la variabilidad de las muestras, incluyendo los niveles máximos y mínimos, parece insuficiente para establecer un criterio cuantitativo para la declaración de conformidad.

En la Ilustración 146, se muestra la dispersión de muestras para el punto de medida 2 en periodo diurno. La nube refleja de manera orientativa la probabilidad de ocurrencia en función de la densidad muestral, como representan otros autores en términos probabilísticos (Ashtiani y Titus, 2011).

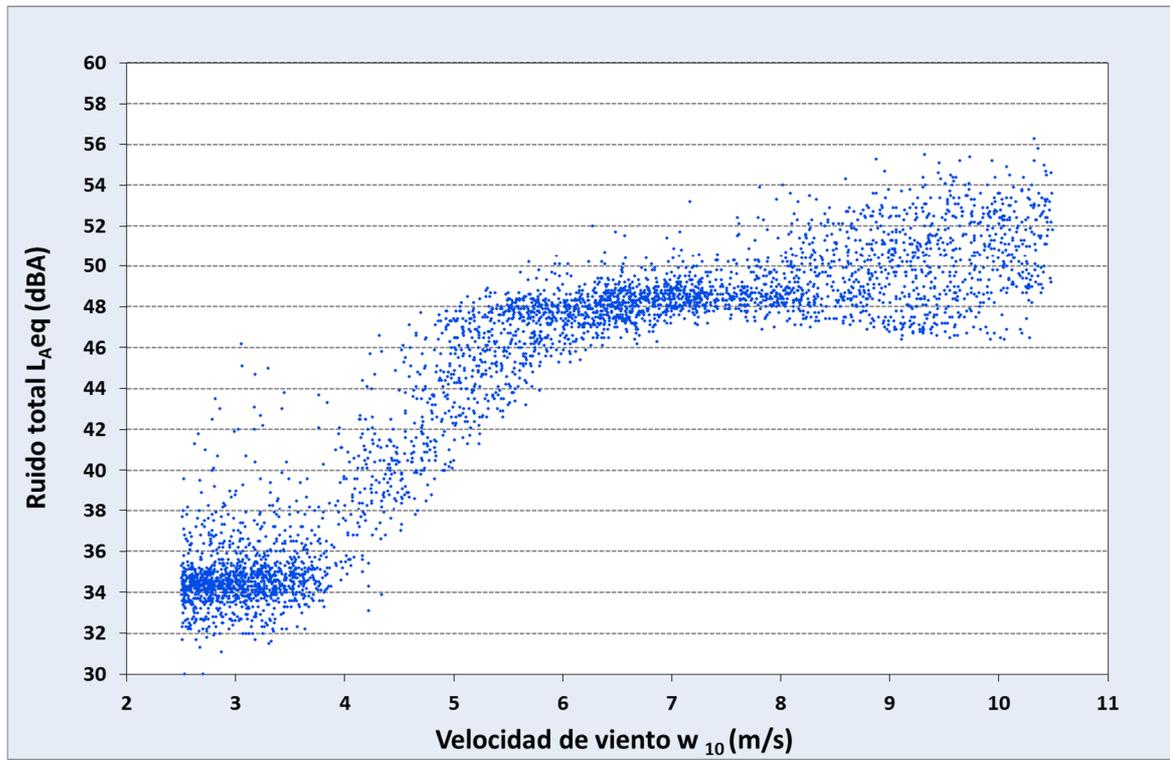


Ilustración 146. Nube de dispersión de la muestra en el punto de medida 2 durante el periodo diurno

El método III de agrupación por bins de viento sí proporciona un valor cuantitativo de la dispersión de los datos que viene dado por la desviación estándar de la muestra para cada ventana de viento. Si aplicamos el procedimiento establecido por ENAC para la declaración de conformidad empleando este parámetro en vez de la incertidumbre expandida ($k=95\%$), podremos reducir la variabilidad encontrada en la medida que se caractericen adecuadamente los niveles de inmisión, bien incrementando el tamaño de la muestra, bien identificando los parámetros causantes de la dispersión (ej. direcciones de viento, ruido de fondo, variables estacionales, etc.).

A continuación se analiza el grado de cobertura que proporcionaría esta metodología en relación con la aproximación por el método de mínimos cuadrados aplicada en el método II. El objetivo de las siguientes comparativas entre el método II y III es comprobar si el ajuste por regresión queda englobado por el rango valor promedio \pm la desviación estándar obtenida en el método III para cada ventana de viento.

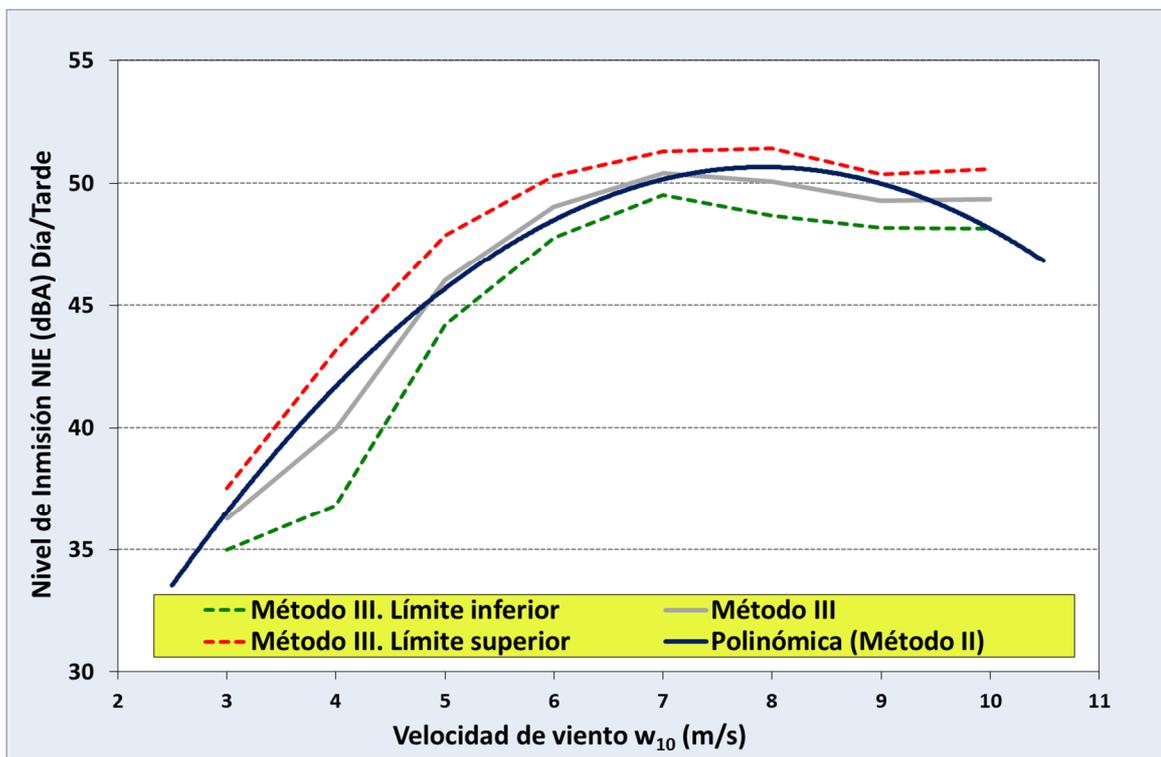


Ilustración 147. Comparativa entre los resultados del Método II y III en el punto de medida 1 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas).

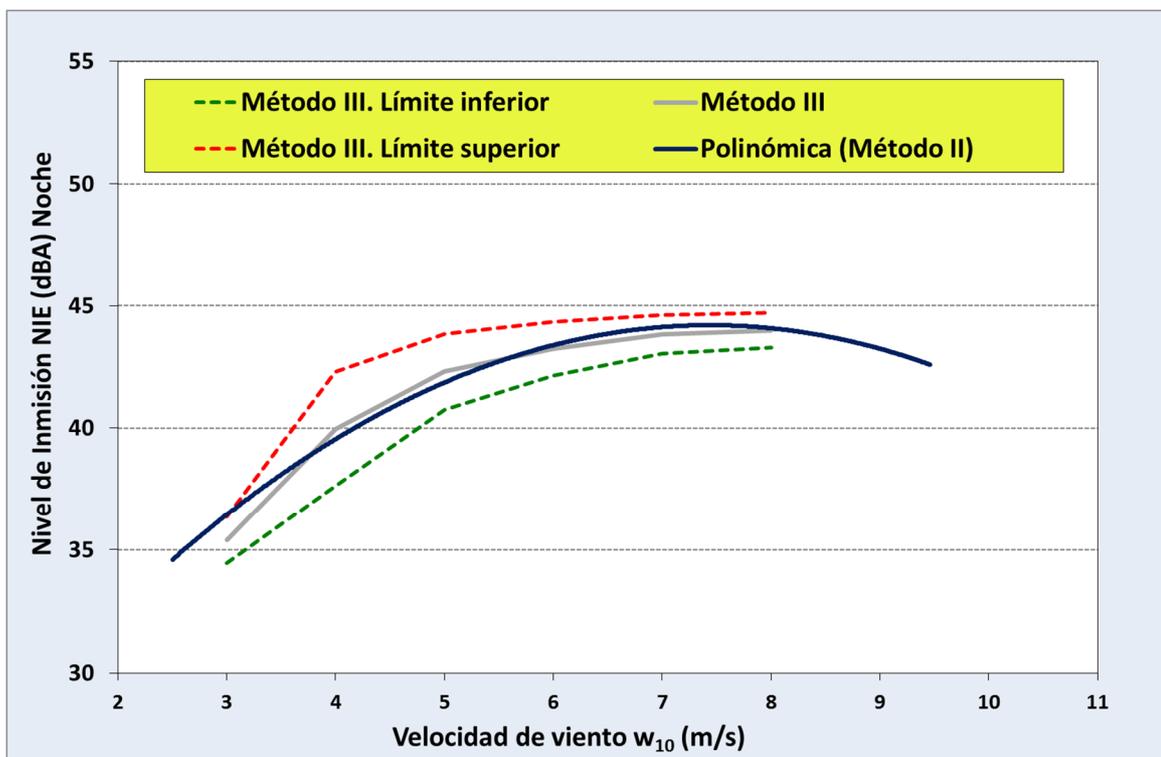


Ilustración 148. Comparativa entre los resultados del Método II y III en el punto de medida 1 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

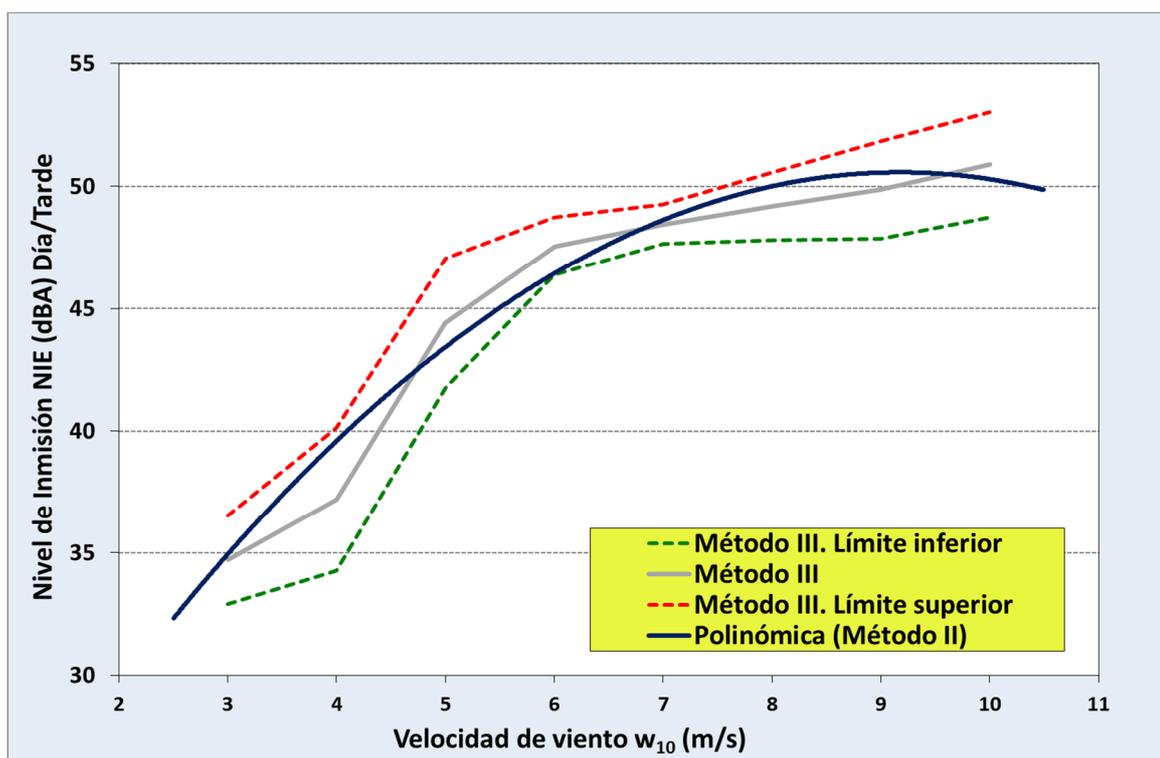


Ilustración 149. Comparativa entre los resultados del Método II y III en el punto de medida 2 durante el periodo diurno (07:00-23:00 horas)

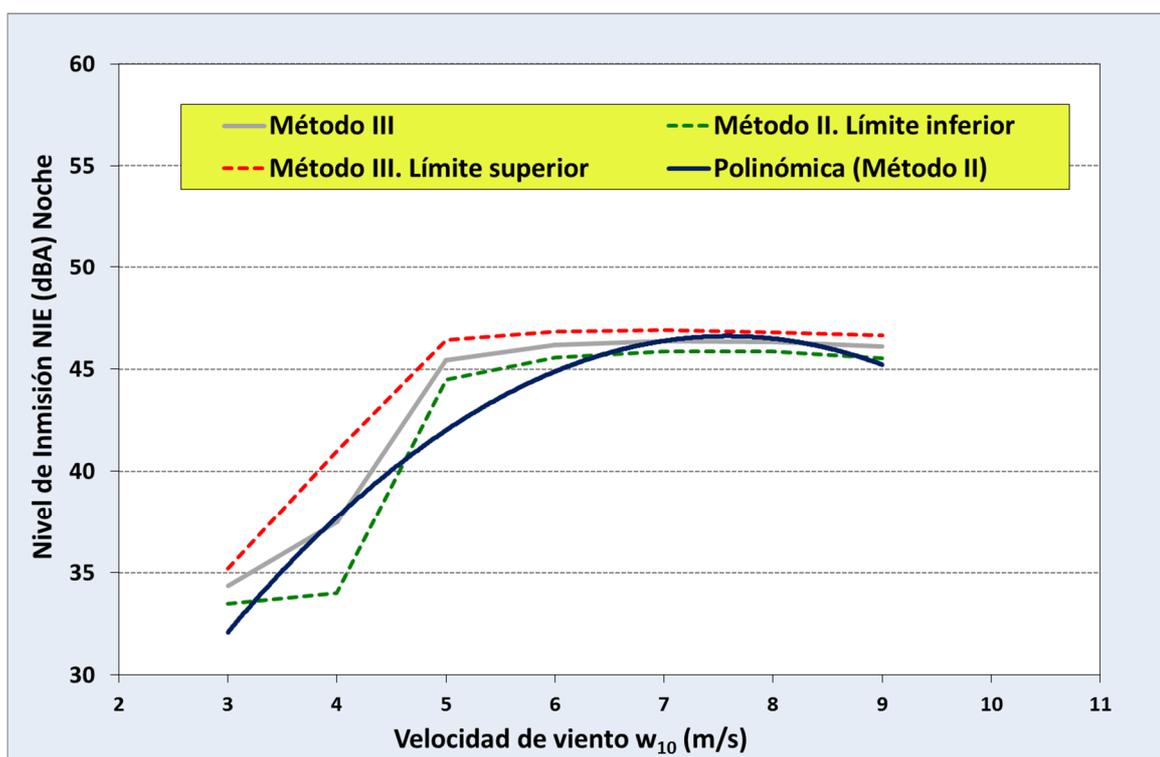


Ilustración 150. Comparativa entre los resultados del Método II y III en el punto de medida 2 durante el periodo noche (23:00-07:00 horas).

La comparativa demuestra que el método III de agrupación por bins de viento, aporta información adicional sobre la variabilidad del nivel sonora y engloba la extrapolación obtenida por

regresión mediante el método II (salvo en la Imagen 150), pero sin presentar desviaciones en los extremos del rango de velocidades estudiados.

En la mayoría de casos estudiados la totalidad de la curva de regresión se encuentra situada entre el límite superior e inferior del Nivel de Inmisión según el método II, salvo en el punto de medida 2 en periodo nocturno. En este caso (Ilustración 150), la puesta en marcha de estrategias de bajo ruido a velocidades superiores a 5 m/s ocasiona un cambio brusco en los niveles sonoros que no puede ser ajustado por regresión polinomial. Por tanto el método II no sería recomendable para parques eólicos donde se encuentren implementadas medidas de mitigación que puedan generar tales cambios de tendencia, puesto que en esos casos los niveles sonoros no pueden ser explicados exclusivamente por la velocidad del viento.

En base a estas conclusiones, el método de agrupación por bins (método III) se presenta como el más idóneo para representar la variación del nivel de inmisión sonora ocasionado por los parques eólicos, especialmente cuando existen medidas de mitigación implementadas. Esta metodología había sido implementada con anterioridad para la caracterización de la potencia acústica de los aerogeneradores (IEC, 2012), proporcionando el presente estudio, una experiencia en su validación a nivel de inmisión sonora sobre receptores. La desviación estándar de la muestras podría ser empleada como indicador de la dispersión de los datos para la declaración de conformidad bajo la normativa de aplicación.

8.3 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN EN PARQUES EÓLICOS MEDIANTE MONITORIZADO DE RUIDOS

Hipótesis: Dado que los métodos de predicción sonora no fueron ideados originalmente para la estudio de fuentes sonoras a gran altura, la precisión de los resultados podría no ser adecuada para la evaluación acústica de los aerogeneradores. Los diferentes estándares de reconocido prestigio internacional deben ser validados para garantizar su idoneidad para la evaluación de parques eólicos.

En este apartado se realiza un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por cada uno de los modelos de predicción sonora y los niveles sonoros monitorizados en los trabajos de campo con vistas a analizar su validez para parques eólicos.

Para dicha comparación, se han empleado los niveles monitorizados conforme al método de medida III que se ha demostrado como el más idóneo debido a las siguientes características:

- Permite la evaluación de diferentes ventanas de emisión mediante la toma de diferentes muestras bajo condiciones meteorológicas homogéneas conforme a las recomendaciones de la nueva versión de la norma ISO1996-2:2015.
- Permite una evaluación estadística de la dispersión de los valores monitorizados.
- Reduce las desviaciones de los resultados monitorizados para valores extremos de velocidad que presentan otros métodos.

Es conveniente destacar que los resultados se comparan con los niveles sonoros incidentes, esto es, se ha deducido 3 dBA en concepto de reflexiones de los niveles monitorizados una vez comprobados que la ubicación de los puntos de medida verificaban las condiciones de instalación establecidas en el anexo B de la norma ISO 1996-2:2007.

En los siguientes apartados se evalúa la idoneidad de las normas de cálculo analizados considerando dos aspectos:

- Topografía, analizando los dos puntos de medida de forma independiente. De acuerdo con Evans and Cooper, 2012 la topografía constituye uno de los parámetros básicos a la hora de determinar la fiabilidad de los modelos. En el caso objeto de estudio, ambos puntos de medida presentan topografía compleja (no llana), representando el punto de medida 1 una pendiente descendente continua y el punto de medida 2, una topografía cóncava con aerogeneradores en ambos extremos del valle.
- Implementación de medidas de mitigación, a través de la evaluación de forma independiente de los periodos de valoración: funcionamiento habitual durante el día y estrategias de bajo ruido implementadas durante la noche. Este parámetro puede llegar a ser fundamental porque al eliminar en algunos casos la aportación principal sobre el receptor (por parada técnica del aerogenerador más cercano por ejemplo), cobra relevancia la precisión del cálculo de las aportaciones de los aerogeneradores situados a mayor distancia.

En el Anexo II se incluyen las comparativas de todos los modelos de predicción sonora con los resultados del monitorizado de ruido, tanto en forma tabular como en forma gráfica. En el presente apartado sólo se discutirán aquellos más significativos.

Evaluación de las Diferentes Normas de Cálculo según el Punto de Medida evaluado

En la evaluación de las normas de cálculo evaluadas, es necesario considerar el grado de adaptación a los puntos de monitorizado de forma independiente, puesto que ambas localizaciones presentan características particulares (distancia a los aerogeneradores, ubicación relativa respecto a los diferentes subparques, topografía, obstáculos, etc.).

Por ello se incluyen a continuación las desviaciones promedios y gráficas comparativas respecto a los niveles sonoros monitorizados para cada punto de monitorizado.

PUNTO DE MEDIDA 1						
Norma de cálculo	Absorción G=0		Absorción G=0,5		Absorción G=CLC	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	2,0	1,0	0,1	0,9	-0,6	0,9
CONCAWE	7,2	1,4	2,0	0,9	2,0	0,9
NORD2000	2,3	1,1	1,8	1,1	1,6	1,1
CNOSSOS	0,3	0,8	-1,2	0,8	-1,9	0,8
PUNTO DE MEDIDA 2						
Norma de cálculo	Absorción G=0		Absorción G=0,5		Absorción G=CLC	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	2,6	1,1	-1,2	1,0	-2,7	1,0
CONCAWE	6,2	1,3	2,7	1,1	2,7	1,1
NORD2000	2,4	1,1	1,4	1,1	1,0	1,0
CNOSSOS	0,8	1,0	-0,7	1,0	-1,7	1,0

Tabla 59. Desviación promedio de las diferencias existentes entre los modelos de cálculo y los valores monitorizados para una absorción del terreno G según cobertura de usos de suelos según el punto de medida evaluado

En las siguientes gráficas se puede apreciar una de las principales diferencias entre ambos puntos de medida para cada valor de absorción del terreno.

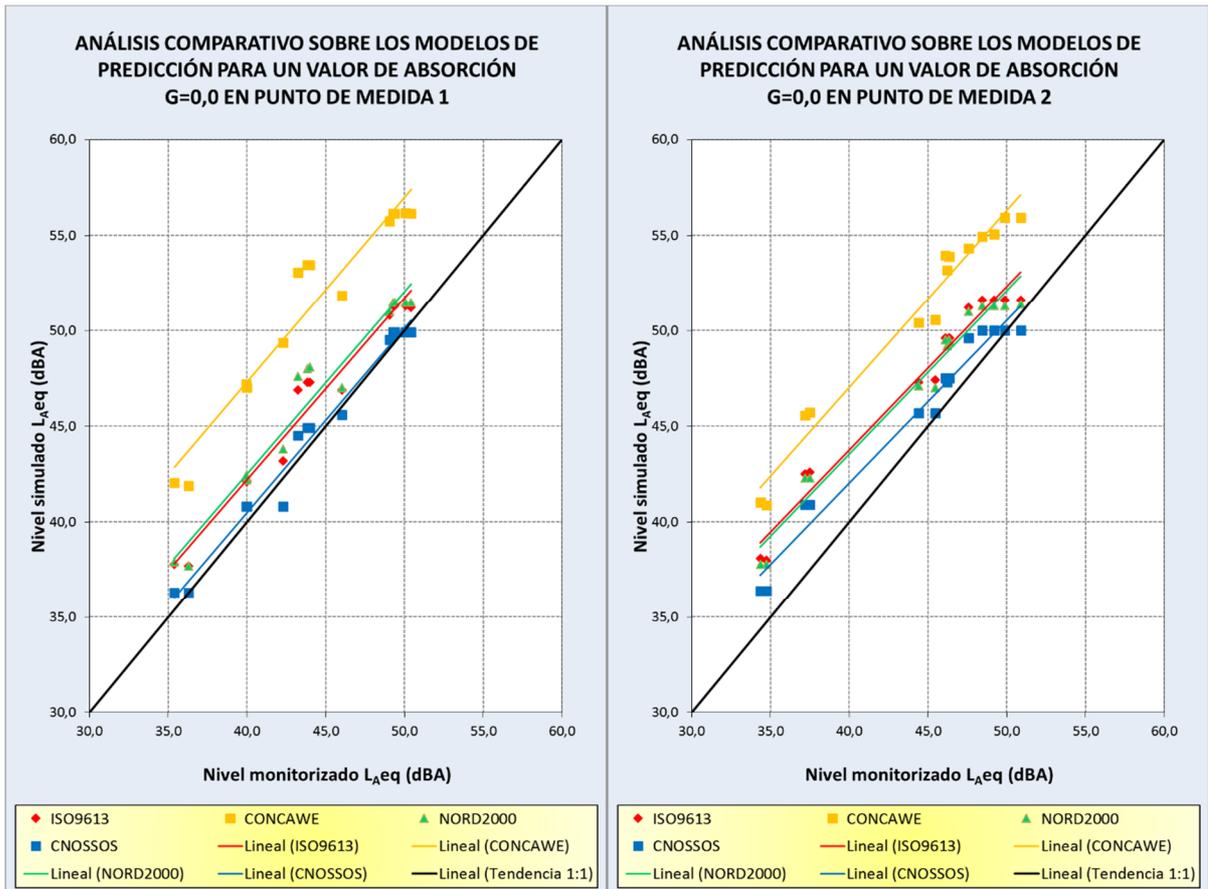


Ilustración 151. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=0$ según punto de medida

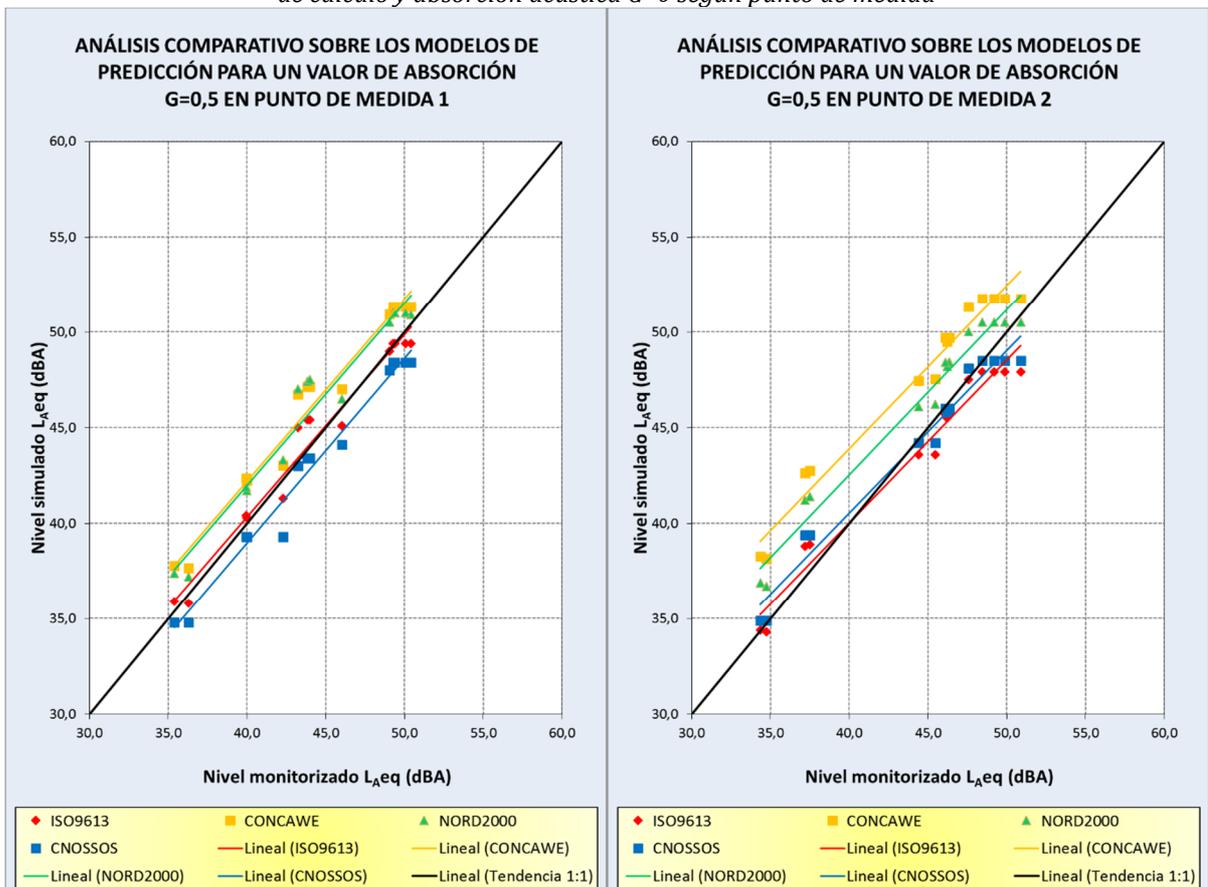


Ilustración 152. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=0,5$ según punto de medida

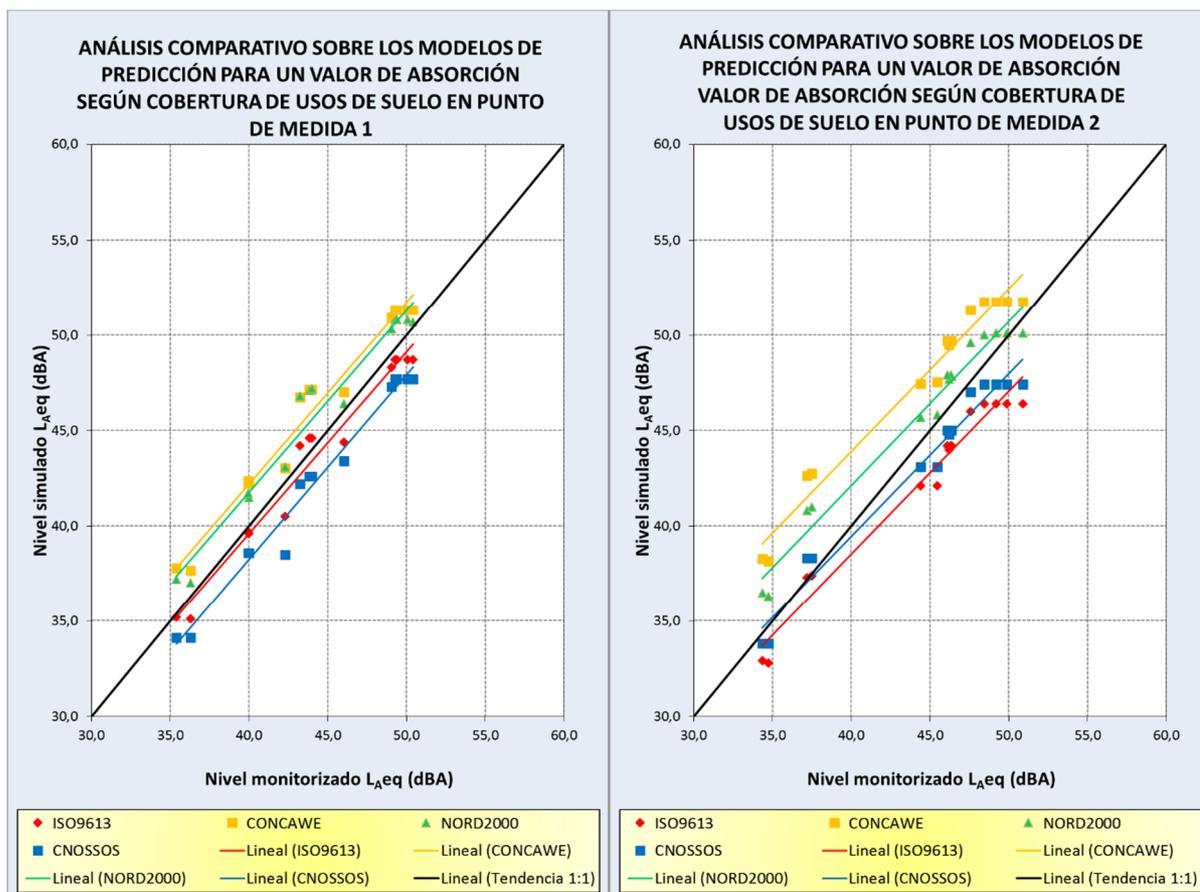


Ilustración 153. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=CLC$ según punto de medida

En las Tablas 60 y 61, se listan los diferentes modelos de cálculo empleados según la absorción del terreno, ordenados en base a la desviación promedio por punto de medida respecto a los niveles sonoros ensayados y sin discriminar el periodo de evaluación. Los resultados permiten afirmar:

- Punto de medida 1 – Pendiente homogénea descendente:
 - El modelo ISO 9613 $G=0,5$ es el que presenta un mejor ajuste respecto a la realidad con una desviación promedio de 0,1 dBA y una desviación típica de 0,9 dBA. Estos resultados son análogos a las conclusiones de Adcock et al., 2012; Evans and Cooper, 2012; Siponen et al., 2013.
 - Los modelos CNOSSOS son los que se encuentran en un rango de desviación más próximo a los niveles monitorizados con menor dispersión de los resultados para cualquier valor de absorción del terreno considerado, si bien los valores mixtos de G tienden a la subestimación del ruido (-1,2/-1,9 dBA).
 - El modelo CONCAWE es el que presenta mayores sobreestimaciones, destacando desviaciones promedio de 7,2 dBA para terrenos completamente reflexivos.

- El modelo NORD2000 presenta sobreestimaciones de los niveles sonoros en el rango 1,6-2,3 dBA siendo la absorción correspondiente a los usos de suelos CLC la más acertada.
- De forma general, la desviaciones estándar de las diferencias con los niveles monitorizados se encuentra en el rango 0,8 -1,4 dBA, siendo la norma CNOSSOS G=0 la que presenta el valor inferior y CONCAWE G=0 la que presenta el valor superior.

EVALUACIÓN DE NORMAS DE CÁLCULOS PUNTO DE MEDIDA 1		
Norma de cálculo	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
CONCAWE G=0	7,2	1,4
NORD2000 G=0	2,3	1,1
ISO9613 G=0	2	1
CONCAWE G=0,5	2	0,9
CONCAWE G=CLC	2	0,9
NORD2000 G=0,5	1,8	1,1
NORD2000 G=CLC	1,6	1,1
CNOSSOS G=0	0,3	0,8
ISO9613 G=0,5	0,1	0,9
ISO9613 G=CLC	-0,6	0,9
CNOSSOS G=0,5	-1,2	0,8
CNOSSOS G=CLC	-1,9	0,8

Tabla 60. Modelos de cálculo ordenados en función de las desviaciones promedios para el punto de medida 1 (en verde, sobreestimaciones y en rojo subestimación respecto al monitorizado)

- Punto de medida 2 – Pendiente cóncava descendente:
 - El modelo CNOSSOS G=0 es el que presenta un mejor ajuste respecto a la realidad con una desviación promedio de 0,8 dBA y una desviación típica de 1 dBA. Sin embargo, la consideración de valores intermedios de absorción conlleva subestimaciones en el rango -0,7/-1,7 dBA.
 - El modelo NORD2000 son los que se encuentran en un rango de desviación más proximo a los niveles monitorizados con menor dispersión de los resultados para cualquier valor de absorción del terreno considerado, en un rango de 1-2,4 dBA, siendo la absorción correspondiente a los usos de suelos CLC la más acertada. Estos resultados se ajustan a los obtenidos por DELTA, 2009 para la validación del modelo en parques eólicos.
 - El modelo CONCAWE es el que presenta mayor sobreestimaciones, destacando desviaciones promedios de 6,7 dBA para terrenos completamente reflexivos.
 - La norma ISO963 tiende a la subestación para valores intermedios de absorción (-1,2 y -2,7 dBA respectivamente para valores de G de 0,5 y CLC respectivamente) salvo en el caso de terrenos duros dónde presenta una sobreestimación de 2,6 dBA (en línea con Cooper et al., 2013).
 - De forma general, la desviaciones estándar de las diferencias con el monitorizado se encuentra en el rango 1 -1,3 dBA, siendo la norma CONCAWE G=0 la que presenta el valor superior.

EVALUACIÓN DE NORMAS DE CÁLCULOS PUNTO DE MEDIDA 2		
Norma de cálculo	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
CONCAWE G=0	6,2	1,3
CONCAWE G=0,5	2,7	1,1
CONCAWE G=CLC	2,7	1,1
ISO9613 G=0	2,6	1,1
NORD2000 G=0	2,4	1,1
NORD2000 G=0,5	1,4	1,1
NORD2000 G=CLC	1	1
CNOSSOS G=0	0,8	1
CNOSSOS G=0,5	-0,7	1
ISO9613 G=0,5	-1,2	1
CNOSSOS G=CLC	-1,7	1
ISO9613 G=CLC	-2,7	1

Tabla 61. Modelos de cálculo ordenados en función de las desviaciones promedios para el punto de medida 2 (en verde, sobreestimaciones y en rojo subestimación respecto al monitorizado)

Los resultados demuestran que las normas CNOSSOS y NORD2000 presentan un mayor grado de adaptación a condiciones topográficas variables debido al método de segmentación que emplean para simplificar la topografía. En el caso de la norma NORD2000, la segmentación se hace de forma iterativa en función de la diferencia de altura respecto a un segmento plano, de forma que el modelo puede adaptarse al terreno adecuadamente. En el caso del modelo CNOSSOS, el terreno se define como un conjunto de puntos discretos que define una secuencia (polilínea) de segmentos rectos. Esta polilínea se aproxima a la altura media el conjunto ordenado de puntos discretos. Este conjunto de puntos define una polilínea, o de manera equivalente, una secuencia de segmentos rectos. El plano medio se representa mediante una aproximación mínima cuadrática, por lo que también permite un alto grado de adaptación al terreno.

En el caso de la norma ISO9613, la topografía está basada en la altura media entre emisor y receptor y por ello se adapta mejor a terrenos llanos y con pendientes homogéneas (Adcock et al., 2012; Bass et al., 1998; Evans y Cooper, 2012; Siponen et al., 2013); siendo necesaria la adopción de correcciones cuando la topografía es más compleja (Bass et al., 1998; Bullmore et al., 2009; Cooper y Evans, 2013; Institute of Acoustics, 2013). El grado de adaptación dependerá en cada caso del valor de absorción considerado, recomendándose adoptar valores de 0,5 cuando la pendiente es homogénea y suelo duro cuando el perfil es complejo (como se concluye en este estudio y en Cooper et al., 2013; Teague et al., 2011).

Dado que CadnaA implementa la topografía mediante el mismo procedimiento que para ISO9613 (la normativa no establece ninguna aclaración en ese sentido), las desviaciones encontradas responden a otros parámetros de cálculo. Estos resultados son consecuentes con otros estudios (Teague et al., 2011), en los que se observaban variaciones de hasta 6 dBA en relación con la norma ISO9613.

Otros autores han encontrado diferencias inferiores de la NORD2000 respecto a la norma ISO9613 para terrenos no llanos (DELTA, 2009), si bien estas desviaciones dependen en gran medida del grado de complejidad del terretorio y de la impedancia acústica del mismo.

En el punto de medida 2 se observa una tendencia generalizada a la sobrestimación de todos los modelos, que es especialmente relevante en el caso de la norma CNOSSOS, que presenta un alto de precisión para el resto de velocidades de viento.

Ilustración 154. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno de $G=0$ y periodo diurno

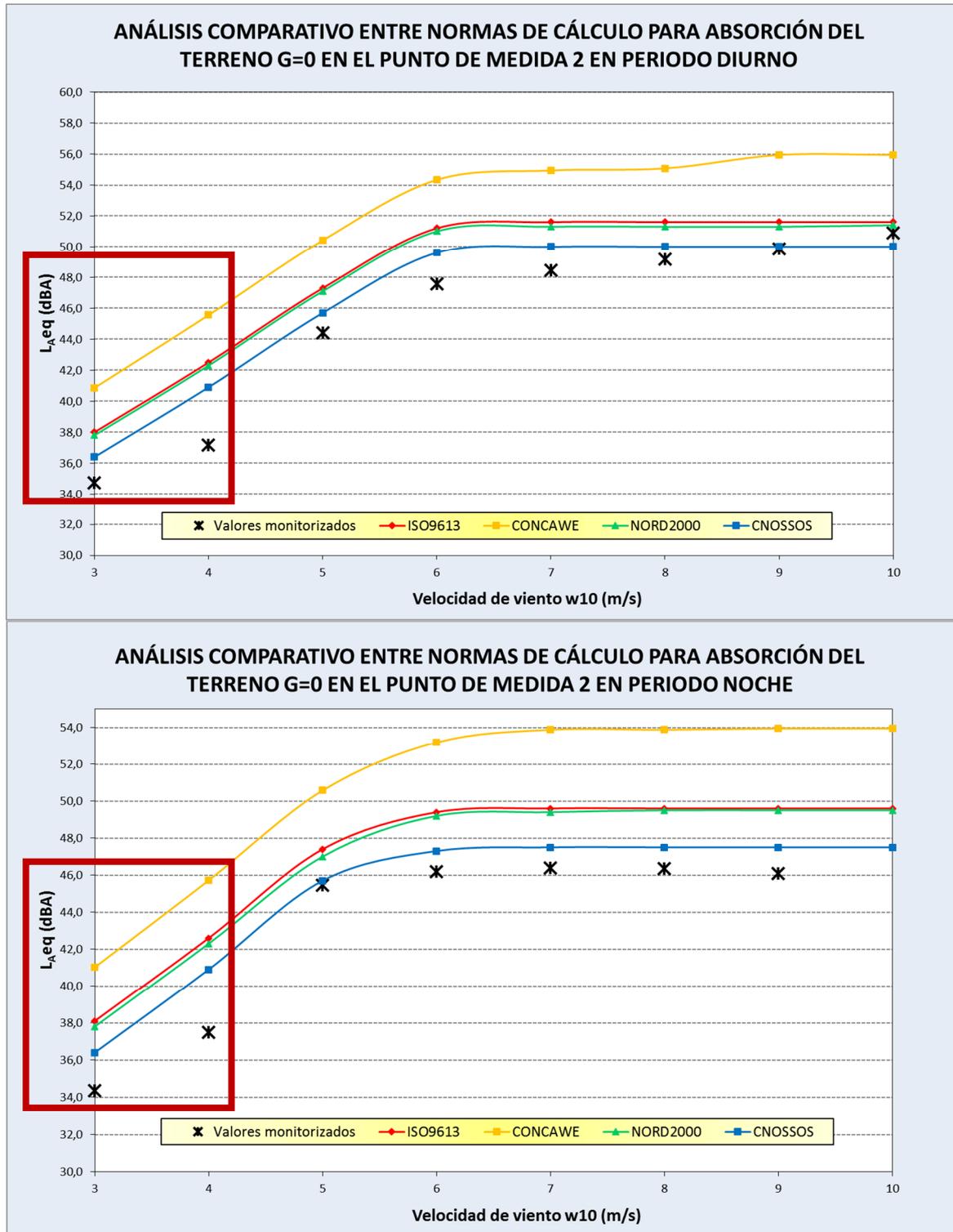


Ilustración 155. Sobrestimación de todos los modelos en el punto de medida 2 para velocidades de viento de 3-4 m/s

La justificación para tales desviaciones la encontramos en las muestras obtenidas para esas velocidades de viento, que concentra un alto número de muestras en niveles relativamente bajos cuando los aerogeneradores deberían estar ocasionando (al menos a nivel teórico) niveles sonoros superiores.

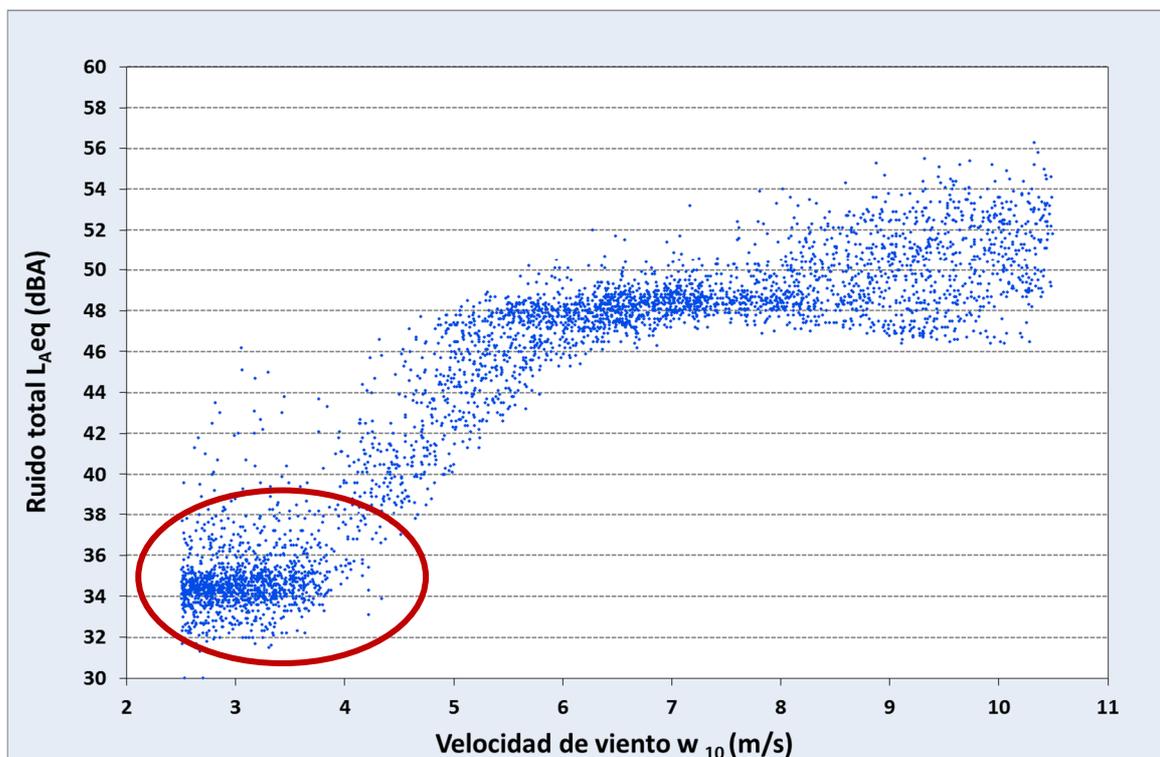


Ilustración 156. Nube de dispersión de la muestra la concentración de muestras en el punto de medida 2 a bajas velocidades de viento

Como se explicó con anterioridad, esta circunstancia se debe a la incertidumbre asociada a la puesta en marcha de los aerogeneradores en la velocidad de arranque y cobra mayor importancia en el punto de medida 2 por la distancia a la estación meteorológica de referencia y, probablemente, por variantes locales en el perfil vertical de viento, puesto que la edificación evaluada se encuentra en un valle entre dos alineaciones de aerogeneradores.

Evaluación de las Diferentes Normas de Cálculo según el Periodo de evaluación

En la evaluación de las normas de cálculo analizadas, es necesario considerar el grado de adaptación a los diferentes periodo de evaluación, puesto que en el periodo nocturno permanecen implementadas estrategias de mitigación de ruidos que modifican el régimen normal de funcionamiento de los aerogeneradores. Dado que durante el periodo diurno los parques eólicos funcionan de forma regular, la comparativa entre periodos de evaluación nos permite identificar cómo se adapta la metodología empleada a condiciones de funcionamiento más complejas.

Por ello se incluyen a continuación las desviaciones promedios y gráficas comparativas respecto a los niveles sonoros monitorizados para cada periodo de evaluación, sin discriminar por punto de medida (Tabla 62).

PERIODO DIURNO						
Norma de cálculo	Absorción G=0		Absorción G=0,5		Absorción G=CLC	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	1,7	0,5	-1,1	0,9	-2,2	1,3
CONCAWE	5,8	0,9	1,8	0,5	1,8	0,5
NORD2000	1,7	0,5	0,9	0,6	0,6	0,6
CNOSSOS	0,2	0,5	-1,3	0,5	-2,2	0,5
PERIODO NOCHE						
Norma de cálculo	Absorción G=0		Absorción G=0,5		Absorción G=CLC	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	3,1	1,0	0,1	1,1	-1,0	1,4
CONCAWE	7,7	1,3	3,1	1,1	3,1	1,1
NORD2000	3,2	1,0	2,4	1,0	2,1	1,0
CNOSSOS	1,1	1,1	-0,4	1,1	-1,3	1,0

Tabla 62. Desviación promedio de las diferencias existentes entre los modelos de cálculo y los valores monitorizados para una absorción del terreno G según cobertura de usos de suelos según el periodo evaluado

A nivel cuantitativo, las desviaciones encontradas durante el periodo nocturno son mayores que las existentes en el periodo diurno (del orden de 1-2 dBA), lo cual podría explicarse:

- Por las incertidumbres que introduce la implementación de las medidas de mitigación en los niveles monitorizados.
- Por las variaciones que se producen en el perfil vertical de viento durante el periodo nocturno (respecto al periodo diurno) y que podrían introducir variaciones muy importantes en los niveles sonoros (Van Den Berg, 2004, 2006; Broneske, 2014, entre otros). Aunque fuera del alcance del estudio, las variaciones del perfil vertical del viento deberían ser estudiadas específicamente para cada localización y proceder a nuevas simulaciones para comprobar su influencia.

En las siguientes gráficas (Ilustraciones 157-159) se exponen los resultados categorizados para el periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha).

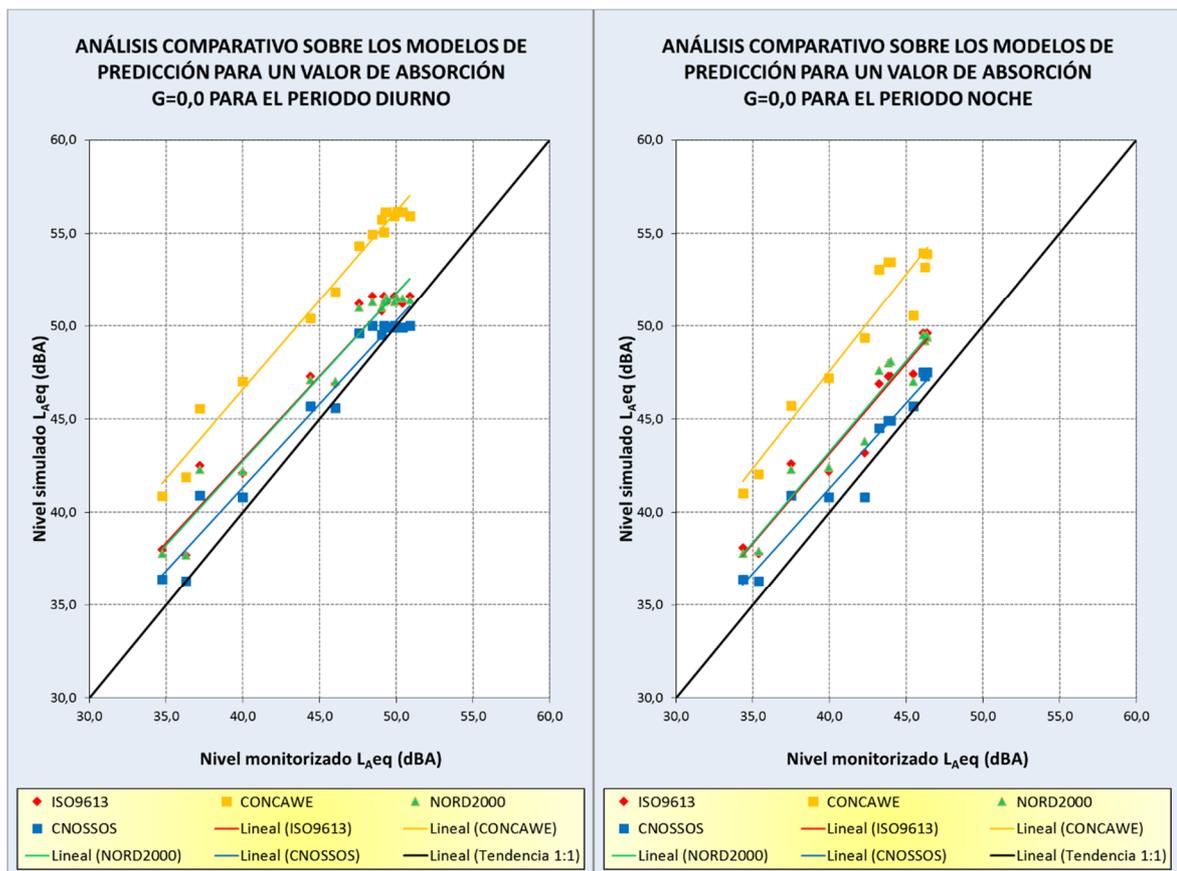


Ilustración 157. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=0$ según periodo de evaluación

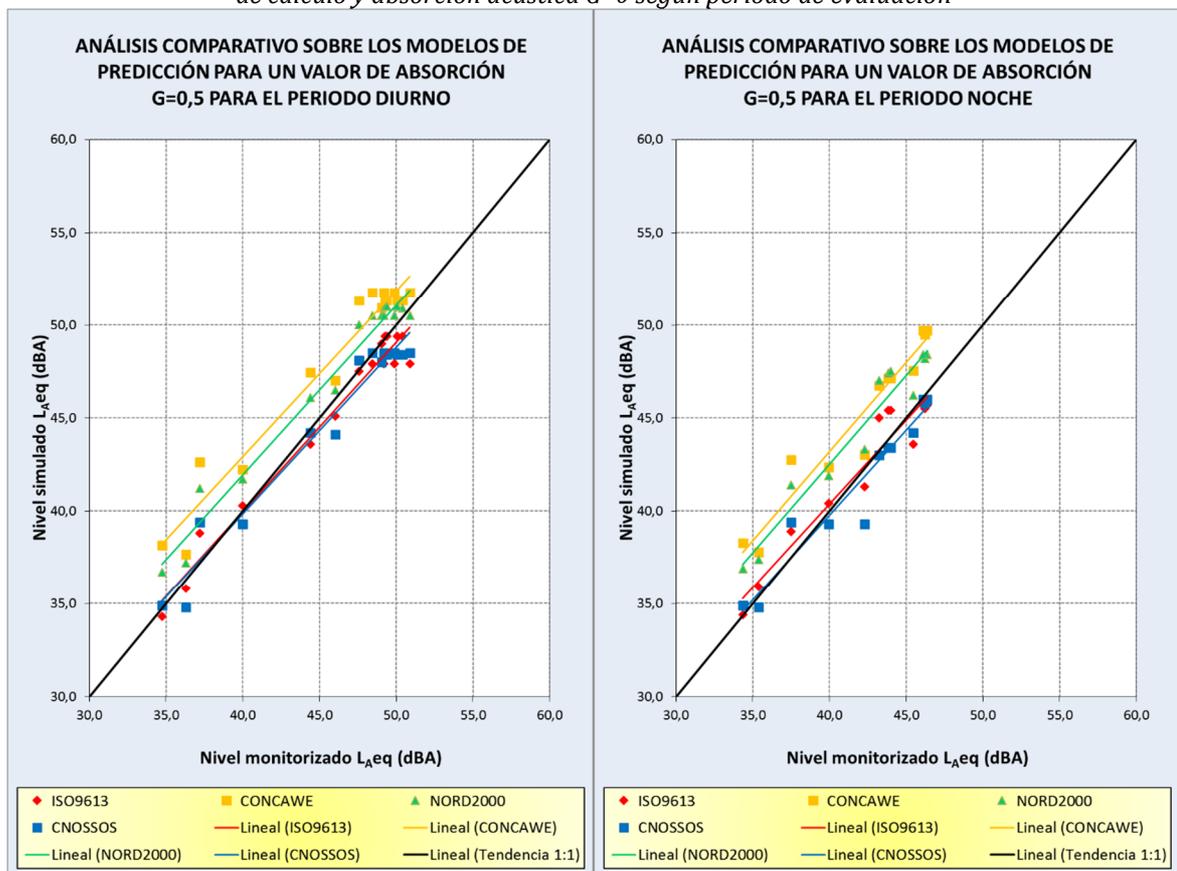


Ilustración 158. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=0,5$ según periodo de evaluación

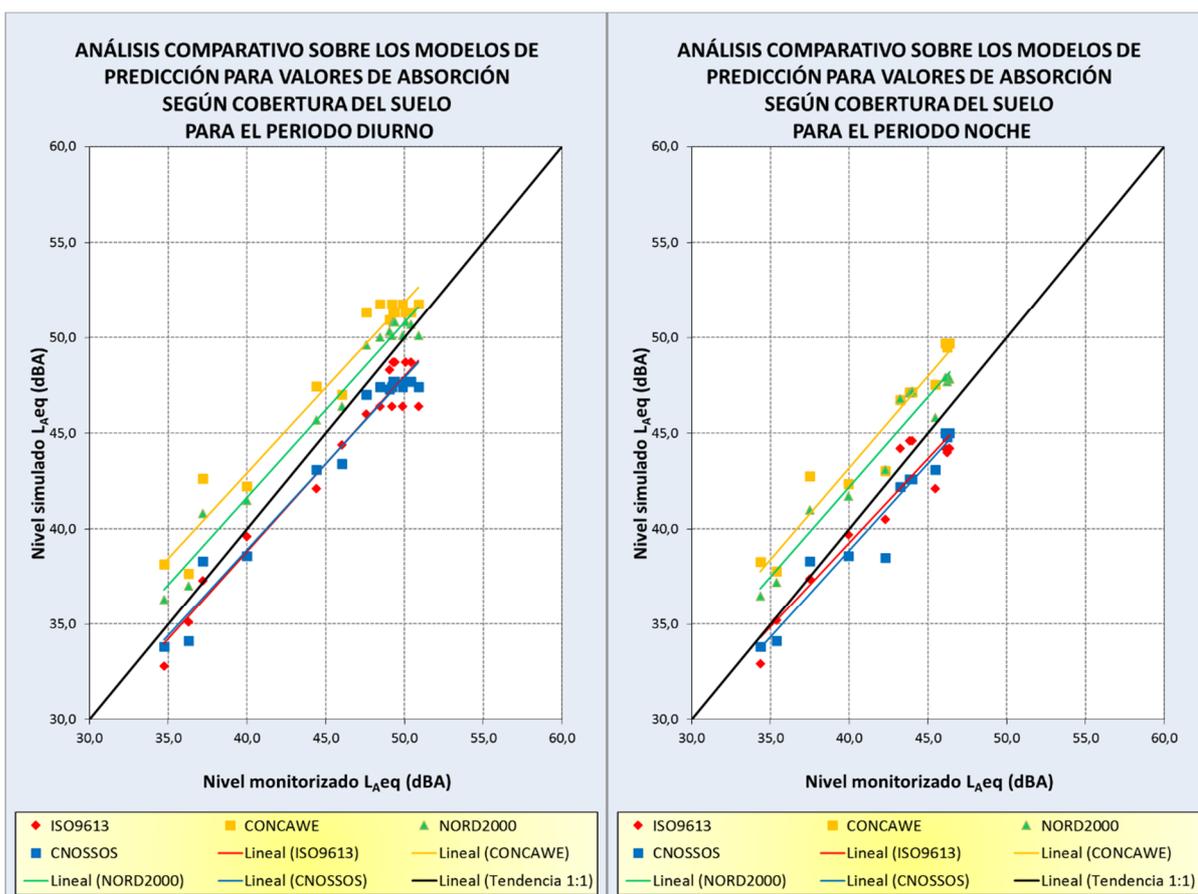


Ilustración 159. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=CLC$ según periodo de evaluación

En las Tablas 63 y 64, se listan los diferentes modelos de cálculo empleados según la absorción del terreno, ordenados en base a la desviación promedio por periodo de evaluación respecto a los niveles sonoros ensayados. Los resultados permiten afirmar:

- Periodo diurno:
 - El modelo CNOSSOS $G=0$ es el que presenta un mejor ajuste respecto a la realidad con una desviación promedio de 0,2 dBA y una desviación típica de 0,5 dBA. Los escenarios con absorciones intermedias incurrir en subestimaciones en el rango -1,3/-2,2 dBA.
 - Los modelos NORD2000 son los que se encuentran en un rango de desviación más proximo a los niveles monitorizados con menor dispersión de los resultados para cualquier valor de absorción, dentro del rango 0,6-1,7 dBA, siendo la absorción del terreno según CLC la más idónea.
 - El modelo CONCAWE es el que presenta mayor sobreestimaciones, destacando desviaciones promedios de 5,8 dBA para terrenos completamente reflexivos.
 - La norma ISO9613 tiende a la subestimación para valores intermedios de absorción (-1,1 y -2,2dBA respectivamente para valores de G de 0,5 y CLC respectivamente) salvo en el caso de terrenos duros dónde presenta una sobreestimacion de 1,7 dBA.
- De forma general, la desviaciones estándar de las diferencias se encuentra en el rango 0,5 -1,3 dBA, siendo la norma ISO9613 $G=CLC$ la que presenta el valor superior.

EVALUACIÓN DE NORMAS DE CÁLCULOS PERIODO DIURNO		
Norma de cálculo	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
CONCAWE G=0	5,8	0,9
CONCAWE G=0,5	1,8	0,5
CONCAWE G=CLC	1,8	0,5
ISO9613 G=0	1,7	0,5
NORD2000 G=0	1,7	0,5
NORD2000 G=0,5	0,9	0,6
NORD2000 G=CLC	0,6	0,6
CNOSSOS G=0	0,2	0,5
ISO9613 G=0,5	-1,1	0,9
CNOSSOS G=0,5	-1,3	0,5
ISO9613 G=CLC	-2,2	1,3
CNOSSOS G=CLC	-2,2	0,5

Tabla 63. Modelos de cálculo ordenados en función de las desviaciones promedios para el periodo diurno (en verde, sobreestimaciones y en rojo subestimación respecto al monitorizado)

- Periodo nocturno:
 - o El modelo ISO9613 G=0,5 es el que presenta un mejor ajuste respecto a la realidad con una desviación promedio de 0,1 dBA y una desviación típica de 1,1 dBA. Los otros escenarios estudiados difieren sensiblemente, presentando valores superiores en 3,1 dBA a los ensayados (terreno duro) e inferiores en 1 dBA en el caso de absorciones según CLC.
 - o Los modelos NORD2000 son los que se encuentran en un rango de desviación más proximo a los niveles monitorizados aunque incurriendo en sobreestimaciones importantes (2,1-3,2 dBA), siendo la absorción correspondiente a los usos de suelos CLC la más acertada.
 - o El modelo CONCAWE es el que presenta la mayor sobreestimación (7,7 dBA para terrenos duros) mientras que para valores intermedios de absorción presentan sobrestimaciones del rango de 3,1 dBA, en línea con otros modelos.
 - o El modelo CNOSSOS G=0 es el que presenta un valor promedio superior en 1,1 dBA a los niveles ensayos. Los escenarios con absorciones intermedias incurren en subestimaciones en el rango -0,4/-1,3 dBA.
 - o De forma general, la desviaciones estándar de las desviaciones se encuentra en el rango 1 -1,3 dBA, siendo la norma CONCAWE G=0 la que presenta el valor superior.

EVALUACIÓN DE NORMAS DE CÁLCULOS PERIODO NOCHE		
Norma de cálculo	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
CONCAWE G=0	7,7	1,3
NORD2000 G=0	3,2	1
ISO9613 G=0	3,1	1
CONCAWE G=0,5	3,1	1,1
CONCAWE G=CLC	3,1	1,1
NORD2000 G=0,5	2,4	1
NORD2000 G=CLC	2,1	1
CNOSSOS G=0	1,1	1,1
ISO9613 G=0,5	0,1	1,1
CNOSSOS G=0,5	-0,4	1,1
ISO9613 G=CLC	-1	1,4
CNOSSOS G=CLC	-1,3	1

Tabla 64. Modelos de cálculo ordenados en función de las desviaciones promedios para el punto de medida 2 (en verde, sobreestimaciones y en rojo subestimación respecto al monitorizado)

De forma general, no existen grandes variaciones de los modelos cuando se analizan los periodos de evaluación por separado, adaptándose las normas de cálculo empleadas a las estrategias de bajo ruido (paradas incluidos) de la misma manera que para el funcionamiento habitual. Existen algunos cambios en las desviaciones, que hacen que la norma CNOSSOS considerando suelos duros sea la norma más adecuada en periodo día y la norma ISO9613 con G=0,5 la más adecuada durante el nocturno.

El modelo CONCAWE con absorción mixta es el único que presenta un cambio de tendencia durante el periodo nocturno que puede ser explicado por la consideración de la absorción del terreno con la distancia de este modelo, que para la frecuencia de 500 Hz se estabiliza a partir de unos 300 metros. Otros autores han demostrado que el modelo CONCAWE mejora su tendencia a la sobrestimación a distancias superiores a 1000 metros (Evans y Cooper, 2012), gracias a las expresiones que utiliza tanto para la atenuación del terreno como debida a las condiciones meteorológicas.

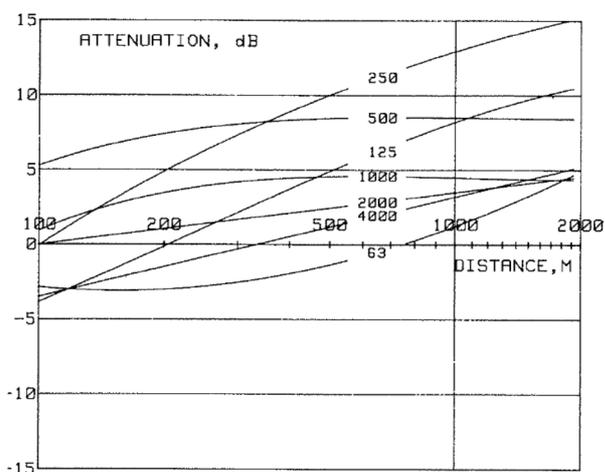


Ilustración 160. Valores de atenuación del suelo (CONCAWE, 1981)

En un escenario en el que el aerogenerador detiene su funcionamiento como medida de reducción de ruidos, las aportaciones sonoras de las máquinas situadas a mayor distancia cobrarían mayor importancia en la valoración del nivel de inmisión en el punto de medida, especialmente si los niveles sonoros son bajos. Esta circunstancia explica la ligera mejora de la precisión del modelo CONCAWE con absorción mixta respecto a otras normas, si bien el modelo sigue sobrestimando los niveles sonoros en más de 3 dBA.

Por último, destacar la subestimación de los niveles monitorizados en el punto de medida 1 durante la noche para el bin de viento de 5 m/s, momento en el que el aerogenerador con aportación principal detiene su funcionamiento como medida de mitigación.

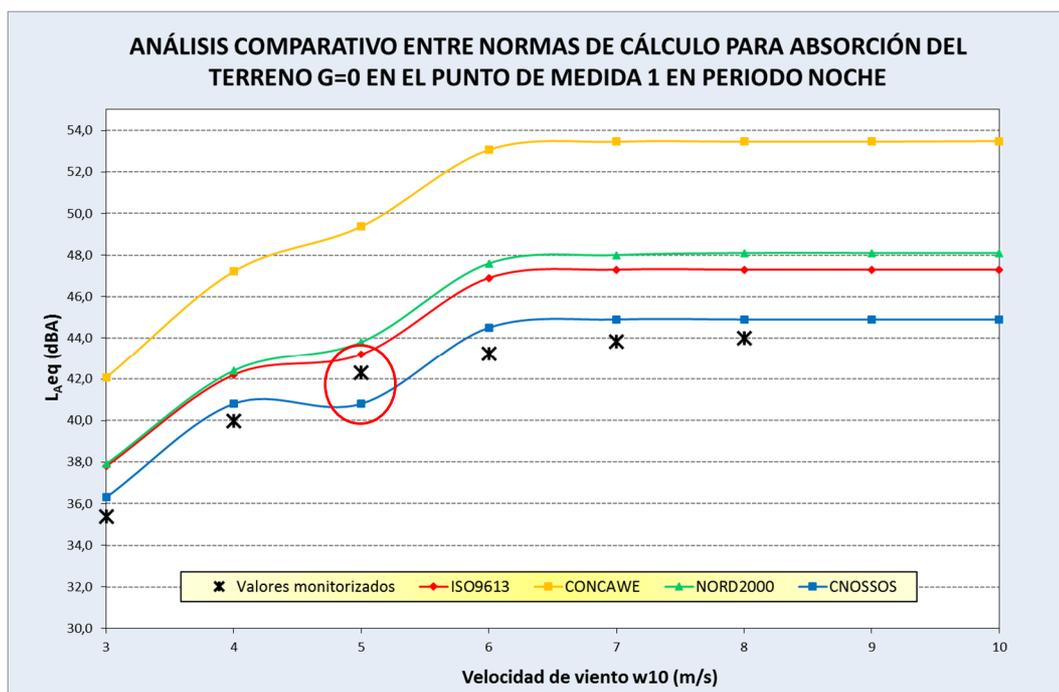


Ilustración 161. Desviación del modelo CNOSSOS para el punto de medida 1 para absorción del terreno de G=0 y periodo noche para la velocidad de viento de 5 m/s

Esta tendencia es independiente de la absorción acústica y se observa para todos los valores empleados como se observa en la Ilustración 162. Aunque esta ventana de viento junto con la correspondiente a 4 m/s son las que presentan mayores incertidumbres en los ensayos (ver ilustración 142), la desviación sólo ocurre en esta norma de cálculo y en ese punto de medida, por lo que no puede ser justificado por esa razón.

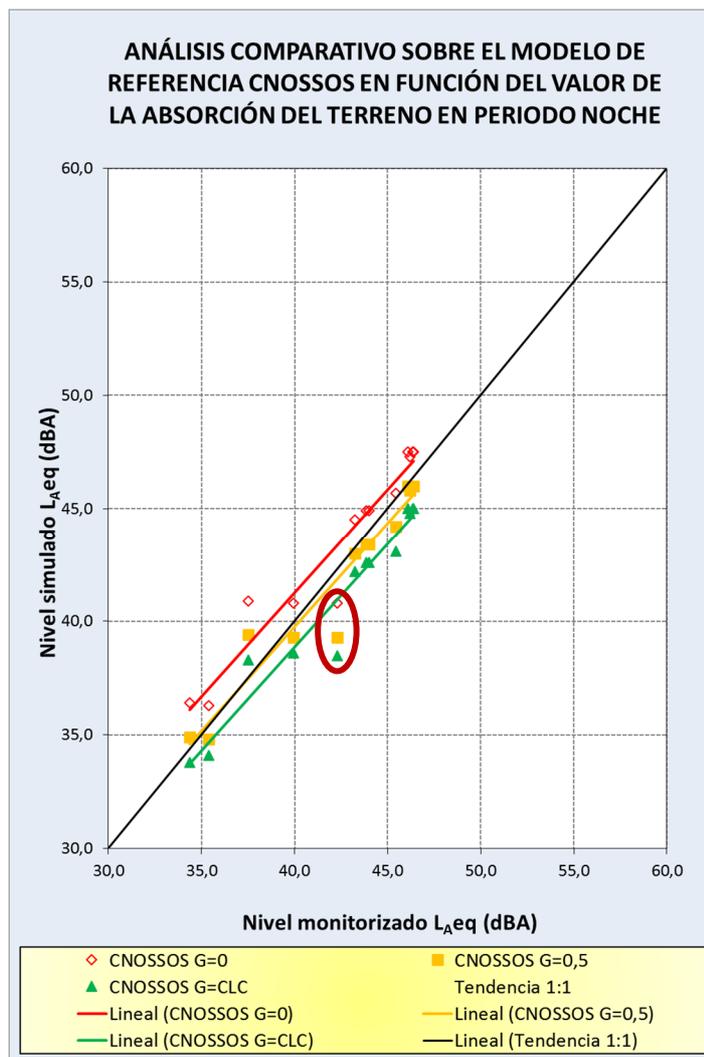


Ilustración 162. Subestimación del modelo CNOSSOS para el punto de medida 1 para la velocidad de viento de 5 m/s

Dicha desviación sólo podría ser explicada por una subestimación de las aportaciones parciales de los aerogeneradores más alejados, que sólo se hace patente para ese punto de medida (debido a la distancia efectiva a los aerogeneradores) cuando se elimina la contribución del aerogenerador principal. Esta subestimación se corrige cuando se incrementa el nivel de potencia acústica de los aerogeneradores secundarios y no afecta a la valoración global del modelo, que de hecho es el segundo más preciso para este periodo noche considerando suelos duros. Sin embargo, introduce ciertas dudas sobre la idoneidad del modelo, que podría subestimar los niveles sonoros cuando no existe una fuente emisora con gran contribución sobre el punto receptor y los niveles sonoros son inferiores a 42 dBA. Aunque esta circunstancia no se ha reproducido en el punto de medida 2 debería ser estudiada bajo circunstancias similares en otros casos de estudio.

8.3 EVALUACIÓN GLOBAL DE LOS MODELOS DE LAS NORMAS DE CÁLCULO RESPECTO AL MONITORIZADO DE RUIDO APLICANDO METODOLOGÍA IOA

Hipótesis: Los modelos de predicción sonora presentan diferentes grados de adaptación en función de la topografía del terreno y es habitual que los parques eólicos se encuentren en terrenos irregulares. La precisión de los modelos sobre escenarios de topografía compleja puede ser mejorada incorporando factores de corrección asociados a criterios de visibilidad o altura media calculada de forma independiente para cada receptor, conforme a las recomendaciones del IOA.

Finalmente, se realiza una evaluación de los modelos tipo con correcciones de acuerdo a la metodología IOA. El objetivo es analizar la influencia de estas correcciones en los diferentes modelos de cálculo base y determinar su idoneidad. Dado que ambas correcciones están vinculadas con las situación específica de cada receptor (altura media entre emisor y receptor y criterios de visibilidad) se hace el análisis en función del punto de medida evaluado. Conviene destacar de nuevo, que en el caso de las normas de cálculo que incorporación la refracción del terreno, sólo se ha considerado la corrección por reflexiones múltiples asociada a la metodología IOA (valores marcados en la Tabla 65 con asterisco).

A continuación se incluyen en formato de tablas, las desviaciones promedios y gráficas comparativas respecto a los niveles sonoros monitorizados para los escenarios de la metodología IOA en comparación con las del modelo base.

PUNTO DE MEDIDA 1						
Absorción G=0						
Norma de cálculo	Modelo base		Limitación A _{bar}		Metodología IOA	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	2,0	1,0	2,3	1,0	2,3	1,0
CONCAWE	7,2	1,4	7,3	1,5	7,4	1,5
NORD2000	2,3	1,1	-	-	2,6*	1,3*
CNOSSOS	0,3	0,8	-	-	0,4*	0,8*
PUNTO DE MEDIDA 2						
Norma de cálculo	Modelo base		Limitación A _{bar}		Metodología IOA	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	2,6	1,1	4,1	1,2	4,1	1,2
CONCAWE	6,2	1,3	7,2	1,4	7,2	1,4
NORD2000	2,4	1,1	-	-	2,4*	1,1*
CNOSSOS	0,8	1,0	-	-	0,8*	1,0*

Tabla 65. Desviación promedio de las diferencias existentes entre los modelos de cálculo según IOA y los valores monitorizados para terrenos duros G=0 (*Incluye únicamente corrección por reflexiones múltiples)

PUNTO DE MEDIDA 1						
Absorción G=0,5						
Norma de cálculo	Modelo base		Limitación A _{bar}		Metodología IOA	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	0,1	0,9	0,4	1,0	0,6	1,0
CONCAWE	2,0	0,9	2,1	0,9	2,2	0,9
NORD2000	1,8	1,1	-	-	2,2*	1,4*
CNOSSOS	-1,2	0,8	-	-	-1,1*	0,8*
PUNTO DE MEDIDA 2						
Norma de cálculo	Modelo base		Limitación A _{bar}		Metodología IOA	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	-1,2	1,0	0,2	1,1	0,2	1,1
CONCAWE	2,7	1,1	3,6	1,1	3,7	1,1
NORD2000	1,4	1,1	-	-	1,4*	1,1*
CNOSSOS	-0,7	1,0	-	-	-0,7*	1,0*

Tabla 66. Desviación promedio de las diferencias existentes entre los modelos de cálculo según IOA y los valores monitorizados para absorción del terreno G=0,5 (*Incluye únicamente corrección por reflexiones múltiples)

PUNTO DE MEDIDA 1						
Absorción G según cobertura de usos de suelos						
Norma de cálculo	Modelo base		Limitación A _{bar}		Metodología IOA	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	-0,6	0,9	-0,3	1,0	-0,2	1,0
CONCAWE	2,0	0,9	2,1	0,9	2,2	0,9
NORD2000	1,6	1,1	-	-	2,0*	1,4*
CNOSSOS	-1,9	0,8	-	-	-1,9*	0,8*
PUNTO DE MEDIDA 2						
Norma de cálculo	Modelo base		Limitación A _{bar}		Metodología IOA	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	-2,7	1,0	-1,4	1,1	-1,4	1,1
CONCAWE	2,7	1,1	3,6	1,1	3,7	1,1
NORD2000	1,0	1,0	-	-	1,0*	1,0*
CNOSSOS	-1,7	1,0	-	-	-1,7*	1,0*

Tabla 67. Desviación promedio de las diferencias existentes entre los modelos de cálculo según IOA y los valores monitorizados para absorción del terreno G=CLC (*Incluye únicamente corrección por reflexiones múltiples)

El objetivo de las correcciones establecidas por el IOA es mejorar la precisión de los modelos cuando existen topografías complejas que podrían ocasionar reflexiones múltiples en el terreno, que no pueden ser estimadas por los modelos de predicción. Del mismo modo, trata de limitar la atenuación por apantallamiento del terreno para aquellos casos en los que realmente el aerogenerador no es visible desde el receptor. En definitiva, la aplicación de estas correcciones debe

suponer un incremento en los niveles sonoros en aquellos receptores que cumplan con las condiciones establecidas.

En primer lugar, cabe destacar que las correcciones aplicadas no tienen un efecto significativo en los modelos NORD2000 y CNOSSOS. Aunque existen algunos aerogeneradores que cumplen con la condición para la aplicación de reflexiones múltiples, su aportación es tan reducida a los niveles sonoros globales que no es relevante. Conviene destacar que el modelo CNOSSOS incluye la consideración de reflexiones múltiples mediante un método propio que podría ser adaptado a este fin se fuera necesario (Comisión Europea, 2015), si bien todavía no ha sido implementado en el software, empleado en esta tesis.

En el caso del modelo CONCAWE, dado que los niveles presentan elevadas sobrestimaciones respecto a los resultados del monitorizado debido a la propia norma, la metodología IOA sólo empeora tal circunstancia. Por tanto, se desaconseja su uso para esta norma de cálculo.

Finalmente, la metodología IOA sí introduce diferencias más significativas en las predicciones de la norma ISO9613-2 para la que fue originalmente diseñada (Ilustración 163). Los cambios introducidos tras la aplicación del método IOA son prácticamente homogéneos en todos los valores recomendados, por lo que las correcciones no serían adecuadas para suelos completamente reflexivos, puesto que incrementa las subestimaciones. Las correcciones de la metodología IOA contribuyen activamente en la reducción de la subestimación de las predicciones para escenarios de absorción mixta del terreno (0,5 o CLC) pero no lo hace de forma específica en función del tipo de topografía. De este modo, aunque en algunos escenarios introduce mejoras en las predicciones (punto 2 con absorción $G=0,5$ y punto 1 con absorción según usos de suelos), dicha mejoría sólo responde a la reducción en las subestimaciones. Por tanto, se desaconseja la utilización de esta metodología en el caso de estudio, más aún cuando en la actualidad existen métodos de cálculos más modernos que consideran:

- Refracción descendente de los rayos de propagación del sonido que invalidan y perfeccionan los criterios de visibilidad previamente establecidos para la limitación de la atenuación por obstáculos (NORD2000 y CNOSSOS).
- La existencia de reflexiones múltiples sobre el terreno en zanjas y valles (CNOSSOS)

Como han puesto de manifiesto otros autores (Birchby et al., 2015), la aplicación de las correcciones de la metodología IOA responden a condiciones muy concretas cuando es evidente que puede existir este fenómeno en diversos grados en la realidad. En ocasiones, el cumplimiento en dichas cláusulas podría venir determinado por la falta de precisión de la topografía empleada en el modelo de predicción o bien en el método de triangulación que lleve a cabo el software, lo que conllevaría la aplicación incorrecta de las correcciones. Dado que es el presente estudio se han aplicado las cláusulas de la metodología IOA para cada aerogenerador individualmente, se recomienda que se considere esta metodología cuando un número de representativo de aerogeneradores con aportaciones sonoras significativas en el receptor cumplan dichas condiciones y la topografía justifique por su complejidad su aplicación.

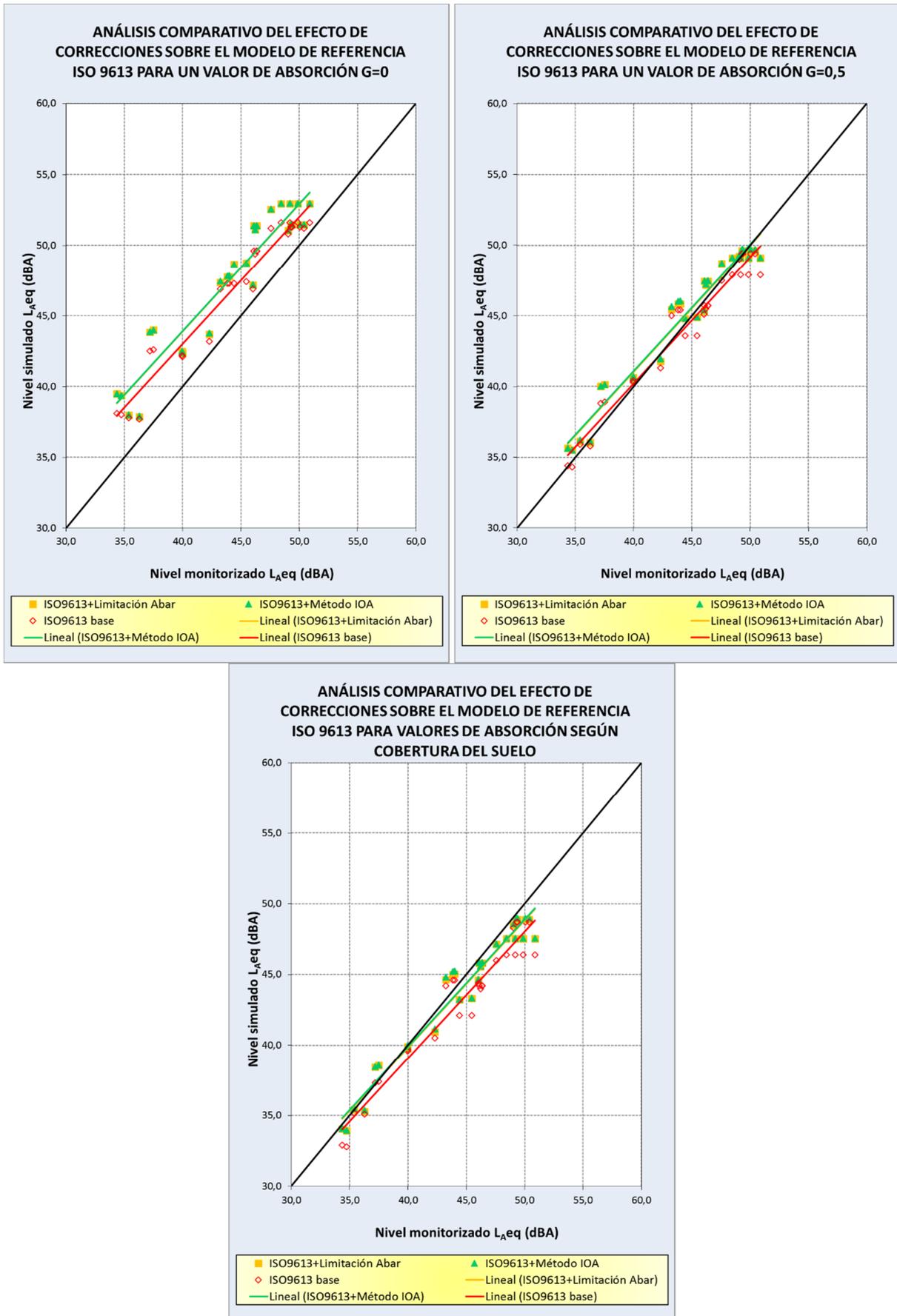


Ilustración 163. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para la norma ISO961 y todos los escenarios calculados

8.4 EVALUACIÓN GLOBAL DE LOS MODELOS BASE DE LAS NORMAS DE CÁLCULO EN FUNCIÓN DE LA ABSORCIÓN DEL TERRENO G

Hipótesis: Los estudios y experiencias internacionales demuestran que el valor de la absorción del terreno (G) es uno de los parámetros clave que determina la representatividad de los modelos de predicción sonora y por lo que debe ser seleccionado con criterio. La adopción de valores de absorción de suelo asociados a los diferentes usos de suelos existentes podría ser un criterio adecuado para mejorar la precisión de los modelos de predicción.

Finalmente, se realiza una evaluación global de los modelos base para cada una de las normas de cálculo (esto es, sin ningún tipo de corrección asociado a la metodología IOA). El objetivo es obtener un indicador sobre el método más idóneo para un conjunto de situaciones que incluye diferentes topografías, periodos temporales y variaciones en las potencias sonoras de los focos ruidosos para el rango de velocidades de viento consideradas. Esta evaluación se realiza en base al valor G de absorción del terreno como uno de los parámetros principales que condiciona los resultados de las predicciones sonoras en parques eólicos.

Por ello se incluyen a continuación las desviaciones promedios y gráficas comparativas respecto a los niveles sonoros monitorizados para cada valor G empleado en los modelos de predicción.

Norma de cálculo	Absorción G=0		Absorción G=0,5		Absorción G=CLC	
	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
ISO9613	2,3	1,0	-0,5	1,2	-1,7	1,4
CONCAWE	6,7	1,4	2,4	1,0	2,4	1,0
NORD2000	2,3	1,1	1,6	1,1	1,3	1,1
CNOSSOS	0,6	0,9	-0,9	0,9	-1,8	0,9

Tabla 68. Desviación promedio de las diferencias existentes entre los modelos de cálculo y los valores monitorizados según absorción del suelo para todos los casos estudiados

Un primer análisis de los gráficas comparativas de la Ilustración 164 se pone de manifiesto que los modelos CONCAWE y NORD2000 sobrestiman los niveles sonoros monitorizados si bien, en el caso de CONCAWE exceden ampliamente estos valores. Las normas ISO9613 y CNOSSOS se ajustan mejor a los valores ensayados, especialmente para valores G de 0,5 si bien incurrir en subestimaciones (poco recomendables en estudios predictivos de parques eólicos) cuando se emplean valores de impedancia acústica basados en la cobertura de usos de suelos según CLC.

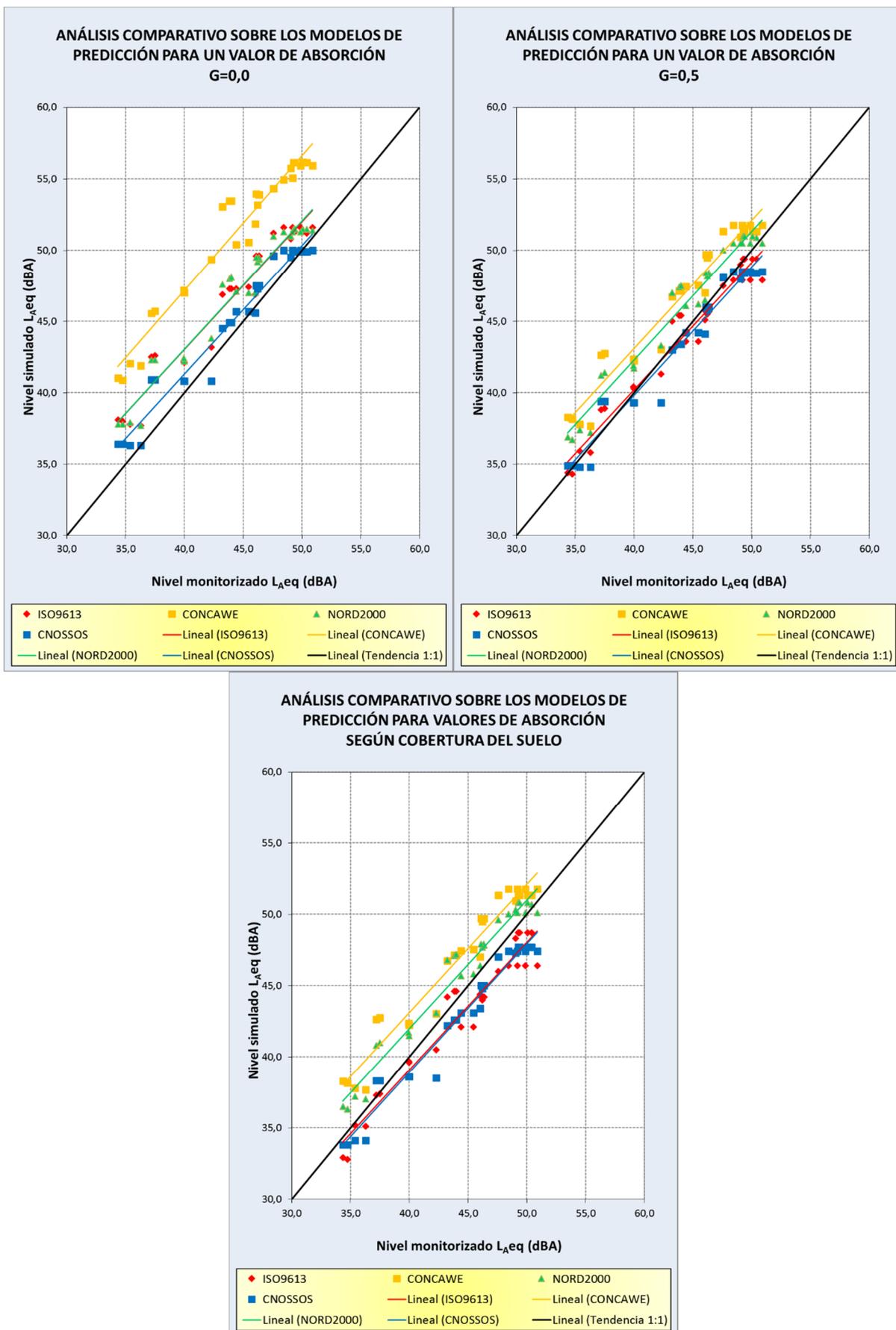


Ilustración 164. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de las normas de cálculo y absorción acústica $G=0$ para todos los casos estudiados

En la Tabla 69, se listan los diferentes modelos de cálculo empleados según la absorción del terreno, ordenados en base a la desviación promedio total respecto a los niveles sonoros ensayados. Los resultados permiten afirmar:

- El modelo CNOSSOS G=0 es el que presenta un mejor ajuste respecto a la realidad con una desviación promedio de 0,6 dBA y una desviación típica de 0,9 dBA sin incurrir en subestimaciones.
- La norma ISO9613 G=0,5 presenta menores desviaciones (0,5 dBA) pero subestimando los niveles sonoros monitorizados. Esta norma presenta niveles superiores en 2,3 dBA al monitorizado de ruido para terrenos duros y niveles inferiores en 1,7 dBA para terrenos según cobertura de usos de suelo CLC.
- Los modelos CNOSSOS que consideran absorciones de terreno mixtas generan subestimaciones en el rango -0,9/-1.8 dBA para valores G de 0,5 y CLC respectivamente.
- Los modelos NORD2000 es el presentan menores variaciones asociadas al valor de la absorción del terreno, produciendo predicciones conservativas dentro del rango 1,3-2,3 dBA, siendo la absorción del terreno según CLC la más idónea.
- El modelo CONCAWE es el que presenta mayor sobreestimaciones, destacando desviaciones promedios de 2,4 dBA para valores mixtos de absorción del terreno y de 6,7 dBA para terrenos duros.
- De forma general, la desviaciones estándar de las diferencias con los registros sonorosse encuentra en el rango 0,9 -1,4 dBA, siendo la norma CNOSSOS la que presenta valores inferiores y CONCAWE el extremo superior.

EVALUACIÓN GLOBAL DE LAS NORMAS DE CÁLCULOS		
Norma de cálculo	Diferencia promedio (dBA)	Desviación estándar (dBA)
CONCAWE G=0	6,7	1,4
CONCAWE G=0,5	2,4	1
CONCAWE G=CLC	2,4	1
ISO9613 G=0	2,3	1
NORD2000 G=0	2,3	1,1
NORD2000 G=0,5	1,6	1,1
NORD2000 G=CLC	1,3	1,1
CNOSSOS G=0	0,6	0,9
ISO9613 G=0,5	-0,5	1,2
CNOSSOS G=0,5	-0,9	0,9
ISO9613 G=CLC	-1,7	1,4
CNOSSOS G=CLC	-1,8	0,9

Tabla 69. Modelos de cálculo ordenados en función de las desviaciones promedios globales (en verde, sobreestimaciones y en rojo subestimación respecto al monitorizado)

Los resultados confirman los modelos CONCAWE y NORD2000 como los más conserdores y los modelos ISO9613 y CNOSSOS como más precisos, aunque su ajuste depende en gran medida del valor de absorción del terreno empleado. Esta variabilidad de la norma ISO9613-2 es explicada por otros autores (Cooper y Evans, 2013; Öhlund y Larsson, 2013; Siponen et al., 2013; Teague et al., 2011) en función de cómo varíe la topografía y la distancia de los receptores. El modelo ISO 9613-2 con terrenos duros ha sido empleado por otros autores como modelo conservativo (Evans y Cooper,

2012; Siponen et al., 2013; Søndergaard, 2012) con desviaciones que oscilan entre 1,5 y 2,7 dBA en función del grado de irregularidad del terreno. Estos datos están en línea con las desviaciones encontradas de 2,3 dBA para terrenos duros en el caso de estudio. La consideración de terrenos mixtos (0,5 o CLC) se traduce en ligeras subestimaciones (0,5 dBA en el caso de $G=0,5$) y -1,7 dBA en el caso de absorciones basados en los suelos usos, lo que confirma la recomendación del IOA y otras referencias de no emplear valores superiores de G superiores a 0,5.

En cuanto al rango de variación para los valores de absorción G considerados, el modelo ISO9613 es el que presenta mayor rango de variación (4,9 dBA) seguido del modelo CONCAWE (4.4 dBA) y CNOSSOS (2,5 dBA). El modelo NORD2000 se confirma como la norma que presentan menores variaciones respecto a la atenuación del terreno (1,4 dBA). Se observa que el modelo CNOSSOS tiene una mayor tendencia a la subestimación respecto al modelo ISO9613 a medida que se incrementa la impedancia acústica del terreno, lo cual difiere con los resultados del modelo NORD2000, que ha servido de base para su diseño y que presenta la menor variación asociada a la incertidumbre de todos los modelos empleados (Berndt, 2004; Comisión Europea, 2015; Kephelopoulos et al., 2012).

Estas diferencias entre el modelo CNOSSOS y NORD2000 pueden venir dadas por la versión de la norma europea implementada en el software de predicción, ya que la Directiva 996/2015 fue publicado con posterioridad al lanzamiento de la última versión del software usado en esta tesis. Esta circunstancia no ha sido podido ser confirmada con Datakustik pero es probable que la versión implementada se corresponda con la del año 2012. Con posterioridad a dicha fecha, se llevo a cabo un proyecto para depurar el texto final (Extrium, 2014a, 2014b, 2014c), que puede introducir mejoras para corregir este aspecto.

El modelo NORD2000 presenta sobrestimaciones del nivel monitorizado en el rango 1,3-2,3 siendo el modelo más previsto el que emplea las coberturas de usos de suelos en base a CLC, por lo que esta base de datos cobra relevancia en su aplicación mediante esta fórmula. Estas desviaciones son ligeramente superiores a las encontradas por DELTA (-0.1 dBA) para la validación del modelo (DELTA, 2009), si bien dichas medidas se realizan mediante condiciones controladas en terrenos llanos principalmente o con pendientes inferiores a la topografía objeto de estudio.

Finalmente, destacar que el modelo CONCAWE obtiene predicciones con sobreestimaciones e los niveles monitorizados, especialmente considerando terrenos duros (más de 6,5 dBA), y sólo debería ser empleada desde un punto de vista conservador con valores de absorción del terreno mixtos y/o previa validación mediante ensayos acústicos.

En la Ilustración 165 se puede observar los resultados para cada una de las normas de cálculos empleados, destacando que las desviaciones son superiores a bajas velocidades de viento, fundamentalmente por las mayores incertidumbres registradas durante la campaña de monitorizado bajo esas condiciones meteorológicas y de emisión (bines próximos a la velocidad de viento).

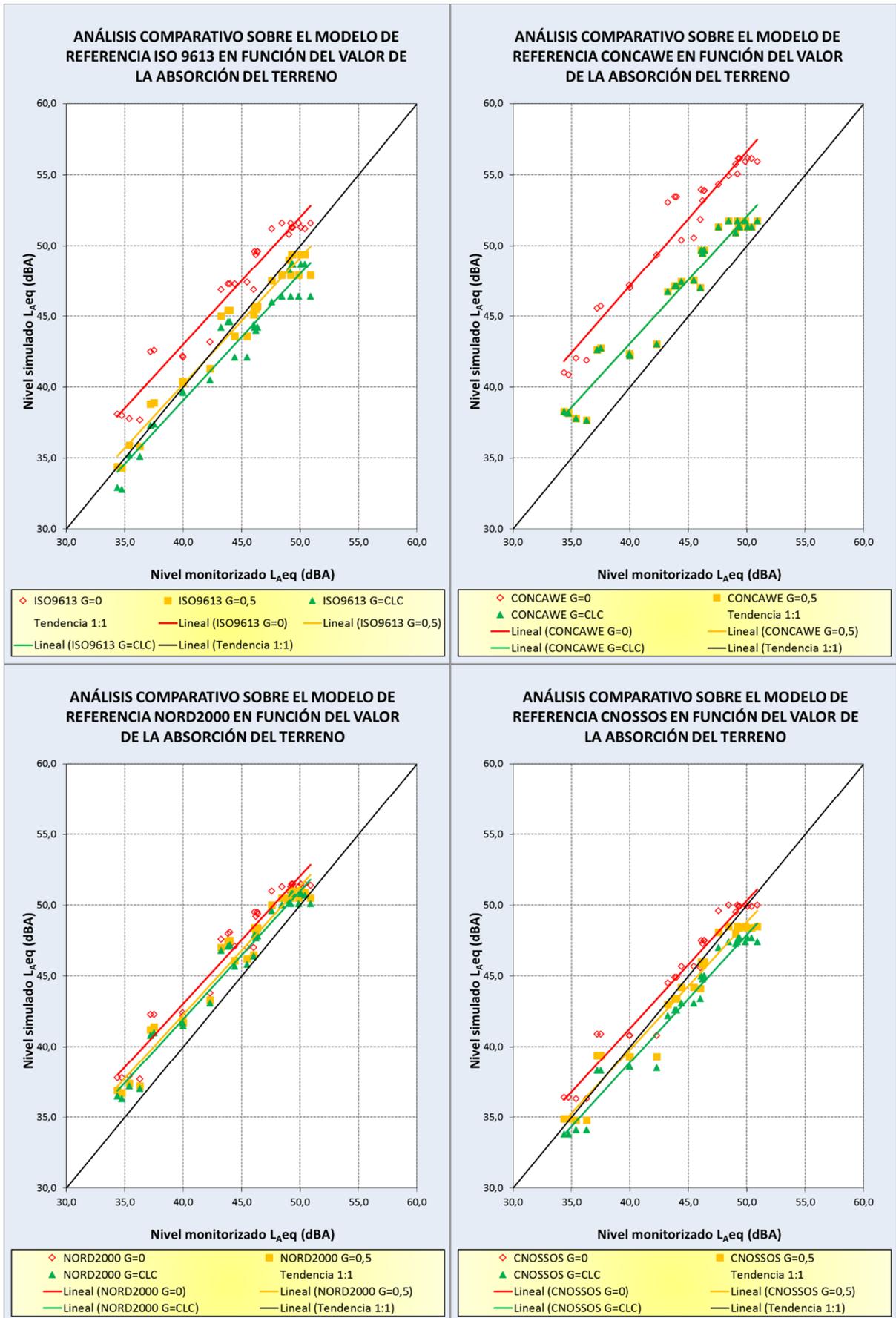


Ilustración 165. Análisis comparativo entre monitorizado y predicción sonora para los modelos base de cada norma de cálculo en función de la absorción del terreno

8.5 EFICACIA DE LAS ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN DE BAJO RUIDO

Hipótesis: La implementación de estrategias de modos de bajo ruido en los aerogeneradores, diseñadas mediante modelos de predicción, constituye una medida de mitigación efectiva evaluable mediante ensayos acústicos in situ.

En el parque eólico objeto de estudio se implantaron modos de operación de bajo ruido por iniciativa del promotor del parque para evitar las molestias por ruidos sobre las dos edificaciones estudiadas. Estas estrategias de bajo ruido fueron diseñadas en función de la potencia acústica de los aerogeneradores, basado en la norma IEC61400-11:2002:2003 y mediante un modelo de predicción sonora basado en la norma de cálculo de propagación CONCAWE con un valor de absorción $G=0,5$, que tiene en cuenta dirección y velocidad de viento así como diferentes clases de estabilidad atmosférica para el periodo día, tarde y noche. Las estrategias de bajo ruido fueron implementadas considerando la posibilidad de implementar la máxima reducción de ruidos en los aerogeneradores con contribución sonora en el punto de medida, y si el nivel objetivo no era alcanzado, implementando paradas técnicas de los aerogeneradores con mayor aportación hasta obtener dicho nivel (Fotheringham y Gemmell, 2015). En el modelo se tuvo en cuenta el efecto acumulativo de todos los aerogeneradores siguiendo las recomendaciones de Mackay, 2015 y el modelo fue validado con los registros sonoros disponibles en ese momento, con vistas a garantizar la idoneidad del modelo (Hessler Associates Inc., 2011; Tickell, 2005, 2006).

En la siguiente tabla, se especifica las estrategias de funcionamiento de bajo ruido diseñada para los aerogeneradores con mayor aportación sobre los niveles de inmisión de cada punto de medida. Conforme a los resultados del modelo de predicción sonora, se esperaba una atenuación de al menos seis (6) dBA en el punto de medida 1 y dos (2) dBA en el punto de medida 2 por reducción de la potencia sonora del aerogenerador, para alcanzar un nivel sonoro de 45 dBA.

PUNTO DE MEDIDA 1								
Aerogenerador	Velocidad de viento w_{10} (m/s)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Aportación principal	FP	FP	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Aportación secundaria	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP
PUNTO DE MEDIDA 2								
Aerogenerador	Velocidad de viento w_{10} (m/s)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Aportación principal	FP	FP	FP	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01
Aportación secundaria 1	FP	FP	FP	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01
Aportación secundaria 2	FP	FP	FP	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01	NRS01
Aportación secundaria 3	FP	FP	FP	NRS 05				
FP: Plena potencia. NRS: Modos de bajo ruido descritos en la tabla 13								

Tabla 70. Estrategias de operación de bajo ruido aplicable al periodo nocturno con viento de Poniente. (Fte. Promotor del parque).

En la siguiente gráfica se muestra una comparativa entre los niveles de inmisión registrados durante la campaña de monitorizado del ruido, comprando el ruido total, con y sin medidas de

protección acústica, y el nivel sonoro límite que se perseguía obtener en base a los resultados del modelo de predicción. La comparativa se realiza entre los niveles de inmisión en el periodo diurno y nocturno, pues ambos han sido monitorizados bajo condiciones favorables de propagación. Las atenuaciones estimadas pueden ser menores a las reales dada la muy probable existencia de condiciones muy favorables de propagación durante los ensayos en periodo nocturno.

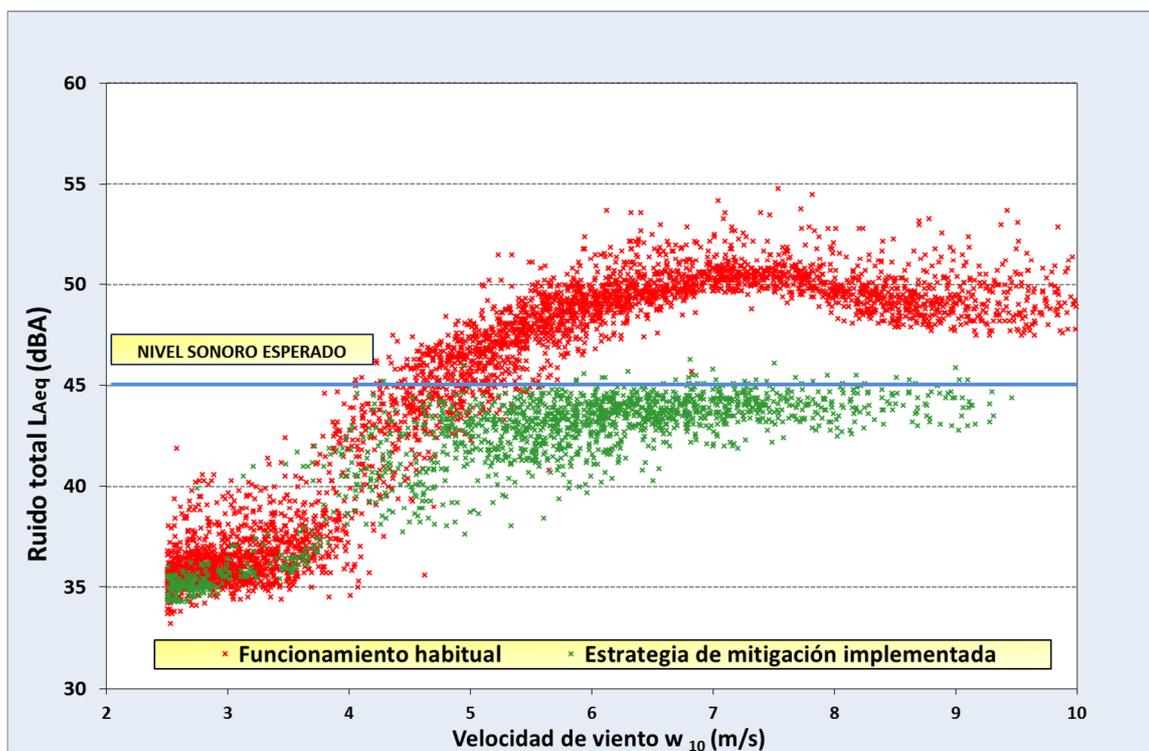


Ilustración 166. Ruido total (L_{Aeq}) en el punto de medida 1 durante el periodo noche y nivel límite pretendido con la aplicación de las estrategias de bajo ruido

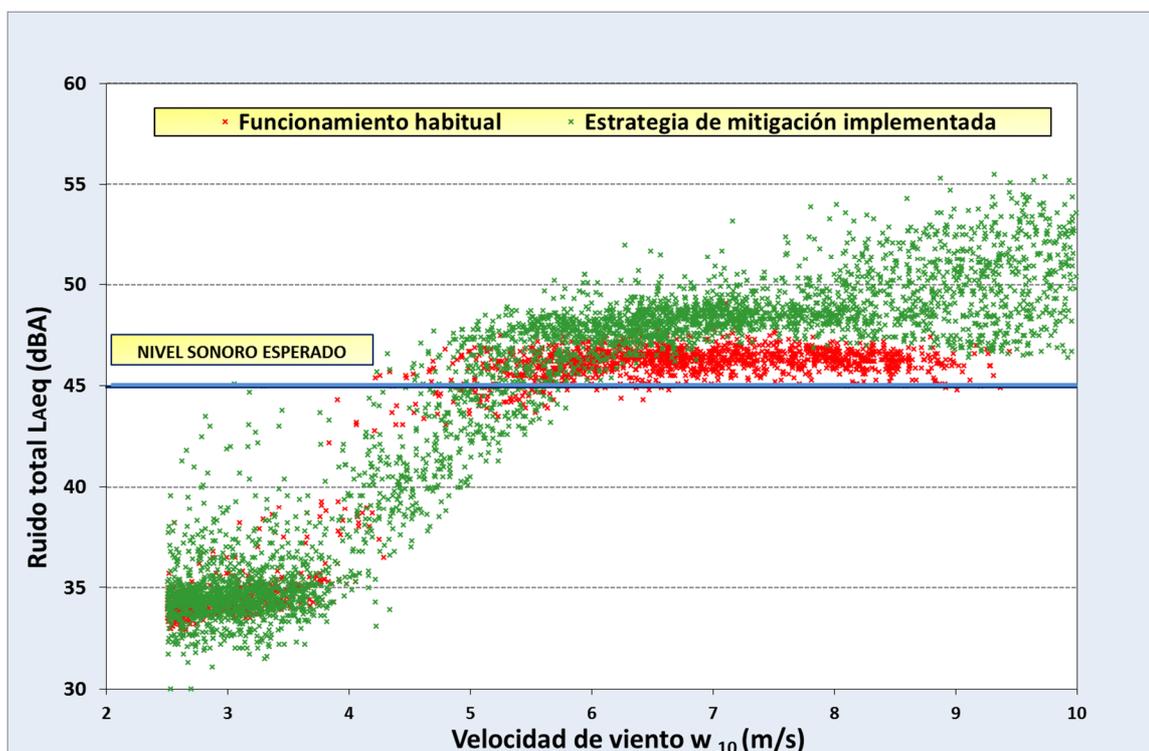


Ilustración 167. Ruido total (L_{Aeq}) en el punto de medida 2 durante el periodo noche y nivel límite pretendido con la aplicación de las estrategias de bajo ruido

A continuación se analizan de forma numérica (Tablas 71 y 72) los resultados empleando los registros obtenidos mediante el método de agrupación por bins de viento. Es conveniente recordar que las estrategias de mitigación se han implementado en el punto de medida 1 a partir de 5 m/s y a partir de 6 m/s en el punto de medida 2.

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	4	5	6	7	8
Nivel de inmisión sin medida (dBA)	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1
Nivel de inmisión con estrategias de bajo ruido (dBA)	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0
Atenuación obtenida (dBA)	0,0	3,7	5,8	6,6	6,1

Tabla 71. Estimación de la efectividad de las estrategias de bajo ruido para el punto de medida 1

Velocidad de viento w_{10} (m/s)	5	6	7	8	9
Nivel de inmisión sin medida (dBA)	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9
Nivel de inmisión con estrategias de bajo ruido (dBA)	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1
Atenuación obtenida (dBA)	-1,0	1,4	2,1	2,8	3,8

Tabla 72. Estimación de la efectividad de las estrategias de bajo ruido para el punto de medida 2

Los resultados demuestran la eficacia de las medidas correctoras propuestas para la reducción de los niveles sonoros, especialmente en el punto de medida 1, donde la efectividad de las medidas correctoras promedio es de 6,2 dBA para la máxima emisión del aerogenerador. En el punto de medida 2, la atenuación acústica promedio se sitúa en torno a los 2,9 dBA y se desvía en unos 2 dBA de los niveles sonoros esperados. Por tanto quedaría demostrada la efectividad de las medidas de mitigación para el punto de medida 1 mientras que en el punto de medida 2 se hace necesaria la adecuada calibración del modelo porque, aunque las atenuaciones son incluso mayores de las esperadas, no se alcanza el nivel de inmisión sonora esperado a priori. Estas desviaciones en el punto de medida 2 pueden estar motivadas por los registros discretos empleados en la calibración, que podían representar un escenario que no era el más desfavorable desde el punto de vista acústico. Otra causa probable podría estar asociada a la implementación de las estrategias de bajo ruido y las desviaciones encontradas cuando éstas entran en funcionamiento (Evans and Cooper, 2011), que podrían explicar las desviaciones encontradas en el bin de viento de 5 m/s.

Las conclusiones del presente estudio permitirían obtener un modelo de predicción calibrado para el punto de medida 2 empleando la norma de cálculo CNOSSOS y rediseñar las medidas de mitigación convenientemente. Igualmente se podrían emplear el límite superior obtenido en el método agrupado de bins de viento, para garantizar que los resultados son conservadores respecto al cumplimiento de la normativa.

En conclusión, las estrategias de operación de bajo ruido de los aerogeneradores, constituye una de las escasas herramientas de gestión del parque que permiten minimizar el impacto acústico sobre las edificaciones más cercanas, restringiendo la aplicación de las medidas correctoras a los periodos en los que la afección es mayor y minimizando las pérdidas de producción en las instalaciones. Esta estrategia podría ser complementada con un estudio previo a la instalación del parque que analice la ubicación más óptima de los aerogeneradores (Probst et al., 2013) o bien permitiendo que el sistema sea dinámico y a tiempo real, ajustando el nivel de emisión del parque en función de la velocidad y dirección de viento y la dosis acumulada por la población expuesta.

8.6 MODELO RECOMENDADO PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE PARQUES EÓLICOS

Hipótesis: La evaluación acústica de los parques eólicos debe estar basado en un modelo combinado de norma de cálculo y monitorizado de ruidos que permita el análisis de diferentes escenarios de propagación, con un alto grado de precisión y sin incurrir en subestimaciones de los niveles sonoros.

La norma de cálculo CNOSSOS-EU considerando terrenos duros y el método de agrupación por bins de viento empleando monitorizado de ruidos de larga duración constituyen el método combinado más idóneo para la evaluación del impacto acústico de parques eólicos en el caso de estudio que aquí se presenta.

El modelo CNOSSOS con valor nulo de absorción del terreno ha presentado una adecuada precisión (0,6 dBA con desviaciones estándar de 0,9 dBA) respecto a los niveles monitorizados sin incurrir en subestimaciones para ninguno de los periodos estudiados (desviaciones de 0,2/1,1 dBA en periodo diurno y noche respectivamente) y topografías seleccionadas (0,3 dBA para terrenos con pendientes homogéneas descendentes en el punto de medida 1 y 0,8 dBA para terrenos con perfil cóncavo descendente en el punto 2). La consideración de la refracción descendente en la propagación de rayos, la posibilidad de incorporar mecanismos de reflexiones múltiples y la capacidad de adaptación a diferentes tipos de terrenos lo convierten en un método altamente recomendado para parques eólicos.

El monitorizado de ruido en continuo mediante la norma ISO1996-2:2007 ha demostrado su consistencia y adaptabilidad para la evaluación de los niveles de inmisión ocasionados por los aerogeneradores siempre que se dispongan de una segunda pantalla protectora que garantice la reducción del viento sobre el micrófono. Una campaña de monitorización en continuo durante 10 días sería suficiente para obtener un número mínimo de registros minutales (al menos 60 registros) para cada ventana de viento analizada, si bien la duración final dependerá de las variaciones meteorológicas que concurren durante la campaña de ensayos. Se recomienda encarecidamente que estas técnicas se empleen igualmente para la caracterización del ruido de fondo del área de estudio.

La técnica de agrupación por bins de viento para el postprocesado de los registros sonoros se presenta como la mejor alternativa por su adaptación a la variabilidad en los niveles sonoros producidos por los aerogeneradores. Además, este método demuestra su robustez aun cuando se valoran valores extremos de la velocidad de viento y proporciona un indicador (la desviación estándar para cada ventana de viento), que puede ser empleado para la declaración de conformidad normativa, cubriendo aquellos escenarios promedios y más probables.

Campaña de ensayos	Postprocesado de Registros	Norma de cálculo
Monitorizado de ruido en continuo según ISO 1996-2:2007 durante al menos 10 días u obtener 60 registros válidos para cada ventana de viento objeto de estudio	Agrupación por bins de viento (Ontario Ministry of the Environment, 2008)	Método CNOSSOS-EU (Comisión Europea, 2015)

Tabla 73. Método combinado propuesto para evaluación del impacto acústico de parques eólicos

A continuación se incluye una comparativa de los resultados de la evaluación de impacto acústico del caso de estudio mediante la aplicación de los métodos recomendados.

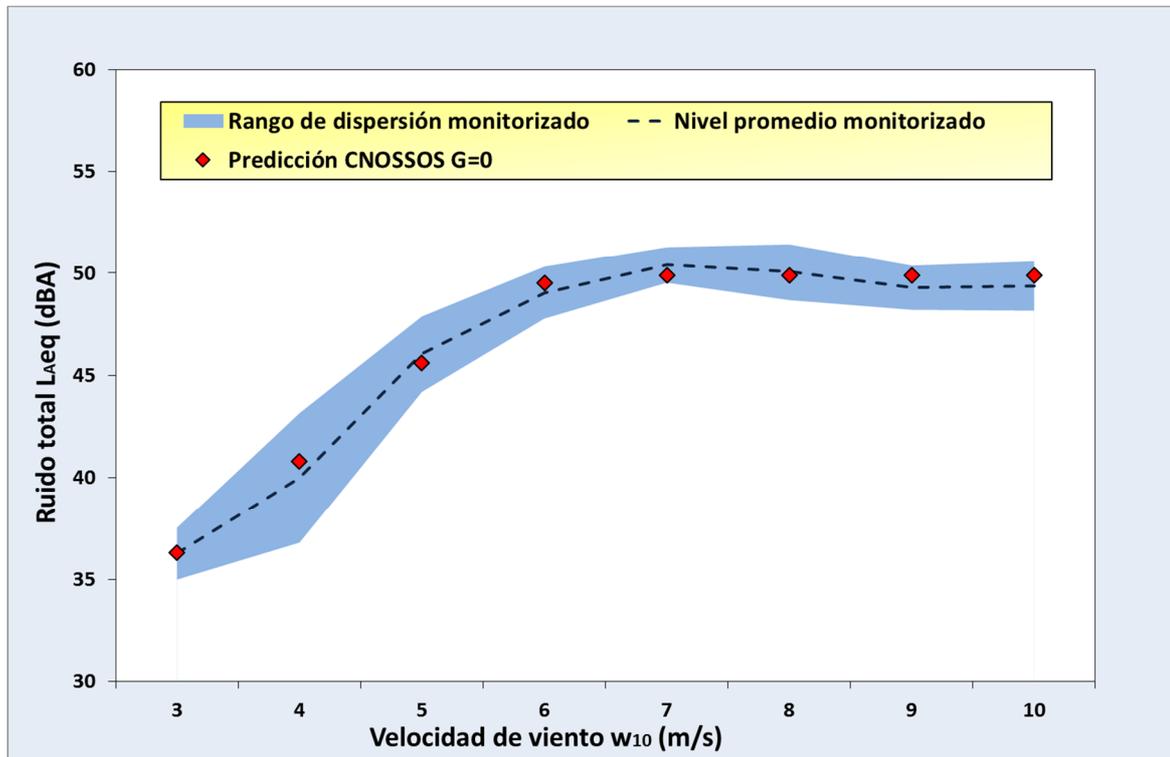


Ilustración 168. Aplicación del método recomendado al punto de medida 1 en periodo diurno

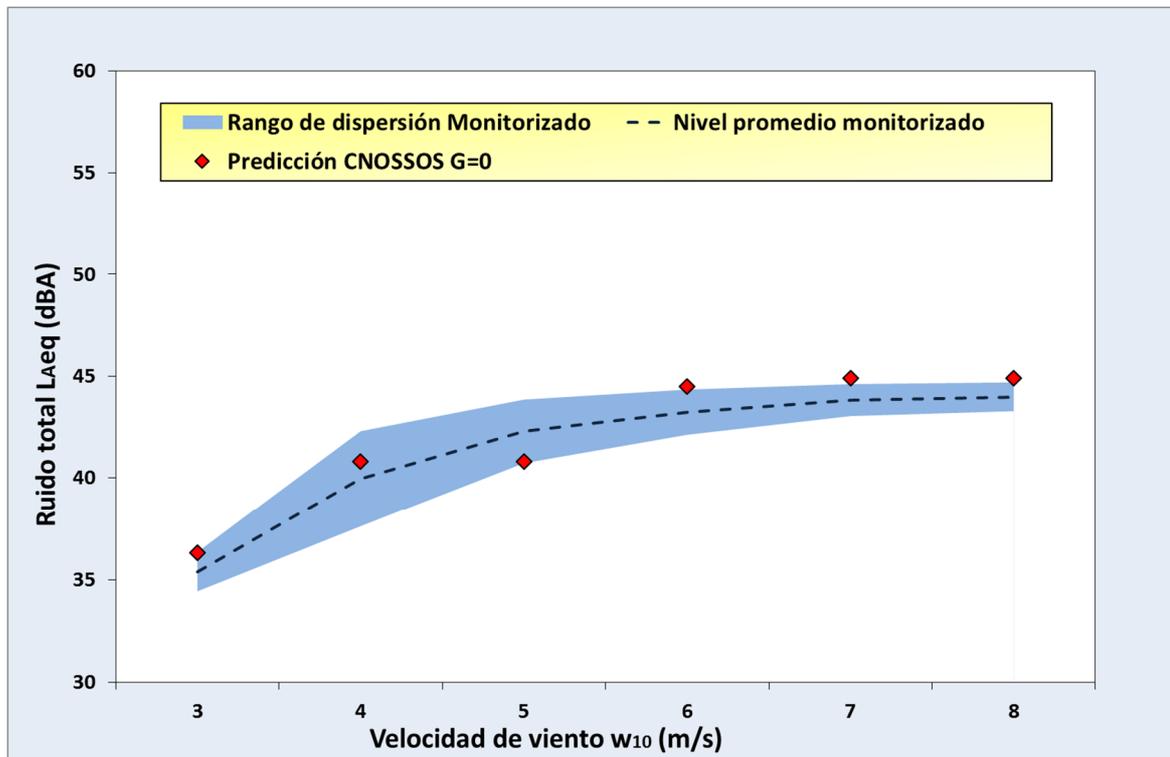


Ilustración 169. Aplicación del método recomendado al punto de medida 1 en periodo noche

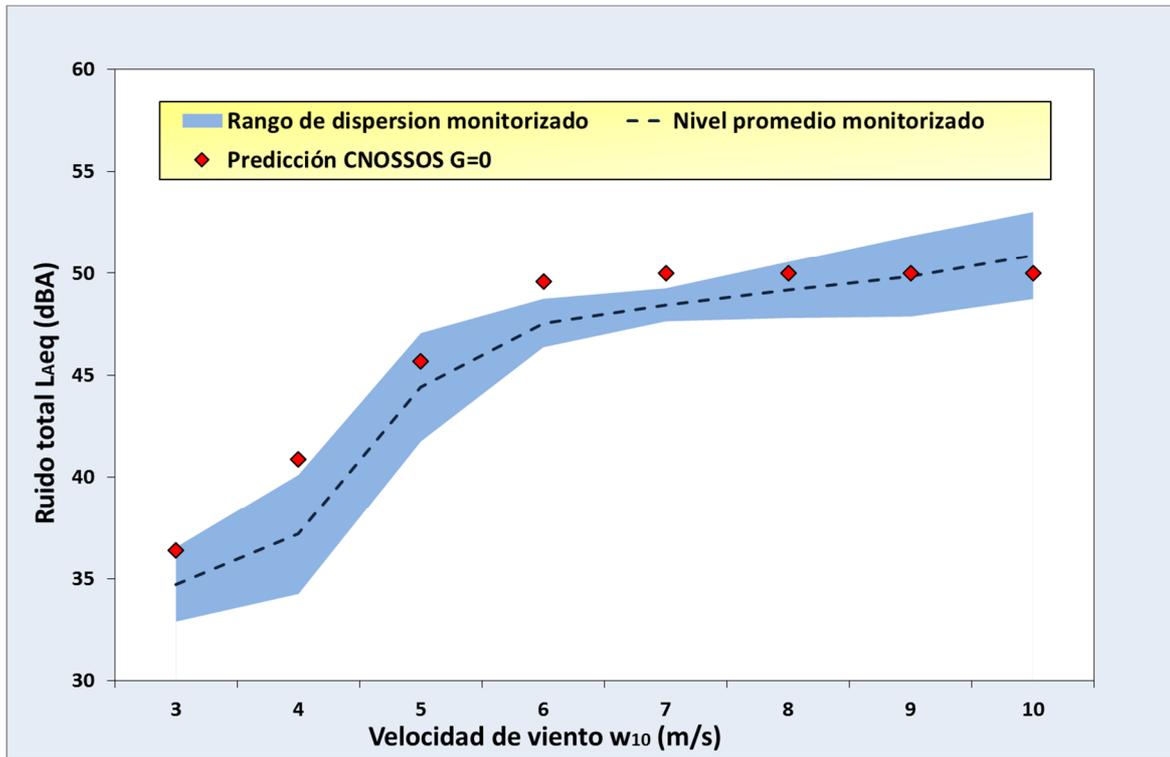


Ilustración 170. Aplicación del método recomendado al punto de medida 2 en periodo diurno

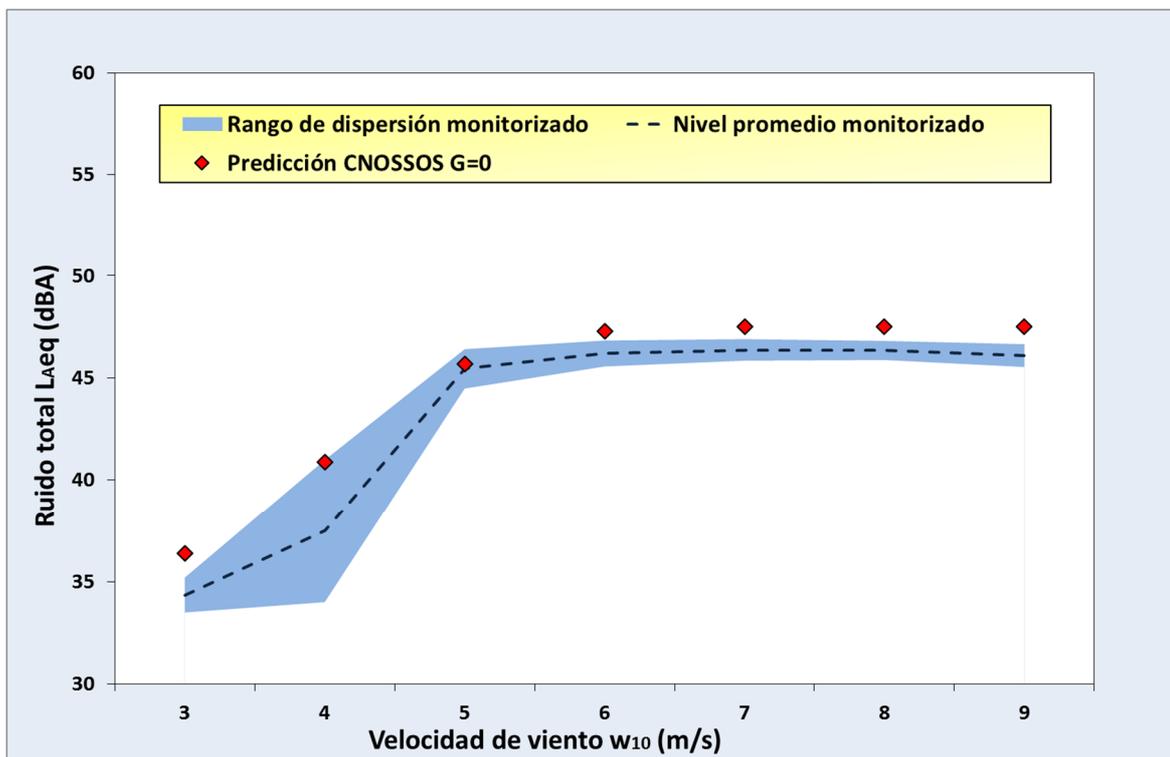


Ilustración 171. Aplicación del método recomendado al punto de medida 2 en periodo noche

9. CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de esta tesis es contribuir al desarrollo y mejora de una sistemática específica de valoración del impacto acústico de los parques eólicos, empleando un método de predicción y monitorizado acústico, que fuese representativo para topografías complejas y adaptable a los requerimientos de la normativa nacional.

Conforme a los resultados obtenidos en el presente estudio, el método más representativo para la evaluación acústica del parque eólico objeto de estudio, debe estar basado en:

- Modelo de predicción según CNOSSOS-EU EU (*Common NOise aSSessment methOds*) con valor de absorción del terreno G igual a 0.
- Monitorizado de ruido en continuo según ISO 1996-2:2007 durante al menos 10 días u obtener al menos 60 registros válidos para cada *bin* de viento dentro del rango de velocidades objeto de estudios.
- Postprocesado de los registros sonoros minutales obtenidos *in situ*, mediante análisis estadísticos a través del método de agrupación por bins de viento.

La aplicación de esta metodología ha permitido estimar el nivel de inmisión del parque eólico objeto de estudio con un alto grado de precisión (desviación promedio igual a 0,6 dBA), sin incurrir en subestimaciones y con un alto grado de adaptación a los diferentes perfiles topográficos estudiados.

A continuación, se exponen otras conclusiones que se derivan del presente trabajo de investigación y que dan respuesta a los objetivos específicos de la presente tesis:

- La aplicación de la norma de cálculo ISO9613-2 con valores mixtos de absorción del terreno ($G=0,5$) permite obtener predicciones igualmente representativas, no recomendándose su utilización bajo el principio de máxima precaución, por incurrir en subestimaciones de los niveles sonoros.
- La aplicación de absorciones de suelos basadas en las coberturas de suelos según CORINE LAND COVER ha demostrado mejorar la precisión de la norma NORD2000, representando escenarios conservadores con sobrestimaciones promedio de 1,3 dBA. Sin embargo, su aplicación bajo las normas ISO9613-2 y CNOSSOS introduce importantes subestimaciones en las predicciones.
- La metodología desarrollada por el Instituto de Acústica de Reino Unido (IOA) no ha proporcionado mejoras consistentes en el parque eólico objeto de estudio, recomendándose su aplicación cuando un número representativo de aerogeneradores cumplan con las cláusulas establecidas. El desarrollo de modelos de predicción que consideran la refracción descendente en la propagación y la posibilidad de incorporar reflexiones múltiples (NORD2000 y CNOSSOS) pueden garantizar la consideración de topografías complejas sin necesidad de correcciones adicionales.

- Se recomienda el monitorizado del ruido ambiental según norma ISO1996-2:2007 durante al menos diez (10) días en continuo, tanto para el ruido total como para el ruido de fondo. La duración total de la medida podrá estar condicionada por el rango de velocidades de viento a caracterizar, el nivel de incertidumbre perseguido y las características específicas del ámbito objeto de estudio.
- La declaración de conformidad de un parque eólico respecto a la legislación acústica vigente podría justificarse mediante el promedio energético del nivel de inmisión medido *in situ* más la desviación estándar de la muestra para cada ventana de vientos. Este indicador proporcionaría información adicional sobre el grado de dispersión esperado de los niveles sonoros en cada receptor.
- El método seleccionado ha puesto de manifiesto la efectividad de las medidas de mitigación de ruido implementadas durante el periodo nocturno, con una atenuación sonora estimada de 3-7 dBA durante el periodo de máxima emisión del aerogenerador. En este sentido, es fundamental validar la precisión del modelo de predicción empleado previamente, con vistas a garantizar los niveles máximos establecidos como objetivos en cada receptor.

Los resultados y conclusiones obtenidos en el presente estudio reflejan la validación de las normas de cálculo seleccionadas para el parque eólico analizado. Dado que este estudio constituye la primera experiencia conocida para la validación de la norma CNOSSOS en parques eólicos, las conclusiones obtenidas deberían ser validadas mediante estudios complementarios en otras localizaciones que presenten diferente topografía. Además, el impacto de cómo los desarrolladores del software de simulación implementan la norma CNOSSOS, debería ser objeto de verificación en futuras investigaciones.

9.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A raíz de los resultados y conclusiones del presente estudio, se proponen las siguientes líneas de investigación para un futuro:

- Avanzar en el cálculo de la incertidumbre de los ensayos acústicos conforme a la nueva normativa de referencia (ISO, 2015), estableciendo sistemática de ensayos que permitan reducir la incertidumbre de los mismos y permitiendo la declaración de conformidad con la máxima probabilidad de cobertura posible.
- Estudio de detalle de la aplicación del Anexo B de la norma ISO 996-2:2007 a parques eólicos y las correcciones por reflexiones a considerar, incluyendo la realización en paralelo de ensayos en campo libre.
- Validación del método recomendado bajo otros perfiles topográficos (llanos, montañosos), condiciones de propagación (neutrales) y obteniendo una caracterización más adecuada del medio de propagación (perfiles verticales de viento por periodo y localización y caracterización de la impedancia acústica mediante ensayos *in situ*).
- Diseño de un sistema dinámico de reducción de ruido a tiempo real, basado en la implementación automática de modos de bajo ruido de los aerogeneradores en función de las dosis máximas establecidas por normativa y vientos predominantes en cada momento, con vistas a maximizar la producción energética.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Adcock, J., Delaire, C., y Griffin, D. (2012). «A Review Of The Draft NSW Planning Guidelines : Wind Farms», *Acoust. Aust.*, **40**, 72-78.
- Adcock, J., Delaire, C., y Griffin, D. (2015). «Study of secondary wind shield performance in the field Mark Jiggins», *Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas. , Scotl.*, 20.
- AEE (2015). *Anuario 2015* Anu. la Asoc. Empres. Eólica, 112 pages.
- Ambrose, S. E., Rand, R. W., y Krogh, C. M. E. (2012). «Wind Turbine Acoustic Investigation: Infrasound and Low-Frequency Noise--A Case Study», *Bull. Sci. Technol. Soc.*, doi:10.1177/0270467612455734
- AMEC Environment & Infrastructure (2012). *Provision of Second Round Noise Maps for Northern Ireland. 3D modelling report* 89 pages.
- Arcadis, K. F., Avenue, F., Arcadis, E. K., Box, P. O., y Arnhem, A. G. (2013). «Noise International Legislation and Regulations for Wind Turbine Noise», *Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US.*, 22.
- Ashtiani, P., y Titus, S. (2011). «Analysis of Noise Immission levels measured from Wind Turbines Noise Immission measurements», *Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy, INCE Europe.*
- Australian Standard (2010). *AS4959:2010 Acoustics – Measurement, prediction and assessment of noise from wind turbine generators* ASA, p. 35.
- Bakker, R. H., Pedersen, E., van den Berg, G. P., Stewart, R. E., Lok, W., y Bouma, J. (2012). «Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress», *Sci. Total Environ.*, **425**, 42-51. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.03.005
- Bass, J. H., Bullmore, a J., y Sloth, E. (1998). *Development of a Wind Farm Noise Propagation Prediction Model* 21 pages.
- Van Den Berg, G. P. (2004). «Effects of the wind profile at night on wind turbine sound», *J. Sound Vib.*, **277**, 955-970. doi:10.1016/j.jsv.2003.09.050
- Van Den Berg, G. P. (2006). *The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise* University of Groningen, Netherlands, 105 pages. Recuperado a partir de <http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/2006/g.p.van.den.berg/?pLanguage=en&pFullItemRecord=ON>
- Van Den Berg, G. P. (2008). «Wind turbine power and sound in relation to atmospheric stability», *Wind Energy*, **11**, 151-169.

- Van Den Berg, M. (2015). «Parsimonius regulations for wind turbine noise», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas. , Scotl., 6.
- Berndt, A. (2004). «Uncertainties in Environmental Noise Modeling», Acoust. Aust. 2004, Gold Coast, Aust., 443-446.
- Bigot, A., y Farotto, G. (2011). «Long term measurements : a way to minimize uncertainties on acoustic impact control of wind farms», Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy, 8.
- Birchby, A., Cassidy, M., y Bass, J. (2015). «Propagation of Noise from Wind Farms According to the Institute of Acoustics ' Good Practice Guide - A Sensitivity Analysis», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas. , Scotl., 11.
- Bliss, M. (2013). «Noise Environmental noise assessment of proposed wind farms using annual average L dn», Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US., 8.
- Bolen, L. N., y Bass, H. E. (1981). «Effects of ground cover on the propagation of sound through the atmosphere», J. ASA, **69**, 121-128.
- Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (2003). *Decreto 326/2003, de 25 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía* BOJA, pp. 612-628.
- Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (2012). *Decreto 6/2012, de 17 de Enero por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía.* BOJA, pp. 7-37.
- Boletín Oficial del Estado (2005). *Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla Ley del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas* BOE, pp. 46932-46946.
- Boletín Oficial del Estado (2005). *Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley del Ruido en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental* BOE, pp. 41356-41363.
- Boletín Oficial del Estado (2007). *Ley7/2007, de 9 de Agosto, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental* BOE, pp. 34118-34169.
- Bonsma, I. (2009). «An investigation of the wind induced background levels in rural areas for existing and proposed wind farms», Can. Acoust., **37**, 10-11.
- Bonsma, I., y Munro, M. (2009). «An investigation of the wind induced background sound levels in rural areas for existing and proposed wind farms», Can. Acoust., **37**, 154-155.
- Botha, P. (2012). *Statement of Rebuttal Evidence of Paul Cedric Botha on behalf of Meridian Energy Limited* 11 pages.
- Broneske, S. (2014). «Wind turbine noise measurements - How are results influenced by different methods of deriving wind speed ?», INTERNOISE 2014. Melbourne, Aust., Melbourne, Australia, 10.
- Bullmore, A., Adcock, J., Jiggins, M., y Cand, M. (2009). «Wind Farm Noise Predictions and Comparison with Measurements», Proc. 3rd Int. Meet. Wind Turbine Noise. Aalborg, Denmark,.

- Chiles, S. (2010). «NZS 6808 : 2010 Acoustics – Wind farm noise», New Zeal. Acoust., **23**, 20-22.
- Comisión Europea (2015). *Directiva 2015/996 de 19 de mayo de 2015 por la que se establecen métodos comunes de evaluación del ruido en virtud de la Directiva 2002/49/CE del parlamento Europeo y del Consejo*. D. Of. las Comunidades Eur., pp. 37-39.
- Consejería de Agricultura Pesca y Medio Ambiente (CAPMA) (2012). *Guía de contaminación acústica*. Recuperado a partir de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/medio_ambiente_urbano/contaminacionacustica/guia_acustica_baja_ok.pdf
- Consejo Europeo (2002). *Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de Junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental* D. Of. las Comunidades Eur., pp. 43-50.
- Cooper, J., y Evans, T. (2013). «Accuracy of noise predictions for wind farms», Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US., 17.
- Cooper, J., Evans, T., y Najera, L. (2012). «Comparison of compliance results obtained from the various wind farm standards used in Australia», Acoust. Aust., **40**, 37-44.
- Cueto Ancela, J. L., Rivas Calvete, S., y Hernández Molina, R. (2006). «Metodología para la evaluación del impacto sonoro producido por los parques eólicos en andalucía», 46º Congr. Español Acústica. Gandía, España, 1-6.
- Danish Parliament (2011). *Statutory Order on Noise from Wind Turbines 1284* p. 14.
- Datakustik GmbH (2015). *Reference Manual Release 4.5* (No. 4.5.151), Greifenberg: Datakustik GmbH, 1382 pages.
- Delaire, C., Griffin, D., Adcock, J., Richards, A., y Ryan, B. (2015). «Research into a continuous wind farm noise monitoring system Forward by Pacific Hydro», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas., Scotl., 23.
- Delaire, C., Griffin, D., y Walsh, D. (2011). «Comparison of predicted wind farm noise emission and measured post- construction noise levels at the Portland Wind Energy Project in Victoria , Australia», Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy, 1-24.
- DELTA (2006). *Nord2000. Validation of the Propagation Model* 151 pages.
- DELTA (2009). *Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise* PSO-07 F&Uproject no7389,70 pages.
- Dickinson, P. J. (2009a). «A pragmatic view of a wind turbine noise standard», Updat. from Proc. Acoust. 2009, Adelaide, Aust., 1-8.
- Dickinson, P. J. (2009b). «Nonsense on s tilts», Acoust. Aust. 2009. Adelaide, Aust., Adelaide, 8.
- Donavan, P. R. (2009). «Measurement and analysis of wind-induced background noise levels for wind turbine generator impact assessment», Proc. EURONOISE 2009, Ottawa, Canada,.
- EAA (2006). *Corine Land Cover — Copernicus Land Monitoring Services*, Available: <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>, (date last viewed: 14-sep-15).

- Recuperado septiembre 14, 2015, a partir de <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- ENAC (2009). *Directrices para informar sobre el cumplimiento con especificaciones* 5 pages. Recuperado a partir de <https://www.enac.es/documents/7020/43174a88-4aa0-49e7-a3b5-dd69d588be60>
- Environmental Protection Authority NSW Australia (2000). *NSW Industrial Noise Policy, Appendix E — Methods for determining the frequency of temperature inversions* NSW Aust.,60-108 pages.
- Environmental Protection Authority South Australia (2009). «Wind farms environmental noise guidelines.»
- European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (2007). *Position Paper: Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure* 129 pages.
- European Environmental Agency (2010). «Good practice guide on noise exposure and potential health effects», EEA Tech. Rep., 11, 5.
- Evans, T., y Cooper, J. (2011). «Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms», *Acoust. Aust.* 2011, Gold Coast, Aust., 1-8.
- Evans, T., y Cooper, J. (2012). «Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms», *Acoust. Aust.*, 40, 28-36.
- Evans, T., Cooper, J., y Lenchine, V. (2013). *Wind Turbine Control Methods - National Instruments*. Recuperado a partir de <http://www.ni.com/white-paper/8189/en/>
- Evans, T., Cooper, J., y Lenchine, V. (2013). *Infrasound levels near windfarms and in other environments* 71 pages.
- Evans, T., Cooper, J., y Lenchine, V. (2013). *Low frequency noise near wind farms and in other environments* 56 pages.
- Extrium (2014a). *Develop and Implement Harmonised Noise Assessment Methods Log 2* 28 pages.
- Extrium (2014b). *Develop and Implement Harmonised Noise Assessment Methods Log 3* 17 pages.
- Extrium (2014c). *Develop and Implement Harmonised Noise Assessment Methods Log 5* 9 pages.
- Fotheringham, D., y Gemmell, S. (2015). «Wind Farm Noise Optimisation Tool», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas. , Scotl., 6.
- Fredianelli, L., Gallo, P., y Palazzuoli, D. (2012). «The suitable parameters to assess noise impact of a wind farm in a complex terrain : a case-study in Tuscan hills», *Euronoise Prague*, 2012, 6.
- Fredianelli, L., y Licitra, G. (2014). «Looking for a wind turbine noise legislation paying attention to annoyance : which metric ?», 11th Int. Congr. Noise as a Publica Heal. Probl. 2014, Nara, Japan, 8.
- Garrigues, S., y Gamba, R. (2012). *The French approach to noise assessment*, EWEA website, Available: <http://www.ewea.org/events/workshops/wp-content/uploads/2012/12/EWEA-Noise->

- Workshop-Oxford-2012-3-3-Sebastian-Garrigues.pdf, (date last viewed: 06-sep-15). Recuperado septiembre 6, 2015, a partir de <http://www.ewea.org/events/workshops/wp-content/uploads/2012/12/EWEA-Noise-Workshop-Oxford-2012-3-3-Sebastian-Garrigues.pdf>
- Goemé, A. (2015). «Comparative analysis of wind turbine noise assessment and rating procedures in the UK, France and the Netherlands», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas., Scotl., 23.
- Grilo, Á. (2015). «Acoustic Impact Assessment of Wind Farms in Spain: The new approach of the Andalusian Regulation», 46º Congr. Español Acústica. Val. España, 747-755.
- Hansen, K. L., Rd, S., y Park, B. (2015). «Perception and annoyance of low frequency noise versus infrasound in the context of wind turbine noise», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas., Scotl., 26.
- Hathaway, K., y Kaliski, K. (2006). «Assessing wind tyurbines against relative noise standards», INTERNOISE 2006. Honolulu, Hawai, 7.
- Hessler Associates Inc. (2011). *Assessing Sound Emissions from Proposed Wind Farms & Measuring the Performance of Completed Projects* 69 pages.
- Hessler, D. (2011). «Accounting for Background Noise when Measuring Operational Sound Levels from Wind Turbine Projects», Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy, 12.
- Horner, B., Ontario, K., Krogh, C., Ontario, K., Jeffrey, R., y Island, M. (2013). «Audit report : literature reviews on wind turbine noise and health», Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US., 22.
- IEC (2002). *IEC 61400-11:2002 Aerogeneradores: Técnicas de medida de ruido acústicos* CENELEC, Vol. 11, p. 48.
- IEC (2012). *IEC 61400-11:2012 Aerogeneradores: Técnicas de medida de ruido acústicos* CENELEC, p. 50.
- IMAGINE Work Group (2003). *Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment Description of the Source Database* 81 pages.
- IMAGINE Work Group (2011). *Determination of Lden and Lnight using measurements* 43 pages.
- INASEL (2009). *Estudios acústicos de Parques Eólicos para otros promotores*.
- Institute of Acoustics (2013). *A Good Practice Guide to the Application of ETSU-R-97 for the Assessment and Rating of Wind Turbine Noise* 40 pages.
- Irvine, G. (2015). «The Institute of Acoustics ' Working Group on Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise - Progress towards an agreed rating and assessment metric», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas., Scotl., 8.
- ISO (1996). *ISO 9613-2:1996 «Acoustic – Abatement of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation»*.
- ISO (2007). «ISO 1996-2:2007 “Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 2: Determination of environmental noise levels”,.»

- ISO (2015). *ISO/DIS 1996-2:2015 Acoustic - Determination of environmental noise levels* Draft Rep., p. 64.
- Italian Organization for Standardization (2005). *UNI 11143-1, «Acustica - Metodo per la stima dell'«impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti - Parte 1: Generalità»* UNI, Italy.
- Janssen, S. a, Vos, H., Eisses, A. R., y Pedersen, E. (2010). «Prediction Annoyance by Wind Turbine Noise», *Poceedings INTERNOISE 2010*, Lisbon, Port., 5.
- Janssen, S. A., Vos, H., Eisses, A. R., y Pedersen, E. (2009). «Exposure-response relationships for annoyance by wind turbine noise: a comparison with other stationary sources», *Proc. EURONOISE 2009*, Ottawa, Canada, 7.
- Janssen, S. A., Vos, H., Eisses, A. R., y Pedersen, E. (2011). «A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources», *J. Acoust. Soc. Am.*, **130**, 3746-53. doi:10.1121/1.3653984
- JRC (2014). *Photovoltaic Geographical Information System*, JRC Eur. Com., Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>, (date last viewed: 14-sep-15). Recuperado septiembre 14, 2015, a partir de <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- Kaliski, K., y Duncan, E. (2008). «Improving sound propagation modeling for wind power projects», *J. Acoust. Soc. Am.*, **123**, 12-15. doi:10.1121/1.2934500
- Kaliski, K., Duncan, E., Mcphee, P., West, C. R., O'Neal, R., Zimmerman, J., y Snyder, J. (2014). «The Massachusetts Research Study on Wind Turbine Acoustics – Methods and Goals», *NOISE-CON2014*, Florida, USA., 6.
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M., y Anfosso-Ledee (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, (JRC Institutie, Ed.) 180 pages. doi:10.2788/31776
- Kragh, J., y Jakobsen, J. (1995). *Propagation of Wind Turbine Noise, Outline of a Prediction Methodp* 1-30 pages.
- Large, S., y Stigwood, M. (2015). «Compliance isn ' t everything », *Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise*. Glas. , Scotl., 12.
- Larsson, C., y Öhlund, O. (2012). «Sound from wind turbines during different weather conditions», *Proc. Internoise 2012*, New York, USA, 10.
- Larsson, C., y Öhlund, O. (2014). «Wind turbine sound - metric and guidelines», *INTERNOISE 2014*. Melbourne, Aust., Melbourne, Australia, 8.
- Leclercq, D., Cooper, J., y Stead, M. (2008). «The use of microphone windshields for outdoors noise measurements», *Acoust. Aust.* 2008. Gelong, Victoria, Aust., 1-6.
- Lee, S., Kim, K., Choi, W., y Lee, S. (2011). «Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise», *Noise Control Eng. J.*,. doi:10.3397/1.3531797
- Ljunggren, S. (1997). *Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations* Stockholm, Sweden., 52 pages.

- Lundmark, G. (2011). «Measurement of Swish Noise A new method», Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy, 8.
- Mackay, J. (2015). «The use of cumulative wind turbine noise related planning conditions», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas. , Scotl., 11.
- Van Maercke, D. (2006). *Prediction of Excess Attenuation in Outdoor Noise Propagation*, Meet. Nor. Acoust. Soc., Available: http://www.norskakustiskselskap.org/old/NAS_revised/Webpages/hostmotet2006/Harmonoise - Dirk van Maercke.pdf, (date last viewed: 13-sep-15). Recuperado septiembre 13, 2015, a partir de http://www.norskakustiskselskap.org/old/NAS_revised/Webpages/hostmotet2006/Harmonoise - Dirk van Maercke.pdf
- Manning, C. J. (1981). *The propagation of noise from petroleum and petrochemical complexes to neighbouring communities* Technology,. Recuperado a partir de <http://www.concawe.be/Content/Default.asp?PageID=569>
- McDonald, P., Geraghty, D., y Humphreys, I. (2011). «A Long Term Noise Measurement System for Wind Farms», Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy, 10.
- Ministries of Environ. & Energy of British Columbia (2012). *Best Practice for Wind Power Project Acoustic Assessment* 28 pages.
- Ministry of Environmental Protection of China (1994). *Standard of environmental noise of urban area*, MEPC website, Available: http://english.mep.gov.cn/standards_reports/standards/Noise/Quality_Standard2/200710/t20071024_111864.htm, (date last viewed: 09-sep-15). Recuperado septiembre 9, 2015, a partir de http://english.mep.gov.cn/standards_reports/standards/Noise/Quality_Standard2/200710/t20071024_111864.htm
- Ministry of the Environment Japan (1998). *Environmental quality standards for noise [MOE]*, MOE website, Available: <https://www.env.go.jp/en/air/noise/noise.html>, (date last viewed: 09-sep-15). Recuperado septiembre 9, 2015, a partir de <https://www.env.go.jp/en/air/noise/noise.html>
- Moles, J. A., David, G., Gowans, R., y Munro, D. (2010). *Stockyard Hull Wind Energy Facility and associated planning permit application* 152 pages. Recuperado a partir de http://www.dtpli.vic.gov.au/_data/assets/pdf_file/0018/231237/Stockyard-Hill-Wind-Farm-Panel-Report-Sections-1-7.pdf
- Northern Ireland EPA (2009). *Guidance Note for Strategic Noise Mapping* 126 pages.
- Northern Ireland EPA (2010). *Guidance Note on Noise Assessment of Wind Turbine Operations at EPA Licensed Sites (NG3)* Renew. Energy,.
- NSW Department of Planning and Infrastructure (2011). *NSW Plannig Guidelines Wind Farms Draft Rep.*,59 pages.
- Öhlund, O., y Larsson, C. (2013). «Sound propagation from wind turbines under various weather conditions», Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US., 13.

- Ontario Ministry of the Environment (2008). *Noise Guidelines for Wind Farms* 20 pages.
- Parkin, P., y Scholes, W. (1964). «The Horizontal Propagation of Sound from a Jet close to the Ground at Radlett», *J. Sound Vib.*, **1**, 1-13.
- Parkin, P., y Scholes, W. (1965). «The Horizontal Propagation of Sound from a Jet close to the Ground at Hatfield», *J. Sound Vib.*, **2**, 353-374.
- Pasquill, F. (1983). *Atmospheric Diffusion*, (F. B. Smith, Ed.) Ellis Horwood Ltd, 438 pages.
- Pawlaczyk-Łuszczynska, M., Dudarewicz, A., Zaborowski, K., Zamojska-Daniszewska, M., y Waszkowska, M. (2014). «Evaluation of annoyance from the wind turbine noise - A pilot study», *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*, **27**, 364-388. doi:10.2478/s13382-014-0252-1
- Pedersen, E. (2007). «Human response to wind turbine noise», Sahlgrenska Acad. Göteborg, Recuperado a partir de http://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/4431/1/gupea_2077_4431_1.pdf. Recuperado a partir de http://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/4431/1/gupea_2077_4431_1.pdf
- Pedersen, E. (2007). «Human response to wind turbine noise», Sahlgrenska Acad. Göteborg.
- Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R., y Bouma, J. (2009). «Response to noise from modern wind farms in The Netherlands», *J. Acoust. Soc. Am.*, **126**, 634-643. doi:10.1121/1.3160293
- Pedersen, E., y Persson Waye, K. (2007). «Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments», *Occup. Environ. Med.*, **64**, 480-486. doi:10.1136/oem.2006.031039
- Pedersen, E., y Waye, K. P. (2004). «Perception and annoyance due to wind turbine noise--a dose-response relationship», *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**, 3460-3470. doi:10.1121/1.1815091
- Persson Waye, K., y Öhrström, E. (2002). «Psycho-Acoustic Characters of Relevance for Annoyance of Wind Turbine Noise», *J. Sound Vib.*, **250**, 65-73. doi:10.1006/jsvi.2001.3905
- Pierce, J. E., Embleton, T., y Donato, R. (1977). «Prediction of the Ground Effect Side Line Noise from Aircraft», *J. ASA*, **61**, S2.
- Plovsing, B. (Delta A. and V. (2006a). *Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction*. DELTA,127 pages.
- Plovsing, B. (Delta A. and V. (2006b). *Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 2: Propagation in an Atmosphere with Significant Refraction*. DELTA,50 pages.
- Plovsing, B. (Delta A. and V. (2010). *Proposal for Nordtest Method: Nord2000 - Prediction of Outdoor Sound Propagation* 1-176 pages. doi:AV1106/07
- Probst, F., Gmbh, D., De, G., Probst, W., Gmbh, D., De, G., Gmbh, D., et al. (2013). «Large-Scale Calculation of Possible Locations for Specific Wind Turbines under Consideration of Noise Limits», *Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise*. Denver, US., 8.
- R.Nota et als. (2005). *HARMONOISE - Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning*.

- Ramakrishnan, R. (2007). *Wind Turbine Facilities Noise Issues Ontario*, 127 pages. Recuperado a partir de http://www.downloads.ene.gov.on.ca/envision/env_reg/er/documents/2008/NoiseReport.pdf
- RenewableUK (2013). *Wind Turbine Amplitude Modulation : Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect* 513 pages.
- Van Renterghem, T., Bockstael, A., De Weirt, V., y Botteldooren, D. (2013). «Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise», *Sci. Total Environ.*, **456-457**, 333-45. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.03.095
- Salmon, J. R., y Corby, S. J. (2012). *Noise Assessment report - K2 Wind Power Project* 141 pages. doi:10.2788/31776
- Savery, M. T., y Queensland, B. (2011). «The Case for Spectral Measurements of Ambient Noise Levels in the Assessment of Wind Farms Downsides to Broadband Noise Logging Case Study : Ambient Noise Study with Wind Data», *Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy*, 6.
- Scholes, W., y Parkin, P. (1967). «Effect of Source Height on Sound Propagation», *J. Sound Vib.*, **6**, 424.
- Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K. N., y Hill, E. M. (2011). «Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life», *Noise Health*, **13**, 333-9. doi:10.4103/1463-1741.85502
- Siponen, D., Napoli, C. Di, Eurasto, R., Uosukainen, S., y Nykänen, H. (2013). «The new good-practice-guide to help assessment of wind turbine noise in Finland», *Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US.*, 10.
- Smith, M., y Chiles, S. (2012). «Analysis Techniques for Wind Farm Sound Level Measurements», *Acoust. Aust.*, **40**, 51-56.
- Søndergaard, B. (2012). «Noise from Wind Turbines Measurement and prediction including low frequency noise», *Jt. Balt. Acoust. Meet., BNAM2012, Odense, Denmark*, 8.
- Søndergaard, L. S., Vej, N. J., y Aalborg, Ø. (2013). «Validation of WindPRO implementation of Nord2000 for low frequency wind turbine noise Agro Food Park 13 Thomas Sørensen», *Proc. 5 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US.*, 7.
- Tachibana, H. (2014). «Outcome of systematic research on wind turbine noise in Japan», *INTERNOISE 2014. Melbourne, Aust., Melbourne, Australia*, 10.
- Tachibana, H., y Lang, W. W. (2009). «Survey of Legislation , Regulations , and Guidelines for Control of Community Noise», *I-INCE Publ.*, **09**, 50. Recuperado a partir de <http://iince.org/files/publications/iince091.pdf>
- Taylor, J., Eastwick, C., Lawrence, C., y Wilson, R. (2013). «Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines», *Renew. Energy*, **55**, 120-127. doi:10.1016/j.renene.2012.11.031
- Teague, P., Leonard, A., Engineers, V., y Town, K. (2011). «Prediction , Validation , Assessment & Compliance of Wind Farm Noise in Australia», *Proc. 4 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Rome, Italy*, 19.

- The Finnish Ministry of The Environment (2012). *Tuulivoimarakentamisen suunnittelu* Ympäristöministeriö, p. 92.
- The New Zealand Standard Institute (2010). *NZS6808:2010 Acoustics - Wind Farm Noise* NZS, p. 50.
- Thorne, R., y Shepherd, D. (2011). «Wind turbine noise: why accurate prediction and measurement matter», Acoustics.Asn.Au, Recuperado a partir de http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p73.pdf. Recuperado a partir de http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p73.pdf
- Tickell, C. (2005). «Wind turbine assessment in Australian and comparison of software model predictions for Australian conditions and wind farms», Proc. 1st Int. Meet. Wind Turbine Noise. Berlin, Ger., 12.
- Tickell, C. (2006). «Wind Farm Noise Assessment in Australia and Model Comparison», Can. Acoust., **34**, 37-44.
- Tonin, R. (1985). «Estimating noise level from petrochemical plants, mines and industrial complexes», Acoust. Aust., **13**, 59-67.
- Tonin, R. (2012). «Sources of Wind Turbine Noise and Sound Propagation», Acoust. Aust., **40**, 20-27.
- Wagner, S., Bareiß, R., y Guidati, G. (1996). *Wind Turbine Noise*, Springer, Berlin, Germany, 1996.^a ed., 226 pages.
- Wang, L., Zander, a C., y Lenchine, V. V (2012). «Measurement of the Self-Noise of Microphone Wind Shields», 18th Aust. Fluid Mech. Conf., 7-10.
- WHO (1999). *WHO guidelines for community noise* (B. Berglund, T. Lindvall, y D. H. Schwela, Eds.) Noise Vib. Worldw., Vol. 31, 161 pages. doi:10.1260/0957456001497535
- WHO (2009). *Night Noise Guidelines for Europe* (C. Hurtley, Ed.) 184 pages. Recuperado a partir de http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf, Septiembre 2015
- World Wind Energy Association (2015). *World Wind Energy Association – Worldwide Wind Market*, WWEA website, Available: <http://www.wwindea.org/hyr2015/>, (date last viewed: 12-sep-15). Recuperado septiembre 12, 2015, a partir de <http://www.wwindea.org/hyr2015/>
- Xue, S., Xiang, Y., Weixiang, Z., Rui, L., Fen, T. H., Walker, B., y Acoustics, C. I. (2015). «Overview of IEEE standard development on amplitude modulation noise measurement», Proc. 6 th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glas. , Scotl., 9.

ANEXO I. GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

A continuación se incluyen las principales definiciones de los términos empleados en el presente estudio conforme a los documentos normativo:

- Absorción del terreno G: Parámetro que determinar el valor de la impedancia acústica del terreno (valores entre 0 y 1).
- Altura de buje: La altura en metros del punto central del rotor del aerogenerador al suelo.
- *Amplitude modulation* o efecto AM: Cambios en las características de emisión acústica de un aerogenerador, incrementando su carácter impulsivo y/o contenido en bajas frecuencias, que se atribuye al ruido de banda ancha causado por la rotación de la pala, particularmente en la zona de difusión del borde de la pala y el efecto *doppler* del movimiento de la pala hacia el receptor (Xue et al., 2015).
- Área de sensibilidad acústica: Ámbito territorial donde se pretende que exista una calidad acústica homogénea y que coincide con la denominada por la legislación básica como área acústica.
- Área urbanizada: Superficie del territorio que reúna los requisitos establecidos en la legislación urbanística aplicable para ser clasificada como suelo urbano o urbanizado y siempre que se encuentre ya integrada, de manera legal y efectiva, en la red de dotaciones y servicios propios de los núcleos de población. Se entenderá que así ocurre cuando las parcelas, estando o no edificadas, cuenten con las dotaciones y los servicios requeridos por la legislación urbanística o puedan llegar a contar con ellos sin otras obras que las de conexión a las instalaciones en funcionamiento.
- Área urbanizada existente: La superficie del territorio que sea área urbanizada antes de la entrada en vigor del Real Decreto 1367/07 (24 de octubre de 2007).
- Bin (Bines): Término anglosajón referido a un rango de velocidades de viento de $1\pm 0,5$ m/s de amplitud.
- CLC (CORINE LAND COVER): Base de datos de tipo vectorial de usos de suelos a escala europea obtenida a partir de imagen satélites (SPOT-4/5 and IRS P6 LISS III), que permite identificar las diferentes coberturas mediante un inventario de 44 clases diferentes.
- CNOSSOS-EU (Common NOise aSSessment methOdS – CNOSSOS-EU): Métodos comunes de evaluación del ruido para ruido de tráfico, ferrocarriles, aeropuertos e industria para ser empleados por los Estados Miembros en la realización de los mapas estratégicos implementados mediante la actualización del Anexo II de la Directiva END (Directiva 996/2015 de 19 de Mayo).

- Decibelio (dB): Término empleado para identificar el valor de 10 veces el logaritmo en base 10 del cociente entre dos variables correspondientes a intensidad, potencia o energía, referidas a una base de referencia.
- Diferencia energética: El proceso de sustracción de energía de un conjunto de niveles sonoros mediante la siguiente ecuación: $L = 10\log(10^{0.1L_1} - 10^{0.1L_2})$ donde L_1 es el minuendo, L_2 es el sustraendo y L es el nivel resultante de la diferencia energética.
- Estrategias de bajo ruido de aerogeneradores: Modos de funcionamiento de los aerogeneradores que reduce la potencia acústica del mismo, restringiendo la velocidad de rotación de la palas (sistemas de frenado o cambios en la orientación y diseño de las palas).
- GICA: Ley de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, aprobada por la Ley 7/2007 de Andalucía.
- Índice acústico: Magnitud física para describir la contaminación acústica que tiene relación con los efectos producidos por ésta.
- Infrasonido: Sonido por debajo del normal rango de frecuencia audible humano, por debajo de 20 Hz.
- Intervalo de medida: Duración de una medida singular (En el presente estudio, el intervalo de medida es de 1 minuto).
- ISO estándar: Norma estándar publicada por la Organización Nacional de Normalización (ISO).
- IOA – Institute of Acoustics: Cuerpo de profesionales en acústica, ruido y vibraciones de Reino Unido. Miembro de la Asociación Europea de Acústica (EAA), el Instituto Internacional de Ingeniería de Control de Ruidos (I-INCE) y miembro de la Comisión Internacional de Acústica (ICA).
- Nivel continuo equivalente (L_{AeqT}): Diez veces el logaritmo en base diez del cociente de la media al cuadrado del nivel de presión sonora referido a un intervalo de tiempo y el cuadrado de la presión sonora de referencia.

$$L_{AeqT} = 10\log\left(\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt/p_0^2\right)$$

○ Donde:

- T es el periodo de medición, $T=t_2-t_1$
- L_{AeqT} es el nivel continuo equivalente del periodo T .
- $p^2(t)$ es el cuadrado del nivel de presión sonora ponderado A en función del tiempo.
- p_0 es la presión de referencia (20 μ Pa)

- Nivel Percentil $L_n(t)$: El nivel sonoro que es igualado o excedido durante el n% del tiempo de medida, t.
- Nivel de potencia sonora, L_w : Diez veces el logaritmo en base 10 del cociente entre la potencia sonora y la potencia sonora de referencia: $L_w = 10\log\left(\frac{W}{W_0}\right)$, donde W es la potencia sonora y W_0 la potencia sonora de referencia (10^{-12} W).
- Nuevo desarrollo urbanístico: Superficie del territorio en situación de suelo rural para la que los instrumentos de ordenación territorial y urbanística prevén o permiten su paso a la situación de suelo urbanizado, mediante las correspondientes actuaciones de urbanización, así como la de suelo ya urbanizado que esté sometido a actuaciones de reforma o renovación de la urbanización.
- Objetivo de calidad acústica: Conjunto de requisitos que, en relación con la contaminación acústica, deben cumplirse en un momento dado en un espacio determinado, incluyendo los valores límite de inmisión o de emisión.
- Pieza habitable (según Decreto 6/2012): Tendrá la consideración de pieza habitable toda aquella que reúna las condiciones para desarrollar en ella actividades que impliquen la permanencia prolongada de personas.
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- RPCCA: Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica de Andalucía, actualmente aprobado por el Decreto 6/2012.
- Ruido impulsivo: Sonido eventual que tiene un nivel de pico de corta duración, por lo general menos de 100 milisegundos.
- Ruido de baja frecuencia: Sonido por debajo de 200 Hz.
- Suma energética: El proceso de suma de energía de un conjunto de niveles sonoros mediante la siguiente ecuación: $L = 10\log(10^{0.1L_1} + 10^{0.1L_2} + \dots + 10^{0.1L_n})$ donde N es el número de muestras; L_1, L_2, \dots, L_n son los niveles sonoros y L es el nivel resultante de la suma energética.
- Tercios/bandas de octava: Bandas de frecuencia de acuerdo con la norma IEC61260.
- Valor límite de inmisión: Valor del índice de inmisión que no debe ser sobrepasado en un lugar durante un determinado período de tiempo, medido con arreglo a unas condiciones establecidas.
- Velocidad de arranque: Velocidad de viento en la que el aerogenerador comienza la producción, habitualmente del orden de 3-4 m/s.
- Velocidad de viento w_{10} : Velocidad de viento expresada en m/s valorada o referenciada a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo.
- Velocidad de viento w_b : Velocidad de viento expresada en m/s valorada o referenciada a altura de buje. En nuestro estudio, 78 metros sobre el nivel del suelo.

- Zona tranquila en campo abierto: Espacios situados en zonas tranquilas sin aglomeración no perturbados por el ruido procedente del tráfico, las actividades industriales o las actividades deportivo-recreativas.

ANEXO II. RESULTADOS DE MODELIZACIONES POR BINES DE VIENTO

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G=0

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	37,7	42,1	46,9	50,8	51,2	51,3	51,3	51,3
CONCAWE	41,9	47,0	51,8	55,7	56,1	56,2	56,2	56,2
NORD2000	37,7	42,2	47,0	51,0	51,5	51,5	51,5	51,5
CNOSSOS	36,3	40,8	45,6	49,5	49,9	49,9	49,9	49,9
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	1,4	2,1	0,9	1,8	0,8	1,2	2,0	1,9
CONCAWE	5,6	7,0	5,8	6,7	5,7	6,1	6,9	6,8
NORD2000	1,4	2,2	1,0	2,0	1,1	1,4	2,2	2,1
CNOSSOS	0,0	0,8	-0,4	0,5	-0,5	-0,2	0,6	0,5
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	37,8	42,2	43,2	46,9	47,3	47,3	-	-
CONCAWE	42,1	47,2	49,4	53,1	53,5	53,5	-	-
NORD2000	37,9	42,4	43,8	47,6	48,0	48,1	-	-
CNOSSOS	36,3	40,8	40,8	44,5	44,9	44,9	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	2,4	2,2	0,9	3,7	3,5	3,3	-	-
CONCAWE	6,7	7,2	7,1	9,8	9,6	9,5	-	-
NORD2000	2,5	2,4	1,5	4,4	4,2	4,1	-	-
CNOSSOS	0,9	0,8	-1,5	1,3	1,1	0,9	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			2,0			1,0		
CONCAWE			7,2			1,4		
NORD2000			2,3			1,1		
CNOSSOS			0,3			0,8		
PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	38,0	42,5	47,3	51,2	51,6	51,6	51,6	51,6
CONCAWE	40,9	45,6	50,4	54,3	54,9	55,1	55,9	55,9
NORD2000	37,8	42,3	47,1	51,0	51,3	51,3	51,3	51,4
CNOSSOS	36,4	40,9	45,7	49,6	50,0	50,0	50,0	50,0
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	1,7	2,5	1,3	2,2	1,2	1,5	2,3	2,2
CONCAWE	4,6	5,6	4,4	5,3	4,5	5,0	6,7	6,6
NORD2000	1,5	2,3	1,1	2,0	0,9	1,2	2,0	2,0
CNOSSOS	0,1	0,9	-0,3	0,6	-0,4	-0,1	0,7	0,6
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	38,1	42,6	47,4	49,4	49,6	49,6	49,6	-
CONCAWE	41,0	45,7	50,6	53,2	53,9	53,9	53,9	-
NORD2000	37,8	42,3	47,0	49,2	49,4	49,5	49,5	-
CNOSSOS	36,4	40,9	45,7	47,3	47,5	47,5	47,5	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	3,7	5,1	2,0	3,2	3,2	3,3	3,5	-
CONCAWE	6,7	8,2	5,1	7,0	7,5	7,5	7,9	-
NORD2000	3,4	4,8	1,6	3,0	3,0	3,2	3,4	-
CNOSSOS	2,0	3,4	0,3	1,1	1,1	1,2	1,4	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			2,6			1,1		
CONCAWE			6,2			1,3		
NORD2000			2,4			1,1		
CNOSSOS			0,8			1,0		

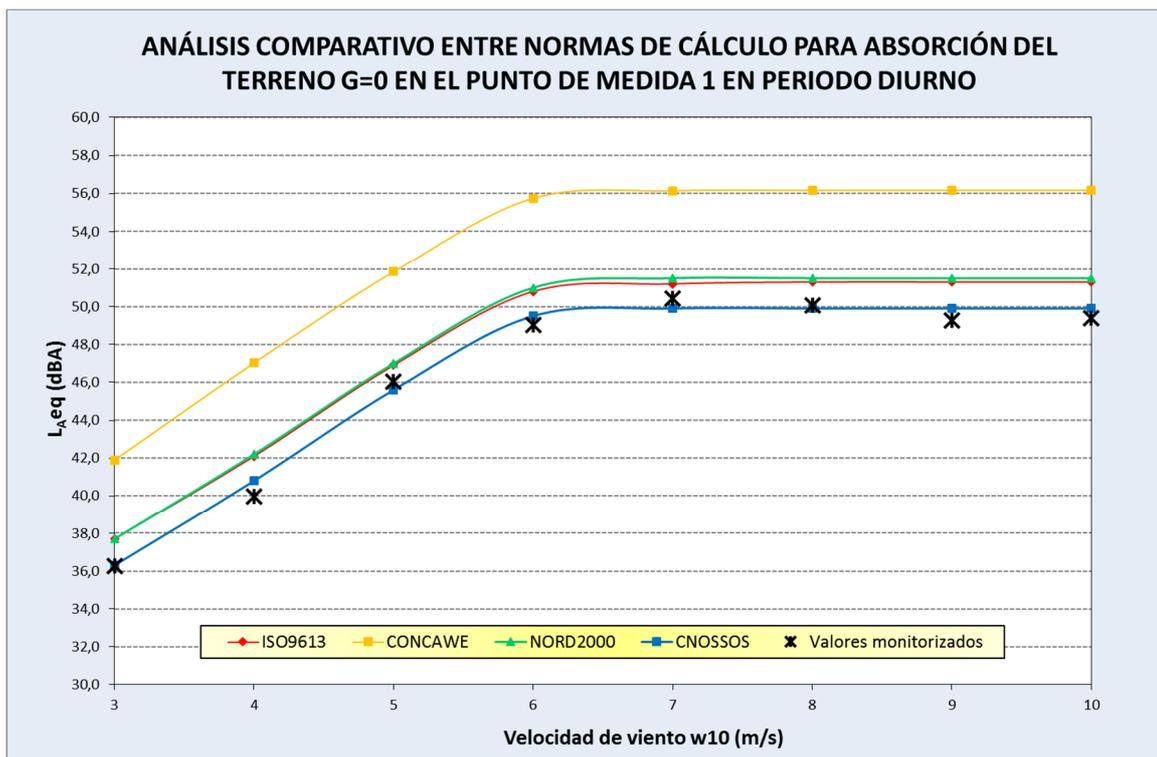


Ilustración 172. Resultados de los modelos para el punto de medida 1 para absorción del terreno de G=0 y periodo diurno

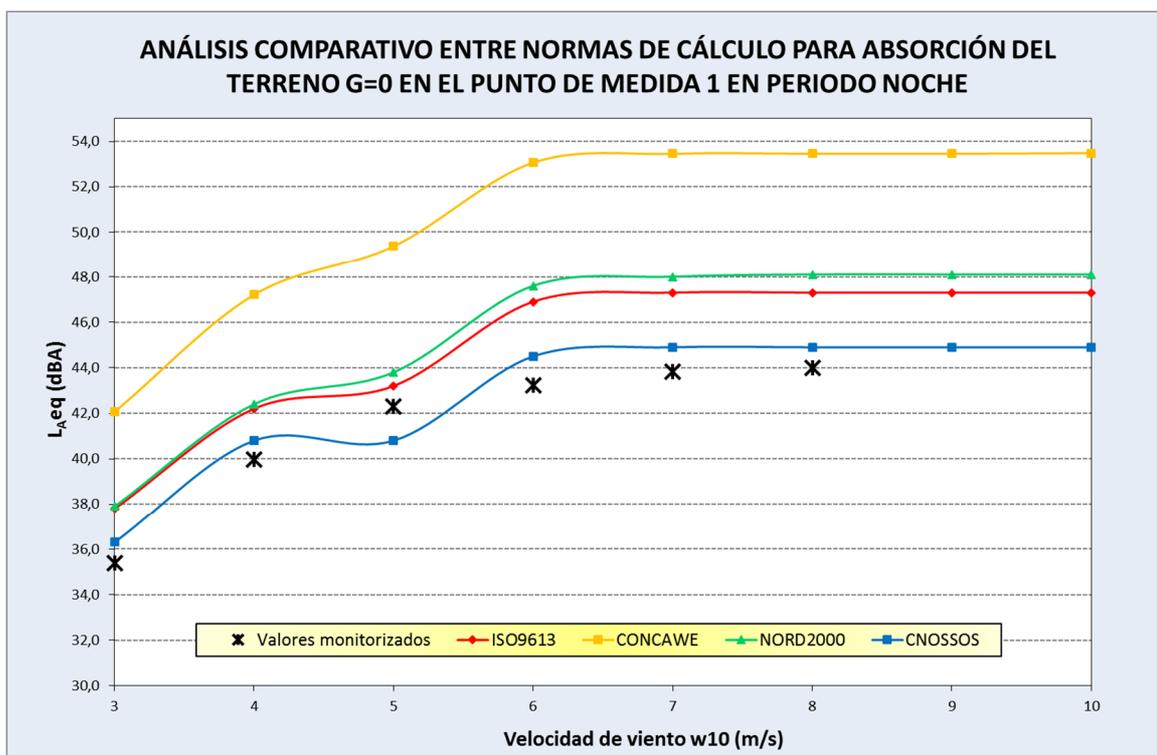


Ilustración 173. Resultados de los modelos para el punto de medida 1 para absorción del terreno de G=0 y periodo noche

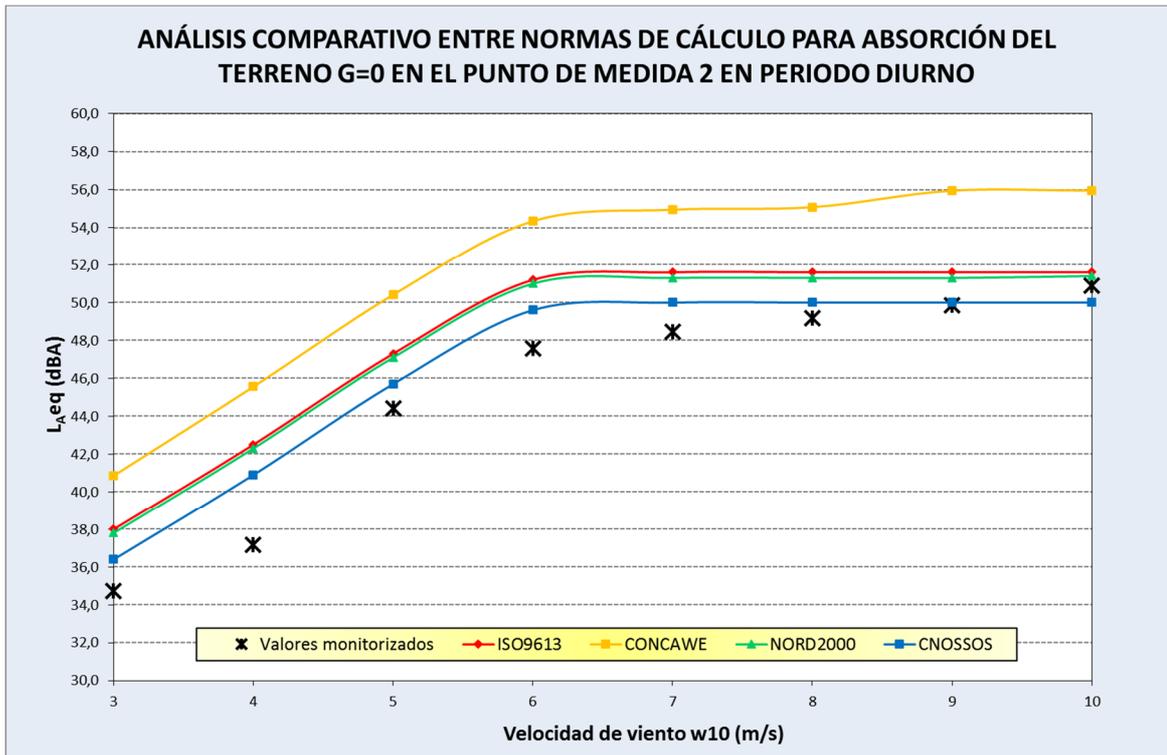


Ilustración 174. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno de G=0 y periodo diurno

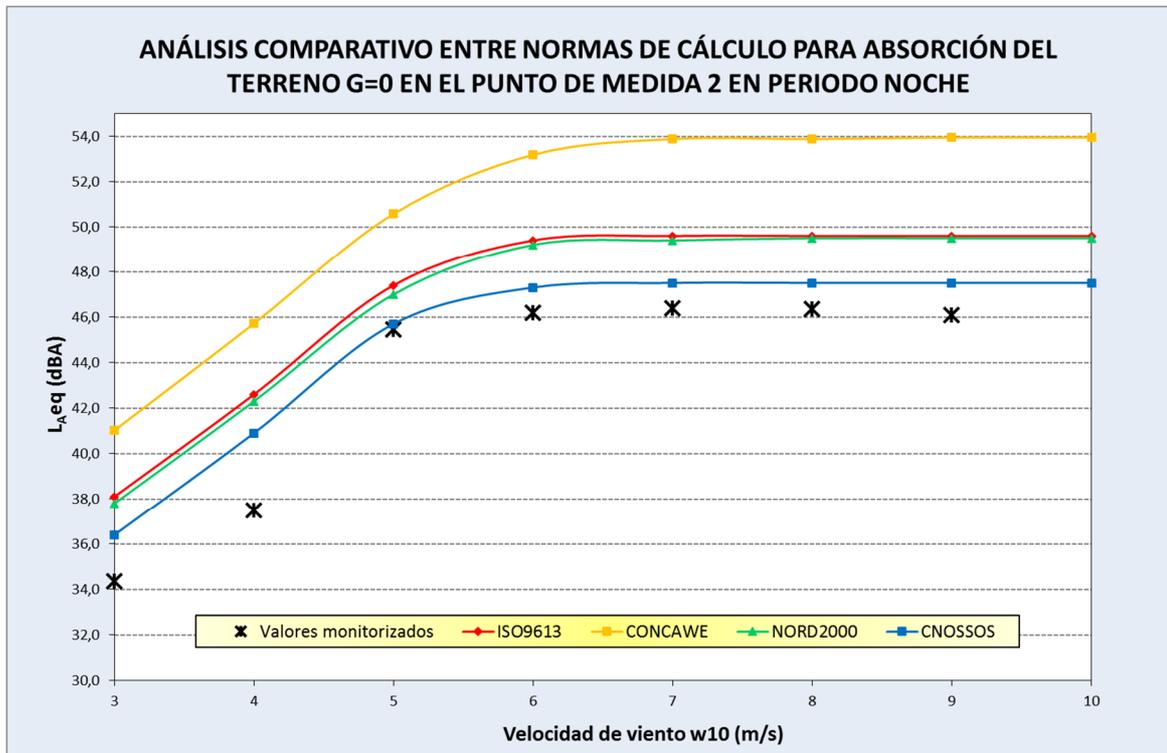


Ilustración 175. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno de G=0 y periodo noche

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G=0 Y LIMITACIÓN DE ATENUACIÓN A_{BAR}

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	37,9	42,4	47,2	51,1	51,5	51,5	51,5	51,5
CONCAWE	42,0	47,1	51,9	55,8	56,2	56,3	56,3	56,3
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	1,6	2,4	1,1	2,0	1,0	1,4	2,2	2,1
CONCAWE	5,7	7,1	5,9	6,8	5,8	6,2	7,0	6,9
Periodo noche								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	38,0	42,5	43,7	47,4	47,7	47,8	-	-
CONCAWE	42,2	47,3	49,6	53,3	53,7	53,7	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	2,6	2,5	1,4	4,1	3,9	3,8	-	-
CONCAWE	6,8	7,4	7,3	10,0	9,8	9,7	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			2,3			1,0		
CONCAWE			7,3			1,5		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	39,4	43,8	48,7	52,5	52,9	53,0	53,0	53,0
CONCAWE	41,9	46,6	51,4	55,4	55,9	56,0	56,8	56,8
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	3,1	3,9	2,6	3,5	2,5	2,9	3,7	3,6
CONCAWE	5,6	6,6	5,4	6,3	5,5	6,0	7,5	7,4
Periodo noche								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	39,5	44,0	48,7	51,1	51,4	51,4	51,4	-
CONCAWE	42,0	46,7	51,6	54,5	55,1	55,1	55,2	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	5,1	6,5	3,3	4,9	5,0	5,0	5,3	-
CONCAWE	7,7	9,2	6,1	8,3	8,7	8,8	9,1	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			4,1			1,2		
CONCAWE			7,2			1,4		

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G=0 Y METODOLOGÍA IOA

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	37,9	42,4	47,2	51,1	51,5	51,5	51,5	51,5
CONCAWE	42,1	47,2	52,0	55,9	56,3	56,3	56,3	56,3
NORD2000	37,7	42,3	47,1	51,0	51,6	51,6	51,6	51,6
CNOSSOS	36,3	40,8	45,6	49,5	49,9	49,9	49,9	49,9
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	1,6	2,4	1,2	2,0	1,1	1,4	2,2	2,1
CONCAWE	5,8	7,2	6,0	6,9	5,9	6,3	7,0	6,9
NORD2000	1,4	2,3	1,1	2,0	1,2	1,5	2,3	2,2
CNOSSOS	0,0	0,8	-0,4	0,5	-0,5	-0,2	0,6	0,5
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	38,0	42,5	43,8	47,4	47,8	47,8	-	-
CONCAWE	42,2	47,4	49,7	53,4	53,7	53,7	-	-
NORD2000	37,9	42,7	44,4	48,2	48,7	48,7	-	-
CNOSSOS	36,3	40,8	40,9	44,6	45,0	45,0	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	2,6	2,5	1,5	4,2	4,0	3,9	-	-
CONCAWE	6,8	7,4	7,4	10,1	9,9	9,8	-	-
NORD2000	2,5	2,7	2,1	5,0	4,9	4,7	-	-
CNOSSOS	0,9	0,8	-1,4	1,4	1,2	1,0	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			2,3			1,0		
CONCAWE			7,4			1,5		
NORD2000			2,6			1,3		
CNOSSOS			0,4			0,8		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	39,4	43,9	48,7	52,6	53,0	53,0	53,0	53,0
CONCAWE	41,9	46,6	51,4	55,4	56,0	56,1	56,8	56,8
NORD2000	37,8	42,3	47,2	51,0	51,4	51,4	51,4	51,4
CNOSSOS	36,4	40,9	45,7	49,6	50,0	50,0	50,0	50,0
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	3,1	3,9	2,6	3,5	2,6	2,9	3,7	3,6
CONCAWE	5,6	6,6	5,4	6,4	5,6	6,0	7,5	7,4
NORD2000	1,5	2,3	1,2	2,0	1,0	1,3	2,1	2,0
CNOSSOS	0,1	0,9	-0,3	0,6	-0,4	-0,1	0,7	0,6
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	39,5	44,0	48,8	51,1	51,4	51,4	51,4	-
CONCAWE	42,1	46,8	51,6	54,5	55,1	55,2	55,2	-
NORD2000	37,8	42,3	47,1	49,2	49,7	49,7	49,7	-
CNOSSOS	36,4	40,9	45,7	47,3	47,5	47,5	47,5	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	5,1	6,5	3,3	4,9	5,0	5,1	5,3	-
CONCAWE	7,7	9,3	6,2	8,3	8,8	8,8	9,1	-
NORD2000	3,4	4,8	1,7	3,0	3,3	3,4	3,6	-
CNOSSOS	2,0	3,4	0,3	1,1	1,1	1,2	1,4	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			4,1			1,2		
CONCAWE			7,2			1,4		
NORD2000			2,4			1,1		
CNOSSOS			0,8			1,0		

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G=0,5

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	35,8	40,3	45,1	49,0	49,4	49,4	49,4	49,4
CONCAWE	37,7	42,2	47,0	50,9	51,3	51,3	51,3	51,3
NORD2000	37,2	41,7	46,5	50,5	50,9	51,0	51,0	51,0
CNOSSOS	34,8	39,3	44,1	48,0	48,4	48,4	48,4	48,4
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,5	0,3	-0,9	0,0	-1,0	-0,7	0,1	0,0
CONCAWE	1,4	2,2	1,0	1,9	0,9	1,3	2,0	1,9
NORD2000	0,9	1,7	0,5	1,5	0,5	0,9	1,7	1,6
CNOSSOS	-1,5	-0,7	-1,9	-1,0	-2,0	-1,7	-0,9	-1,0
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	35,9	40,4	41,3	45,0	45,4	45,4	-	-
CONCAWE	37,8	42,3	43,0	46,7	47,1	47,1	-	-
NORD2000	37,4	41,9	43,3	47,0	47,4	47,5	-	-
CNOSSOS	34,8	39,3	39,3	43,0	43,4	43,4	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	0,5	0,4	-1,0	1,8	1,6	1,4	-	-
CONCAWE	2,4	2,4	0,7	3,5	3,3	3,1	-	-
NORD2000	2,0	1,9	1,0	3,8	3,6	3,5	-	-
CNOSSOS	-0,6	-0,7	-3,0	-0,2	-0,4	-0,6	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			0,1			0,9		
CONCAWE			2,0			0,9		
NORD2000			1,8			1,1		
CNOSSOS			-1,2			0,8		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	34,3	38,8	43,6	47,5	47,9	47,9	47,9	47,9
CONCAWE	38,1	42,6	47,4	51,3	51,8	51,8	51,8	51,8
NORD2000	36,7	41,2	46,1	50,0	50,5	50,5	50,5	50,5
CNOSSOS	34,9	39,4	44,2	48,1	48,5	48,5	48,5	48,5
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-2,0	-1,2	-2,4	-1,5	-2,5	-2,2	-1,4	-1,5
CONCAWE	1,9	2,7	1,4	2,3	1,3	1,7	2,5	2,4
NORD2000	0,4	1,2	0,1	1,0	0,1	0,4	1,2	1,1
CNOSSOS	-1,4	-0,6	-1,8	-0,9	-1,9	-1,6	-0,8	-0,9
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	34,4	38,9	43,6	45,5	45,7	45,7	45,7	-
CONCAWE	38,3	42,8	47,5	49,5	49,7	49,7	49,7	-
NORD2000	36,9	41,4	46,2	48,2	48,4	48,4	48,4	-
CNOSSOS	34,9	39,4	44,2	45,8	46,0	46,0	46,0	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	,0	1,4	-1,8	-,7	-,7	-,6	-,4	-
CONCAWE	3,9	5,3	2,1	3,3	3,3	3,4	3,6	-
NORD2000	2,5	3,9	,8	2,0	2,0	2,1	2,3	-
CNOSSOS	,5	1,9	-1,2	-,4	-,4	-,3	-,1	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-1,2			1,0		
CONCAWE			2,7			1,1		
NORD2000			1,4			1,1		
CNOSSOS			-0,7			1,0		

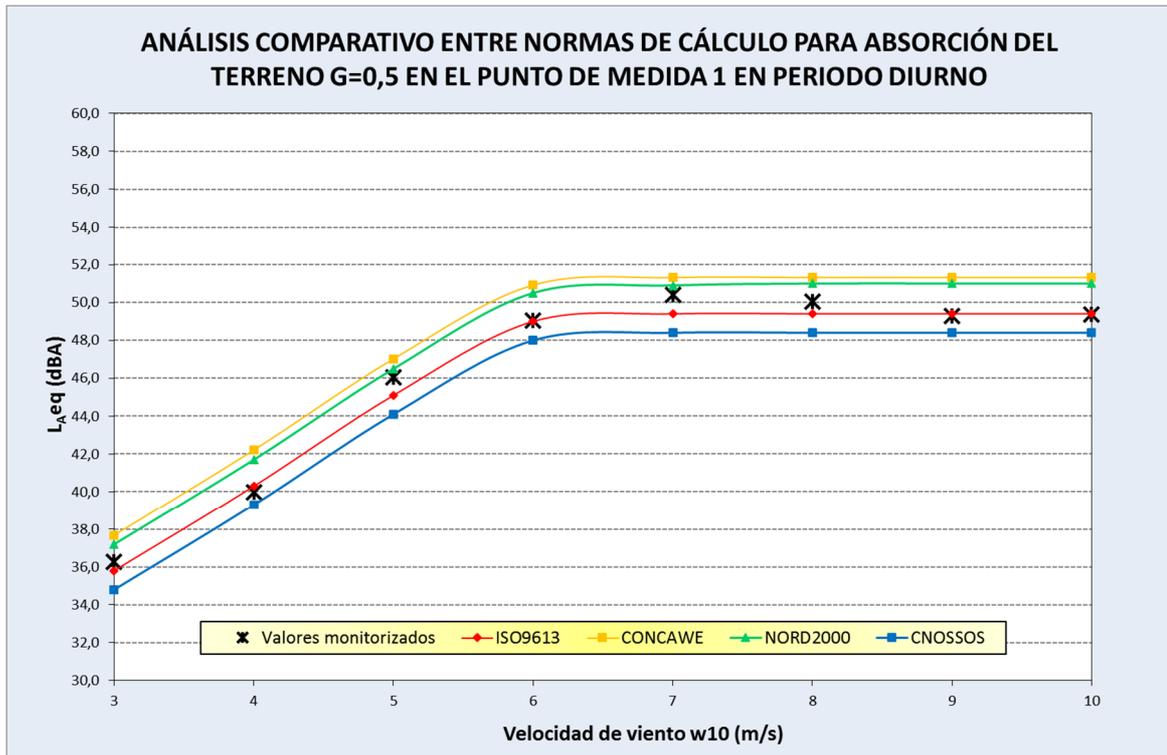


Ilustración 176. Resultados de los modelos para el punto de medida 1 para absorción del terreno de G=0,5 y periodo diurno

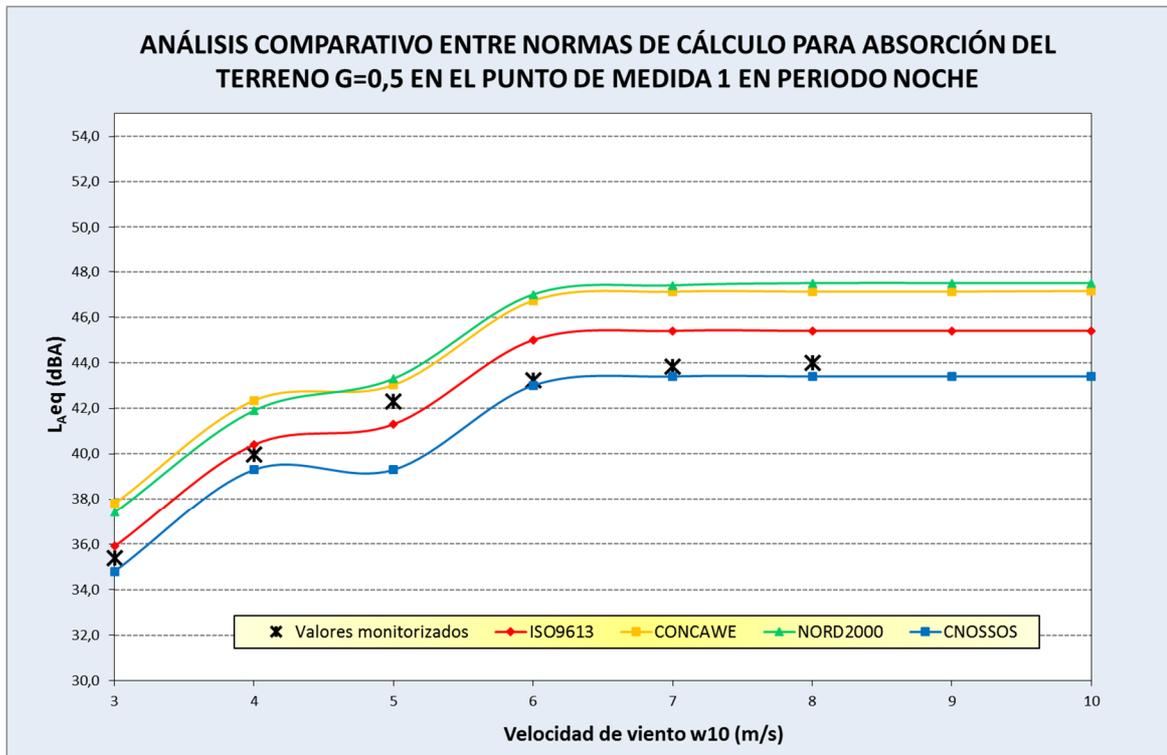


Ilustración 177. Resultados de los modelos para el punto de medida 1 para absorción del terreno de G=0,5 y periodo noche

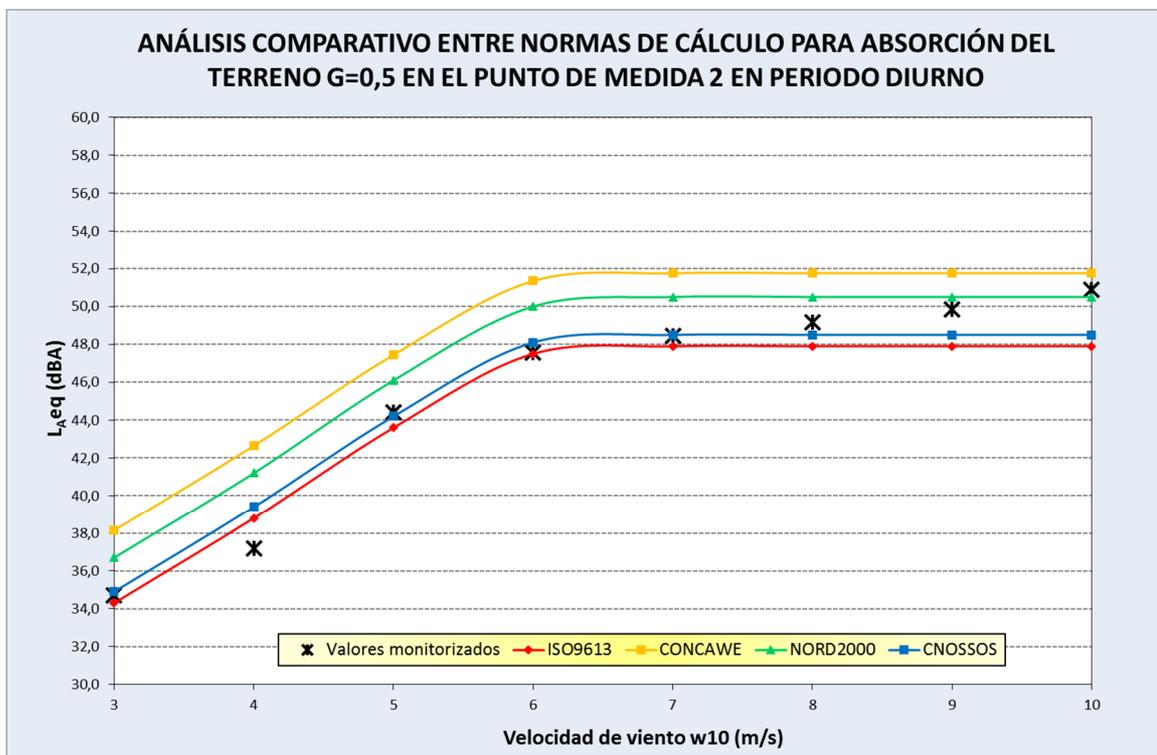


Ilustración 178. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno de G=0,5 y periodo diurno

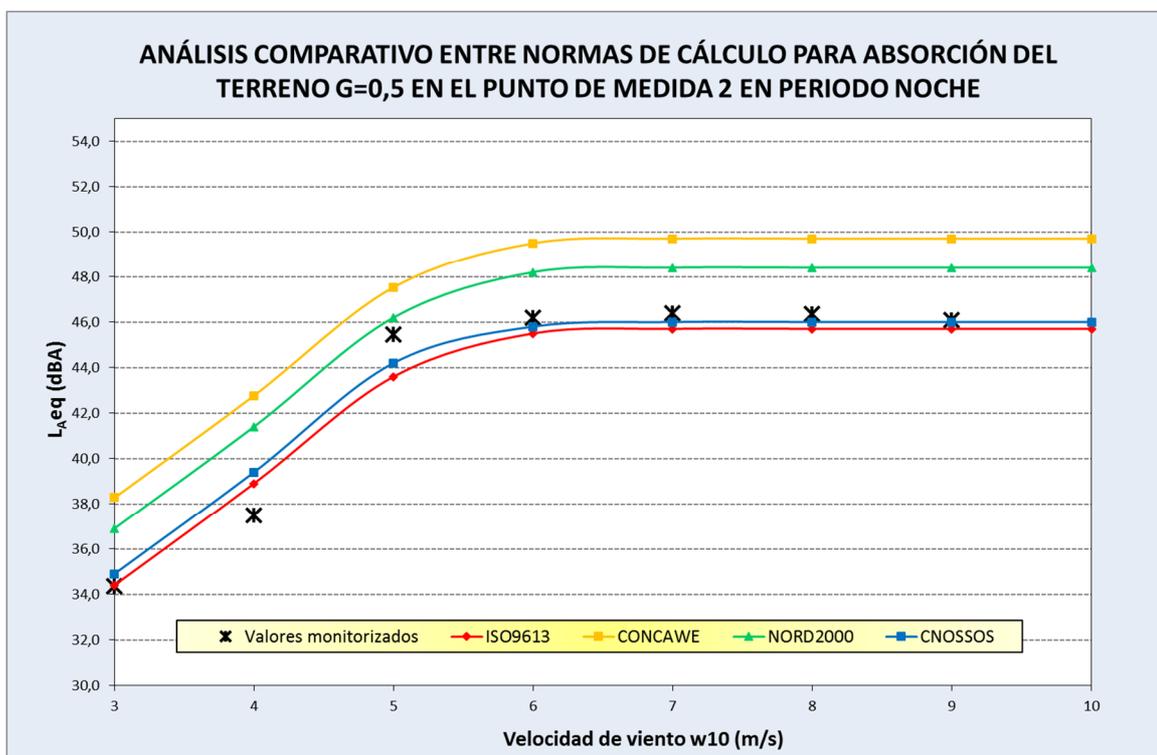


Ilustración 179. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno de G=0,5 y periodo noche

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN $G=0,5$ Y LIMITACIÓN DE ATENUACIÓN A_{BAR}

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w_{10} (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	36,0	40,5	45,3	49,2	49,6	49,6	49,6	49,6
CONCAWE	37,7	42,3	47,1	51,0	51,4	51,4	51,4	51,4
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,2	0,5	-0,7	0,2	-0,8	-0,4	0,3	0,3
CONCAWE	1,4	2,3	1,0	1,9	1,0	1,3	2,1	2,0
Periodo noche								
Velocidad de viento w_{10} (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	36,1	40,6	41,8	45,4	45,8	45,8	-	-
CONCAWE	37,8	42,4	43,2	46,9	47,3	47,3	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	0,7	0,7	-0,5	2,2	2,0	1,8	-	-
CONCAWE	2,4	2,4	0,9	3,7	3,5	3,3	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			0,4			1,0		
CONCAWE			2,1			0,9		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w_{10} (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	35,5	40,0	44,8	48,7	49,1	49,1	49,1	49,1
CONCAWE	38,9	43,4	48,2	52,1	52,6	52,6	52,6	52,6
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,8	0,0	-1,2	-0,4	-1,3	-1,0	-0,2	-0,3
CONCAWE	2,7	3,5	2,2	3,1	2,1	2,5	3,3	3,2
Periodo noche								
Velocidad de viento w_{10} (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	35,6	40,1	44,9	47,2	47,4	47,4	47,4	-
CONCAWE	39,1	43,6	48,4	50,6	50,8	50,8	50,8	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	1,3	2,6	-0,6	1,0	1,1	1,1	1,3	-
CONCAWE	4,7	6,1	2,9	4,4	4,4	4,5	4,7	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			0,2			1,1		
CONCAWE			3,6			1,1		

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G=0,5 Y METODOLOGÍA IOA

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	36,1	40,6	45,4	49,3	49,7	49,7	49,7	49,7
CONCAWE	37,8	42,4	47,2	51,1	51,5	51,5	51,5	51,5
NORD2000	37,2	41,8	46,7	50,6	51,1	51,1	51,1	51,1
CNOSSOS	34,9	39,3	44,1	48,0	48,4	48,4	48,4	48,4
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,2	0,6	-0,6	0,3	-0,7	-0,3	0,4	0,3
CONCAWE	1,5	2,4	1,1	2,0	1,0	1,4	2,2	2,1
NORD2000	0,9	1,8	0,7	1,6	0,7	1,0	1,8	1,7
CNOSSOS	-1,4	-0,7	-1,9	-1,0	-2,0	-1,7	-0,9	-1,0
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	36,2	40,7	42,0	45,6	46,0	46,0	-	-
CONCAWE	37,9	42,5	43,4	47,1	47,5	47,5	-	-
NORD2000	37,4	42,3	44,2	47,9	48,7	48,4	-	-
CNOSSOS	34,8	39,3	39,5	43,2	43,6	43,6	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	0,8	0,8	-0,3	2,4	2,2	2,1	-	-
CONCAWE	2,5	2,5	1,1	3,8	3,6	3,5	-	-
NORD2000	2,0	2,3	1,9	4,7	4,9	4,4	-	-
CNOSSOS	-0,6	-0,7	-2,8	0,0	-0,2	-0,4	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			0,6			1,0		
CONCAWE			2,2			0,9		
NORD2000			2,2			1,4		
CNOSSOS			-1,1			0,8		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	35,5	40,0	44,8	48,7	49,1	49,1	49,1	49,1
CONCAWE	39,0	43,5	48,3	52,2	52,6	52,6	52,6	52,6
NORD2000	36,7	41,2	46,1	50,0	50,5	50,5	50,5	50,5
CNOSSOS	34,9	39,4	44,2	48,1	48,5	48,5	48,5	48,5
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,7	0,0	-1,2	-0,3	-1,3	-0,9	-0,2	-0,2
CONCAWE	2,7	3,5	2,3	3,2	2,2	2,6	3,3	3,2
NORD2000	0,4	1,2	0,1	1,0	0,1	0,4	1,2	1,1
CNOSSOS	-1,4	-0,6	-1,8	-0,9	-1,9	-1,6	-0,8	-0,9
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	35,6	40,1	44,9	47,2	47,5	47,5	47,5	-
CONCAWE	39,1	43,6	48,4	50,7	50,9	50,9	50,9	-
NORD2000	36,9	41,4	46,2	48,2	48,5	48,4	48,4	-
CNOSSOS	34,9	39,4	44,2	45,8	46,0	46,0	46,0	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	1,3	2,6	-0,5	1,0	1,1	1,1	1,4	-
CONCAWE	4,8	6,1	3,0	4,5	4,5	4,6	4,8	-
NORD2000	2,5	3,9	0,8	2,0	2,1	2,1	2,3	-
CNOSSOS	0,5	1,9	-1,2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			0,2			1,1		
CONCAWE			3,7			1,1		
NORD2000			1,4			1,1		
CNOSSOS			-0,7			1,0		

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G CONFORME A CLC

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	35,1	39,6	44,4	48,3	48,7	48,7	48,7	48,7
CONCAWE	37,7	42,2	47,0	50,9	51,3	51,3	51,3	51,3
NORD2000	37,0	41,5	46,4	50,3	50,7	50,8	50,8	50,8
CNOSSOS	34,1	38,6	43,4	47,3	47,7	47,7	47,7	47,7
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-1,2	-0,4	-1,6	-0,7	-1,7	-1,4	-0,6	-0,7
CONCAWE	1,4	2,2	1,0	1,9	0,9	1,3	2,0	1,9
NORD2000	0,7	1,5	0,4	1,3	0,3	0,7	1,5	1,4
CNOSSOS	-2,2	-1,4	-2,6	-1,7	-2,7	-2,4	-1,6	-1,7
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	35,2	39,7	40,5	44,2	44,6	44,6	-	-
CONCAWE	37,8	42,3	43,0	46,7	47,1	47,1	-	-
NORD2000	37,2	41,7	43,1	46,8	47,1	47,2	-	-
CNOSSOS	34,1	38,6	38,5	42,2	42,6	42,6	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,2	-0,3	-1,8	1,0	0,8	0,6	-	-
CONCAWE	2,4	2,4	0,7	3,5	3,3	3,1	-	-
NORD2000	1,8	1,7	0,8	3,6	3,3	3,2	-	-
CNOSSOS	-1,3	-1,4	-3,8	-1,0	-1,2	-1,4	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-0,6			0,9		
CONCAWE			2,0			0,9		
NORD2000			1,6			1,1		
CNOSSOS			-1,9			0,8		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	32,8	37,3	42,1	46,0	46,4	46,4	46,4	46,4
CONCAWE	38,1	42,6	47,4	51,3	51,8	51,8	51,8	51,8
NORD2000	36,3	40,8	45,7	49,6	50,0	50,1	50,1	50,1
CNOSSOS	33,8	38,3	43,1	47,0	47,4	47,4	47,4	47,4
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-3,5	-2,7	-3,9	-3,0	-4,0	-3,7	-2,9	-3,0
CONCAWE	1,9	2,7	1,4	2,3	1,3	1,7	2,5	2,4
NORD2000	0,0	0,8	-0,3	0,6	-0,4	0,0	0,8	0,7
CNOSSOS	-2,5	-1,7	-2,9	-2,0	-3,0	-2,7	-1,9	-2,0
Periodo noche								
Velocidad de viento w10 (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	32,9	37,4	42,1	44,0	44,2	44,2	44,2	-
CONCAWE	38,3	42,8	47,5	49,5	49,7	49,7	49,7	-
NORD2000	36,5	41,0	45,8	47,7	47,8	47,9	47,9	-
CNOSSOS	33,8	38,3	43,1	44,8	45,0	45,0	45,0	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-1,5	-0,1	-3,3	-2,2	-2,2	-2,1	-1,9	-
CONCAWE	3,9	5,3	2,1	3,3	3,3	3,4	3,6	-
NORD2000	2,1	3,5	0,4	1,5	1,4	1,6	1,8	-
CNOSSOS	-0,6	0,8	-2,3	-1,4	-1,4	-1,3	-1,1	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-2,7			1,0		
CONCAWE			2,7			1,1		
NORD2000			1,0			1,0		
CNOSSOS			-1,7			1,0		

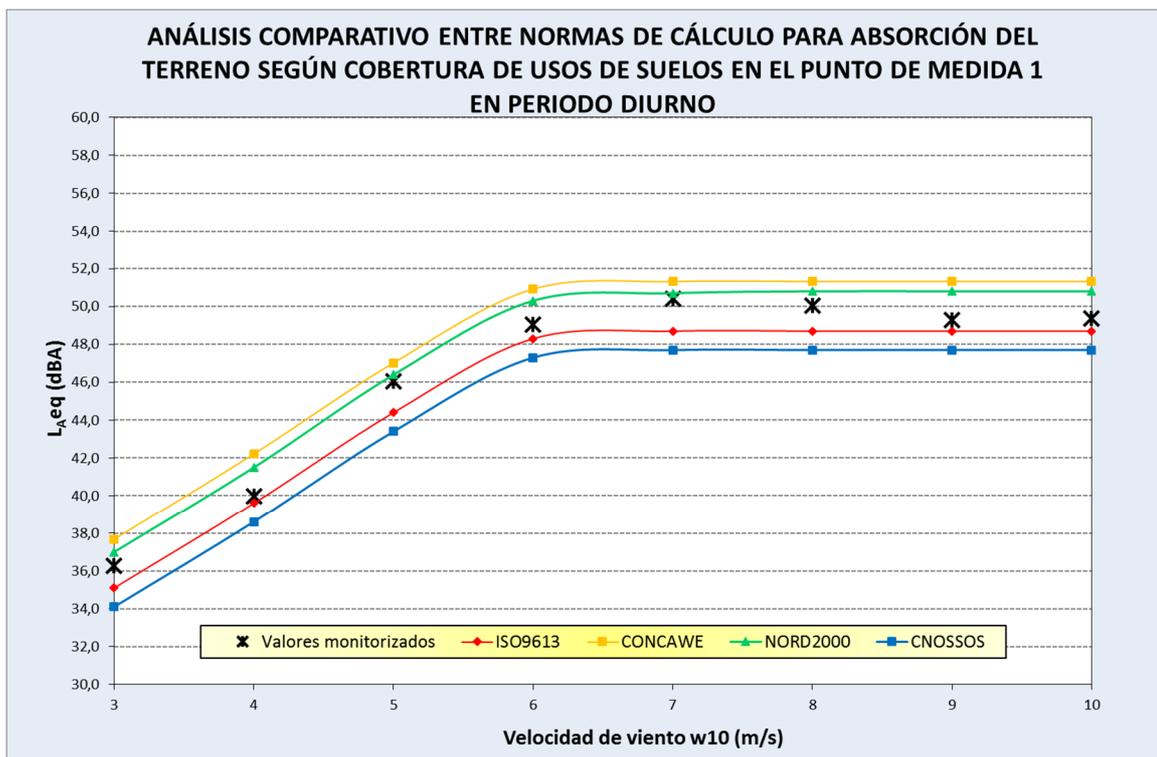


Ilustración 180. Resultados de los modelos para el punto de medida 1 para absorción del terreno G según CLC y periodo diurno

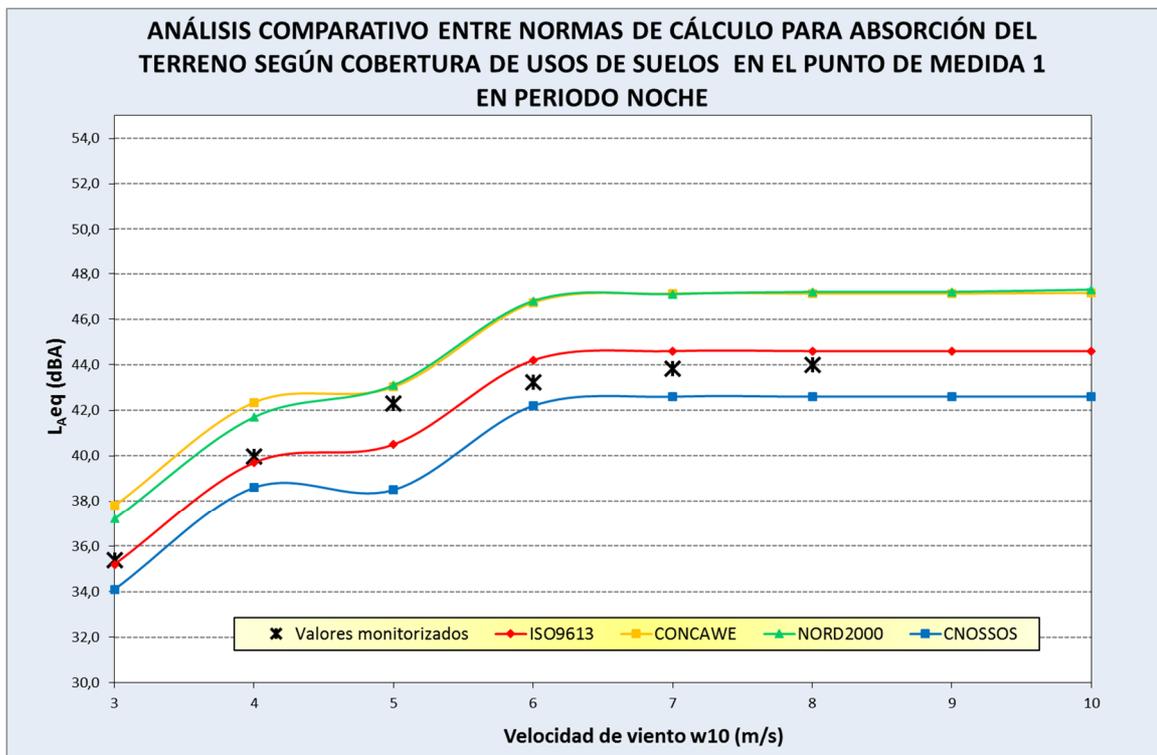


Ilustración 181. Resultados de los modelos para el punto de medida 1 para absorción del terreno G según CLC y periodo noche

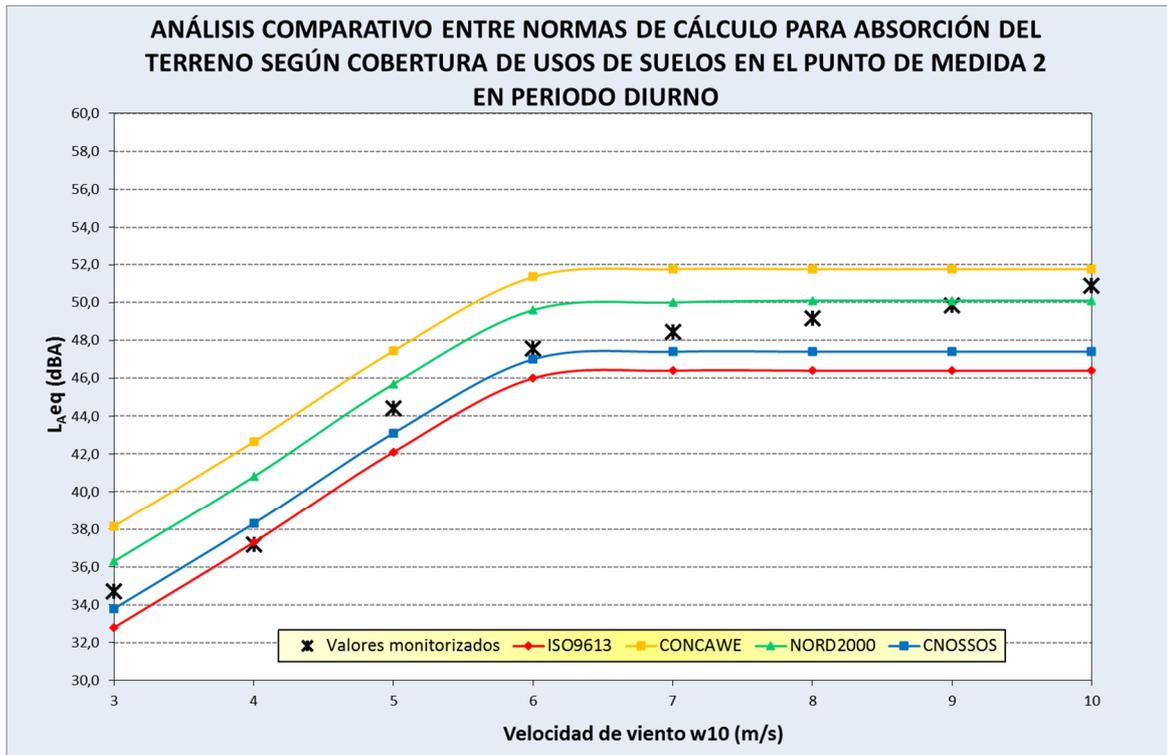


Ilustración 182. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno G según CLC y periodo diurno

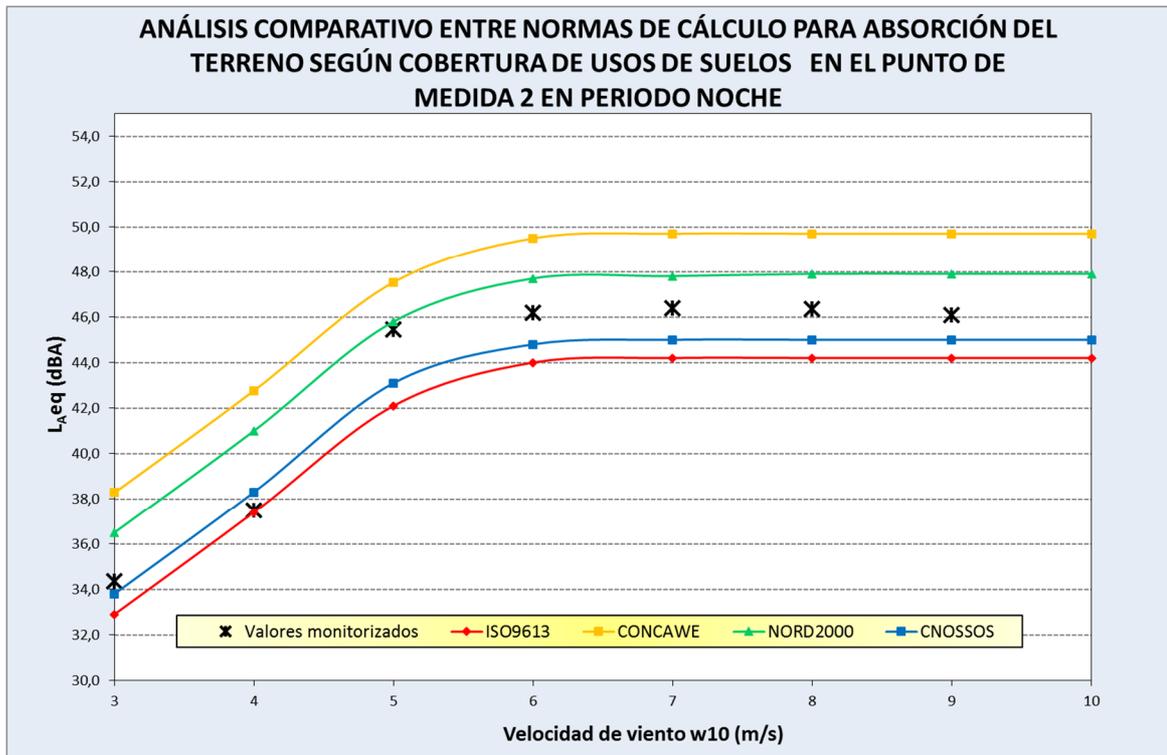


Ilustración 183. Resultados de los modelos para el punto de medida 2 para absorción del terreno G según CLC y periodo noche

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G CONFORME A CLC Y LIMITACIÓN DE ATENUACIÓN A_{BAR}

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	35,3	39,8	44,6	48,5	48,9	48,9	48,9	48,9
CONCAWE	37,7	42,3	47,1	51,0	51,4	51,4	51,4	51,4
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-1,0	-0,2	-1,5	-0,6	-1,5	-1,2	-0,4	-0,5
CONCAWE	1,4	2,3	1,0	1,9	1,0	1,3	2,1	2,0
Periodo noche								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	35,4	39,9	40,9	44,6	45,0	45,0	-	-
CONCAWE	37,8	42,4	43,2	46,9	47,3	47,3	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	0,0	-0,1	-1,4	1,4	1,2	1,0	-	-
CONCAWE	2,4	2,4	0,9	3,7	3,5	3,3	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-0,3			1,0		
CONCAWE			2,1			0,9		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	33,9	38,4	43,2	47,1	47,5	47,5	47,5	47,5
CONCAWE	38,9	43,4	48,2	52,1	52,6	52,6	52,6	52,6
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-2,3	-1,6	-2,8	-1,9	-2,9	-2,5	-1,8	-1,8
CONCAWE	2,7	3,5	2,2	3,1	2,1	2,5	3,3	3,2
Periodo noche								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	34,0	38,5	43,3	45,6	45,8	45,8	45,8	-
CONCAWE	39,1	43,6	48,4	50,6	50,8	50,8	50,8	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,3	1,0	-2,1	-0,6	-0,6	-0,5	-0,3	-
CONCAWE	4,7	6,1	2,9	4,4	4,4	4,5	4,7	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-1,4			1,1		
CONCAWE			3,6			1,1		

RESULTADOS CON VALOR DE ABSORCIÓN G CONFORME A CLC Y METODOLOGÍA IOA

PUNTO DE MEDIDA 1								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	36,3	40,0	46,0	49,0	50,4	50,1	49,3	49,4
ISO9613	35,4	39,9	44,7	48,6	49,0	49,0	49,0	49,0
CONCAWE	37,8	42,4	47,2	51,1	51,5	51,5	51,5	51,5
NORD2000	37,1	41,6	46,5	50,4	50,9	50,9	50,9	50,9
CNOSSOS	34,2	38,7	43,5	47,3	47,8	47,8	47,8	47,8
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,9	-0,1	-1,4	-0,5	-1,4	-1,1	-0,3	-0,4
CONCAWE	1,5	2,4	1,1	2,0	1,0	1,4	2,2	2,1
NORD2000	0,8	1,6	0,5	1,4	0,5	0,8	1,6	1,5
CNOSSOS	-2,1	-1,3	-2,5	-1,7	-2,6	-2,3	-1,5	-1,6
Periodo noche								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	35,4	40,0	42,3	43,2	43,8	44,0	-	-
ISO9613	35,5	40,0	41,1	44,8	45,2	45,2	-	-
CONCAWE	37,9	42,5	43,4	47,1	47,5	47,5	-	-
NORD2000	37,2	42,1	44,0	47,7	48,2	48,2	-	-
CNOSSOS	34,1	38,6	38,7	42,4	42,8	42,8	-	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	0,1	0,0	-1,2	1,6	1,4	1,2	-	-
CONCAWE	2,5	2,5	1,1	3,8	3,6	3,5	-	-
NORD2000	1,8	2,1	1,7	4,5	4,4	4,2	-	-
CNOSSOS	-1,3	-1,4	-3,6	-0,8	-1,0	-1,2	-	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-0,2			1,0		
CONCAWE			2,2			0,9		
NORD2000			2,0			1,4		
CNOSSOS			-1,8			0,8		

PUNTO DE MEDIDA 2								
Periodo diurno								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,7	37,2	44,4	47,6	48,5	49,2	49,9	50,9
ISO9613	33,9	38,4	43,2	47,1	47,5	47,5	47,5	47,5
CONCAWE	39,0	43,5	48,3	52,2	52,6	52,6	52,6	52,6
NORD2000	36,3	40,8	45,7	49,6	50,1	50,1	50,1	50,1
CNOSSOS	33,8	38,3	43,1	47,0	47,4	47,4	47,4	47,4
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-2,3	-1,5	-2,8	-1,9	-2,9	-2,5	-1,7	-1,8
CONCAWE	2,7	3,5	2,3	3,2	2,2	2,6	3,3	3,2
NORD2000	0,0	0,8	-0,3	0,6	-0,3	0,0	0,8	0,7
CNOSSOS	-2,5	-1,7	-2,9	-2,0	-3,0	-2,7	-1,9	-2,0
Periodo noche								
Velocidad de viento w ₁₀ (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores monitorizados (dBA)	34,4	37,5	45,4	46,2	46,4	46,3	46,1	-
ISO9613	34,1	38,6	43,3	45,6	45,8	45,8	45,8	-
CONCAWE	39,1	43,6	48,4	50,7	50,9	50,9	50,9	-
NORD2000	36,5	41,0	45,8	47,7	47,9	47,9	47,9	-
CNOSSOS	33,8	38,3	43,1	44,8	45,0	45,0	45,0	-
Diferencias Predicción vs. Monitorizado (dBA)								
ISO9613	-0,3	1,1	-2,1	-0,6	-0,5	-0,5	-0,2	-
CONCAWE	4,8	6,1	3,0	4,5	4,5	4,6	4,8	-
NORD2000	2,1	3,5	0,4	1,5	1,5	1,6	1,8	-
CNOSSOS	-0,6	0,8	-2,3	-1,4	-1,4	-1,3	-1,1	-
NORMA DE CÁLCULO			Diferencia promedio (dBA)			Desviación estándar (dBA)		
ISO9613			-1,4			1,1		
CONCAWE			3,7			1,1		
NORD2000			1,0			1,0		
CNOSSOS			-1,7			1,0		

ANEXO III. ARTÍCULO PRESENTADO EN TECNIACÚSTICA 2015

ACOUSTIC IMPACT ASSESSMENT OF WIND FARMS IN SPAIN: THE NEW APPROACH OF THE ANDALUSIAN REGULATION

PACS: 43.50.Sr

Grilo Bensusan, Álvaro;
INERCO ACÚSTICA S.L.
P.T. Aerópolis, C/Juan Olivert, 10.
41300 La Rinconada (Seville). Spain
Tel: 00 34 955 63 02 73 Fax: 00 34 955 63 04 22
E-Mail: agrilo@inerco.com Web: www.inercoacustica.com

ABSTRACT

A new regulation about noise management has entered into force recently and it has led to important changes in the acoustic evaluation of wind farms in Andalusia. The Decree 6/2012 approved the Regulations against Acoustic Pollution in the region, establishing new fixed noise limits for all noise sources and activities depending on zoning uses. As the previous regulation defined noise limits based on background noise, the newly regulation represents a different approach for the acoustic impact assessment of wind farms in southern Spain.

In this research paper an analysis of the implications of the new requirements in the acoustic evaluation for wind farms in Andalusia is presented through a case study where background noise measurements were measured at different wind speeds. The noise limits of Andalusian regulations are the compared with other International regulations in order to evaluate its adequacy for wind turbines noise management.

RESUMEN

El Decreto 6/2012 ha introducido importantes cambios en el Reglamento de Protección Acústica de Andalucía, incluyendo la definición de nuevos valores límites en función de la zonificación acústica del territorio. Dado que la anterior normativa establecía límites subjetivos basados en ruido de fondo, el actual reglamento representa una diferente aproximación metodológica de la evaluación acústica de Parques Eólicos.

El presente estudio analiza los requerimientos acústicos para parques eólicos en Andalucía, a través de un caso de estudio donde se evaluó el ruido residual a diferentes velocidades de viento y mediante un análisis comparativo con otras normativas y estándares internacionales.

INTRODUCTION

The new Decree for Acoustic Pollution in Andalusia was approved on the 17th of January 2012 (hereinafter referred as D6/2012). This regulation develops the national law, Royal Decree 1367/07 (RD1367/07), in the Andalusian region and is applied to any infrastructure, installation, machinery, project and private or public activity which could produce acoustic pollution due to noise or vibrations. Therefore, this law is in force for the acoustic assessment of wind farms, including the evaluation of noise levels at the nearest dwellings.

This paper focuses on the evaluation of the Noise Immision Level (NIE, as called in the D6/2012) at the facades of the nearest dwellings to the wind farm under study, considering the acoustic contribution of the wind turbines exclusively. For this purpose, a wind farm is considered as an industrial facility according to the requirements of the Decree 6/2012.

In general, the new Andalusian Regulation includes the legal provisions of the national law, regarding to noise indicators, noise limits, methodology of measurements, and key criteria for evaluation of the Noise Immision Level applied at wind farms. In this sense, the Decree 6/2012 establishes the noise limits for wind farms in the table VII of Chapter II, considering different zoning uses. These noise limits are applied at the façade of the buildings or at the external border of the acoustic areas.

	Areas	Noise limits (dBA)		
		L _{kd} Day	L _{ke} Evening	L _{kn} Night
a	Residential areas	55	55	45
b	Industrial areas	65	65	55
c	Recreational and entertainment uses	63	63	53
d	Touristic and tertiary uses (different to area c)	60	60	50
e	Educational, cultural, health activities or any sensitive use that requires a special protection.	50	50	40

Table VII Decree 6/2012. Noise limits for activities and regional port infrastructures (dBA)

To support the implementation of the new regulation, the Andalusian Environmental Agency has published guidelines (CMA, 2012) where the applicability procedure of the regulation to wind farms is clarified:

1. According to the article 29, the Noise Immision Level (NIE) will be evaluated at the façade of the nearest building to the wind farm. For the measurements, the microphone has to be located at 1,5 meter distance and 1,5 meter height to the most exposed façade.

2. The applied noise limits for new wind farms (i.e. those holding a legal authorisation or that have already applied for it before October 24th 2007) will be the values mentioned in table VII. For existing wind farms, the noise limits are less restrictive attending to the increase of emission level of wind turbine due to decline of the installations. In this case, the noise limit of the table VII will be increased in 3 dBA for the evaluation of day, evening and night average and an increment of 5 dBA for short-time evaluation considering the worst scenario (measured in minutes).

The rest of technical issues for the application of the Andalusian Regulation, described in the Technical Annex II, are similar to the methodology of acoustic assessment provided in the National law (described in the Annex IV). Both regulations use the requirements of the standard ISO 1996-2:2007 for noise campaign in wind farm.

MAIN CHANGES INTRODUCED BY THE NOISE REGULATION FOR ANDALUSIAN WIND FARMS

The previous noise regulation, Decree 326/03 (hereinafter referred as D326/2003), was approved in 2003 and was the reference guideline for the acoustic assessment of wind farms until the publication of the Decree 6/2012 on March 6th 2012. The Decree 326/03 defined a different noise indicator in the article 23, called Acoustic Assessment Index (NAE according to Spanish acronym), that established a noise limit based on background noise. The noise indicator NAE was defined as an A-weighted equivalent continuous sound pressure level for a time interval of 10 minutes ($L_{Aeq10min}$).

When Decree 6/2012 entered into force, the control of the noise emission of wind farms changed and the applied noise indicator became the Noise Immision Level (NIE according to Spanish acronym) as it is described in articles 29 and 30. This noise indicator NIE is defined as an A-weighted equivalent continuous sound pressure level (L_{keq}), for a time interval of, at least, 5 seconds and with different noise limits considering the urban zoning and the time periods (day, evening and night). The table below describes the main differences between both regulations in order to identify the main changes introduce in the evaluation of wind farm as an industrial facility:

	Acoustic Assessment Index - NAE Decree 326/2003	Noise Immision Level - NIE Decree 6/2012		
Noise indicator	$L_{Aeq10min}$	L_{keqT}		
Penalties	Up to 5 dBA	Up to 9 dBA		
Adjustment due to reflections	None (open window)	Incident sound		
Time interval	10 minutes	At least 5 seconds		
Number of measurements	At least 1	Three records with a time-lapse of three minutes		
Evaluation of background noise	Same methodology	Same methodology		
Height of microphone	At least 1,2 meters height	1,5 meters		
Location of microphone	Open window	At the facades of the building		
Spatial/time sampling	Worst scenario	Worst scenario		
Time period	Day (7 AM – 11 PM) Night (11 PM – 7 AM)	Day (7 AM – 7 PM) Evening (7 PM – 11 PM) Night (11 PM – 7 AM)		
Noise limits for new wind farms	Background noise + 5 dBA	TABLE VII Day/Evening: 55 dBA Night: 45 dBA		
Noise limits for existing wind farms		TABLE VIII	Average Period (+3 dBA)	Short time evaluation (+5 dBA)
		Day/ Evening	58	60
		Night	48	50

*Table 1. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003
(Modified from Grilo, 2014)*

Based in this table results, the most important changes of Decree 6/2012 are as follows:

1. **Noise limits applicable to Wind Farms:** The main change of the regulation is the criteria used to establish noise limits, replacing the existing noise limits based on background noise for a fixed value of 55 dBA during day/evening and a value of 45 dBA during the night for residential uses.

Obviously, the consequences of this change are highly dependent on the location of the wind farm and the influence of specific noise sources at the surroundings of the wind turbines (road traffic or other industrial noise sources) that could increase the background noise levels. In Andalusia, most of the wind farms are located at open country and quiet areas (Figure 1), where the environmental noise is influenced exclusively by natural sound and the wind-induced noise.



Figure 1. Location of Wind farms in Andalusia (AEE, 2015)

The Acoustic Laboratory of INERCO Acústica has carried out a wind farm noise campaign in South Spain to monitor the background noise at different locations according to ISO 1996-2:2007 during 8 days. In Figure 3 the results obtained from the correlation between the background noise levels, evaluated by $L_{Aeq10min}$, and the wind speed at 10 meters height (w_{10}) for a rural dwelling at open country during the night period are presented. In this particular study, the microphone was situated in an opened window at the ground floor, identified as the most exposed faces of the nearest dwelling from the wind farm.

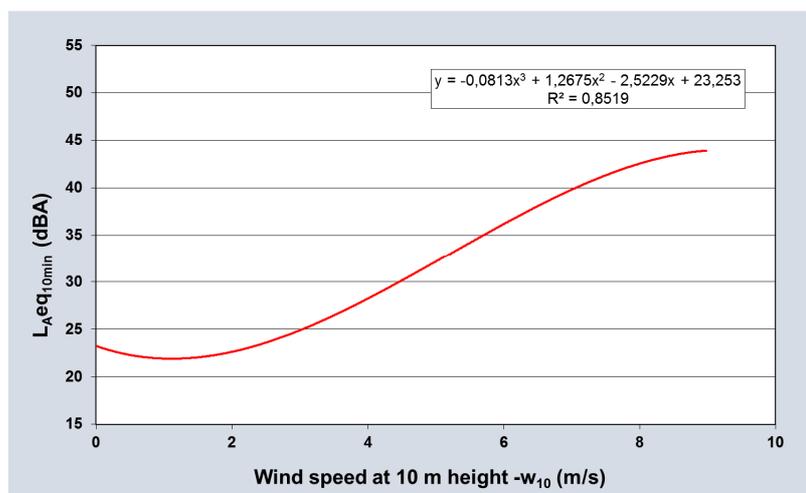


Figure 3. Correlation between the background noise levels and the wind speed at 10 meters height during the night for a studied wind farm.

Taking into account the obtained background noise levels (Figure 3), it is possible to compare noise limits using the previous regulation (D326/2003) and the current applicable limits following the table VII of Decree 6/2012.

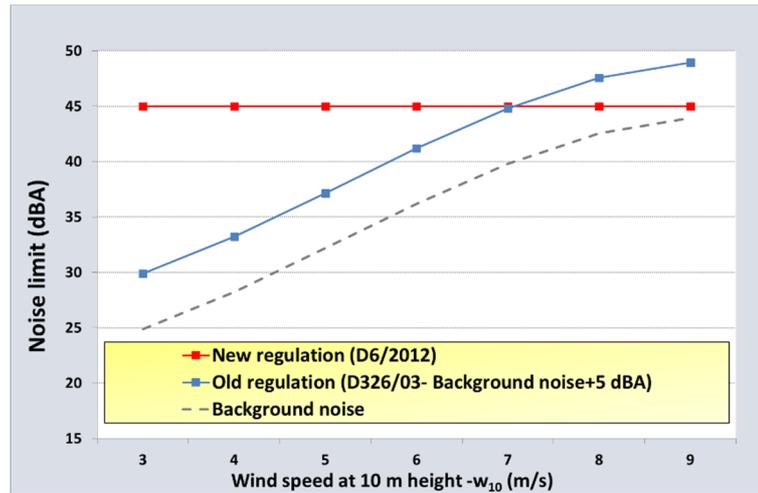


Figure 4. Noise limits of Wind farms for residential uses and night period for a studied wind farm

According to Figure 4 and considering the night period (worst scenario), the new regulation is less restrictive than Decree 326/2003 for wind speed up to 7 m/s. Particularly, at quiet areas, and when the wind speed is below 7 m/s, the background noise appears to be specially low, between 20 dBA and 40 dBA according to our measurements. On the contrary, for the study area, the previous regulation seems to be only more permissive when high wind speeds (more than 8 m/s) are reached and when wind-induced noise exceeds 40 dBA.

As a conclusion, it can be said that for wind farm situated at quiet areas, the noise limit based on background noise (Decree 326/2003) provides a special protection against sound emergence when the environmental noise is low whereas it is more permissive when higher wind speeds are reached and when the wind induced background noise exceeds 40 dBA.

2. **Adjustments due to tonality, impulsiveness, low frequency and low background noise:** Analysing the differences due to the corrections of tonality, impulsiveness, etc. both regulations were compared (table 2). The previous noise regulation included a correction related to low background noise (evaluated by L_{90}) in order to protect the quietness at natural areas. However, this correction was not incorporated to the current regulation, but a new adjustment due to low frequency noise has been included.

	Previous Regulation Decree 326/2003	Current Regulation Decree 6/2012										
Correction due to low background noise (evaluated by $L_{90-10 \text{ min}}$)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">L_{90}</th> <th style="text-align: center;">P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">≤ 24</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">26</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≥ 27</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>	L_{90}	P	≤ 24	3	25	2	26	1	≥ 27	0	Non defined
L_{90}	P											
≤ 24	3											
25	2											
26	1											
≥ 27	0											
Correction due to tonality	5 dBA (if exists)	3 - 6 dBA depending of the range of tonality										
Correction due to impulsiveness	2 - 5 dBA	3 - 6 dBA										
Correction due to low frequency	Non defined	3 - 6 dBA										
Maximum correction	5 dBA	9 dBA										

Table 2. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003

There are two differences that can greatly influence the acoustic assessment of wind farms:

- The maximum value of the correction increases until 9 dBA instead of 5 dBA. When the presence of tonality and low frequency is demonstrated at a wind farm, the measured noise level may be increased up to 9 dBA according to Decree 6/2012, always depending on the characteristics of these components.
- The presence of low frequency at the spectral emission of the wind turbine is penalized by the actual regulation with 3 or 6 dBA, depending on the measured difference between L_{ceq} and L_{aeq} .

As example, the table 3 shows the calculated correction according to both regulations using data from a noise campaign developed by INERCO Acústica. At the study location, only low frequency correction were identified and the total adjustment according to D6/2012 was 6 dBA versus the null value of D326/2003.

Corrections according to Decree 326/2003					
Wind speed w_{10} (m/s)	6	7	8	9	10
Low background noise correction (P)	0	0	0	0	0
Tonality correction (K_1)	0	0	0	0	0
Impulsiveness correction (K_2)	0	0	0	0	0
Total adjustment ($A=P+K_1+K_2 \leq 5$ dBA)	0	0	0	0	0
Corrections according to Decree 6/2012					
Wind speed w_{10} (m/s)	6	7	8	9	10
Tonality correction (K_t)	0	0	0	0	0
Low frequency correction (K_f)	6	6	6	6	6
Impulsiveness correction (K_i)	0	0	0	0	0
Total adjustment ($K=K_t+K_f+K_i \leq 9$ dBA)	6	6	6	6	6

Table 2. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003

As the new regulation introduces new adjustments that were not required by the previous legal guidelines, the comparison between the noise limit shown in Figure 5 must be modified considering the correction due low frequency from table 3.

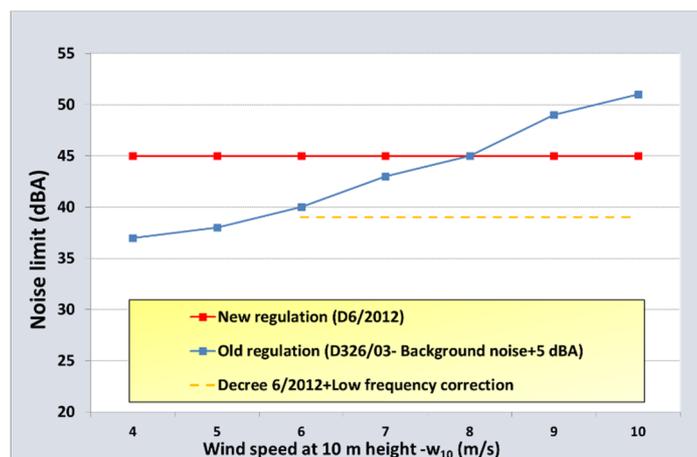


Figure 6. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003 considering the application of low frequency correction for a studied wind farm.

The comparison of noise limits from both Regulations, considering the new correction due to low frequency noise, shows that Decree 6/2012 is more restrictive than the former law for all measured wind speeds.

3. **Time interval of the measurements:** Although internationally recommended time interval for wind farms monitoring is 10 minutes (as defined in Decree 326/2003), Decree 6/2012 allows the development of measurement during shorter intervals (at least 5 seconds). In order to get representative samples of the noise immersion levels, 1 minute intervals may be recommended for the evaluation of the noise emission from wind turbines. The total duration of the noise campaign might be reduced, even improving the relationship between the noise levels and the wind speed, due to the relevant number of 1-minute samples.

Using synchronized sound and meteorological data, different methodologies may be used (polynomial regression, binning method or probability distribution) for the statistical analysis of the measurements. Figure 6 displays the results of the analysis of a monitoring campaign at a wind farm, using the binning method (Asthani & Titus, 2011) applied to 1-minute records.

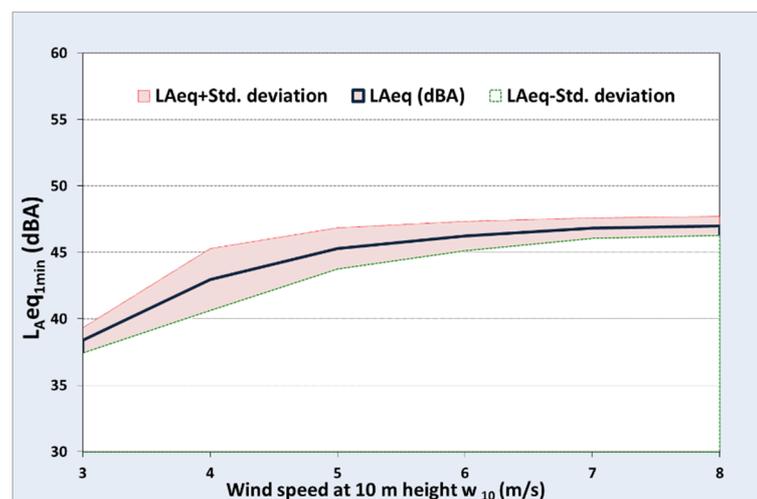


Figure 6. Noise immersion levels analysed by binned wind speeds. The dark line represents the mean $L_{Aeq_{1min}}$ within each bin. The shaded zone represents one standard deviation.

The obtained results were highly representative of the acoustic situation at the nearest dwelling from the studied wind farms, due to a measurement basis of 1 minute interval during 8-days monitoring campaign was set. Thus the calculated deviation error was improved.

4. **Comparison with International Noise Limits:** The existing guidelines for the acoustic assessment of wind farms consider noise limit based on background noise (e.g. Turkey), based on fixed values (e.g. Spain) or using both of them (e.g. Ontario or France). Comparing the actual noise limits in Andalusia for residential uses and night period, with other guidelines from United States and Europe (figure 6) shows that noise limits of the current regulation in Andalusia are less restrictive than the reviewed standards and the recommendations of other guidelines (IOA, 2013), but according to the World Organization of Health guidelines (WHO, 1999). Furthermore, considering the correction due to low frequency noise (up to 6 dBA), the noise limits for night period become closer to those applied in other countries (39 dBA).

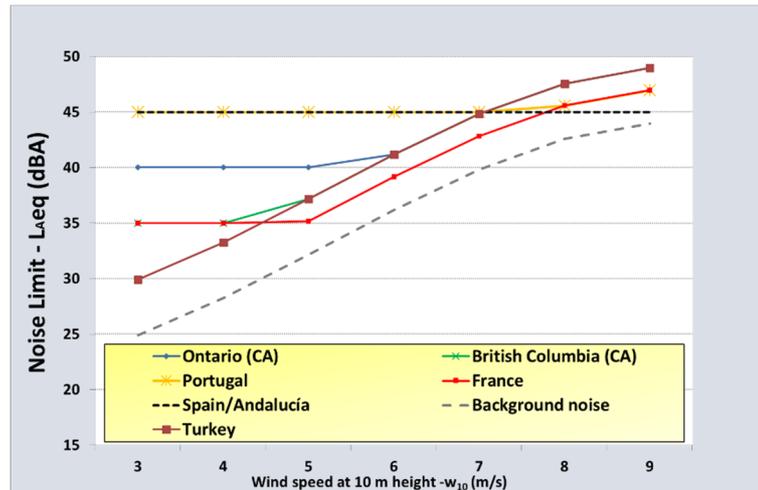


Figure 6. Comparison of Andalusian Noise limits (D6/2012) with other international regulations (Arcadis et al., 2013; Goemé, 2015)

Currently, the main challenge for the acoustic assessment of wind farms in Andalusia is therefore the classification of the noise sensitive receivers when the urban planning is not available. A rural dwelling used as a second residence (usual situation in the region), situated in open country then should be classified as a residential use if the right acoustic quality has to be guaranteed. Otherwise, its classification below any different use (areas b, c or d from Table VII – D6/2012) might prevent the compliance of WHO recommendations.

CONCLUSIONS

The entry into force of a new regulation Decree 6/2012 has led to important changes in the acoustic evaluation of wind farms in Andalusia, establishing new fixed noise limits depending on zoning uses instead of previous limits based on background noise. Despite the fact that some changes in the regulation with respect to the former one might affect residential uses negatively, the noise limits set are more restrictive than the previous ones due to the inclusion of a new correction in low noise frequency, characteristic of noise emission from wind turbines. In this sense, the Decree 6/2012 of Andalusia fulfils the recommendation of the World Organisation of Health for the protection of sensitive uses during the night.

REFERENCES

- AEE. 2015. *Mapa Eólico de Andalucía*. [ONLINE] Available at: <http://www.aeolica.org/es/map/andalucia/>. [Accessed 30 January 15]
- Arcadis, K. F., Avenue, F., Arcadis, E. K., Box, P. O., and Arnhem, A. G. (2013). *Noise International Legislation and Regulations for Wind Turbine Noise*, Proc. 5th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US. 1–22
- Ashtiani P. and Titus S., 2011. *Analysis of noise immission levels measured from wind turbines*. Proceedings of the 4th International Meeting on Wind Turbine Noise; 2011. Rome, Italy. INCE Europe. ISBN: 978-88-88942-33-9.
- Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012. *Guía de Contaminación Acústica*. Junta de Andalucía, Noviembre de 2012.
- Decreto 6/2012, de 17 de Enero, *por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía*, Boletín oficial de la Junta de Andalucía, número 24. Pp. 7-37.
- ETSU-R-97, *The assessment and rating of noise from Wind Farms, Final ETSU-R97 Report for the Department of Trade & Industry*. UK Noise Working Group, 1997.

Goemé, A. (2015). *Comparative analysis of wind turbine noise assessment and rating procedures in the UK, France and the Netherlands*. Proc. 6th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glasgow, Scotland.

Grilo A, 2014. *Implicaciones del Nuevo Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía sobre las Actividades Industriales Existentes: un Caso Práctico*. Official publication of 45th Spanish Congress on Acoustics. Murcia. Pp. 747-755.

IOA 2014. *A Good Practice Guide to the Application of ETSU-R-97 for the Assessment and Rating of Wind Turbine Noise*. Institute of Acoustic. Hertfordshire (UK)

ISO 1996-2:2007 Acoustics: Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise

World Health Organization (WHO), 1999. *WHO guidelines for community noise*. Copenhagen.