



**UCAM**

UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO  
Programa de Doctorado Tecnología de la Computación e  
Ingeniería Ambiental

Análisis y evaluación de ambientes acústicos mediante el uso  
de redes inalámbricas de sensores.

**Autor:**

José Montoya Belmonte

**Director:**

Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz

Murcia, septiembre de 2021





**UCAM**

UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO  
Programa de Doctorado Tecnología de la Computación e  
Ingeniería Ambiental

Análisis y evaluación de ambientes acústicos mediante el uso  
de redes inalámbricas de sensores.

Autor:

José Montoya Belmonte

Director:

Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz

Murcia, septiembre de 2021





El Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz como Director de la Tesis Doctoral titulada “Análisis y evaluación de ambientes acústicos mediante el uso de redes inalámbricas de sensores” realizada por D. José Montoya Belmonte en el Programa de Doctorado Tecnologías de la Computación e Ingeniería Ambiental, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Navarro', is written over a circular stamp that is partially obscured by the signature.

LO QUE FIRMO, PARA DAR CUMPLIMIENTO AL REAL DECRETO 99/2011 DE 28 DE ENERO, EN MURCIA A 29 DE SEPTIEMBRE DE 2021.





## AGRADECIMIENTOS

Durante los últimos años, este viaje (que continuará) ha sido único. La incertidumbre y el caos, la felicidad y la alegría han estado presentes en una mezcla perfecta para poder terminar este gran hito en mi vida. Y todos estos sentimientos han sido compartidos con muchas personas a las que me gustaría dar las gracias.

Mi llegada al mundo de la acústica fue fortuita, pero mi permanencia en él se debe a mi amigo y tutor Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz. Por su ayuda, por su amistad, por su cercanía, por corregirme con respeto, por sus consejos y sobre todo por su paciencia, te doy las gracias.

A mis suegros por sus consejos, su apoyo y su cariño brindado.

A mis abuelos, que siempre han sido un ejemplo de sacrificio y trabajo, pensando más en los demás que en ellos mismos, permitiéndonos a la familia seguir nuestros sueños. Este logro personal es una satisfacción para ellos, y aunque ya no estés con nosotros, abuelo, sé que estarías orgulloso de mí. Y también mi abuela, que ahí sigue demostrando pasen los años que pasen lo mucho que nos quiere, siempre con su frase: hijo, Tú, ¡idea!.

A mi hermana por todos esos momentos vividos juntos, por estar ahí cuando la he necesitado y sobretodo por estar presente siempre que la necesito para cualquier cosa de sus sobrinos.

Mi gratitud y mi cariño a mis padres por apoyarme, alentarme, orientarme y no dejarme solo en este camino emprendido y estar siempre ahí cuando los he necesitado, por hacer de mí la persona que soy, esa que sabe que con esfuerzo todo se consigue.

A Cristina, mi mujer, por creer en mí y por su incalculable compañía, por convertir los días malos en días buenos, por haberme sabido escuchar y apoyarme

en todas las decisiones en todo momento. Por su paciencia conmigo en esos momentos donde sólo existía esta investigación. Por todo lo que hemos vivido y, sobre todo, por hacerme feliz.

Y como especial cariño hacia mis hijos, José y Cristina, por todas esas horas de ausencia, por regalarme todos los días una sonrisa sin pedirles nada a cambio, por ser mi fuente de motivación e inspiración para superarme cada día más y enseñarme a ser mejor padre.

Al resto de mi familia por esos momentos de ausencia.



## RESUMEN

El creciente aumento del tamaño de las ciudades y de su población en las últimas décadas, ha generado una degradación de su medio ambiente. Los mayores niveles de contaminación en general han fomentado la necesidad de la creación de entornos más sostenibles que proporcionen una mejor calidad de vida de sus ciudadanos. Uno de estos agentes contaminantes que ha despertado especial interés en los últimos años es el sonido, también conocido como contaminación acústica, que ha provocado que se ponga más atención en el ruido y sus efectos en las personas.

Recientemente, tras el auge de la creación de las ciudades inteligentes basadas en el paradigma del Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías que lo soportan, se están creando nuevas herramientas de gestión y evaluación de la contaminación acústica. Bajo este grupo de tecnologías en desarrollo, surge esta tesis doctoral cuyo objetivo principal es la validación de la aplicación de una red inalámbrica de sensores acústicos formada por dispositivos de bajo coste en varios ambientes urbanos para el análisis y la evaluación del entorno acústico.

En esta investigación, se han desarrollado varios casos de uso de una red de sensores acústicos mediante campañas de medición de larga duración. En concreto, se presentan tres experimentos de evaluación: interior de un coche durante desplazamiento in itinere, exterior de una urbanización y campus universitario. Para ello, se han diseñado y desplegado una serie de nodos acústicos mediante la aplicación de una metodología de diseño de redes propuesta para el ámbito de la contaminación acústica en concordancia con las legislaciones vigentes. Estas campañas han permitido la monitorización, en diferentes entornos urbanos, del campo acústico y un posterior análisis de la molestia acústica en los ciudadanos.

Para conseguir evaluar la molestia acústica, en esta tesis se propone la utilización de parámetros psicoacústicos, como la sonoridad, combinados con índices acústicos más tradicionales. Los nodos acústicos utilizados son capaces de capturar el sonido, y, a través del algoritmo de procesado, calcular los parámetros

psicoacústicos, tanto monoaurales como binaurales, ofreciendo información más cercana a la sensación de molestia en las personas que los índices acústicos aplicados habitualmente.

Los nodos acústicos utilizados, han sido mejorados en los trabajos de esta tesis para permitir campañas de medición de manera remota y automática. Mediante el módulo de comunicaciones añadido, los parámetros obtenidos por los nodos son enviados a una plataforma software, donde son almacenados para su posterior análisis. La instalación de un grupo de nodos acústicos en una zona específica permite la aplicación de análisis estadístico espacial. En concreto, se propone el método de Kriging para realizar interpolación espacial de los datos acústicos. Además, al realizar campañas de larga duración, se han podido aplicar métodos de análisis estadístico de las series temporales, que han ofrecido otro punto de vista en la comprensión del entorno acústico. Estos análisis se complementan con encuestas subjetivas a los ciudadanos mediante una aplicación móvil desarrollada, permitiendo tomar decisiones más rápidas y completas en comparación con la metodología tradicional de creación de mapas de ruido.

Tras los casos de uso presentados, se concluye que las redes de sensores acústicos son una herramienta útil para obtener mediciones a largo plazo que permiten analizar la evolución temporal y espacial de los índices acústicos, proporcionando una información valiosa para identificar la molestia subjetiva del ruido a través de parámetros psicoacústicos.

Palabras clave: Acústica, Red Inalámbrica de Sensores Acústicos, Internet de las Cosas, Psicoacústica, Molestia Binaural, Ruido.

## ABSTRACT

In recent decades, the increasing size of cities and their populations have led to a degradation of their environment. Higher levels of pollution in general, have fostered the need for the creation of more sustainable environments that provide a better quality of life for its citizens. One such pollutant that has attracted particular interest in recent years is sound, also known as acoustic pollution, which has led to an increased focus on noise and its effects on people.

Recently, following the rise in the creation of smart cities based on the Internet of Things (IoT) paradigm and the technologies that support it, new tools for the management and evaluation of noise pollution are being created. Under this group of developing technologies, this doctoral thesis arises whose main objective is the validation of the application of a wireless network of acoustic sensors formed by low-cost devices in various urban environments for the analysis and evaluation of the acoustic environment.

In this research, several use cases of an acoustic sensor network have been developed through long-term measurement campaigns. In particular, three evaluation experiments are presented: inside a car during in itinere travel, outside a housing estate and on a university campus. To this end, a series of acoustic nodes have been designed and deployed by applying a network design methodology proposed for the field of noise pollution in accordance with current legislation. These campaigns have allowed the monitoring, in different urban environments, to the acoustic field and a subsequent analysis of the acoustic nuisance for citizens.

In order to assess acoustic annoyance, this thesis proposes the use of psychoacoustic parameters, such as loudness, combined with more traditional acoustic indices. The acoustic nodes used are able to capture the sound and, through the processing algorithm, calculate the psychoacoustic parameters, both monaural and binaural, offering information closer to the sensation of annoyance in people than the acoustic indices usually used.

The acoustic nodes have been improved in the work of this thesis to allow remote and automatic measurement campaigns. By means of the added communications module, the parameters obtained by the nodes are sent to a software platform, where they are stored for later analysis. The installation of a group of acoustic nodes in a specific area has allowed the application of spatial statistical analysis. In particular, the Kriging method is proposed to perform spatial interpolation of the acoustic data. Furthermore, by conducting long-term campaigns, it has been possible to apply methods of statistical analysis of the time series, which have offered another point of view in the understanding of the acoustic environment. These analyses are complemented by subjective surveys of citizens through a developed mobile application, allowing faster and more complete decisions to be made compared to traditional noise mapping methodology.

Following the use cases presented, it is concluded that acoustic sensor networks are useful tools to carry out long-term measurements in order to analyze the temporal and spatial evolution of acoustic indices, providing valuable information to identify subjective noise annoyance by obtaining psychoacoustic parameters.

Keywords: Acoustics, Wireless Acoustic Sensor Network, Internet of Things, Psychoacoustics, Binaural annoyance.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN.....	9
ÍNDICE GENERAL.....	13
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	19
ÍNDICE DE FIGURAS Y DE TABLAS.....	23
I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	30
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN.....	30
1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS.....	33
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....	35
1.4 CONTRIBUCIONES A CONGRESOS Y REVISTAS .....	36
II - EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN EL MEDIO AMBIENTE..	40
2.1 CONTEXTUALIZACIÓN.....	40
2.2 PRINCIPALES FUENTES SONORAS EN AMBIENTES URBANOS .....	44
2.2.1 Fuentes de ruido de tráfico.....	48
2.2.1.1 Tráfico rodado .....	48
2.2.1.2 Tráfico ferroviario.....	49
2.2.1.3 Tráfico aéreo.....	49
2.2.2 Fuentes de ruido de la construcción .....	49
2.2.3 Fuentes de ruido de ocio.....	50
2.2.4 Fuentes de ruido de servicios urbanos .....	52
2.2.5 Fuentes de ruido del entorno doméstico y comunitario .....	52
2.2.6 Fuentes de ruido de sonidos naturales .....	53
2.2.7 Fuentes de ruido de entorno industrial .....	54
2.3 EFECTOS RUIDO EN LA CALIDAD DE VIDA DE LAS PERSONAS.....	55
2.3.1 Efectos en la salud .....	57
2.3.1.1 Pérdida auditiva .....	58
2.3.1.2 Tinnitus .....	59
2.3.1.3 Alteraciones del sueño .....	59
2.3.1.4 Ansiedad y Depresión.....	59
2.3.1.5 Problemas cardiovasculares .....	61

2.3.1.6	Obesidad .....	61
2.3.1.7	Diabetes .....	62
2.3.1.8	Estrés oxidativo .....	62
2.3.1.9	Desarrollo cognitivo .....	62
2.3.2	Efectos socio-económicos del ruido .....	63
2.3.2.1	Costes Sanitarios.....	65
2.3.2.2	Depreciación inmuebles.....	65
2.3.2.3	Accidentes.....	65
2.3.2.4	Dificultades de comunicación.....	65
2.3.2.5	Dificultades de convivencia.....	66
2.3.2.6	Agresividad.....	66
2.4	PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL CAMPO SONORO. ....	67
2.4.1	Conceptos básicos de la onda sonora.....	67
2.4.2	Parámetros acústicos.....	70
2.4.2.1	Parámetros de análisis básicos.....	70
2.4.2.1.1	Nivel de presión sonora instantánea ( $L_p$ ).....	70
2.4.2.1.2	Nivel de intensidad sonora ( $L_I$ ).....	71
2.4.2.1.3	Nivel de potencia sonora ( $L_W$ ).....	71
2.4.2.1.4	Análisis espectral.....	71
2.4.2.1.5	Niveles expresados en dB(A).....	72
2.4.2.2	Índices energéticos .....	72
2.4.2.2.1	Nivel de presión sonora equivalente ( $L_{eq}$ ).....	72
2.4.2.2.2	Nivel de exposición sonora, ( $SEL$ ).....	73
2.4.2.2.3	Nivel sonoro equivalente día-tarde-noche ( $L_{den}$ ).....	74
2.4.2.2.4	Nivel diario equivalente en materia de prevención de riesgos laborales.....	76
2.4.2.2.5	Nivel semanal equivalente en materia de prevención de riesgos laborales.....	76
2.4.2.2.6	Nivel pico ( $L_{pico}$ ) en materia de prevención de riesgos laborales.....	77
2.4.2.3	Índices estadísticos. ....	77

2.4.2.3.1 Niveles estadísticos percentiles ( $L_N$ ).....	77
2.4.2.3.2 Índice de ruido de tráfico ( $TNI$ ).....	78
2.4.2.3.3 Clima sonoro ( $NC$ ).....	79
2.4.2.3.4 Índice de contaminación acústica ( $NPL$ ).....	79
2.4.3 Parámetros Psicoacústicos .....	80
2.4.3.1 Ponderaciones frecuenciales.....	81
2.4.3.2 Loudness ( $N$ ) o Sonoridad .....	83
2.4.3.3 Sharpness ( $S$ ) o Nitidez.....	86
2.4.3.4 Booming ( $B$ ) .....	88
2.4.3.5 Roughness ( $R$ ) o Rugosidad.....	90
2.4.3.6 Fluctuation Strength ( $F$ ) o Fuerza de Fluctuación.....	90
2.4.3.7 Molestia psicoacústica ( $PA$ ).....	91
2.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN DEL CAMPO SONORO. ....	92
2.5.1 Introducción.....	92
2.5.2 Sonómetros .....	92
2.5.3 Nodos acústicos.....	95
2.5.4 Redes de sensores .....	104
2.6 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL CAMPO SONORO.....	113
2.6.1 Reglamentación y normas internacionales.....	113
2.6.1.1 Normativa Europea.....	113
2.6.1.2 Mapas de Ruido.....	115
2.6.1.3 Normativa Española.....	118
2.6.2 Medición in situ.....	122
2.6.3 Métodos predictivos.....	122
2.6.4 Métodos para el ambiente o entorno sonoro.....	128
III - IMPLANTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISPOSITIVO ACÚSTICO EN REDES DE SENSORES PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO. ....	136
3.1 MATERIALES Y METODOLOGÍA .....	137
3.1.1 Nodo acústico .....	137

3.1.1.1 Hardware .....	140
3.1.1.2 Sistema de captación de sonido.....	142
3.1.1.3 Software .....	143
3.1.1.4 Módulo de comunicaciones.....	145
3.1.1.5 Otros componentes.....	147
3.1.2 Red inalámbrica de sensores acústicos .....	152
3.1.2.1 Recomendaciones generales y específicas .....	152
3.1.2.2 Metodología de planificación y despliegue.....	160
3.2 CASOS DE USO DE UNA RED DE SENSORES ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DE RUIDO .....	161
3.2.1 Evaluación del entorno sonoro del interior de un coche durante desplazamientos in-itinere. ....	162
3.2.1.1 Descripción del experimento.....	162
3.2.1.2 Resultados y discusión del experimento .....	167
3.2.1.3 Conclusiones del experimento.....	176
3.2.2 Evaluación del entorno sonoro exterior de una urbanización .....	177
3.2.2.1 Descripción del experimento.....	177
3.2.2.2 Resultados y discusión del experimento .....	183
3.2.2.2.1 Mediciones en entorno exterior .....	183
3.2.2.2.2 Modelado y validación cruzada de los conjuntos de medida. ....	185
3.2.2.2.3 Análisis estadístico espacial mediante método de Kriging .....	188
3.2.2.2.4 Estudio subjetivo sobre la molestia mediante encuesta a vecinos .....	192
3.2.2.3 Conclusiones del experimento.....	194
3.2.3 Evaluación del entorno sonoro de un campus universitario .....	195
3.2.3.1 Descripción del experimento.....	195
3.2.3.2 Resultados y discusión del experimento .....	198
3.2.3.2.1 Resultado general del despliegue de sensores .....	199
3.2.3.2.2 Mediciones en entorno interior del campus de la univesidad .....	204
3.2.3.2.3 Mediciones en entorno exterior del campus de la universidad .....	206
3.2.3.3 Conclusiones del experimento.....	210



IV – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....	214
4.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	214
4.2 LÍNEAS FUTURAS .....	217
V – REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	220



## SIGLAS Y ABREVIATURAS

ADC: Analog to Digital Converter- Convertidor analógico-digital.

ANN: Artificial Neural Networks - Redes Neurales Artificiales.

CNEL: Community Noise Equivalent Level.

CNOSSOS-UE: European Commission developed Common NOise aSSessment methOdS.

CPU: Central Processing Unit - Unidad Central de Procesamiento.

DOA: Direction of Arrival – Dirección de Llegada.

ECM: omnidirectional condenser microphone- micrófono de condensador omnidireccional.

END: European Noise Directive – Directiva Europea del Ruido.

FFT: Fast Fourier Transformation-Transformada rápida de Fourier (FFT).

GBP: Great Britain pound- Libra de Gran Bretaña.

GPRS: General Packet Radio Service -Servicio General de Paquetes vía Radio.

GPS: Global Positioning System- Sistema de Posicionamiento Global.

GRITA: Grupo de I+D+i en Telecomunicaciones Avanzadas.

GSM: Global System for Mobile Communications- Sistema Global de Comunicaciones Móviles

IDW: Inverse Distance Weighted.

IoT: Internet of Things- Internet de las Cosas.

20

IMC: Índice de Masa Corporal.

ISO: International Organization for Standardization- Organización Internacional de Normalización.

LAN: Local Area Network -Conexión de Red Local.

MEMS: Micro-Electrical-Mechanical Systems - Micrófonos de Sistemas Micro-Eléctricos-Mecánicos.

MER: Mapa Estratégico de Ruido.

MCU: Microcontroller Unit- Unidad Microcontroladora.

NIHL: Noise Induced Hearing Loss - Perdida Auditiva Inducida por el Ruido.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

PCB: Printed Circuit Board-Placa de Circuito Impreso.

PM: Particulate Matter – Partículas en Suspensión.

RF: Radio Frecuencia.

R-Pi: Raspberry Pi.

SBC: Single Board Computer- Ordenador de Placa Única.

SEL: Nivel de Exposición Sonora.

SNM: Strategic Noise Maps - Mapas Estratégicos de Ruido.

SNR: Signal-to-Noise Ratio - Relación Señal/Ruido.

SPL: Nivel de Presión Sonora.

TNI: Traffic Noise Index- Índice de Ruido de Tráfico.

TNM: Traffic Noise Model - Modelo de Ruido de Tráfico.

TRANEX-Traffic Noise Exposure Model-Modelo de Exposición al Tráfico.

TSA: Time Series Analysis - Análisis de Series Temporales.

UCAM: Universidad Católica San Antonio Murcia.

UE: Unión Europea.

UPS: Uninterruptible Power Supply - Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) .

USB: Universal Serial Bus – Bus Serie Universal.

WASN: Wireless Acoustic Sensor Network - Red Inalámbrica de Sensores Acústicos.

WHO: World Health Organization - Organización Mundial de la Salud



## ÍNDICE DE FIGURAS Y DE TABLAS

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de la Propagación de Fuentes de Ruido tanto Interiores como Exteriores en una Vivienda. ....	46
Figura 2. Esquema de las Principales Fuentes Sonoras de Ruido en Entornos Urbanos y de su Periferia. ....	47
Figura 3. Esquema de la Secuencia Causa-Efecto para la Evaluación de los Efectos Causados por un Agente Ambiental: el Ruido. ....	55
Figura 4. Efectos del Ruido en la Salud, Sociales y Económicos sobre la Población y las Ciudades .....	56
Figura 5. Representación Gráfica de una Señal Senoidal en la que se Muestra la Longitud de Onda.....	69
Figura 6. Representación Gráfica de una Señal Senoidal en el Espacio en la que se Muestra la $P_{max}$ de Onda. ....	69
Figura 7. Curvas de ponderación frecuencial para los filtros A, B y C. ....	82
Figura 8. Etapas de Cálculo de Loudness Binaural. ....	85
Figura 9. Ponderación $g'(z)$ en Función del Tipo de Banda Crítica (Bark) para Sharpness.....	87
Figura 10. Espectro de frecuencias y los valores de nitidez de (a) un tono de 100 Hz y (b) un tono de 10 kHz. ....	88
Figura 11. Ponderación $g'(z)$ en Función del Tipo de Banda Crítica (Bark) para Booming.....	89
Figura 12. Diagrama de Bloques de un Sonómetro. ....	93
Figura 13. Comunicación de los Nodos de una Red con la Plataforma de Datos a) Directa b) Gateway o pasarela .....	107
Figura 14. Esquema de Modelos de Evaluación y sus Métodos para la Evaluación del Paisaje o Entorno Sonoro.....	129
Figura 15. Diagrama de Bloques Representando las Principales Partes de un Dispositivo Acústico para su Uso en Redes de Sensores. ....	138
Figura 16. Detalle del Interior del Dispositivo Prototipo 1 .....	139
Figura 17. Detalle del Exterior del Dispositivo Prototipo 1 .....	140

Figura 18. Detalle del Array de Micrófonos de la PSEye 3. ....	142
Figura 19. Diagrama de Bloques del Funcionamiento del Software .....	143
Figura 20. Arquitectura de la Red de Sensores .....	145
Figura 21. Sensor de Temperatura y Humedad DHT22 .....	148
Figura 22. Senor de Luminosidad TSL 2561.....	149
Figura 23. Etapas para el Despliegue de una Red de Sensores.....	153
Figura 24. Correcciones Propuestas para la Norma ISO 1996-2:2007 en Funcion de la Distancia a la Fachada Reflectante .....	156
Figura 25. Recorrido In Itinere del Trabajador .....	163
Figura 26. Recorrido In Itinere del Trabajador: a) Tramo de Población b) Tramo de Autovía A7 .....	164
Figura 27. Gráfico de la Velocidad Media del Vehículo durante la Campaña de Mediciones.....	165
Figura 28. Instalación del Dispositivo en el Interior del Vehículo. ....	166
Figura 29. Representación $L_{Aeq,d \text{ in itinere}}$ y $L_{Aeq,d 8h}$ en dBA durante una Semana y el Valor $L_{Aeq,s}$ .....	168
Figura 30. Representación de los Valores NC, TNI y NPL durante una Semana.171	
Figura 31. Valores de la $L_{Aeq,d \text{ in Itinere}}$ dB(A) y $L_{eq,d \text{ in Itinere}}$ dB en el Trayecto in Itinere de un Día Concreto .....	173
Figura 32. Comparativa Loudness Derecho e Izquierdo cada 10 Segundos .....	174
Figura 33. Comparativa Loudness Derecho, Izquierdo, Binaural y $L_{eq}$ , en dB (A) cada 10 Segundos.....	175
Figura 34. Localización Geográfica de la Zona de Estudio y Ubicación de los Nodos178	
Figura 35. Despliegue Nodos Acústicos en las Viviendas .....	179
Figura 36. Ejemplo de Visualización de los Datos Obtenidos en la Monitorización de la Urbanización en la Plataforma ThingSpeak.....	181
Figura 37. Diagrama de Bloques de la Molestia Binaural en cada Localización del Entorno de la Urbanización.....	185
Figura 38. Predicción Estadística Espacial de la Molestia Binaural con el Método de Kriging Esférico.....	190



Figura 39. Distribución Estadística Espacial del Error Relativo Producido en la Estimación por el Método de Kriging Usando Valores Medios de Molestia Binaural .....	191
Figura 40. Encuesta de Evaluación de la Percepción Subjetiva a través de Aplicación Android .....	192
Figura 41. Localización de los Nodos en el Campus de la Universidad Católica San Antonio Murcia.....	196
Figura 42. Despliegue Nodos Acústicos en Campus de la Universidad Católica San Antonio Murcia a) Nodo 3 y b) Nodo 4 .....	197
Figura 43. Representación de los Valores de Molestia Binaural en cada Nodo en el Despliegue de una Red de Sensores Inalámbricos en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia .....	200
Figura 44. Representación de la Diferencia entre los Percentiles $L_{90}$ y $L_{10}$ de cada Nodo en el Despliegue de una Red de Sensores Inalámbricos en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia .....	201
Figura 45. Representación de Valores de los Parámetros Psicoacústicos: Percentil de Loudness Binaural 5, 50 y Diferencia 90-10, Percentil de Sharpness Binaural 5, 50 y Diferencia 90-10 en cada Nodo desde (a) para el Nodo 1 hasta (d) para el Nodo 4 en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia .....	202
Figura 46. Mapa de Ruido. Aplicando la Interpolación Espacial de Kriging, a partir de los Valores de la Tabla 26 y la Molestia Binarual obtenidos en la Monitorización en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia a) $L_{Aeq}$ b) $N_{bin}$ c) $S_{bin}$ d) Molestia Binaural.....	203
Figura 47. Valores de $L_{Aeq,24h}$ Obtenidos en el Nodo 3 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia, durante el Periodo Regular, desde el 1 de Febrero al 29 de Febrero de 2020.....	204
Figura 48. Distribución de Frecuencias de $L_{Aeq,1m}$ en el Nodo 3 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia, tanto en Periodo Regular como en Estado de Emergencia.....	205
Figura 49. Valores de $L_{Aeq,1h}$ en el Nodo 4 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia durante el Estado de Alarma, desde 15 de Marzo al 15 de Abril. ....	206
Figura 50. Valores de $L_{Aeq, 24h}$ en el Nodo 4 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia durante el Estado de Alarma, desde 15 de Marzo al 15 de Mayo .....	207

Figura 51. Gráfico de Distribución de Frecuencias de los Valores de $L_{Aeq,1m}$ en el Nudo 4 del campus universitario en Periodo regular y en el Estado de Emergencia. ....	208
Figura 52. Gráficos de Distribución de Frecuencias de los Valores de $L_{Aeq,1m}$ en el Nudo 4 del Campus Universitario para los Intervalos de Día, Tarde y Noche Comparando el Estado de Emergencia y los Períodos Regulares. ....	209

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los Efectos en la Salud a causa del Ruido .....	57
Tabla 2. Efectos del Ruido en Aspectos Sociales y Económicos .....	64
Tabla 3. Definición de Parámetros $N_d$ , $N_e$ y $N_n$ según Normativa .....	75
Tabla 4. Nodos o Sensores de Bajo Coste .....	97
Tabla 5. Valores Límites referidos a los Niveles de Exposición Diaria y a los Niveles de Pico de acuerdo al R.D. 286/2006 .....	121
Tabla 6. Especificaciones Técnicas de Raspberry Pi 3 Modelo B .....	141
Tabla 7. Lista de Componentes del Dispositivo Utilizado para los Casos 3.2.1 y 3.2.2. ....	150
Tabla 8 . Lista de Componentes del Dispositivo para el Caso 3.2.3 .....	151
Tabla 9. Valores $L_{Aeq,d \text{ in itinere}}$ dB(A) del Trabajador a lo largo de una Semana.....	167
Tabla 10. Valores $L_{Aeq,d 8h}$ dB(A) a lo largo de una Semana.....	167
Tabla 11. Valores Estadísticos en dB(A) Obtenidos en el Desplazamiento durante una Semana. ....	169
Tabla 12. Índices de Ruido de Tráfico a lo largo de una Semana .....	169
Tabla 13. Clima Sonoro a lo largo de una Semana .....	170
Tabla 14. Índices de Contaminación Acústica a lo largo de una Semana .....	170
Tabla 15 .Valores $L_{Aeq,d \text{ in itinere}}$ dB(A) y $L_{eq,d \text{ in itinere}}$ dB en el Desplazamiento de Ida en un Día Concreto .....	172
Tabla 16. Valores $L_{Aeq,d \text{ in itinere}}$ dB(A) y $L_{eq,d \text{ in itinere}}$ dB en el Desplazamiento de Vuelta en un Día Concreto .....	172
Tabla 17. Valores Estadísticos Obtenidos en dB(A) durante el Desplazamiento en un Día Concreto. ....	174
Tabla 18. Distancia entre Nodos Desplegados en la Urbanización.....	180
Tabla 19. Evaluación de la Contribución de Roughness y Fluctuation Strength según Señal Acústica .....	182
Tabla 20. Valores Estadísticos Promedio y Desviación Típica, entre Paréntesis, de cada Nodo en Todo el Periodo de Estudio sobre la Molestia en una Urbanización .....	183
Tabla 21. Matriz de Correlación de Pearson para $L_p$ , Loudness Binaural y Sharpness binaural en una Urbanización.....	184
Tabla 22. Resumen de la Prueba de Validación Cruzada del Promedio Espacial usando Leave-One-Out con un Método de Modelo Lineal. ....	186
Tabla 23. Resumen de la Prueba de validación cruzada Temporal Leave-One-Out con un Método de Modelo Lineal en cada Ubicación .....	187
Tabla 24. Resultados de la Encuesta Realizada en el Entorno de la Urbanización .....	193

Tabla 25. Ubicación y Localización de los Nodos Desplegados en la Red de Senores en el Campus de Universidad Católica de San Antonio Murcia..... 197

Tabla 26. Valores obtenidos por la red de sensores en el periodo regular en el campus de la Universidad Católica San Antonio Murcia ..... 199

# **I - INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.**

## I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

En las últimas décadas ha habido una clara tendencia a la despoblación de las zonas rurales, así como una creciente concentración de seres humanos en las ciudades. Según las Naciones Unidas, el 55% de la población mundial reside en entornos urbanos y se proyecta que este porcentaje seguirá aumentando hasta el 68% para el año 2050 (United Nations, 2018).

Este crecimiento de los entornos urbanos y de la población en los mismos ha provocado una pérdida de calidad de vida, debido fundamentalmente a factores medioambientales (Loorbach y Shiroyama, 2016). Estos factores hacen que la población urbana actual se encuentre expuesta a una compleja mezcla de contaminantes medioambientales (Tang y Wang, 2007), creando un impacto importante en la sostenibilidad de las ciudades tanto a nivel económico como social y medio ambiental (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002)

Uno de estos agentes es la contaminación acústica, la cual representa un grave problema en los entornos sociales, sobre todo en los urbanos. La contaminación acústica tiene consecuencias en la calidad de vida y en la salud de las personas, tanto física como psíquica de los habitantes (Marquis-Favre et al., 2005a; Marquis-Favre et al., 2005b), principalmente esto se debe a los cambios constantes en el entorno sonoro y la generación de molestia.

Cada día más, los niveles acústicos se van incrementando debido al aumento de fuentes sonoras, como por ejemplo, los medios de transporte y las actividades humanas, tanto industrial como de ocio. Por tanto, este agente nocivo y sus consecuencias siguen en alza. La contaminación acústica (también conocida como contaminación sonora o ruido ambiental) causada por las emisiones de ruido y vibraciones, es definida por la Ley 37/2003 (LRJSP 37/2003, de 17 de noviembre) como el sonido exterior no deseado o nocivo generado por las

actividades humanas, donde se incluyen: el ruido emitido por los medios de transporte, tráfico rodado, ferroviario, aéreo y por los emplazamientos de actividades industriales.

El problema del ruido y sus consecuencias siempre han estado relegadas a un segundo plano, ya que este agente es invisible y silencioso. Invisible, ya que no es percibido por el sentido más agudizado del ser humano, la vista, y silencioso, ya que desde que el ser humano nace, convive con él sin descanso, minándolo, tanto física como psicológicamente, sin que el ser humano sea capaz de darse cuenta. El ruido es molesto y subjetivo y resulta un agente perjudicial para el ser humano. Sin embargo, ha sido asumido como un elemento más de la vida diaria, sin ser conscientes, en muchas ocasiones de sus afectos en la salud. Aunque el ruido no se acumula en los espacios, sí se acumulan sus efectos en las personas a lo largo del tiempo (Dalton et al., 2001). En consecuencia, el ruido tiene un componente temporal importante cuando se está expuesto durante largos periodos a sus efectos.

Los posibles efectos de la contaminación acústica sobre la salud son numerosos, generalizados, persistentes médicamente y socialmente significativos. El ruido produce efectos adversos directos y acumulativos que perjudican la salud (Jariwala et al., 2017), degradando zonas residenciales, los entornos sociales y la vida laboral, y con las correspondientes pérdidas reales (económicas) e intangibles (bienestar) que esto conlleva (Goines y Hagler, 2007). Pero las fuentes sonoras no afectan únicamente al ser humano, sino también al entorno. De esta manera aparece el término inglés *soundscape*, que es definido como un entorno sonoro (o ambiente sonoro) que viene determinado por la forma en que es percibido y entendido por el individuo o por una sociedad (International Organization for Standardization [ISO], 2018). Los entornos sonoros, sean urbanos o no, son el resultado de una compleja interacción entre un gran número de fuentes sonoras de diferente naturaleza y todo ello bajo unas condiciones urbanísticas, arquitectónicas y atmosféricas muy concretas (Safeer, 1973).

Tradicionalmente, las mediciones de ruido, su control y su evaluación han sido llevadas en los entornos urbanos a través de sonómetros y/o de modelos

teórico-prácticos con el objetivo de la creación de mapas de niveles sonoros en ciertas zonas de las ciudades. Las mediciones con sonómetro (Asociación Española de Normalización [UNE], 2014) tienen inconvenientes en las mediciones de larga duración o muchas repeticiones, sobre todo en entornos exteriores. Son mediciones manuales, donde se requiere formación y experiencia (Peckens et al., 2018), y por tanto un alto coste de personal. Adicionalmente, los sonómetros son equipos de medición costosos y cuyos valores captados y posteriormente analizados son concretos en tiempo y espacio en la zona de estudio. Además, los resultados obtenidos son de un parámetro objetivo (nivel de presión sonora) que sirven como indicativo para valorar la exposición al ruido de los habitantes de las ciudades. Sin embargo, dichas herramientas y resultados se encuentran limitados en alcance al no evaluar aspectos tan importantes como los psicoacústicos, los cuales tienen en cuenta la sensación subjetiva que el sonido generado en los entornos sonoros, produce a las personas.

En estos últimos años la creación de ciudades inteligentes está creciendo, haciendo uso de la tecnología de Internet de las Cosas, del inglés Internet of Things (IoT) (Zanella et al., 2014). Esta tecnología está proporcionando nuevas herramientas para la monitorización, gestión y evaluación de contaminantes ambientales, incluyendo el ambiente sonoro, reduciendo a su vez los costes de las técnicas tradicionales y proporcionando datos en tiempo real que permiten la toma de decisiones para mitigar los posibles efectos adversos en las diferentes zonas de la ciudad.

Recientemente, la aplicación de las tecnologías IoT para el campo de la acústica, y en especial para la monitorización del sonido, ha despertado el interés de la comunidad científica. Usando estas tecnologías IoT se han desarrollado dispositivos pequeños y autónomos para la realización de campañas de medición de larga duración con una adecuada calidad y bajo coste, permitiendo posteriormente y a través de una comunicación habitualmente inalámbrica con los servidores en la nube, compartir la información en portales destinados a la ciudadanía. Los avances que han traído las plataformas de IoT, las comunicaciones y el aumento de la potencia de computación en las placas computadoras reducidas (Single Board Computer, SBC) han incrementado



sustancialmente las capacidades de estos sensores pudiendo realizar análisis avanzado de la señal sonora.

Esta tesis doctoral se enmarca dentro de la línea de investigación en Tecnologías Multimedia del Grupo de I+D+i en Telecomunicaciones avanzadas (GRITA), perteneciente al programa de doctorado en Tecnologías de la Computación e Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica San Antonio Murcia (UCAM), orientado hacia la aplicación de las telecomunicaciones para una mejora de la calidad de vida. El grupo GRITA diseñó en investigaciones anteriores un dispositivo electrónico autónomo destinado a monitorizar los niveles sonoros en una localización concreta, captando la señal sonora binaural y calculando varios índices acústicos. Este equipo ha sido ampliado en esta tesis para poder ser usado de forma conjunta en una red de dispositivos o nodos, denominadas WASN, en inglés Wireless Acoustic Sensor Network. Mediante el despliegue de esta red se busca evaluar la contaminación acústica y la molestia del ruido en el entorno sonoro determinado.

Esta tesis doctoral tiene como objetivo principal el análisis y validación de las redes inalámbricas de sensores acústicos para el estudio y la evaluación de la contaminación acústica y la molestia del ruido en la actividad humana. Para ello, se han analizado diferentes entornos sonoros urbanos a través de una serie de campañas de larga duración que permitan verificar el uso de estas redes y validar las prestaciones para la evaluación del ambiente sonoro.

## 1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS

El crecimiento de la población y los cambios de hábitos de la sociedad ha dado lugar a cambios importantes en los entornos urbanos, tanto visuales como acústicos, creando entornos cada vez menos sostenibles y una pérdida de calidad de vida en los mismos. La contaminación acústica es inherente a estos cambios, por lo que es necesario la implementación de nuevas herramientas de gestión del ruido ambiental que permitan identificar problemas con rapidez para su control. El ruido, como agente perjudicial, es una de las quejas más frecuentes de la población que vive en las grandes ciudades (Muzet, 2007), lo que ha provocado

que las autoridades empiecen a considerar el ruido como un agente nocivo al que es necesario evaluar y proponer acciones de mejora.

Adicionalmente, la tendencia actual de la implantación de las tecnologías de la información y las comunicaciones, y en concreto al paradigma del Internet de las Cosas, en todos los ámbitos cotidianos y no solo a la industria, han dado lugar a grandes avances que han permitido mejorar dispositivos electrónicos, tanto en prestaciones como en tamaño y coste, para la recogida de datos ambientales. Además, se añade la posibilidad de transmitir la información de manera sencilla para su posterior almacenamiento y análisis.

La inquietud del grupo GRITA, por parte de su investigador principal el Dr. D. Juan Miguel Navarro Ruiz y su equipo, por mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, dio como resultado la creación de un dispositivo de bajo coste (Noriega-Linares y Navarro Ruiz, 2016) capaz de realizar mediciones de larga duración y que permite la obtención de parámetros ambientales meteorológicos y acústicos, estableciendo el inicio de este trabajo de investigación.

Entre las distintas soluciones que aparecen en la literatura actual para la evaluación de los entornos sonoros, como son sonómetros o mapas de ruido, esta tesis plantea una alternativa como es la utilización de redes de sensores para el estudio acústico. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo de investigación es el análisis y validación de las redes inalámbricas de sensores acústicos para el estudio y la evaluación de la contaminación acústica y la molestia del ruido en diferentes entornos sonoros.

Para ello se tienen en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- Evaluación, validación e integración en una red de sensores, de un dispositivo acústico diseñado en trabajos anteriores a esta tesis, para evaluar la sensación de molestia en entornos urbanos a través de parámetros acústicos y psicoacústicos.
- Ampliar las características del nodo acústico para añadir capacidad de transmisión de datos y formar parte de una red de sensores.

- Proporcionar una metodología para diseñar, planificar y desplegar una red de sensores acústicos para la monitorización de larga duración en el tiempo de un entorno acústico.
- Aplicar técnicas de análisis estadístico espacial y temporal a los datos recopilados por la red para la descripción del entorno sonoro.
- Evaluar las molestias y afecciones debidas a la contaminación acústica recibidas por las personas, en los períodos in itinere que pasan en el interior de los vehículos, tanto por la exposición a ruido de tráfico y como del entorno.
- Analizar la idoneidad de aplicar una red inalámbrica de sensores acústicos para la evaluación de la molestia al ruido durante largos periodos de tiempo en un entorno urbano residencial.
- Analizar la idoneidad de aplicar una red inalámbrica de sensores acústicos para la evaluación de la molestia al ruido durante largos periodos de tiempo en un entorno de campus universitario.

### 1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis está organizada de la siguiente forma:

- **Capítulo 2:** En este capítulo se presenta los fundamentos básicos sobre la evaluación de la calidad acústica en el medio ambiente. Para ello se introduce el problema de la contaminación acústica y se define los conceptos básicos del sonido, sus propiedades y los parámetros tanto objetivos como subjetivos más habituales en la monitorización ambiental del ruido. Después, se presentan las fuentes de ruido más comunes en las ciudades y los efectos que el ruido o molestia producen en las personas. A continuación se desarrolla un estudio del arte de los diferentes tipos de dispositivos utilizados para la medición del campo sonoro, introduciendo la nueva tecnología para la monitorización de los entornos urbanos, como son las redes de sensores acústicos. Finalmente, se incluye una revisión de las metodologías para la evaluación del campo sonoro y la normativa vigente en materia de contaminación acústica.

- **Capítulo 3:** en este apartado se desarrollan las contribuciones originales que se aportan en este trabajo de investigación. En una primera parte se presenta los materiales y la metodología utilizada para el despliegue de la red de sensores acústicos en entornos urbanos. Posteriormente se presentan los diferentes experimentos y resultados en varios escenarios donde se han realizado evaluaciones de larga duración del campo acústico usando estas redes.
- **Capítulo 4:** se describen las conclusiones obtenidas en este trabajo de investigación y sus contribuciones principales, junto con ideas para futuras investigaciones.
- **Capítulo 5:** esta sección se dedica exclusivamente a mostrar las referencias bibliográficas que han ayudado a la confección de esta tesis.

#### 1.4 CONTRIBUCIONES A CONGRESOS Y REVISTAS

- Artículos de congresos:

- Montoya-Belmonte, J., Noriega- Linares, J. E., & Navarro Ruiz, J. M. (2017). Análisis preliminar de la molestia acústica recibida por los ciudadanos en sus desplazamientos in-itinere en vehículo. *Proceedings of Tecniacústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica; Encuentro Ibérico de Acústica; European Symposium on Underwater Acoustics Applications; European Symposium on Sustainable Building Acoustics: A Coruña 3-6 octubre 2017* (pp. 539-547). Sociedad Española de Acústica.
- Montoya-Belmonte, J., Segura-García, J., & Navarro-Ruiz, J. M. (2018). Estudio del despliegue de dispositivos IoT acústicos para el análisis del ruido en entornos educativos. . *Proceedings of XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica–TECNIACUSTICA'18. Cádiz 24-26 octubre 2018* (pp. 534-544). Sociedad Española de Acústica.
- Navarro- Ruiz, J.M., Montoya -Belmonte, J., Botia, M.D., & Escolano J. Creación de un nodo acústico virtual para simulación de una red de sensores. *Proceedings of XI Congreso Iberoamericano de*

*Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica–TECNIACUSTICA'18*. Cádiz 24-26 octubre 2018 (pp. 527-533). Sociedad Española de Acústica.

- Segura-Garcia, J., Navarro-Ruiz, J. M., Perez-Solano, J. J., Montoya-Belmonte, J., Felici-Castell, S., Cobos, M., & Torres-Aranda, A. M. (2018). Análisis espacio-temporal de los parámetros psico-acústicos en entornos acústicos urbanos usando sistemas IoT en tiempo real. *Proceedings of XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica–TECNIACUSTICA'18*. Cádiz 24-26 octubre 2018 (pp. 552-562). Sociedad Española de Acústica.

- Artículos de revista:

- Segura-Garcia, J., Navarro-Ruiz, J. M., Perez-Solano, J. J., Montoya-Belmonte, J., Felici-Castell, S., Cobos, M., & Torres-Aranda, A. M. (2018). Spatio-temporal analysis of urban acoustic environments with binaural psycho-acoustical considerations for IoT-based applications. *Sensors*, 18(3), 690.

Factor de Impacto: 3,275 y se encuentra en JCR - Q1 (*Instruments & Instrumentation*) / CiteScore - Q1 (*Instrumentation*)

- Montoya-Belmonte, J., & Navarro, J. M. (2020). Long-Term Temporal Analysis of Psychoacoustic Parameters of the Acoustic Environment in a University Campus Using a Wireless Acoustic Sensor Network. *Sustainability*, 12(18), 7406.

Factor de Impacto: 2,579 y se encuentra en el JCR - Q2 (*Environmental Sciences*) / CiteScore - Q1 (*Geography, Planning and Development*).



## **II - EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN EL MEDIO AMBIENTE**

## II - EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN EL MEDIO AMBIENTE

### 2.1 CONTEXTUALIZACIÓN

En las últimas décadas las ciudades se encuentran ante un importante crecimiento de la población. Este crecimiento conlleva cambios notorios en los entornos urbanos, producidos en gran medida por un aumento considerable de la contaminación. Esto supone un reto para mantener la sostenibilidad de las ciudades. Además, se dificulta el mantenimiento y la mejora de la calidad de vida de sus ciudadanos. Entre los diferentes tipos de contaminación, la contaminación acústica se ha identificado como uno de los principales problemas de salud en estos entornos urbanos, siendo considerado por la Agencia Europea de Medioambiente como el mayor problema de salud ambiental en Europa. (European Environment Agency, 2021). Para conocer mejor este fenómeno de la contaminación acústica en el apartado 2.2 se describen las principales fuentes sonoras en entornos urbanos.

Un adecuado control del ruido permite reducir los efectos nocivos de la contaminación acústica en las personas (descritas en el apartado 2.3), mejorando así su calidad de vida. Sin embargo, la población no es experta en análisis y control de ruido, lo que hace que el término molestia acústica (una sensación subjetiva negativa que el ruido causa en las personas), sea más utilizado que el término contaminación acústica. De hecho, la adecuada evaluación de la molestia acústica es un campo científico con relevancia en los últimos años, siendo uno de los objetivos de esta tesis doctoral.

Ante la existencia de diferentes emisiones acústicas en los entornos, los países y regiones de la Unión Europea crearon una directiva y una serie de legislaciones para evaluar y controlar los niveles de ruido existentes. Las directivas 2002/49/CE (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002) y 2015/996 (Dir. 2015/996 de la Comisión, de 19 mayo de 2015), a través del



European Noise Directive (END) que serán descritas en el apartado 2.6.1.1, establecen una serie de guías y regulaciones en materia acústica para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos del ruido, incluyendo la molestia. Estas guías y regulaciones conllevan a su vez la creación de planes de acción y mapas estratégicos de ruido (MER) o SNM (Strategic Noise Maps) en sus siglas en inglés, para los distintos entornos acústicos, que serán introducidos en el apartado 2.6.1.2.

De manera más reciente, ha aparecido una nueva metodología, el Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-UE), donde se determina la metodología conjunta a seguir por los países miembros de la Unión Europea (UE) con el fin de abordar la contaminación acústica, evaluando y comparando los resultados de todos los estados miembros de la UE (Kephelopoulos et al., 2012). En el año 2022, y de acuerdo con el artículo 6.2 de la Directiva sobre el ruido ambiental (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002), entrará en vigor para todas las naciones de la Unión Europea el método común de evaluación del ruido CNOSSOS-EU para la elaboración de mapas estratégicos de ruido generado en carreteras, ferrocarriles, aeronaves e industria. Dado que ya existen métodos normalizados para el ruido de las aeronaves, CNOSSOS-EU tiene implicaciones menos significativas para esta fuente, prestando especial atención a las fuentes viales y ferroviarias, ya que son las áreas que se verán más directamente afectadas por la evolución hacia procedimientos normalizados de cálculo y estimación de exposición sonora (Faulkner et al., 2019). Los principales parámetros e índices utilizados para la evaluación del campo sonoro se introducen en el apartado 2.4. A continuación, en los apartados 2.5. y 2.6. se describen los equipos y los métodos, respectivamente, de evaluación del campo sonoro.

Es fundamental disponer de la mayor cantidad de información de índices sobre el campo sonoro, manteniendo su fiabilidad y precisión a lo largo del tiempo. Hasta la aparición de la tecnología de Internet de las cosas (del inglés Internet of Things, IoT), las mediciones de ruido han sido realizadas principalmente mediante una metodología in-situ usando sonómetros, que se describen en el apartado 2.5.2. Dichas mediciones se llevan a cabo en distintos puntos de interés alrededor de los núcleos urbanos y son realizadas

principalmente por técnicos especializados a tal fin, obteniendo datos en una secuencia concreta de tiempo y espacio, es decir, únicamente cuando se mide. Esta metodología de obtención de datos, que posteriormente son analizados, requiere la intervención manual humana, conllevando un incremento considerable de tiempo y coste para las entidades públicas que precisan de esta información para ajustarse a la normativa europea.

Adicionalmente a las mediciones manuales, es posible crear mapas estratégicos de ruido mediante métodos predictivos, que se describen en el apartado 2.6.3. Estos métodos predictivos se basan en modelos matemáticos teórico-prácticos que simulan la propagación del sonido y estiman los niveles de ruido según la fuente sonora que los genera (tráfico urbano, carreteras, zonas industriales, aeropuertos, etcétera). Gracias al uso programas de simulación que usan dichos modelos matemáticos, estos métodos predictivos son una herramienta fundamental para una primera aproximación a la gestión del ruido en una gran ciudad. Sin embargo, los resultados obtenidos son solo una aproximación de la situación real que debe ser comprobada y actualizada con mediciones in-situ (Maisonneuve et.,2010).

Ante esta problemática de fiabilidad, coste y tiempo, la aparición de la tecnología de IoT, que permite la conexión a internet de cualquier dispositivo, ha creado un nuevo paradigma en el campo de las mediciones ambientales. La creciente expansión de los nuevos dispositivos de bajo coste y cada vez computacionalmente más eficientes ha dado lugar a una serie de herramientas útiles para la gestión y evaluación de la contaminación ambiental. En los últimos tiempos, en el campo de acústica se han desarrollado los llamados nodos acústicos, que serán detallados en el apartado 2.5.3, los cuales permiten realizar mediciones continuas en el tiempo y de forma remota sin necesidad de personal.

Particularizando en la contaminación acústica, ámbito de esta tesis, es necesario realizar una buena evaluación y gestión para minimizar los efectos que produce en las personas, tanto físicos como psicológicos, así como sus efectos en el entorno. En general, la literatura se ha centrado principalmente en parámetros objetivos para evaluar la molestia del ruido, sin tener en cuenta las experiencias

del ser humano en el entorno. Recientemente se han empezado a tener en cuenta estas experiencias con el entorno para realizar su evaluación, dando lugar al término de paisaje sonoro. Este término es la representación de cómo la gente percibe y experimenta dichos ambientes acústicos, proporcionando una información más real (Kang et al.,2018), y será descrito en el apartado 2.6.4.

En resumen, la contaminación acústica está en aumento en las ciudades debido al crecimiento de la población y sus actividades en los entornos urbanos. Esto ha ocasionado que los países de la Unión Europea pongan su atención en este agente contaminante e intenten evaluarlo a través de mapas estratégicos de ruido. Actualmente estos mapas de ruido conllevan un coste elevado tanto de realizar como de actualizar, siendo la tecnología IoT una posible herramienta útil para la evaluación de este agente contaminante en conjunción con los métodos tradicionales in-situ y los métodos basados en predicción. Además, se hace necesario tener en cuenta el carácter subjetivo de la sensación de molestia, para lo cual se debe integrar en estos dispositivos IoT la capacidad de calcular parámetros acústicos que permitan evaluar los entornos sonoros.

El objetivo de este capítulo es presentar un marco teórico de la evaluación de la contaminación acústica y el ambiente sonoro en los entornos urbanos. Se organiza en las siguientes secciones: en el apartado 2.2 se presentan las principales fuentes sonoras en ambientes urbanos y en el apartado 2.3 se describen los efectos nocivos de la contaminación acústica en las personas tanto sanitarias como sociales, económicas y laborales. A continuación, en el 2.4 se muestran una serie de conceptos básicos sobre la onda sonora, además de desarrollar los principales parámetros acústicos tanto físicos como psicoacústicos. En 2.5 se introducen los equipos de medición del campo acústico, para posteriormente en el apartado 2.6 exponer los principales métodos de evaluación del campo sonoro y las normativas vigentes.

## 2.2 PRINCIPALES FUENTES SONORAS EN AMBIENTES URBANOS

Los entornos son una compleja interacción de factores visuales y sonoros de diferente naturaleza que vienen determinados por las condiciones urbanísticas, arquitectónicas y atmosféricas del emplazamiento. Estas características, por tanto, son propias del entorno y varían de un entorno a otro.

Schafer (1977), clasifica los sonidos que componen un paisaje en 3 grandes grupos:

- Sonidos fundamentales.
- Marcas sonoras.
- Señales sonoras.

El primero de ellos, los sonidos fundamentales que son aquellos que forman el fondo ambiental, es decir, el resto de sonidos percibidos van en contra de este. Estos sonidos fundamentales están presentes constantemente. El segundo de ellos, las marcas sonoras, son aquellos sonidos característicos de una comunidad, es decir, son sonidos únicos o que poseen cualidades que los hacen ser percibidos de manera especial. Y por último las señales sonoras, que son aquellos sonidos a los que se dirigen la atención especialmente, es decir, un sonido específico que destaca sobre el fondo de los sonidos principales (Adam et al., 2006). En otros términos y haciendo un símil con una imagen, los sonidos fundamentales serían el fondo de una imagen y las marcas sonoras serían la forma de dicha imagen (Schafer, 1977).

En los entornos urbanos los cambios de contaminación acústica son atribuibles al crecimiento de la población, la urbanización y al crecimiento asociado al uso de fuentes de ruido cada vez más potentes y variadas. Los medios de transporte (autopistas, ferrocarriles y tráfico aéreo) son considerados como una de las principales fuentes del ruido ambiental. En particular, el crecimiento de infraestructuras como carreteras y ferrocarriles, así como la expansión de la urbanización y el aumento del tráfico aéreo, hacen que la contaminación acústica produzca efectos negativos que afectan a aspectos sociales, económicos y

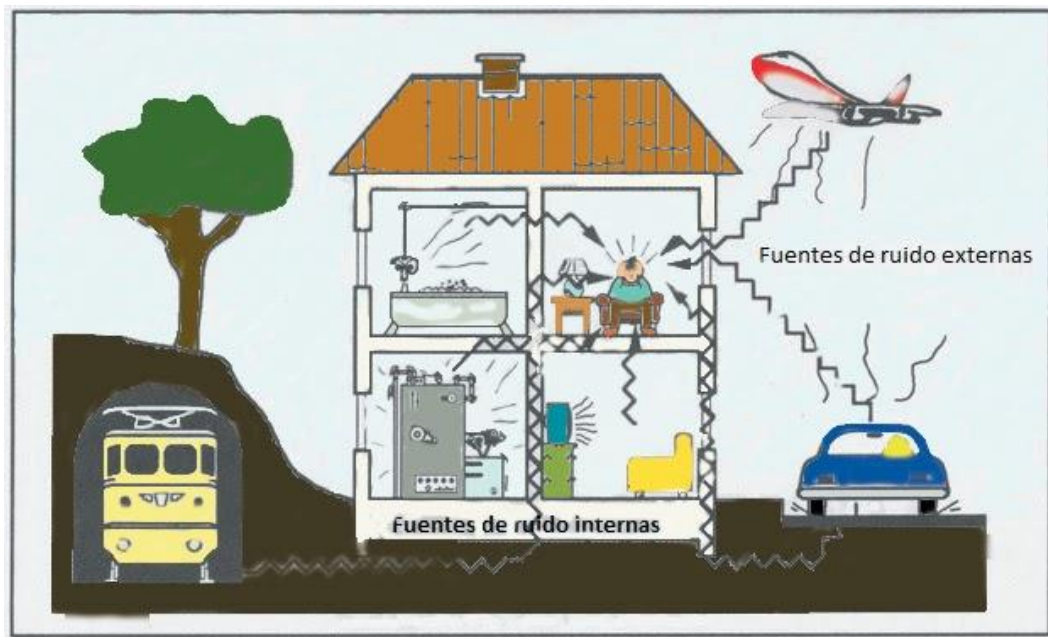
laborales (Singh y Davar, 2004; Jariwala et al., 2017). Estos efectos implican además una amplia gama de perturbaciones auditivas, lo cual será tratado en el apartado 2.3.

La intensificación del transporte, junto con un aumento de las actividades industriales y la construcción de nuevas viviendas y su equipamiento, han creado un impacto negativo en la calidad de la vida urbana, resaltando el tráfico rodado como principal fuente de ruido (Berglund et al., 2000; Doygun y Kuşat 2007). De esta manera, los niveles de ruido provocados por el tráfico rodado han sufrido un aumento considerable (Goines y Hagler, 2007), resultando al que más expuesto se encuentra la población, con la excepción de aquellas zonas cercanas a líneas ferroviarias y aeropuertos (Berglund et al., 2000).

La contaminación acústica puede propagarse por vía aérea o por medio de vibraciones. Si el sonido es transmitido directamente por la fuente y llega al ser humano a través del aire circundante se habla de vía aérea, como por ejemplo el generado por los cláxones o el sonido de un televisor (ver figura 1). Por otra parte, el ruido de vibraciones o ruido estructural es aquel ruido que tiene su origen en la excitación mecánica de elementos sólidos, ya sea por un impacto de corta duración o la vibración de una máquina. Este tipo de ruido se transmite por vía sólida (estructural), aunque finalmente es percibido por el receptor a través del aire. Dado que en los sólidos el sonido se propaga a mayor velocidad que en los gases, ya que tienen una mayor impedancia acústica, el ruido de vibraciones se transmite a gran distancia con facilidad. Son ruido de vibraciones, por ejemplo, las pisadas, las caídas de objetos o las vibraciones de equipos e instalaciones (ver figura 1) (RDL 1371/2007, de 19 de octubre). También podemos encontrar una serie de fuentes generadoras de ruido que se propagan por ambas vías, como es el ruido generado por el metro en las ciudades o los aparatos domésticos. (Ver figura 1)

**Figura 1**

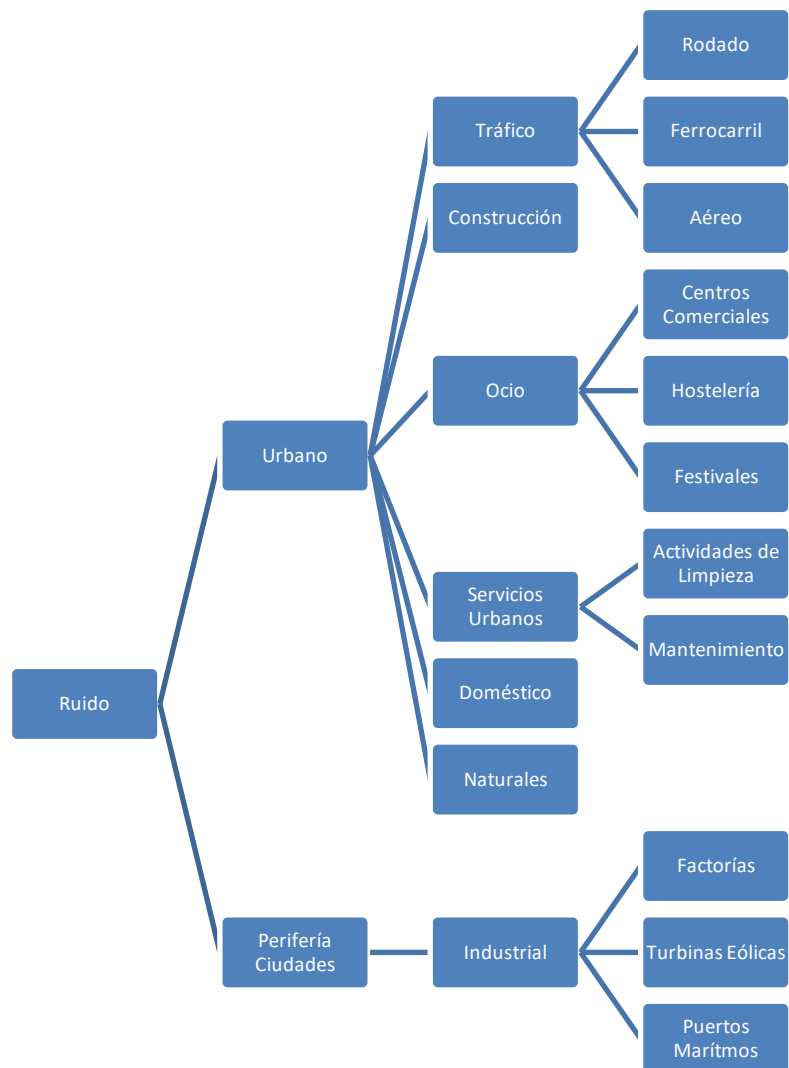
*Ilustración de la Propagación de Fuentes de Ruido tanto Interiores como Exteriores en una Vivienda.*



Las principales fuentes de sonoras en las ciudades son generadas por las actividades humanas e industriales de diferentes naturalezas y se pueden clasificar de la siguiente forma:

**Figura 2**

*Esquema de las Principales Fuentes Sonoras de Ruido en Entornos Urbanos y de su Periferia.*



### 2.2.1 Fuentes de ruido de tráfico

Según el estudio de Licitra et al. (2011), dentro del ruido de tráfico, el tráfico ferroviario (Licitra et al., 2016; Bunn y Zannin, 2016) representa la segunda fuente de ruido más impactante que afecta al estilo de vida humana actualmente, después del tráfico rodado. La tercera fuente generadora de ruido de tráfico sería el tráfico aéreo (Iglesias-Merchan et al., 2015; Gagliardi et al., 2017).

#### 2.2.1.1 Tráfico rodado

El tráfico rodado es el creado por los vehículos, cuyos principales generadores de ruido son: el ruido del motor, el ruido de rodadura y el ruido aerodinámico. Teniendo en cuenta una variable importante como es la velocidad del vehículo, a velocidades por encima de 100 km/h el ruido generado por la aerodinámica comienza a contribuir significativamente más en el ruido global del vehículo, mientras que, a bajas velocidades por debajo de los 50 km/h, el sonido originado por sus partes mecánicas y los neumáticos son los predominantes (Crocker, 2007).

Por un lado, el propio vehículo genera ruido a través de sus elementos mecánicos. Estas partes mecánicas incluyen principalmente al motor, al sistema de transmisión y al sistema de escape de gases (Jekosch, 2004). Resulta necesaria, por tanto, la capacidad para predecir y evaluar las consecuencias acústicas en la construcción y el control del motor en el proceso de desarrollo de vehículos (Duvigneau et al., 2016).

Sin embargo, en los últimos años, el ruido provocado por la de rodadura está tomando más importancia, ya que los fabricantes están construyendo motores cada vez más silenciosos, así como por la aparición del coche eléctrico. Este ruido se crea a partir del contacto entre los neumáticos y el pavimento, resultando estos dos elementos como los principales a tener en cuenta al intentar reducir el ruido global. El ruido generado entre neumático y asfalto varía según ciertas condiciones. Una de estas condiciones, y de acuerdo con la afirmación de Cai, al. et (2017), determina que el nivel de presión sonora incrementa considerablemente con la presencia de agua para todo tipo de vehículos,



resultando una diferencia entre el húmedo y el seco para vehículos ligeros de hasta 10,09 dB(A), para vehículos medianos de 5,56 dB(A), y para vehículos pesados de 4,26 dB(A). El tamaño del vehículo y la disminución de velocidad provocan a su vez una disminución del ruido de rodadura. Otra de esas condiciones a tener en cuenta es el tipo de pavimento, en el que según Bernahard et al. (2005), la interacción del pavimento con los neumáticos puede dar lugar a una variación de 9 dB(A), llegando a 14 dB(A) de diferencia entre los diferentes tipos de pavimentos.

#### *2.2.1.2 Tráfico ferroviario*

En el caso de la existencia de ferrocarril que atraviesa un área urbana, este hace que el nivel de presión sonora crezca rápidamente y tanto más deprisa cuanto más cerca se encuentra el punto de observación. Este ruido depende de varios factores principales como son: el sistema de colocación de los raíles, la conservación de la vía, la naturaleza y tipo del material rodante, la velocidad, la longitud del tren y por último la naturaleza del suelo (Nunes y Travisi, 2016). En el caso específico del metro tiene que evitarse el ruido aéreo dentro del túnel y la propagación de las vibraciones generadas cuando éste circula y son transmitidas a la superficie (Harris, 1997).

#### *2.2.1.3 Tráfico aéreo.*

En los entornos cercanos a los aeropuertos, la generación de ruido por aeronaves se produce principalmente en los despegues y aterrizajes de los aviones. Estos dos momentos de operación son los que más ruido provocan debido a que la potencia acústica emitida es máxima. Además, existen unas condiciones favorables de la propagación del ruido al existir pocos obstáculos y a la cercanía con el receptor (Harris, 1997).

### **2.2.2 Fuentes de ruido de la construcción**

La segunda tipología de fuentes de ruido, de acuerdo con la Figura 2, es la generada por las actividades de la construcción. Las principales fuentes de ruido en una obra de construcción se deben en gran medida a la maquinaria pesada empleada para nuevas edificaciones, mantenimiento o nuevos equipamientos

tales como calles, aceras, etcétera. A efectos de los estudios sobre el ruido, estos mecanismos deben considerarse como fuentes de ruido puntuales o lineales dependiendo del nivel de movimiento en la obra y son complejos de modelar dada el gran abanico de maquinaria de diferente naturaleza. Por poner un ejemplo, la maquinaria usada en la construcción puede generar ruidos impulsivos y continuos de nivel fluctuante, tales como dispositivos de accionamiento neumático (martillo neumático 120 dB(A)), taladros, máquinas de movimiento de tierras y motores de combustión.

Con el crecimiento de la urbanización, las obras de construcción son inevitables en las ciudades, lo que produce ruidos de alto nivel de presión sonora aunque de corta duración en el tiempo. De acuerdo con Neitzel y Seixas (2005), los ruidos de la construcción pueden ser lo suficientemente fuertes como para causar una pérdida de audición permanente, donde según dicho estudio muchos trabajadores de la construcción no pueden oír tan bien como antes. En los estudios de Kerr et al. (2002) y Suter (2002), el nivel medio de presión sonora generado por la mayoría de las tareas de construcción supera los 90 dB(A), y algunos de ellos incluso superan los 95 dB(A).

### **2.2.3 Fuentes de ruido de ocio**

La tercera tipología de fuentes de ruido es la procedente de actividades urbanas comunitarias o de recreo. En las últimas tres décadas las ciudades europeas se han visto afectadas por un tipo particular de contaminación acústica derivada de las actividades recreativas situadas generalmente en el centro de las ciudades (Ottoz et al., 2018). Este ruido se genera principalmente por la concentración de población en un determinado intervalo de tiempo como serían grandes centros comerciales, edificios, tiendas y eventos sociales. Este tipo de ruido va en crecimiento y resulta una fuente continua de quejas por parte de los residentes de las zonas afectadas, suponiendo su gestión un difícil reto para las autoridades locales, especialmente en destinos turísticos ya que no pueden paralizar esas actividades de forma inmediata por el interés económico y social que generan (Asensio et al., 2018).

Ottoz et al. (2018) llevaron a cabo una campaña de monitorización de ruido en Milán y Turín en la que se realizaron encuestas online para analizar el bienestar de los residentes en las áreas de estudio, quedando demostrado los altos niveles de ruido a los que estaban expuestos los ciudadanos de esas zonas. En otra investigación llevada a cabo en Pisa (Italia) (Vinci et al., 2017) se colocaron sensores de ruido en domicilios privados del centro de la ciudad. Este trabajo demostró que los mapas estratégicos de ruido no suelen estar bien dimensionados, ya que para el caso de las ciudades del Mediterráneo se debería tener en cuenta la fuente de ruido de ocio. Decanau y sus compañeros (2020) destacan que las principales fuentes de ruido de un centro comercial en su zona exterior están representadas por los aparatos de aire acondicionado, las bombas de calor situadas en el tejado y el ruido de impacto por las actividades logísticas que conlleva un centro comercial y generado en los muelles de carga y descarga.

En cambio, estudios científicos demuestran que los entornos verdes urbanos son espacios beneficiosos para la vida en la ciudad, relacionándose a su vez con tres valores clave: sociales, económicos y ambientales (Sander, 2015; Scopelliti et al., 2016). Estos entornos verdes proporcionan espacios que promueven la actividad física, y permiten tanto el descanso o la relajación como el aumento de la interacción social (Dadvand et al., 2016). Aun así, existe un cierto grado de molestia generado principalmente por el tráfico rodado, y que junto con las actividades de caminar y hablar provocan en estos espacios emociones tales como irritabilidad, ansiedad e interrupciones de conversación. Del mismo modo, en este entorno urbano, el nivel de molestia al ruido entre los usuarios es inferior al estimado en otras zonas urbanas con un nivel de exposición sonora similar (Rey Gozalo et al., 2018).

Dentro de la clasificación de los ruidos de ocio también se encuentra los producidos por festivales y fiestas de diferente índole. Patel y Bhave (2014) realizan un estudio de un festival en la ciudad de Mumbai, donde destacan que una de las principales fuentes de contaminación sonora en dicha ciudad es el ruido generado durante los festivales.

#### **2.2.4 Fuentes de ruido de servicios urbanos**

A los ruidos generados por el ocio en horario nocturno se le une otra fuente de ruido importante, como es la generada por los equipos de limpieza, tanto por los contenedores como por los equipos de recogida de basura. Según Barrigón Morillas et al. (2001), el ruido generado por la gestión de los residuos sólidos es una de las grandes quejas nocturnas de la sociedad. Las principales fuentes de generación de este ruido son los motores en marcha de los vehículos de recogida de residuos y la descarga de los contenedores en el camión. Los componentes de los residuos sólidos urbanos, como el vidrio y las latas de metal, son los que más contribuyen al ruido especialmente durante el vaciado de los contenedores de metal en el vehículo de recogida de residuos (Ncube et al., 2017).

El ruido generado por los servicios de obra y mantenimiento urbanos son fuentes sonoras con características idénticas al subgrupo de las fuentes de construcción, tratados en el apartado 2.2.2, siendo fuentes de ruido ocasionales de diversa naturaleza y de compleja modelización.

#### **2.2.5 Fuentes de ruido del entorno doméstico y comunitario**

Otra de las fuentes de ruido a considerar son los ruidos del entorno doméstico (Bae et al., 2016), como los procedentes de televisores, aires acondicionados (Bradley, 1993), y electrodomésticos (Ryu et al., 2020). El ruido causado por los electrodomésticos se ha considerado un problema grave. Ya en 1975, Jackson y Leventhall (1975) afirmaron que los electrodomésticos de la cocina son generalmente más ruidosos que otros equipos de la casa, con niveles de ruido en el rango de 40-90 dB, aproximadamente. Bae et al. (2016), en su estudio sobre el ruido generado por los electrodomésticos domésticos, como son secadoras, frigoríficos, aspiradoras y ventiladores, determinaron que los frigoríficos producen mayor rugosidad y fluctuación de ruido, mientras que las aspiradoras crean mayor nitidez de ruido.

Pero no solo los equipos domésticos propios de una vivienda son generadores de ruido. En España, Romeu et al. (2000) analizaron los ascensores de 50 edificios domésticos, incluyendo el análisis de las vibraciones. De dicho

estudio se desprende que las principales fuentes sonoras son: el propio ascensor, el controlador, las puertas y el dispositivo de bloqueo. Las mediciones de ruido que muestran valores superiores a 50 dB(A), fueron causados por fallos en el aislamiento de las vibraciones de la máquina y del controlador en los ascensores.

En 2004, Romeu et al. (2004) aborda el problema del ruido generado por los sistemas de suministro de agua sanitaria en las viviendas, la principal causa generadora de ruido es el problema de la cavitación. La cavitación se produce cuando la presión del líquido cae por debajo de la presión del vapor. Se forman burbujas de vapor que se colapsan rápidamente al aumentar la presión. Ese colapso de las burbujas está asociado a la generación de ruido.

#### **2.2.6 Fuentes de ruido de sonidos naturales**

Por último, otras fuentes de ruido dentro de las zonas urbanas son los sonidos naturales. Estos pueden venir determinados por agentes atmosféricos, como por ejemplo las tormentas generadas por la lluvia, el granizo y/o los truenos (Gallin et al., 2016), y los sonidos producidos por elementos de la naturaleza, como por ejemplo el canto de pájaros y las fuentes de agua en los jardines y plazas (Coensel et al., 2011; Leung y Tang, 2016).

El estudio de Coensel et al. (2011) confirma que el sonido del agua no sólo enmascara el sonido no deseado, como el del tráfico, sino también otros sonidos naturales deseados. Además, el sonido del agua aumenta el nivel general de sonido ambiental y sólo muestra un efecto de enmascaramiento eficaz cuando el sonido del tráfico tiene una baja variabilidad temporal, como por ejemplo autopistas. Pero tal y como indica Nilsson et al. (2010) en su estudio, añadir sonidos deseados puede minimizar el efecto molesto de los sonidos no deseados. Sin embargo, el precio de aumentar los niveles sonoros globales podría disminuir la calidad del paisaje sonoro.

Tras analizar las fuentes de ruido urbanas más características, se analizan aquellas fuentes de ruido predominantes en las zonas periféricas de los entornos urbanos.

### **2.2.7 Fuentes de ruido de entorno industrial**

Las industrias se sitúan normalmente alejadas de los centros urbanos, siendo núcleos importantes generadores de ruido (Atmaca et al., 2005; Morel et al., 2016). Pero, aunque existe esa distancia, este tipo de contaminación puede desplazarse a través de la atmósfera a lo largo de varios kilómetros (Lin et al., 2014). Además, en los entornos industriales los niveles de ruido pueden ser constantes durante las 24h del día.

Unos de los claros ejemplos de generación de ruido de procesos industriales son los campos de generación de energía eólica, que a través de las turbinas eólicas de los aerogeneradores provocan ruido molesto que se propaga a gran distancia (Kuwano et al., 2014; Gallo et al., 2016; Michaud et al., 2016).

Por otro lado, las actividades portuarias también se pueden relacionar con el ruido industrial ya que es uno de los principales medios de transporte de mercancías, además de utilizarse como actividad de ocio y turismo (Murphy y King, 2014). Los puertos se caracterizan por tener varias operaciones complejas. En consecuencia, el análisis de los resultados del ruido es complicado debido a la presencia en la misma zona de diversos sonidos procedentes de las embarcaciones, el comercio y las actividades industriales como astilleros, así como de los servicios auxiliares que producen efectos negativos en el ecosistema natural y la población urbana. Estas actividades tienen un fuerte impacto en el medio ambiente de la zona circundante y, como consecuencia, en la población local, los trabajadores portuarios y los turistas, así como en los ecosistemas terrestres y marinos (Schenone et al., 2016).

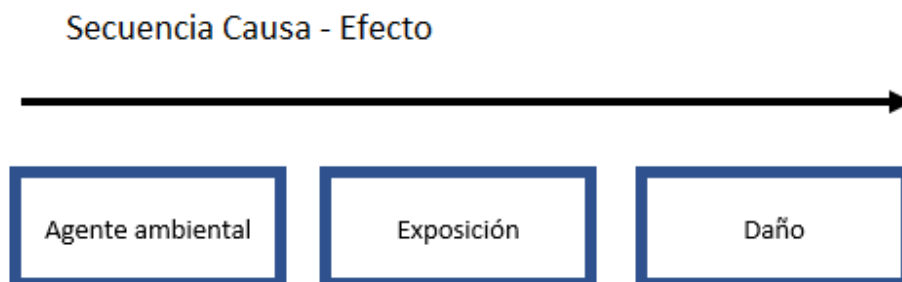
Como conclusión de esta sección sobre fuentes de ruido, se puede afirmar, que la fuente principal causante de la molestia en los entornos urbanos es aquella generada por el tráfico rodado. A esta fuente, le acompañan otra serie de sonidos producidos por diferentes actividades como son la construcción y el ocio, produciendo una mayor contaminación acústica, y por tanto, produciendo una serie de efectos negativos en la calidad de vida del ser humano que serán descritos en el apartado siguiente.

### 2.3 EFECTOS RUIDO EN LA CALIDAD DE VIDA DE LAS PERSONAS

El ruido produce efectos adversos directos y acumulativos que perjudican la salud y los entornos residenciales, sociales y laborales, con las correspondientes pérdidas reales (económicas) e intangibles (de bienestar). Tal y como muestra la figura 3, el ruido es una agente ambiental (la causa) que a una exposición prolongada o a una breve exposición a altos niveles de presión sonora pueden producir daños tanto físicos como psicológicos.

**Figura 3**

*Esquema de la Secuencia Causa-Efecto para la Evaluación de los Efectos Causados por un Agente Ambiental: el Ruido.*



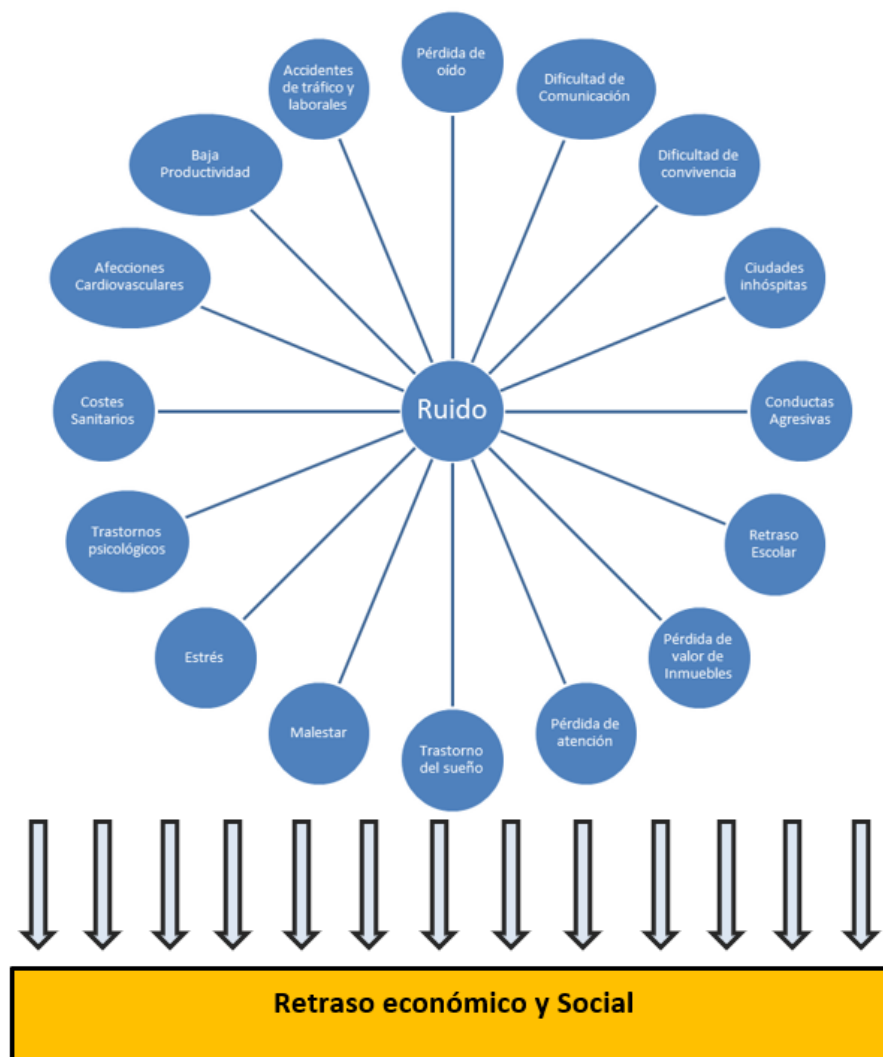
Los efectos del ruido para la salud se pueden clasificar en dos tipos:

- Auditivos.
- No auditivos.

Los auditivos tienen relación directa con la exposición al ruido, cuya consecuencia es la pérdida de audición, tinnitus, fatiga auditiva, etcétera. Mientras que los no auditivos producen tanto alteraciones fisiológicas como psicológicas, producidos por el ruido como agente estresante (Basner et al., 2014). En la figura 4, se presenta una clasificación de diferentes efectos generados por el ruido en la vida diaria, tanto en la salud como en conceptos sociales y económicos.

**Figura 4**

*Efectos del Ruido en la Salud, Sociales y Económicos sobre la Población y las Ciudades*



De los efectos del ruido en el ser humano, el más extendido es la molestia, entendida como una sensación de desagrado que afecta al confort y al bienestar de manera negativa. La molestia es un efecto subjetivo que depende las características físicas del propio ruido, como el nivel de presión sonora, o del



propio ser humano, como el estado de ánimo, la edad, la sensibilidad, etcétera. Acompañando a la molestia, existen otra serie de efectos del ruido en la vida diaria que afectan tanto a la salud como a aspectos sociales, económicos y laborales, tales como interrupciones en el sueño (Halonen et al., 2012), las comunicaciones (Jiménez et al., 2020) o costes sanitarios (Linares et al., 2006), entre otras.

En los apartados siguientes, se realiza un estado del arte sobre los efectos que provoca el ruido tanto en la salud, como en los aspectos socio-económicos.

### 2.3.1 Efectos en la salud

La situación general de degradación ambiental acústica puede incidir sobre la salud y el bienestar de los individuos, teniendo efectos tanto auditivos como no auditivos. En los apartados siguientes, se realizará una breve descripción resaltando resultados relevantes de estudios sobre los diferentes efectos sobre la salud y cuyo resumen se encuentra en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Resumen de los Efectos en la Salud a causa del Ruido*

Efecto en la salud	Autor(-es)
Pérdida auditiva	Jariwala et al.,2017 ; Davis y Hoffman, 2019; Neitzel y Fligor, 2019.
Tinnitus	Robert et al., 2010; Koops et al., 2019.
Alteraciones del sueño	Halonen et al., 2012; Evandt et al., 2017; Beutel et al., 2020.
Ansiedad y Depresión	Beutel et al., 2016 ; Dzhambov y Lercher, 2019; Beutel et al., 2020; Hegewald et al., 2020.

---

Problemas Cardiovasculares	Van Kempen y Babisch, 2012; Foraster et al., 2014; Sørensen et al., 2014; Halonen et al., 2015.
Obesidad	Pyko et al., 2017; Foraster et al., 2018.
Diabetes	Sørensen et al., 2013; Ohlwein et al., 2019; Chang et al., 2020.
Estrés oxidativo	Hahad et al., 2019; Bayo Jimenez et al., 2021.
Desarrollo cognitivo	Kaltenbach et al., 2008; Lercher et al., 2003; Clark et al., 2006; Klatte et al., 2017.

---

#### 2.3.1.1 Pérdida auditiva

La exposición prolongada al ruido suele provocar lo que se denomina pérdida de audición inducida por el ruido, conocida por las siglas NIHL (noise induced hearing loss) o hipoacusia. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el año 2020 unos 466 millones de individuos en todo el mundo presentaron pérdida de audición incapacitante, y se espera que estos valores se dupliquen para el año 2050. Además, unos 34 millones de niños tienen pérdida de audición, pudiendo prevenirse hasta en un 60% de los casos (Davis y Hoffman, 2019). Esta pérdida de audición tiene un profundo impacto en los individuos afectados, reduciendo sustancialmente la calidad de vida y perjudicando las capacidades y las relaciones sociales y laborales.

Por otra parte, un nivel sonoro de 85 dB(A) o superior puede causar daños permanentes como pérdida de sensibilidad o incluso la pérdida total auditiva (Jariwala et al., 2017). En esta línea, el estudio de Neitzel y Fligor (2019), determinó que el límite de exposición adecuado para limitar el riesgo de pérdida de audición debido al sonido recreativo es de 80 dB(A) durante cierto periodo de tiempo, o de 75 dB(A) si es durante 24 horas. Este estudio también muestra que el tinnitus inducido por el ruido puede preceder a la NIHL.

#### 2.3.1.2 *Tinnitus*

El tinnitus, conocido también como acúfeno o sensación auditiva fantasma, se trata de un sonido en el sistema auditivo en ausencia de fuente externa sonora. Esta sensación puede ocurrir por separado o junto con pérdida de audición o hipoacusia, por lo que se recomienda que los límites máximos de exposición al ruido sean más estrictos para proteger contra el tinnitus inducido por el ruido. Este problema afecta a la calidad de vida de millones de personas en todo el mundo y se asocia, en la mayoría de los casos, a pérdida de audición, siendo demostrado a través de audiogramas (Robert et al., 2010). Según otro estudio de Koops et al. (2019), el tinnitus puede comenzar de manera intermitente y pasar a ser continuo después de varios años, independientemente de la edad de inicio.

#### 2.3.1.3 *Alteraciones del sueño*

Existen evidencias claras de que los trastornos del sueño están asociados al deterioro de la salud, y cada vez hay más pruebas de que la exposición a la contaminación acústica durante las 24 horas del día afecta negativamente al sueño. De acuerdo con el estudio de Halonen et al. (2012), los niveles de ruido de tráfico nocturno superiores a 50 dB se asociaron con síntomas de insomnio entre las personas con puntuaciones más altas de ansiedad. Para el resto de población del estudio, los síntomas de insomnio se asociaron con un ruido del tráfico nocturno superior a 55 dB.

Recientemente, Evandt et al. (2017) observaron la relación entre el ruido nocturno del tráfico rodado con las dificultades para conciliar el sueño y el despertar precoz. Sus resultados indican que los individuos expuestos a altos niveles de ruido de tráfico nocturno podrían sufrir falta de sueño y además, para aquellos individuos cuyo dormitorio se encuentra orientado hacia una carretera, la estimación del efecto de las dificultades para conciliar el sueño aumentó en comparación con la población total del estudio.

#### 2.3.1.4 *Ansiedad y Depresión*

Beutel et al. (2016) determinaron que las molestias generales por ruido, tanto moderadas como extremas, aumentan el riesgo de depresión y ansiedad en comparación con la ausencia de molestias en un estudio transversal basado en la población alemana en 2016. Posteriormente, en 2020, Beutel et al. (2020) llevaron a cabo un estudio de cohortes prospectivo basado en una población de 11.095 participantes, y en el que investigaron si la molestia resultante o causada por diferentes fuentes predice el malestar mental cinco años después. Los resultados indicaron que las molestias por ruido en general se mantuvieron estables, mientras que las molestias por ruido diurnas predijeron la aparición de nuevos síntomas depresivos, de ansiedad, y trastornos del sueño. En cuanto a las fuentes específicas, las molestias diurnas producidas por los aviones predijeron niveles de depresión y ansiedad, mientras que las alteraciones del sueño fueron causadas en su mayor parte por el vecindario y el tráfico aéreo. Además, el ruido del vecindario predecía depresión y ansiedad, mientras que el tráfico rodado era causa de molestia tanto diurna como nocturna.

Dzhambov y Lercher (2019) actualizaron la revisión de la OMS sobre el efecto del ruido del tráfico rodado en la depresión y la ansiedad utilizando para ello un enfoque meta-analítico. Los autores incluyeron 10 estudios en su resumen cuantitativo con 15 estimaciones para la depresión y 5 para la ansiedad. En resumen, encontraron un mayor riesgo de depresión (4%) y ansiedad (12%) debido al aumento del ruido del tráfico rodado en combinación con el ruido ambiental.

Recientemente, Hegewald et al. (2020) llevaron a cabo una revisión de 31 estudios, de los cuales 26 de ellos trataban de la depresión y/o trastornos de ansiedad y 5 sobre demencia. El meta-análisis de 5 estudios sobre el ruido de las aeronaves descubrió que el riesgo de depresión aumentaba significativamente en un 12% por cada 10 dB  $L_{den}$ , término que será definido en el apartado 2.4.2.2.3, por lo que la exposición al ruido de los aviones aumenta el riesgo de depresión/ansiedad. Adicionalmente, el meta-análisis de 11 estudios de tráfico rodado y 3 de ferrocarril dio como resultado que existe un 2-3% de aumento de depresión/ansiedad por cada 10 dB de  $L_{den}$ .

#### *2.3.1.5 Problemas cardiovasculares*

Los estudios epidemiológicos han aportado pruebas de que la exposición al ruido del tráfico está relacionada con enfermedades cardiovasculares como la hipertensión arterial, el infarto de miocardio y el ictus. En 2012, un meta-análisis que incluía 24 estudios transversales sobre la relación entre el ruido del tráfico rodado y la hipertensión, encontró un 3,4% más de probabilidad de padecer hipertensión prevalente por cada 5 dB más de ruido del tráfico rodado (Van Kempen y Babisch, 2012). Más tarde, en el año 2014, un estudio estimó que la exposición al ruido nocturno en el interior se asociaba con mayor frecuencia a la elevación de la presión sanguínea sistólica y a hipertensión (Foraster et al., 2014). Ese mismo año, Sørensen et al. (2014) también determinaron que los efectos del ruido del tráfico provocan ictus de tipo isquémicos. Un año más tarde, Halonen et al. (2015) concluyeron que la exposición al ruido del tráfico rodado en el hogar aumentaba el riesgo de sufrir ictus en un 14% por cada aumento en el ruido de 10 dB(A). Además, dicho estudio llevado a cabo en Londres, demostró un riesgo relativo de 1,09 de sufrir un ictus en la población de mayor edad, comparando a su vez a las personas expuestas a más de 60 dB(A) con las expuestas a menos de 55 dB(A).

#### *2.3.1.6 Obesidad*

Existe también una cierta relación entre el ruido y las enfermedades cardiovasculares con la obesidad, tal y como afirman Foraster et al. (2018). La obesidad podría representar una vía a través de la cual el ruido del transporte influye en las enfermedades cardiovasculares y la diabetes. En dicho estudio se evaluaron las asociaciones de la exposición a largo plazo al ruido de las carreteras, los ferrocarriles y las aeronaves con medidas de obesidad y sus fenotipos utilizando diseños transversales y longitudinales. Según los resultados transversales, este impacto puede estar relacionado con la alteración de todos los parámetros de obesidad, es decir, índice de masa corporal (IMC) elevado, grasa abdominal y adiposidad total.

Pyko et al. (2017) demuestran en sus resultados la relación entre la exposición al ruido del transporte con el desarrollo de la obesidad y sugieren que

la exposición combinada de diferentes fuentes puede ser especialmente perjudicial.

#### *2.3.1.7 Diabetes*

Tal y como se comentó previamente, existe una relación entre el ruido y la diabetes. Esto se demuestra en un estudio de cohorte que se llevó a cabo durante 5 años y que mostró que una exposición de 10 dB más de ruido medio provocado por el tráfico rodado produce un mayor riesgo de diabetes incidente, resultando esa incidencia más fuerte con la exposición a largo plazo (5 años) en comparación con la exposición a corto plazo (1 año) (Sørensen et al., 2013). Del mismo modo, otros estudios concluyeron que la exposición a niveles más altos de ruido se asoció con un mayor riesgo de hiperglucemia (Ohlwein et al., 2019; Chang et al., 2020).

#### *2.3.1.8 Estrés oxidativo*

Desde un punto de vista molecular, estudios experimentales sugieren que la exposición al ruido del tráfico puede aumentar los niveles de la hormona del estrés, desencadenando así vías inflamatorias y de estrés oxidativo (Hahad et al., 2019). Otro estudio (Bayo Jimenez et al., 2021) relacionado con el estrés oxidativo determina que una exposición a un nivel sonoro máximo de 85 dB(A) y a un nivel sonoro medio de 72 dB(A) durante 1, 2 y 4 días provoca un incremento de la presión arterial sistólica y las hormonas del estrés circulantes, así como estrés oxidativo e inflamación hormonal, lo que provocó una disfunción endotelial.

#### *2.3.1.9 Desarrollo cognitivo*

El ruido también afecta a los niños en su desarrollo cognitivo, tal y como afirma un estudio (Lercher et al., 2013) realizado con niños de 9 a 10 años de zonas rurales de los Alpes y que descubrió que los niveles de ruido ambiental de la comunidad (ruido del tren y del tráfico rodado) superiores a 60 dB(A) se asociaban con un peor rendimiento de la memoria. Anteriormente, Kaltenbach et al. (2008) descubrieron que una exposición al ruido diurno provocado por

aeronaves de 50 dB(A) o más estaba asociada a dificultades de aprendizaje en los escolares.

Del mismo modo, Klatte et al. (2017), estudiaron los efectos del ruido de las aeronaves en la cognición y la calidad de vida de 1.243 alumnos de segundo grado de 29 escuelas de los alrededores del aeropuerto de Frankfurt/Main en Alemania con niveles de exposición por debajo de los 60 dB. Su estudio determinó que un aumento en la exposición al ruido aéreo se asociaba linealmente con una peor calidad de vida, un aumento de la molestia por el ruido y una disminución del rendimiento en la lectura. Un aumento de 20 dB en la exposición al ruido de los aviones también se asoció con una disminución de las puntuaciones de lectura de un quinto de desviación estándar, lo que corresponde a un retraso en la lectura de unos 2 meses.

Dicha comprensión lectora fue previamente demostrada por Clark et al. (2006), cuyo estudio se llevó a cabo con 2.010 niños de entre 9 y 10 años en 89 colegios de los alrededores de 3 aeropuertos europeos.

En resumen, la exposición al ruido a través de diferentes fuentes sonoras, produce efectos adversos en la salud, que afecta tanto a adultos como a niños, produciendo en muchas ocasiones daños irreversibles. Pero no solo afecta a la salud, sino también al ámbito social y económico.

### **2.3.2 Efectos socio-económicos del ruido**

El ruido no sólo produce efectos nocivos en la salud humana, sino que también repercute en otras dimensiones de la sociedad, por ejemplo, en aspectos de la economía como costes de asistencia sanitaria, accidentes laborales y disminución de los precios de la propiedad, así como en aspectos de comunicación entre otros. En los apartados siguientes, se realizará una breve descripción resaltando resultados relevantes de estudios sobre los diferentes efectos en aspectos sociales, laborales y económicos y cuyo resumen se encuentra en la tabla 2

**Tabla 2***Efectos del Ruido en Aspectos Sociales y Económicos*

---

Efecto en la sociedad	Autor(es)
Costes sanitarios	Tobías et al., 2001; Linares et al., 2006.
Depreciación inmuebles	Bureau & Glachant, 2010; Chang y Kim , 2013 ; Trojanek et al., 2017; Szczepańska et al., 2020.
Accidentes	Toppila et al., 2009.
Dificultad de comunicación	Toppila et al., 2009; Jiménez et al., 2020.
Dificultad de convivencia	Notley et al., 2014 ; Lee, 2020 ; Lee et al., 2020.
Agresividad	Milenović et al., 2018.

---



#### *2.3.2.1 Costes Sanitarios*

En referencia a los costes sanitarios, Tobías et al. (2001), concluyeron que el ruido era un factor de riesgo para los ingresos hospitalarios de urgencia en todos los grupos de edad, y otro estudio realizado por Linares et al. (2006) llegó a la misma conclusión para los niños menores de 10 años con respecto a los ingresos hospitalarios.

#### *2.3.2.2 Depreciación inmuebles*

En el estudio realizado por Trojenek et al. (2017), se demuestra que el ruido de los aviones está relacionado negativamente con los precios de las viviendas, destacando una depreciación de 0,87% en el caso de las viviendas unifamiliares, y del 0,57% en el de los apartamentos. Posteriormente, un estudio llevado a cabo en 2020 por Szczepańska et al. (2020) determinó un impacto negativo en el valor de las propiedades y que variaba en función de la altura del edificio, la refracción del sonido y la difusión de la contaminación debido al impacto de la elevación. Chang y Kim (2013) demostraron a su vez un descenso de los precios de aproximadamente un 0,5% por cada decibelio adicional emitido por la red ferroviaria en la ciudad de Seúl (Corea). Además, Bureau y Glachant (2010) han demostrado que los precios de venta de las viviendas situadas en distritos tranquilos de la ciudad de París (Francia) son un 1,5% más altos que los de los inmuebles situados en zonas más ruidosas.

#### *2.3.2.3 Accidentes*

Otra de las consecuencias que puede tener este agente contaminante, es el aumento de accidentes tal y como afirman Toppila et al. (2009) en su estudio, donde el ruido ambiental aumenta el riesgo de accidente, especialmente entre los trabajadores con pérdida de audición. Este aumento del riesgo se debe a una menor inteligibilidad del habla y una menor capacidad para localizar los sonidos.

#### *2.3.2.4 Dificultades de comunicación*

La calidad del habla y la escucha se ven influidas también por el ruido. Jiménez et al. (2020) llevaron a cabo un estudio sobre la influencia del ruido de fondo a través de un estudio de recopilación de datos colaborativa (crowdsourcing), pero con ruido simulado en el laboratorio, donde dos tipos de

ruido fueron testados: ruido de televisión y ruido de calle. Este estudio determinó que el umbral en el que un ruido de fondo ambiental afecta significativamente a las calificaciones de la calidad del habla en el crowdsourcing se situó entre los 43 dB(A) y los 50 dB(A). Además, los oyentes toleraron más el ruido de la televisión.

#### *2.3.2.5 Dificultades de convivencia*

El ruido, adicionalmente, es un causante de dificultades de convivencia entre comunidades de vecinos. Según un estudio realizado por Notley et al. (2014), las fuentes de ruido de los vecinos más frecuentes fueron por voces, gritos, o discusiones, seguidas por animales domésticos (perros) y la radio, televisión o música. En el mismo estudio también se desprende que el 54% de los encuestados se sentían molestos, fastidiados o perturbados en cierta medida por el ruido de los vecinos y/o de otras personas cercanas.

Lee (2020), indica que el ruido transmitido a través del aire más común entre los vecinos es el generado por los electrodomésticos, según una encuesta realizada con 137.813 consultas telefónicas de 2012 a 2018, en Corea.

En el mismo año Lee et al. (2020) realizaron encuestas online en tres ciudades diferentes: Seúl, Londres y São Paulo. El cuestionario se diseñó para evaluar las molestias causadas por el ruido de los vecinos y el ruido ambiental (transporte). Los encuestados que se sentían más molestos por el ruido exterior dentro de su vivienda declararon una mayor molestia por el ruido de los vecinos. Además, se encontró que la molestia por el ruido interior de los vecinos tenía una influencia mayor en procesos cognitivos y conductuales que la molestia por el ruido exterior.

#### *2.3.2.6 Agresividad*

La agresividad se interpreta como una modalidad reactiva, debido una mayor actividad de la amígdala a nivel neuronal, generando así emociones que pueden expresarse como un comportamiento agresivo.

En el estudio realizado por Milenović et al. (2018), se llevó a cabo una muestra de 60 trabajadores expuestos a un nivel de ruido entre 70 y 90 dB, junto con el grupo de control formado por 60 trabajadores de administración, donde los niveles de ruido no superaban los 55 dB. La agresividad fue evaluada a través de un cuestionario SIGMA (que indica el nivel de actividad de la reacción autorreguladora ante el ataque), y es una parte integral del Modelo Cibernético de Dimensiones de la Personalidad. Los resultados obtenidos en dicho estudio, demuestran que una exposición a ruidos elevados no sólo afecta a la psicofisiología de los empleados, sino que se correlacionan con su mayor disposición a reaccionar de forma agresiva ante situaciones de la vida cotidiana.

En conclusión, sobre esa sección cabe afirmar que, el ruido tiene consecuencias tanto en aspectos como la salud, así como económicos y sociales. Por lo tanto, es necesario disponer de herramientas para la medición y evaluación del mismo, para intentar mitigar sus efectos en la sociedad.

## 2.4 PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL CAMPO SONORO.

### 2.4.1 Conceptos básicos de la onda sonora

El sonido es generado a partir de una alteración propagada a través de un medio elástico o fluido, en el cual las partículas del medio son puestas en movimiento por una presión o desplazamiento en el material.

El sonido puede modelarse como una onda senoidal de presión considerando el cambio de presión a partir de la expresión:

$$P = P_{max} \text{sen}(kx \pm \omega t + \varphi) \quad (Pa) \quad (1)$$

Siendo  $k$  el número de onda determinado por la siguiente expresión:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\omega$  es la frecuencia angular  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$  (radianes/segundo), con  $f$  la frecuencia medida en hercios y  $\varphi$  la fase inicial medida en radianes.  $P_{max}$  indica la amplitud máxima de presión entre la que oscila la perturbación.

Las ondas sonoras tienen distintas propiedades básicas que serán definidas a continuación (Kuttruff, 2016):

- Frecuencia ( $f$ ): es la magnitud por la cual se mide el número de repeticiones ( $n$ ) por unidad de tiempo ( $T$ ) de un fenómeno periódico.

En el caso del sonido, el número de veces que un ciclo se repite en un segundo. Su unidad es el hercio (Hz) (un ciclo por segundo). Los sonidos a bajas frecuencias son percibidos por el ser humano como sonidos graves mientras que las altas frecuencias como sonidos agudos. El sistema auditivo del ser humano, en condiciones óptimas, tiene un rango espectral desde 20 Hz a 20.000 Hz.

$$f = \frac{n}{T} \quad (2)$$

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{s} \quad (3)$$

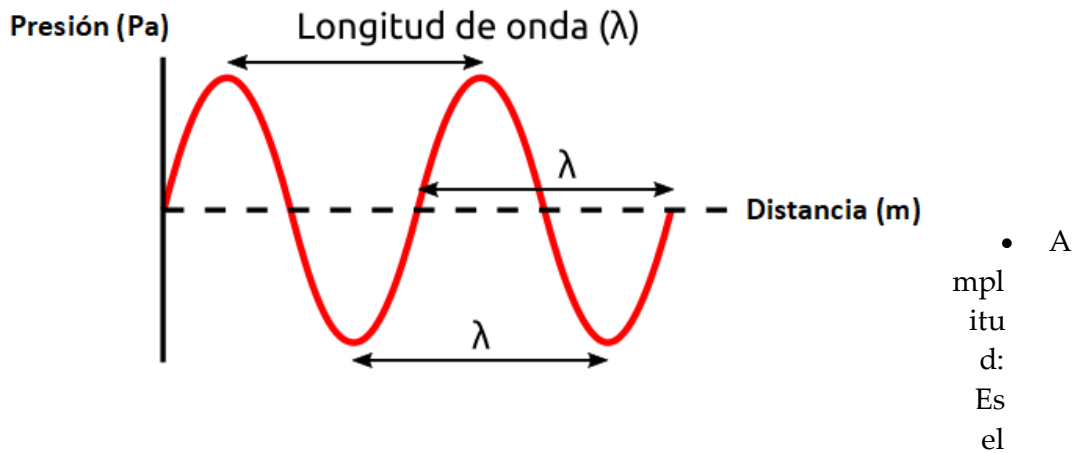
- Periodo ( $T$ ) es la inversa a la frecuencia, es decir, el tiempo en el que una partícula realiza una vibración (oscilación) completa. Se mide en segundos (s).
- Longitud de onda ( $\lambda$ ): A mayor frecuencia, la longitud de onda es menor y viceversa. La longitud de onda es la distancia real que recorre una onda en un determinado intervalo de tiempo (ver figura 5). En el caso de una onda senoidal la longitud de onda se define como la relación entre la velocidad de propagación de la onda en el medio y su frecuencia.

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ (m)} \quad (4)$$

Siendo  $c$  es velocidad de propagación del sonido que equivale a 343,2 m/s a 20 °C de temperatura y con una humedad relativa del 50% y con una presión atmosférica de 101.325 Pascales.

**Figura 5**

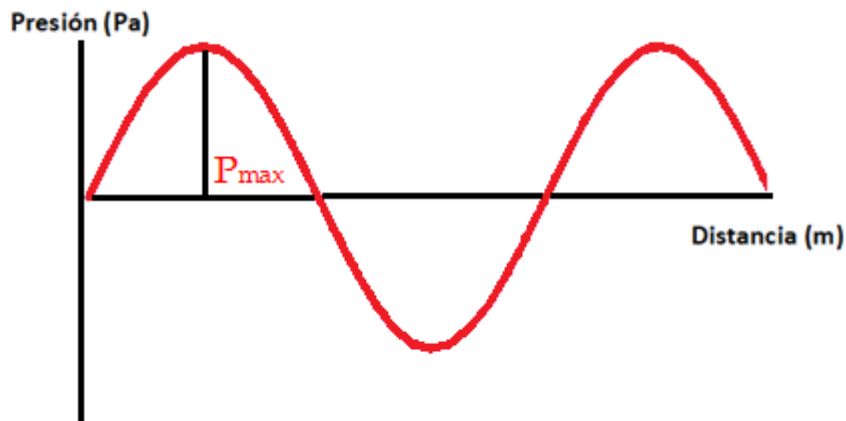
Representación Gráfica de una Señal Senoidal en la que se Muestra la Longitud de Onda



valor máximo del movimiento de una onda, es decir, el máximo valor que alcanza la onda (ver figura 6). En función de la expresión de la onda utilizada, tendrá un valor. Para la onda de presiones, ver ecuación 1, la amplitud es denotada como  $P_{max}$  y se mide en pascales (Pa). Cuanta mayor sea ese valor, mayor es la amplitud o nivel de ese sonido. Cuando el sistema auditivo humano percibe sonidos con una amplitud alta, se escuchan como sonidos de alto volumen, mientras que si tiene amplitudes bajas como sonidos débiles.

Figura 6

Representación Gráfica de una Señal Senoidal en el Espacio en la que se Muestra la  $P_{max}$  de Onda.



- Potencia acústica ( $W$ ) es la cantidad de energía por unidad de tiempo que emite una fuente determinada, por tanto, la cantidad de energía total radiada en un segundo y se mide en vatios ( $w$ ).
- Intensidad Sonora ( $I$ ): La intensidad acústica se define como la cantidad de energía sonora transmitida en una dirección determinada por unidad de área. Permite determinar la cantidad de energía sonora que radia una fuente dentro de un ambiente sonoro. No es posible medirla con un sonómetro, es necesario un equipo especial conocido como intensiómetro.

La intensidad acústica para una fuente de tipo puntual se puede modelar como:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \text{ (w/m}^2\text{)} \quad (5)$$

donde  $W$  representa la potencia acústica, mientras que  $S$  es el área del frente de onda y  $r$  la distancia a la fuente sonora en metros (m).

## 2.4.2 Parámetros acústicos

### 2.4.2.1 Parámetros de análisis básicos

#### 2.4.2.1.1 Nivel de presión sonora instantánea ( $L_p$ )

La mayoría de los estudios realizados en la literatura actual, para las mediciones acústicas, se basan en calcular el parámetro objetivo  $L_p$ , nivel de presión sonora. Se define como la diferencia entre el valor instantáneo de la presión total y la presión de referencia  $P_0$  (Pierce,2019), siendo por tanto, el resultado de las variaciones de presión que experimentan las ondas de sonido en el aire. Su unidad de medida es el decibelio dB. Este parámetro varía entre los 0 dB, que corresponden al umbral de audición, y los 120 dB, que es el umbral de dolor del oído humano. El nivel de presión sonora también se le conoce como *SPL* (nomenclatura anglosajona).

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0} \text{ (dB)} \quad (6)$$

Donde  $P$  es la presión sonora eficaz a analizar y  $P_0$  es la presión de referencia, correspondiente al umbral de audición, que es una constante de valor  $20 \mu\text{Pa}$ .

#### 2.4.2.1.2 Nivel de intensidad sonora ( $L_I$ )

El nivel de intensidad sonora se mide en dB y viene definida por la siguiente ecuación:

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ (dB)} \quad (7)$$

$I_0 = 10^{-12} \text{ w/m}^2$  es la intensidad de referencia y corresponde a un nivel de 0 decibelios, por tanto. El umbral del dolor corresponde a una intensidad de  $1 \text{ w/m}^2$  o 120 dB.

#### 2.4.2.1.3 Nivel de potencia sonora ( $L_W$ )

El nivel de potencia acústica se define por la siguiente expresión:

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \text{ (dB)} \quad (8)$$

Siendo  $W$  la potencia a analizar y  $W_0$  la potencia correspondiente al umbral de audición, la cual es  $10^{-12} \text{ w}$ .

#### 2.4.2.1.4 Análisis espectral

En acústica con análisis espectral o espectro del sonido se refiere a como se distribuye la energía acústica en el dominio de la frecuencia. Se usa para analizar sonidos complejos, que están compuestos por diferentes frecuencias, y son los más habituales en la naturaleza. El análisis de las frecuencias es importante porque dos ruidos que tengan un mismo nivel de presión sonora pueden presentar distribuciones de frecuencias muy diferentes.

En el campo de la acústica, el sonido se suele analizar por bandas de frecuencia normalizadas. Los filtros frecuenciales más utilizados son las bandas de octavas o tercios de octava. Un sonido complejo se puede analizar midiendo su nivel de presión sonora en cada octava o tercio de octava para así conocer sus componentes frecuenciales o espectro. Las primeras, las bandas de octava, son intervalos que cumplen que su frecuencia superior es el doble de su frecuencia inferior. En el caso que se necesite realizar medidas con mayor resolución espectral, cada banda de octava se divide en tres bandas de tercios de octava, de forma que la relación entre las frecuencias superior e inferior de cada banda de tercio de octava es de  $\sqrt[3]{2}$ .

#### 2.4.2.1.5 Niveles expresados en dB(A)

Indicar que los parámetros de medición también se pueden expresar en dB(A). Cuando esto ocurre, se refiere a una ponderación frecuencial (o ponderación de frecuencia), conceptos que se detalla en la sección 2.4.3.1, y consiste en aproximación de la respuesta de los medidores de nivel sonido a las diferentes frecuencias a la sensibilidad del oído humano al sonido. En general, el oído humano, no es muy sensible a frecuencias bajas y altas, pero sí lo es entre 500 Hz y 6 kHz.

#### 2.4.2.2 Índices energéticos

Los principales parámetros energéticos son Nivel Continuo Equivalente ( $L_{eq}$ ), y el Nivel de Exposición Sonora ( $SEL$ ). Ambos se expresan en dB(A). Otro índice energético es el Nivel Sonoro Corregido Día- Tarde-Noche  $L_{DEN}$ .

##### 2.4.2.2.1 Nivel de presión sonora equivalente ( $L_{eq}$ )

Un índice importante en el área de la acústica ambiental es el nivel de presión sonora continuo equivalente,  $L_{eq}$ . Cuando es evaluado en un periodo de tiempo  $T$  se denota  $L_{eqT}$ . Representa la exposición total a ruido durante el período de interés, o la energía promedio del nivel de ruido durante el período de interés. Esta métrica está estandarizada por la ISO 1996 (ISO,2016).

Este parámetro se calcula de la siguiente manera:



$$L_{eq,T} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2(t)} dt \right] \quad (dB) \quad (9)$$

Siendo  $P$  la presión acústica instantánea durante el periodo de medición, siendo  $T$  la duración de la medida y  $P_0$  la presión de referencia.

En ocasiones, este parámetro puede ser expresado en dB(A), ver apartado 2.4.3.1 de curvas de ponderación, cuya expresión es la siguiente:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \int_T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2(t)} dt \right] \quad (dB(A)) \quad (10)$$

Siendo  $P_A$  la presión acústica instantánea ponderada durante el periodo de medición,  $T$  es el tiempo y  $P_0$  es la presión de referencia. A partir del periodo de medida  $T$ , surgen las diferentes variaciones de la fórmula.

Si se realizan diferentes mediciones discretas,  $n$ , es posible realizar la integración de varios valores de nivel equivalente. Para ello, se usa la siguiente ecuación:

$$L_{Aeq,n} = 10 \cdot \log \frac{\sum 10^{(0,1 \cdot L_{Aeq,T})}}{n} \quad (dB(A)) \quad (11)$$

Esta ecuación 11, se puede desarrollar para  $n$  niveles, dando lugar a:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left( \frac{10^{\frac{L_{Aeq,1}}{10}} + 10^{\frac{L_{Aeq,2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{Aeq,n}}{10}}}{n} \right) \quad (dB(A)) \quad (12)$$

#### 2.4.2.2.2 Nivel de exposición sonora, (SEL)

Se define como el nivel de presión sonora de un ruido continuo que tiene la misma energía en un segundo que la del ruido real durante el intervalo de tiempo  $T$ . Es, por tanto, un nivel equivalente pero normalizado a 1 segundo. Se utiliza para clasificar y comparar sucesos de ruido de eventos singulares. Su expresión es:

$$SEL = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{P_A(t)}{P_0} \right) \cdot dt \right] \quad (dB(A)) \quad (13)$$

Siendo  $P_A$ , la presión instantánea ponderada  $A$ ,  $P_0$  la presión de referencia,  $t_0$  el tiempo de referencia de 1 segundo y  $t_2-t_1$  el intervalo de tiempo que incluye todo el ruido.

La utilidad de este concepto se comprende mejor cuando se trata con un entorno en el que actúan una gran variedad de tipos de ruido. En estos casos, el conocimiento del nivel de exposición sonora  $SEL$  tiene algunas ventajas. Cuando queramos describir un ambiente ruidoso mediante el nivel sonoro equivalente  $L_{Aeq}$  o mediante cualquier otro parámetro que dependa de él, como  $L_{DN}$ , se puede calcular muy fácilmente a partir de varias medidas de  $SEL$ , mediante la siguiente expresión:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=0}^n 10^{(SEL_i/10)} \right] \quad (14)$$

donde  $n$  es el número total de suceso de ruido en el tiempo  $T$  y  $SEL_i$  es el  $SEL$  para el suceso  $i$ .

Por tanto,  $SEL$  tiene la ventaja de que los valores que se obtienen describen las fuentes individuales de ruido y el ambiente ruidoso de forma compatible, aunque teniendo en cuenta que se utiliza siempre la ponderación  $A$ .

#### 2.4.2.2.3 Nivel sonoro equivalente día-tarde-noche ( $L_{den}$ )

A raíz de la publicación de la Directiva 2002/49/CE (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002) sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, se empezaron a utilizar los niveles sonoros medios a largo plazo como el nivel día-tarde-noche denotado como  $L_{den}$ .

Se define  $L_{den}$ , como el nivel sonoro para los periodos de día, tarde y noche, compuesto por el  $L_d$ , nivel de presión sonora equivalente en el periodo diurno, el

$L_e$ , como nivel de presión sonora equivalente en el periodo vespertino, y  $L_n$ , es el nivel de presión sonora equivalente en el periodo nocturno.  $L_{den}$  también es conocido como *CNEL*, Community Noise Equivalent Level y viene definido por la siguiente expresión:

$$L_{den}/CNEL = 10 \cdot \log \frac{1}{24} \left( N_d \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + N_e \cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}} + N_n \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \quad (dB(A)) \quad (15)$$

donde  $L_d$ ,  $L_e$  y  $L_n$ , son los niveles de presión sonora según la franja de horarios y  $N_d$ ,  $N_e$  y  $N_n$  corresponden al número de horas de cada uno de los periodos, siendo diferentes, tal y como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Definición de Parámetros  $N_d$ ,  $N_e$  y  $N_n$  según Normativa*

	Franja Horaria Diurno	$N_d$	Franja Horaria Vespertino	$N_e$	Franja Horaria	$N_n$
$L_{den}$	7:00 a 19:00	12	19:00 a 23:00	4	23:00 a 7:00	8
<i>CNEL</i>	7:00 a 19:00	12	19:00 a 22:00	3	22:00 a 7:00	9

Los periodos temporales de evaluación para España están establecidos en tres franjas horarios, de acuerdo con R.D. 1367/2007 de 19 de octubre, (RDL 1367/2007, de 19 de octubre) siguiendo esta distribución:

- 1º) Periodo día ( $d$ ): al periodo día le corresponden 12 horas.
- 2º) Periodo tarde ( $e$ ): al periodo tarde le corresponden 4 horas y una penalización de 5 dB.
- 3º) Periodo noche ( $n$ ): al periodo noche le corresponden 8 horas y una penalización de 10 dB.

Lo que daría lugar a la siguiente expresión para el  $L_{den}$ :

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left[ \frac{12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}}}{24} \right] \quad (dB(A)) \quad (16)$$

Este parámetro y las penalizaciones de decibelios impuestas están destinados a reflejar la sensibilidad de las personas al ruido durante esos períodos.

La norma ISO 1996 (ISO, 2016), define otro indicador acústico,  $L_{dn}$ , nivel de presión sonora día-noche, siendo su ecuación la siguiente:

$$L_{dn} = 10 \cdot \log \frac{1}{24} \left( 15 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 9 \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \quad (dB(A)) \quad (17)$$

siendo el periodo día entre 8:00 y 22:00 y el periodo noche de 22:00 hasta 8:00.

Cabe indicar que Hooper et al. (2009) afirmaron que estos parámetros, usados habitualmente para informar de los datos de contaminación acústica, son demasiados técnicos para personal no experto y, por tanto, no satisfacen las expectativas de los ciudadanos.

#### 2.4.2.2.4 Nivel diario equivalente en materia de prevención de riesgos laborales

Según el anexo I del R.D. 286/2006 normativa en materia de prevención de riesgos laborales (RDL 286/2006, de 10 de marzo), el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A, se corresponde con el nivel en decibelios A, y viene dado por la expresión:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \log \frac{T}{8} \quad (dB(A)) \quad (18)$$

donde  $T$  es el tiempo de exposición del trabajador al ruido,  $P_A$  es la presión acústica instantánea ponderada en A y  $P_o$  es la presión acústica de referencia.

#### 2.4.2.2.5 Nivel semanal equivalente en materia de prevención de riesgos laborales

El nivel de exposición semanal equivalente,  $L_{Aeq,s}$ , término utilizado en materia de prevención de riesgos laborales viene dado por la expresión:

$$L_{Aeq,s} = 10 \cdot \log \frac{1}{5} \sum_{i=1}^m 10^{0,1L_{Aeq,di}} \quad (dB(A)) \quad (19)$$

donde  $m$  es el número de días de la semana expuesto el trabajador al ruido, y  $L_{Aeq,di}$  es el nivel de exposición diario equivalente correspondiente al día  $i$ .

#### 2.4.2.2.6 Nivel pico ( $L_{pico}$ ) en materia de prevención de riesgos laborales

El valor pico es el valor máximo de la presión acústica instantánea. Este valor pico sirve para evaluar la exposición cuando hay ruidos de impulso. El Nivel de pico,  $L_{pico}$ , en decibelios, viene dado por la expresión:

$$L_{pico} = 10 \log \left( \frac{P_{max}}{P_0} \right)^2 \quad dB(C) \quad (20)$$

donde  $P_{max}$  es el valor máximo de la presión acústica instantánea (en pascuales) a que está expuesto el trabajador, determinado con el filtro de ponderación frecuencial C.

#### 2.4.2.3 Índices estadísticos

Además de poder emplear un valor único  $L_{eq}$  para describir energéticamente la secuencia de niveles sonoros que tiene lugar en un intervalo de tiempo, puede ser de gran interés conocer la permanencia de los distintos niveles de presión sonora que ocurren en el intervalo de tiempo considerado. Esto conduce al uso de índices basados en la estadística.

##### 2.4.2.3.1 Niveles estadísticos percentiles ( $L_N$ )

Se definen como los niveles de presión sonora que han sido sobrepasados durante el  $n\%$  del tiempo de observación. Son calculados a partir de la función de distribución acumulativa. Los más utilizados son el  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  y  $L_{90}$ , entre otros:

- $L_{99}$ : nivel sonoro que se ha alcanzado o sobrepasado el 99% de tiempo de medición, suele asociarse al valor mínimo del nivel sonoro fluctuante
- $L_{90}$ : nivel sonoro que se ha alcanzado o sobrepasado el 90% de tiempo de medición, se usa para estimar el nivel de ruido de fondo en un ambiente.

- $L_{50}$ : representa el nivel sobrepasado durante el 50% del tiempo del periodo de medida. Indicativo de valores medios. Corresponde con la mediana estadística de la distribución. Es el mejor índice que interpreta el ruido generado por el tráfico rodado.
- $L_{10}$ : nivel sonoro que se ha alcanzado o sobrepasado el 10% de tiempo de medición que estima los niveles máximos o picos sonoros, siendo un buen indicativo de valores altos del ruido. Este valor es usado para conocer el impacto sonoro de las nuevas carreteras y para la regulación sobre aislamiento de edificios.
- $L_5$ : ruido ha alcanzado o sobrepasado el 5% de tiempo de medición que estima los niveles máximos o picos sonoros. Son representativos de los niveles de pico (los más altos) con bajo nivel de permanencia.
- $L_1$ : nivel sonoro ha alcanzado o sobrepasado el 1% de tiempo de medición, suele asociarse al valor máximo del nivel sonoro fluctuante

A partir de los niveles estadísticos surgieron otra serie de índice usados en diferentes ámbitos de la acústica como son:

#### 2.4.2.3.2 Índice de ruido de tráfico ( $TNI$ )

En inglés, traffic noise index, denotado como  $TNI$ , es el índice que presenta una correlación entre el ruido del tráfico y el grado de insatisfacción de la población. Se define a partir de los niveles percentiles  $L_{10}$  y  $L_{90}$ , teniendo en cuenta el flujo de tráfico (Langdon y Scholes, 1968). Viene determinado por la siguiente ecuación:

$$TNI = 4 \cdot (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \quad (dB) \quad (21)$$

Este índice valora mejor la molestia producida por el ruido de tráfico sobre la población que el  $L_{eq}$ , especialmente en casos de tráfico bastante discontinuo, cuando el valor es inferior a 300 vehículos/hora. Este índice tiene la ventaja de que valora más adecuadamente las reacciones humanas que el nivel  $L_{50}$ , cuando existe poca circulación, en el caso de circulaciones medio y altas se recomienda:

$$L_{10} = L_{50} + 1,28\sigma \quad (dB(A)) \quad (22)$$

$$L_{90} = L_{50} - 1,28\sigma \quad (dB(A)) \quad (23)$$

Quedando *TNI* como:

$$TNI = L_{50} + 9\sigma - 30 \quad (dB(A)) \quad (24)$$

siendo  $\sigma$  la desviación típica en el periodo de medida.

#### 2.4.2.3.3 Clima sonoro (*NC*)

Este índice, denotado como *NC*, representa el intervalo de niveles sonoros registrados durante el 80% del tiempo total de la medida. El clima sonoro viene determinado por la siguiente fórmula:

$$NC = L_{10} - L_{90} \quad (dB(A)) \quad (25)$$

#### 2.4.2.3.4 Índice de contaminación acústica (*NPL*)

Este índice también es conocido como nivel de polución sonora del inglés, Noise Pollution Level, (*NPL*). Este parámetro fue ideado por Robinson, (1971a), donde combinaba dos factores, el nivel equivalente y la desviación estándar de las muestras en el mismo periodo, definido por la siguiente ecuación:

$$NPL = L_{Aeq} + K\sigma \quad (dB(A)) \quad (26)$$

donde *K* es una constante determinado experimentalmente que suele tomar el valor de 2,56.

Este índice, se basa en el principio de que el nivel de molestia que produce un determinado ruido está relacionado con el valor del nivel continuo equivalente y con la dinámica del ruido, es decir, la amplitud de sus fluctuaciones, lo que conlleva aumento de la molestia al producirse estas fluctuaciones. Para tener en cuenta el hecho de que, a mayor fluctuación en el nivel sonoro, mayor molestia

perciben las personas, se incluye en este índice la desviación estándar de las muestras en el período de medición ( $\sigma$ ). Sin embargo, este índice no se puede emplear para comparar la calidad acústica de los diferentes tipos de ruido, ni para valorar la molestia de una persona sujeta a ambientes de ruido diferentes.

Existe una variación de este índice donde se sustituye el segundo término por el Clima Sonoro:

$$NPL = L_{Aeq} + (L_{10} - L_{90}) \quad (dB(A)) \quad (27)$$

El índice *NPL* también fue definido por Beranek (1960) y Robinson (1971b):

$$NPL = L_{Aeq} + (L_{10} - L_{90}) + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60} \quad (dB(A)) \quad (28)$$

Existe alguna variante que en lugar del  $L_{Aeq}$  utiliza el percentil  $L_{50}$  ofreciendo en general resultados muy similares (Barti Domingo, 2013).

Otros estudios han tratado este índice, caracterizando sus valores e indicando el grado de contaminación acústica, por ejemplo, el estudio en la ciudad de Oruro (Bolivia) (Rodríguez Flores, 2008), afirmando que a partir de 75 dB(A) de *NPL* se considera un grado de contaminación alta.

En el caso de Tiwari et al. (2015) en su evaluación de la contaminación acústica en la India producida por el ruido de tráfico fija el valor máximo admisible de *NPL* de 88 dB(A) y en el caso de *TNI* establecen que un valor de 74 dB(A) es un valor que produciría insatisfacción en el 50% de la población. Mientras que Robison (1971), sugirió un valor de 72 dB(A) de *NPL* como límite superior de aceptabilidad.

### 2.4.3 Parámetros Psicoacústicos

Oír es en realidad un proceso complejo en el que intervienen tanto factores físicos relacionados con la propagación de las ondas sonoras, como factores psicoacústicos derivados de la forma en que nuestro cerebro procesa los estímulos



recibidos en cada oído para crear la percepción sonora final (Zwicker y Fastl, 1990).

En la mayoría de los estudios relacionados con el análisis de la contaminación acústica, el término molestia es un término que suele evaluarse habitualmente con indicadores sonoros objetivos, como los introducidos en el apartado anterior, principalmente el nivel de presión sonora equivalente. Sin embargo, es importante señalar, tal y como indica Kang et al. (2019), que sólo el 30% de las molestias por ruido se deben a aspectos físicos.

Por ello, es necesario el cálculo de valores que realicen una estimación más cercana a la molestia del ruido en las personas, incluyendo aspectos psicoacústicos del sentido de la audición (Segura et al., 2012). Estos términos, en la literatura científica, se suelen referenciar con su denominación original en inglés, e intentan modelar con mayor precisión estas sensaciones sonoras subjetivas del ser humano. Algunos ejemplos que se presentarán a continuación son: loudness o sonoridad, sharpness o agudeza, así como roughness o rugosidad.

Antes de describir los parámetros psicoacústicos, cabe presentar la primera aproximación, y aunque simple es la más ampliamente utilizada, para cuantificar la molestia de sonido en las personas, las ponderaciones frecuenciales y en especial la ponderación A.

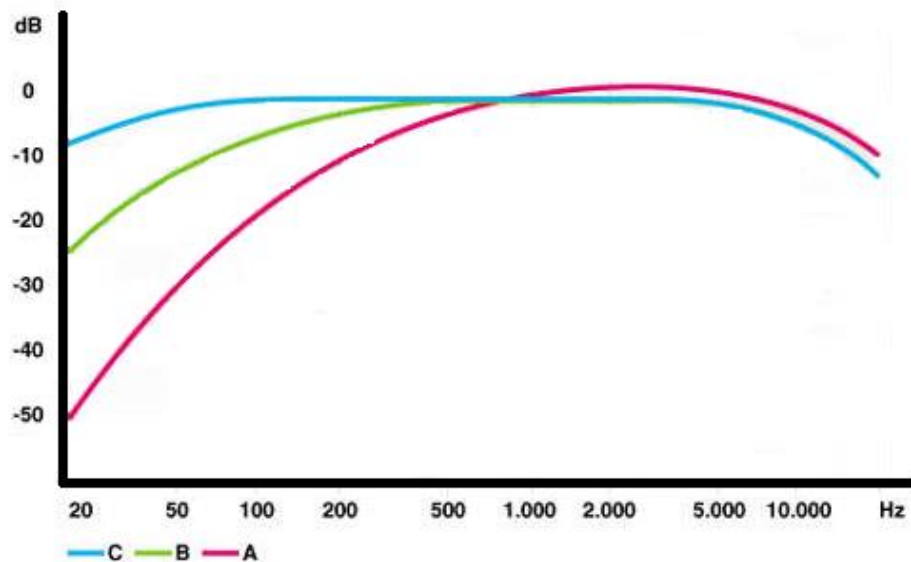
#### *2.4.3.1 Ponderaciones frecuenciales*

El análisis de las frecuencias es importante porque dos ruidos que tengan un mismo nivel de presión sonora  $L_p$ , definido en la sección 2.4.2.1, pueden presentar distribuciones de frecuencias muy diferentes.

El sistema auditivo es menos sensible a las bajas y altas frecuencias, esto hace que sea necesario el uso de filtros de ponderación para representar el nivel de ruido percibido en los equipos de medida. Con el fin de tener en cuenta esta respuesta humana al sonido en función de su frecuencia, se introdujo en su medida el concepto de curvas estándar de ponderación, que discriminan el peso relativo de cada banda de frecuencia en el conjunto del espectro.

**Figura 7**

*Curvas de ponderación frecuencial para los filtros A, B y C.*



La curva de ponderación A (línea rosa de la figura 7), es usada para niveles de sonoridad de menos de 55 fonios (unidad de medida del nivel de sonoridad), la cual equivale a 1 decibelio de nivel sonoro cuya frecuencia sea de 1.000 Hz. La curva de ponderación B (línea verde de la figura 7) es utilizada para niveles de sonoridad entre 55 y 80 fonios, y la C (línea azul de la figura 7) para niveles superiores a 80 fonios.

En realidad, la curva de ponderación A, es la que se usa más habitualmente para medir la molestia del ruido, pues su respuesta a las distintas frecuencias es una buena aproximación al modo en que el oído humano percibe el sonido y aparece en la mayoría de legislación y normativa sobre ruido. En consecuencia,

para expresar la sonoridad subjetiva del sonido para el oído humano se utiliza el nivel de presión acústica ponderado A, y se adopta la denominación dB(A).

Los dB(A) no modelan con precisión esa molestia (Bento Coelho, 2010; Liu et al., 2014). Esto ha provocado mayor cantidad de estudios sobre el sistema auditivo hasta que recientemente empieza a ser relevante entre la comunidad científica el uso de parámetros psicoacústicos avanzados. Aunque su cálculo es más complejo, consiguen implementar un modelo más preciso del comportamiento del sistema auditivo humano y su respuesta a la molestia al ruido.

#### 2.4.3.2 Loudness (N) o Sonoridad

Loudness, sonoridad en español, representado por  $N$ , se define como la sonoridad subjetiva del sonido. El término se considera como una medida perceptiva de la intensidad percibida por el oído humano, siendo el fonio su unidad de medida.

Este parámetro está estandarizado en la norma ISO 532B (Organización Internacional de Normalización. [ISO], 2017), teniendo una buena correlación con la amplitud del sonido, desde los sonidos tranquilos hasta los sonidos fuertes. Zwicker y Fastl (1990) construyeron el modelo más usado para el cálculo de la molestia junto con el modelo más extendido del loudness monaural.

El loudness total monaural de un sonido que llega al oído,  $N$ , ya sea el izquierdo  $N_{izquierdo}$  o el derecho  $N_{derecho}$ , se calcula mediante la integración de cada uno de los valores del loudness específico por banda, para todas las contribuciones en frecuencia, denotadas por  $z$  y viene determinado por la siguiente expresión:

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) dz \quad (\text{fonio}) \quad (29)$$

$N'$  proviene de la transformación desde la excitación en el sistema auditivo a un nivel específico de loudness, estando este referido al nivel de loudness por banda. Mientras que el loudness total monoaural está referido al total del conjunto de bandas.

El concepto de banda crítica está asociado al fenómeno psicoacústico de enmascaramiento. Las bandas críticas se utilizan para cuantificar la capacidad del oído humano de distinguir entre tonos de frecuencia de manera individual. El oído humano puede oír de 20 a 20.000 Hz, pero la capacidad de distinguir tonos individuales varía en función de la frecuencia. A bajas frecuencias, el oído humano puede distinguir los cambios de frecuencia más fácilmente que a altas frecuencias. Por ejemplo, el oído puede distinguir una diferencia de 20 Hz entre los tonos de 500 y 520 Hz más fácilmente que entre los tonos de 5000 y 5020 Hz.

Las bandas se definen de forma similar a los filtros paso banda, con una frecuencia central y un ancho de banda. El ancho de banda tiene una frecuencia inferior y otra superior definidas por el punto en el que hay una atenuación de 3 dB (Zwicker, 1961). Los anchos de banda de las bandas críticas son aproximadamente constantes (alrededor de 100 Hz) para las frecuencias inferiores a 500 Hz. Por encima de 500 Hz, los anchos de banda aumentan aproximadamente en un valor porcentual constante.

El sistema auditivo humano es modelado usualmente como un banco de 24 bandas críticas (Zwicker y Terhardt, 1980), cada banda crítica del oído se le denomina Bark. Cada banda crítica es capaz de estimular la misma cantidad de células en la membrana basilar, produciendo un desplazamiento proporcional en ella en relación a la frecuencia expresada usando la razón de banda crítica. Las bandas críticas se utilizan en el cálculo de diferentes métricas psicoacústicas del sonido, como loudness (ver apartado 3.4.3.2), fluctuation strength (ver apartado 3.4.3.6), roughness (ver apartado 3.4.3.5).

Por lo tanto, el nivel específico de loudness por cada banda, debe ser previamente calculado de la siguiente manera antes de ser integrado en la ecuación (29):

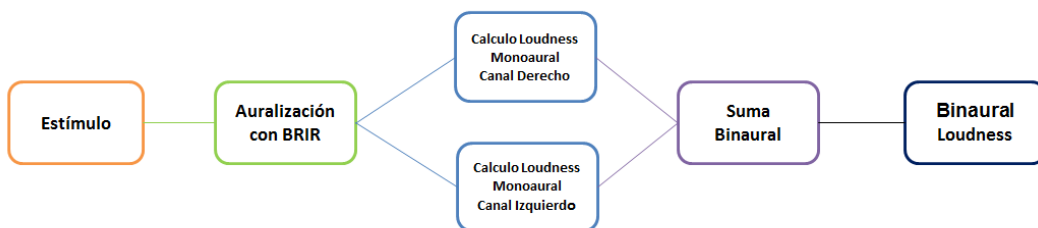
$$N' = 0.08 \cdot \left(\frac{E_{THQ}}{E_o}\right)^{0.23} \cdot \left[ \left(0.5 + 0.5 \cdot \frac{E_{sig}}{E_{THQ}}\right)^{0.23} - 1 \right] \quad \left(\frac{sonne}{Bark}\right) \quad (30)$$

donde  $E_o$  es la excitación correspondiente a la intensidad de referencia  $I_o= 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>,  $E_{THQ}$  es igual al contorno de nivel de loudness en el umbral de audición mientras que  $E_{sig}$  corresponde al patrón de excitación de la señal del estímulo. (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2003).

En general, los parámetros psicoacústicos hacen referencia a valores monoaurales, pero el sistema auditivo del ser humano es binaural por tanto, es necesario determinar dichos valores en términos binaurales. Para el caso de la escucha diótica, las señales recibidas en los dos canales auditivos tienden a contribuir de igual manera en el loudness total. Estudios más recientes sugieren que las contribuciones de ambos oídos no siguen la regla de la suma perfecta para el cálculo del loudness binaural (Sivonen, 2006; Moore y Glasberg, 2007). Moore y Glasberg (2007) en su modelo, realiza dos cálculos independientes del nivel de loudness para cada uno de los canales auditivos, es decir, izquierdo y derecho por separado. Para el entorno de estas tesis y la implementación en el dispositivo acústico utilizado, ante un estímulo sonoro, el cálculo de loudness binaural se realiza siguiendo las fases de la figura 8.

**Figura 8**

*Etapas de Cálculo de Loudness Binaural.*



*Nota.* Adaptada de Etapas de cálculo de loudness binaural de (Noriega-Linares, 2017).

Adicionalmente, en su estudio Moore y Glasberg (2007) afirman que una señal diótica es aproximadamente 1,5 veces más fuerte que la misma señal presentada monoauralmente, dando lugar a que la señal diótica está relacionada con una señal monoaural en términos de loudness. Esta afirmación es corroborada por diferentes estudios (Whilby et al. 2006; Edmonds y Culling, 2009).

Por lo tanto, la contribución de cada canal auditivo en el loudness binaural global ( $N_{binaural}$ ) queda determinado como que es 0,75 veces el nivel inhibido, dando un nivel global de 1,5 veces mayor que el loudness monoaural, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$N_{binaural} = 0,75 \cdot N_{derecho} + 0,75 \cdot N_{izquierdo} \quad (fonio) \quad (31)$$

O lo que es lo mismo:

$$N_{binaural} = \frac{3}{4} \cdot (N_{derecho} + N_{izquierdo}) \quad (fonio) \quad (32)$$

#### 2.4.3.3 Sharpness (S) o Nitidez

El segundo parámetro psicoacústico utilizado para la evaluación de la molestia es el parámetro sharpness (agudeza o nitidez). Este parámetro es un valor de sensación que es causada por componentes de alta frecuencia en un ruido dado. La unidad de sharpness es acum (del latín acum = agudo). El sharpness perfila la sensación humana también de manera lineal.

De acuerdo con el modelo Zwicker y Fastl (1990), este término se calcula de la siguiente manera:

$$S = 0,11 \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) \cdot g'(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) \cdot z \cdot dz} \quad (acum), \quad (33)$$

siendo el parámetro  $N'$ , el nivel específico de loudness por banda de Bark, calculado según la ecuación 30. El valor de  $g'(z)$  también depende de las bandas de Bark, tal y como se puede observar en la figura 9. Para las bandas de bajas frecuencias,  $z < 14$ , el valor  $g'(z)$  es 1, mientras que para bandas de frecuencias altas el valor queda expresado por:

$$g'(z) = 0,00012 \cdot z^4 + 0,00056 \cdot z^3 + 0,1 \cdot z^2 - 0,81 \cdot z + 3,51 \quad (34)$$

A continuación, siguiendo el mismo procedimiento que para el loudness, se obtiene el sharpness binaural (Fastl,1985):

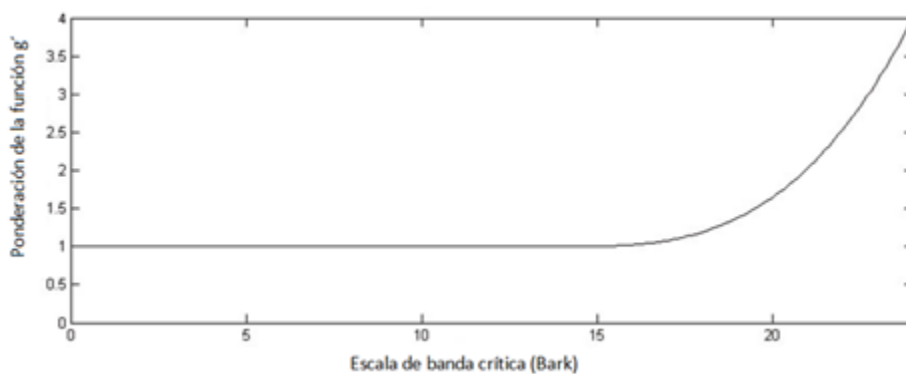
$$S_{binaural} = 0,75 \cdot S_{derecho} + 0,75 \cdot S_{izquierdo} \quad (acum) \quad (35)$$

O lo que es lo mismo:

$$S_{binaural} = \frac{3}{4} \cdot (S_{derecho} + S_{izquierdo}) \quad (acum) \quad (36)$$

**Figura 9**

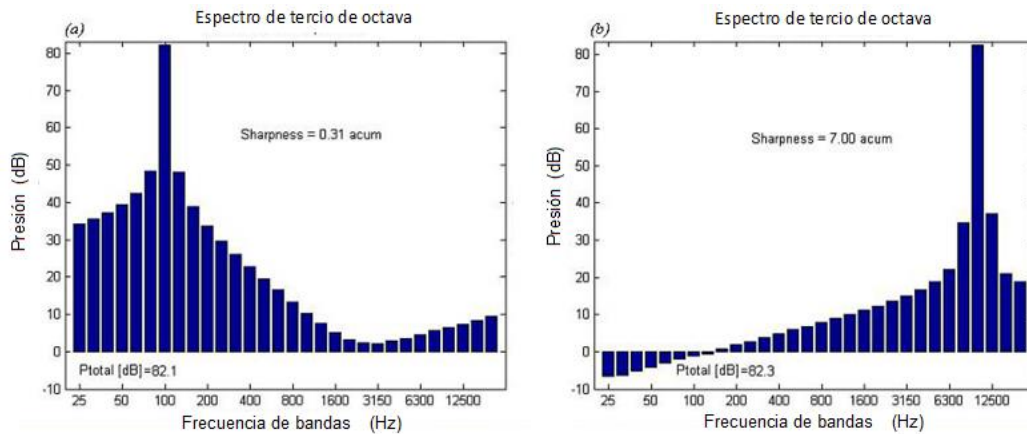
*Ponderación  $g'(z)$  en Función del Tipo de Banda Crítica (Bark) para Sharpness*



*Nota.* Adaptada de Weighting,  $g'(z)$ , as a function of critical band rate, University of Salford. (*Sharpness and Booming | Acoustics | University of Salford, 2020*)

**Figura 10**

*Espectro de frecuencias y los valores de nitidez de (a) un tono de 100 Hz y (b) un tono de 10 kHz.*



*Nota.* Adapta de Frequency spectrum and sharpness values of (a) a 100 Hz tone and (b) a 10 kHz tone. University of Salford. (*Sharpness and Booming | Acoustics | University of Salford, 2020*).

La figura 10 representa un ejemplo del espectro de un sonido agudo (b) y otro menos agudo (a) y su correspondiente valor de sharpness monoaural.

#### 2.4.3.4 Booming (B)

De manera similar al sharpness, existe otro parámetro psicoacústico que depende del contenido espectral en bajas frecuencias. Este parámetro es el booming, cuya característica es que cuanto mayor sea la proporción de bajas frecuencias, mayor es su valor. Por tanto, se puede hablar de un parámetro complementario al sharpness. El parámetro es muy usado y es de gran importancia en la industria automovilística (Shin, 2004) para cuantificar de manera parcial la calidad sonora del motor.

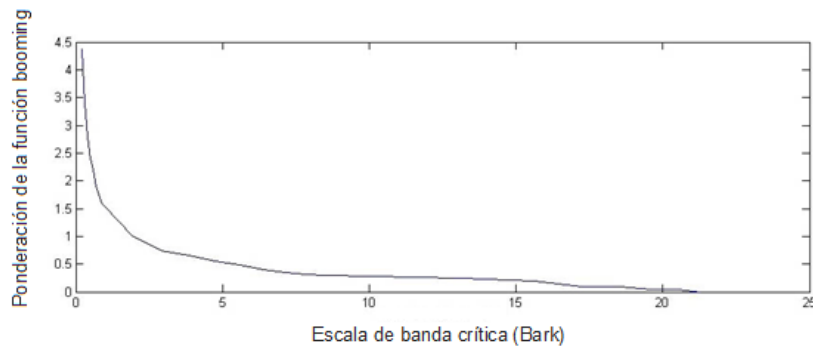
También, el booming es considerado uno de los principales parámetros de estudio en los ruidos mecánicos de los vehículos (Shin et al., 2009), producidos por la cadena de transmisión, cuando los tonos puros o de banda estrecha, relacionados con la frecuencia de encendido del motor, y sus armónicos excitan la



cavidad de los pasajeros, lo que conlleva un aumento prominente de la intensidad del sonido. En consecuencia, este parámetro acústico subjetivo se ha considerado muy importante para el confort acústico de los pasajeros (Shin et al.,2009).

**Figura 11**

*Ponderación  $g'(z)$  en Función del Tipo de Banda Crítica (Bark) para Booming.*



*Nota.* Adapta de Booming weighting as a function of critical band rate University of Salford. (Sharpness and Booming | Acoustics | University of Salford, 2020).

Por tanto, al ser su cálculo similar al sharpness, tenemos que

$$B = 0,11 \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) \cdot g'(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) \cdot z \cdot dz} \quad (\text{acum}) \quad , \quad (37)$$

siguiendo el mismo procedimiento que para el sharpness binaural, se obtiene que el booming binaural:

$$B_{\text{binaural}} = 0,75 \cdot B_{\text{derecho}} + 0,75 \cdot B_{\text{izquierdo}} \quad (\text{acum}) \quad (38)$$

$$B_{\text{binaural}} = \frac{3}{4} \cdot (B_{\text{derecho}} + B_{\text{izquierdo}}) \quad (\text{acum}) \quad (39)$$

#### 2.4.3.5 *Roughness (R) o Rugosidad*

Este parámetro psicoacústico, traducido también al español como aspereza, está destinado al diseño de sonidos (Lyon, 2003), y medir la subjetividad de impresiones sonoras (Daniel y Weber, 1997). Su unidad es el *asper*.

Zwicker y Fastl (1990), definió el *asper* como el valor de roughness provocado por un tono de 1 kilohercio modulado en amplitud a 60 decibelios con una modulación de 70 hercios. Este parámetro se produce siempre que existe un involucramiento variable temporalmente en una banda crítica, por ejemplo, cuando los tonos muestran una estructura temporal debida a una variación de su amplitud o frecuencia. Cuanto mayor es este parámetro, su percepción es mayor, causando a su vez más agresividad y una mayor molestia, aunque el loudness o el nivel de sonora con filtro A permanezcan invariables.

El roughness depende de la frecuencia central, de la frecuencia de modulación y de la profundidad de modulación. Aumentando la profundidad de modulación, la impresión de roughness es más fuerte. La dependencia con la frecuencia de modulación tiene una característica pasabanda, es decir, la impresión de roughness decrece fuertemente hacia frecuencias muy altas o muy bajas. Esta impresión se maximiza en una frecuencia de modulación cerca de 70 Hz (Segura et al., 2012). La expresión para el cálculo de este parámetro es la siguiente:

$$R = 0,003 \sum_0^{24Bark} f_{mod}(z) \cdot \Delta L_E(z) \cdot \Delta z \quad (\text{asper}) \quad (40)$$

siendo  $R$ , roughness,  $f_{mod}$ , la frecuencia de modulación y  $\Delta L$  es el índice de modulación percibido por el oyente.

#### 2.4.3.6 *Fluctuation Strength (F) o Fuerza de Fluctuación*

Fluctuation strength (fuerza fluctuante) se denomina a la sensación auditiva determinada por las variaciones de señal con frecuencias de modulación muy bajas alrededor de 20 Hz (Zwicker y Fastl, 1990). Su unidad es el vacil, que viene definido por un tono de 1 kHz a 60 decibelios modulado en amplitud a 4 Hz. Viene definida por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{0,008 \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} \Delta L \cdot dz}{(f_{mod}/4 \text{ Hz}) + 4 \text{ Hz}/f_{mod}} \quad (\text{vacil}) \quad (41)$$

donde  $f_{mod}$  es la frecuencia de modulación y  $\Delta L$  es el índice de modulación percibido por el oyente.

#### 2.4.3.7 Molestia psicoacústica (PA)

Los parámetros descritos hasta el momento devuelven valores que indican características de un sonido, siendo clave en estos parámetros su modelización, que permite una cuantificación objetiva, es decir, cuantificar el valor subjetivo del atributo según las características físicas de la señal.

A consecuencia de ello, Zwicker y Fastl (1990), teniendo en cuenta las experiencias psicoacústicas, lograron una expresión que devuelve el grado de molestia de un sonido mediante una combinación de las cuatro métricas, a ese valor se le denomina molestia psicoacústica, siendo su terminología anglosajona como "Psychoacoustic Annoyance" (PA). A partir, de los registros obtenidos en cada uno de los parámetros descritos anteriormente de manera individualizada y del cálculo de su variación temporal, es posible aplicar el modelo de molestia de Zwicker y Fastl. La molestia según este modelo se expresa como:

$$PA = N_5 \cdot \left( 1 + \sqrt{w_S^2 + w_{FR}^2} \right) \quad (42)$$

En la ecuación (42),  $N_5$  es el percentil 5 de la sonoridad o loudness respecto al tiempo,  $w_S$  es la componente que contiene el valor de sharpness y  $w_{FR}$  es la componente que corresponde a las modulaciones, es decir, fluctuation strength (F) y roughness (R).

$$w_S = (S - 1,75) \cdot 0,25 \cdot \log(N_5 + 10) \quad (43)$$

$$w_{FR} = \frac{2,18}{(N_5)^{0,4}} \cdot (0,4 \cdot F + 0,6 \cdot R) \quad (44)$$

En esta sección se han presentado conceptos básicos de la onda sonora, junto con los parámetros acústicos tanto físicos como psicoacústicos que han sido utilizados en esta tesis. Estos parámetros son obtenidos y/o calculados por los diferentes tipos de medidores del campo sonoro que son descritos en el siguiente apartado.

## 2.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN DEL CAMPO SONORO.

### 2.5.1 Introducción

Tradicionalmente las mediciones del campo sonoro se han llevado a cabo a través de los sonómetros, que se introducen en el apartado 2.5.2, ya sea para el control del ruido, la evaluación de la contaminación acústica y/o la molestia generada en las ciudades. Sin embargo, los nuevos avances de la tecnología de Internet de las cosas han dado lugar a la creación de nodos acústicos, que son capaces de capturar señal sonora, así como calcular, almacenar y transmitir parámetros acústicos de forma autónoma y remota. Los nodos acústicos son presentados en el apartado 2.5.3. Además, estos nodos acústicos pueden realizar mediciones de manera individual o bien desplegar una un grupo de nodos acústicos para crear una red inalámbrica de sensores acústicos, las cuales son expuestas en el apartado 2.5.4.

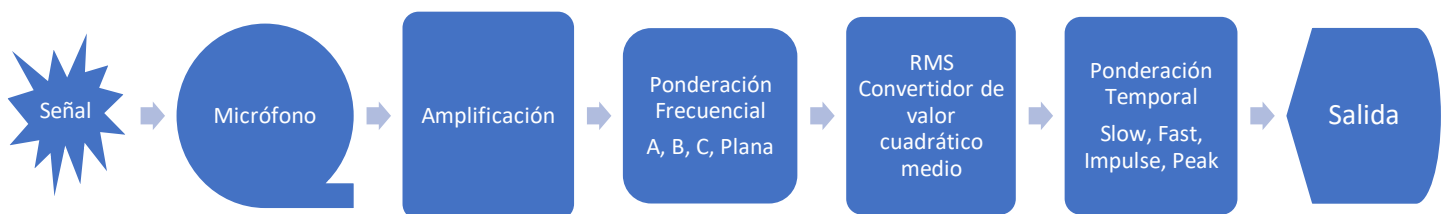
### 2.5.2 Sonómetros

Hasta los últimos años las mediciones acústicas en las ciudades han sido realizadas principalmente por profesionales que registran y analizan niveles de ruido equivalentes en determinados lugares durante un periodo de tiempo determinado utilizando equipamiento certificado. En estas mediciones de parámetros e índices acústicos básicos de los entornos sonoros, se usan sonómetros manuales portátiles, destinados a la medida de los niveles de presión sonora ponderados en frecuencia y en tiempo. Generalmente, un sonómetro es una combinación de un micrófono, un procesador de señal de audio y un

dispositivo de presentación de resultados. En la figura 12 se presenta un diagrama de bloques general de un sonómetro:

**Figura 12.**

*Diagrama de Bloques de un Sonómetro.*



El sonómetro, a través de un micrófono incorporado, captura una señal sonora midiendo los cambios de presión de la misma. Dicho micrófono, es un elemento transductor que se encarga de adquirir las ondas mecánicas que se propagan en el sonido y convertir las variaciones de presión acústica en una señal eléctrica.

La señal eléctrica obtenida suele ser muy débil, así que se amplifica para poder procesarla en las siguientes etapas. A continuación, la señal es procesada por el circuito de ponderación, el cual aplica filtro en frecuencia de acuerdo con la aplicación (A, B, C o Plana) que se esté contemplando, ver apartado 2.4.3.1. El siguiente proceso es la obtención del valor cuadrático medio de la señal (RMS), con el objetivo de cuantificar el promedio de energía de la señal. Finalmente, la visualización del valor del parámetro se muestra en una pantalla de manera digital o analógica, de acuerdo con la respuesta temporal seleccionada. Esta respuesta temporal también afecta al periodo de integración del valor cuadrático medio calculado.

En algunos sonómetros, una unidad de procesado espectral, permiten realizar medidas globales o por bandas de frecuencias de octava y tercios de octava. Con el fin de reducir al máximo las posibles diferencias entre las

mediciones efectuadas con sonómetros de distintas marcas y modelos. Existen unas normas internacionales a las que deben ceñirse los fabricantes de tales instrumentos (UNE EN 61672-1, 2014).

La ponderación en el tiempo, es decir, en la velocidad con la que responde el sonómetro a cambios de amplitud, viene determinada por la normativa que las clasifica en cuatro velocidades:

- Lento ("S", slow): El valor es de un segundo aproximadamente.
- Rápido ("F", fast): El valor es de 125 milisegundos. Es una velocidad más precisa ante fluctuaciones.
- Impulso ("I", impulse): El valor es de 35 milisegundos. Valora la respuesta del oído frente a sonidos de corta duración.
- Pico ("P", Peak): El valor es de entre 50 y 100 milisegundos. Sirve para valorar la posibilidad de un deterioro en el oído ante un sonido corto, pero de gran intensidad.

Un sonómetro general muestra el nivel de presión sonora instantáneo en decibelios (dB), tal y como se describe en el apartado 2.4.2.1, lo que normalmente se conoce como nivel de sonido o nivel sonoro. Según el tipo de medidas que se vaya a realizar los sonómetros se clasifican según la norma UNE-EN 61672-1:2014 (UNE-EN 61672-1, 2014):

- Sonómetro: Mide niveles de sonido ponderados en frecuencia con ponderación temporal exponencial.
- Sonómetro integrador-promediador: Mide niveles de sonido ponderados en frecuencia promediados en el tiempo.
- Sonómetro integrador: mide niveles de exposición sonora ponderados en frecuencia.

Dependiendo el objetivo de las mediciones, existen cuatro clases de sonómetros:

- Tipo 0: Sonómetros patrones, cuyas tolerancias más estrictas ( $\pm 0,7$  dB entre 100 Hz y 4000 Hz). Se utiliza en laboratorios. Sirve como referencia.
- Tipo 1: De precisión. Se emplea en mediciones de precisión en el terreno. Con tolerancias de  $\pm 1$  dB entre 100 Hz y 4000 Hz.

- Tipo 2: De precisión y de uso general. Medidor de propósito general, las tolerancias son las mínimas aceptables ( $\pm 1,5$  dB entre 100 Hz y 1250 Hz,  $\pm 3$  dB hasta 4000 Hz) para monitoreo de ruido, utilizado en mediciones generales de campo.
- Tipo 3: De inspección empleado para realizar reconocimientos. Mediciones aproximadas.

El empleo de uno u otro tipo depende de la exactitud buscada en las mediciones y del uso que se requiera del instrumento. Dicha clasificación quedó modificada en 2014, con la norma UNE EN 61.672 (UNE EN 61672-1 (2014)) donde se eliminan los tipos 0 y 3, quedando exclusivamente los tipos 1 y 2.

Durante mucho tiempo, el control del ruido, la molestia y la evaluación de la contaminación acústica en las ciudades se ha llevado a cabo a través de la realización de mediciones con sonómetros o con modelos matemáticos teóricos y prácticos, con el objetivo de crear unos mapas de niveles de ruido en ciertas zonas de las ciudades. Sin embargo, dada la escala urbana considerada y la variabilidad espacial del entorno sonoro, el número de puntos de medición a implantar es muy grande para modelar la variabilidad relevante del entorno sonoro (Aumond et al., 2018). Por tanto, el uso de este tipo de medidores, junto con el tiempo de trabajo realizado por los profesionales para obtener resultados del entorno, es muy costoso.

El nuevo paradigma de Internet de las cosas (IoT), ha dado lugar a que los fabricantes de sonómetros hayan dotado a estos equipos de conectividad, mejorando las versiones tradicionales que no la poseen, pero aumentando sus costes de adquisición. Un ejemplo comercial sería el modelo del fabricante Cesva TA 120 (cesva.com, 2021).

### 2.5.3 Nodos acústicos

La tecnología de IoT conlleva la digitalización de objetos cotidianos a través de una interconexión e intercambio de datos con otros dispositivos y/o sistemas a través de Internet, con una mínima intervención humana. Esta tecnología da lugar

a nuevos sistemas de ingeniería que permiten mejorar la sostenibilidad de los entornos, junto con un gran potencial en la monitorización de los mismos.

Este paradigma ha creado una nueva manera de evaluar los entornos sonoros, permitiendo crear equipos (nodos acústicos) remotos y autónomos, tanto independientes o interrelacionados, que permiten la monitorización del entorno sin casi la acción humana.

En los últimos años la gestión de las ciudades ha venido sufriendo cambios en virtud de las mejoras que se están produciendo en el ámbito de la tecnología de la información y las comunicaciones, creando el concepto de ciudades o regiones inteligentes. Sutriadi (2018) define Smart City como: una innovación en los entornos urbanos, en busca de una planificación sostenible, que promueve un desarrollo de los entornos, basado en el conocimiento, mediante el aprendizaje continuo de los recursos humanos como parte integrante del desarrollo de los recursos urbanos, especialmente en el fomento de las zonas urbanas edificadas. Este concepto de ciudad inteligente, junto con el estudio de parámetros ambientales, están muy presentes en la sociedad actual, siendo uno de los campos científicos con una gran evolución en las próximas décadas (Zanella et al.,2014).

Además de la conectividad, han surgido numerosos e importantes avances tecnológicos que han permitido desarrollar dispositivos de captación que integran:

- Transductores de diferentes tipos.
- Sistemas de procesamiento integrados.
- Sistemas de comunicación alámbricos e inalámbricos.

Estos avances traen consigo a su vez:

- Optimización del consumo de energía.
- Reducción del tamaño del dispositivo.
- Reducción de coste en los componentes electrónicos.

Todo ello supone una reducción en el coste del dispositivo, haciendo que la adquisición de éstos sea más asequible, dando lugar a los denominados nodos de



bajo coste. Estos nodos o sensores de bajo coste están presentes en muchas investigaciones de diferentes ámbitos. En la tabla 4 se presentan algunos ejemplos externos al ámbito de la acústica.

**Tabla 4**

*Nodos o Sensores de Bajo Coste*

Uso del equipo	Autor(es)
Medición de gases y calidad aire	Mat et al.,2015 ; Schneider et al., 2017 ; Badura et al. ,2018 ; Ahangar et al., 2019 ; Ali et al., 2020.
Monitorización de aguas	Martinez et al., 2020.
Agricultura	Muñoz-Carpena y Dukes, 2005 ; Mat et al., 2015 ; Blomquist et al., 2006.
Incendios forestales	Jadhav yDeshmukh, 2012.
Jardines urbanos	Carrión et al., 2018 ; Abbas et al., 2014.

Schneider y su equipo (Schneider et al., 2017) evaluaron el dióxido de nitrógeno en Oslo, Noruega, a través de un método de fusión de datos basado en la geoestadística. Para ello utilizaron tanto unos conjuntos de datos simulados como mediciones del mundo real de una red de sensores de bajo coste, debido a que los datos obtenidos por estos nodos suelen ser menos fiables que los de los equipos estándar.

Badura et al. (2018) realizaron un estudio comparativo de cuatro sensores ópticos de medición de partículas finas de PM<sub>2.5</sub> (PM, en inglés particulate matter) y un analizador de partículas durante aproximadamente seis meses en Varsovia, Polonia. De sus resultados, afirman que los sensores ópticos de PM de bajo coste pueden ser unas herramientas eficaces para la vigilancia de la calidad del aire ambiente. En esa misma línea del estudio de partículas finas PM<sub>2.5</sub>, Ahangar et al. (2019) presentan una red formada por 20 nodos desplegados en el Valle Imperial del Sur de California, cuyos resultados se basan en una modelo de dispersión para la obtención de mapa de concentración lo más preciso posible. Ali et al. (2020), hicieron uso de un equipo de bajo coste que utiliza sensores electroquímicos para medir las concentraciones de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno y un sensor de infrarrojos para medir los niveles de partículas.

Otro de los usos de estos sensores sería la monitorización de la calidad del agua y la agricultura. En su estudio, Martinez et al. (2020) presentan un dispositivo de bajo coste que consiste en un analizador de nitratos y nitritos basado en un novedoso método de detección por cromatografía iónica. Los resultados obtenidos, comparando los datos medidos en el laboratorio y en el dispositivo, demuestran la fiabilidad del sistema y del método analítico implementado en el dispositivo. Muñoz-Carpena y Dukes (2005) afirmaron que el riego por aspersión con aplicaciones de sensores podía mejorar la eficiencia hídrica hasta un 80-90% frente al 40-45% del método de riego superficial. Blomquist et al. (2006) concluyeron que se podía ahorrar un 16% de agua con esta práctica de riego. Mat et al. (2015) desarrollaron un sistema de monitorización de agricultura de precisión, utilizando sensores de bajo coste para monitorear la humedad, la temperatura, la luminosidad, la conductividad eléctrica y el pH. Este sistema no se desplegó ni se probó en un área grande, por lo que su fiabilidad aún no está demostrada.

Haciendo uso de dos variables monitorizadas en el anterior estudio como son temperatura y humedad, Jadhav y Deshmukh (2012) diseñaron un sistema de detección de humo para la prevención de incendios forestales. Los resultados de las pruebas indicaron que la fiabilidad del sistema en la propagación de la

información directamente a la estación base podía obtenerse de forma excelente en diversas condiciones. Abbas et al. (2014) han desarrollado un sistema basado en sensores inteligentes para parques y jardines. En este sistema, se utilizan sensores de humedad de suelo para detectar la humedad del campo, así como diferentes características del suelo, como la capacidad de retención de agua.

Pero el uso de equipos de bajo coste también está presente en el campo de la acústica a través de los denominados sensores acústicos, los cuales llevan integrados micrófonos para la captación del sonido. Los sensores pueden ser clasificados en función de su localización espacial: (Picaut et al., 2020)

- Sensor o red de sensores fijos o estáticos (Segura Garcia et al., 2016; Zamora et al., 2017; Benocci et al., 2020).
- Sensor o red de sensores móviles (Lacerda et al., 2004; Zamora et al., 2017; Alsina-Pagès et al., 2017).

Dentro de los sensores móviles, se incluyen aquellos cuya medición es participativa móvil como los teléfonos inteligentes o tablet (Kanjó, 2010). Según Picaut et al. (2020), los sensores móviles pueden ser móviles continuos como es el caso de un sensor en el interior de un vehículo, o bien móviles ocasionales, el nodo se mueve de una posición estática a otra posición estática, durante un largo tiempo de medición, en cuyo caso la red se considera siempre como una red estática.

A continuación, se realiza una revisión de trabajos científicos donde se desarrollan y aplican nodos acústicos con un solo micrófono, por lo que adquieren una señal monoaural.

Santini y Vitaletti (2007) en su estudio hacen uso de un nodo compuesto por un micrófono electret de condensador omnidireccional EM6050P-423, una unidad microcontroladora, modelo Texas Instruments MSP430 y un procesador RISC de 16 bits, equipado con una tarjeta de sensor multimodal EasySense SBT80, todo ello en una plataforma hardware Tmote Sky. Posteriormente ambos autores, junto con Ostermaier, (Santini et al., 2008), recurrieron a una plataforma Tmote

Invent compuesta por una unidad microcontroladora Texas Instruments MSP430. Sin embargo, ambos nodos desarrollados presentaron ciertas limitaciones con respecto a la frecuencia de muestreo a 8 kHz, siendo insuficiente para el estudio del entorno sonoro en todo su espectro. Además, en sus estudios descubrieron que la Tmote Sky generaba un ruido interno excesivo y que la Tmote Invent, con un micrófono integrado, tenía unas características de audio aparentemente buenas. Posteriormente haciendo uso de la misma plataforma Tmote Sky, Filipponi et al. (2008) desarrollan un sonómetro propio para su nodo acústico, mientras que Santini et al. (2009) hacen uso de un sonómetro comercial de clase 2 (Extech 407740). Ambos proyectos se conectaron a la plataforma Tmote Sky a través de un canal de entrada analógico, para superar principalmente el problema de los limitados recursos computacionales. En los estudios referenciados, (Santini y Vitaletti, 2007; Santini et al., 2008; Filipponi et al., 2008; Santini et al., 2009), no se presenta la calibración específica de los sonómetros, además concluyen que existe una limitación en la potencia de computo, un gran consumo de batería en el proceso de muestreo, una mediocre calidad de los micrófonos y, únicamente miden el nivel de ruido equivalente.

Con el objetivo de mejorar las prestaciones de los equipos anteriores, MacDonald et al. (2008) desarrollaron un sensor de ruido basado en una plataforma Triton XXS, utilizando una plataforma Intel XScale PXA255 de 32 bits. La medición acústica se realizó a través de un micrófono electret de condensador omnidireccional conectado al microprocesador mediante un convertidor de audio analógico-digital de 16 bits. Se hizo uso de un filtro digital de ponderación A para el cálculo de los niveles sonoros equivalentes durante un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, no se ofrece información sobre las características acústicas finales de los sensores, su calibración y su precisión.

Más recientemente, Barham y Chan en diferentes grupos de trabajo (Barham et al., 2009; Barham et al., 2010; Barham et al., 2018) realizan sus mediciones acústicas con el uso de micrófonos tipo MEMS (micro-electrical-mechanical systems), en español sistema microelectromecánico, incluyendo su propio diseño de un micrófono MEMS con un rendimiento optimizado. Para el diseño de su dispositivo usan circuitos integrados reconfigurables, es decir,

hardware programables como son Float point gate array, para mejorar la eficiencia de la batería del dispositivo y su respuesta en frecuencia de captura de sonido. Las pruebas realizadas con dichos micrófonos dieron buenos resultados para la obtención de medidas acústicas. Además, se realizaron numerosas pruebas para evaluar tanto las prestaciones acústicas intrínsecas de los MEMS utilizados, como la evolución de dicha solución en condiciones de funcionamiento (efecto de las condiciones atmosféricas, viento, frío, vibraciones, etc.). Las técnicas desarrolladas han sido lo suficientemente avanzadas como para desplegar un centenar de sensores en varios emplazamientos urbanos y comenzar a analizar los datos recogidos. Posteriormente en Piper et al. (2017) se conectó estos micrófonos MEMS a una placa hardware marca Raspberry Pi (R-Pi) 2 Modelo B con suministro de energía por cable, y utilizando la conexión del sistema global de comunicaciones móviles (GSM, global system for mobile communications).

Otro grupo de investigadores (Hakala et al.,2010) hacen uso de sensores basados en plataforma hardware CiNet, con un microcontrolador ATmega120 con convertidor analógico-digital de 10 bits, que permite a una frecuencia de muestreo de 33 kHz, utilizando un chip compatible con IEEE 802.15.4 (Zigbee) y un micro electret omnidireccional de alta calidad (MONACOR MCE-400). Los autores implementan un filtro analógico de ponderación A en tiempo real (Kivelä et al., 2011) y una preamplificación a través de dos canales (Maxim MAX4524). La calibración de este nodo es comparada con sonómetros de Clase-1 y Clase-2, dando como resultado una desviación inferior a 2 dB

Posteriormente Tan y Jarvis (2013), en su estudio hacen uso de un nodo sensor basado en un módulo sensor inalámbrico de ultra bajo consumo Telos, junto con micrófono de condensador omnidireccional. Este estudio destaca por el uso de placas solares como fuente de alimentación. Los resultados que ofrece su sistema se basan en los niveles de ruido máximos, en lugar del  $L_{eqT}$ . Tras las pruebas realizadas, detectaron varios problemas técnicos como son: bajo rendimiento acústico del micrófono en términos de relación señal/ruido y dinámica, así como las limitaciones del microcontrolador en tamaño de memoria y del conversor analógico-digital. En su siguiente estudio Tan y Jarvis (2014), para superar esa deficiencia en el micrófono, hacen uso de micrófonos tipo MEMS,

ofreciendo mejores prestaciones acústicas. Su estudio muestra un almacenamiento suficiente de energía generada por las placas, para el funcionamiento del sensor durante la medición. Esta necesidad va en función del tipo de salidas acústicas que se requieran, además de afirmar que dicho dispositivo realiza una gestión correcta del consumo para el cálculo de algoritmos en mediciones autónomas.

En 2011 y 2015, Mariscal-Ramírez et al. (2011, 2015) implementaron en sus estudios un indicador de ruido en campo difuso, o sea, para interiores. El nodo sensor se basó en la plataforma hardware Sun Spot con un micrófono electret, utilizando un conversor analógico-digital de 8 bits. El nodo se probó con varias señales, mostrando una desviación inferior al 4% en términos de niveles sonoros, en comparación con un sonómetro de clase 2.

Con el objetivo de la medición de niveles sonoros e índices psicoacústicos de la contaminación acústica del tráfico en entornos exteriores, Segura et al. (2014) realizan la comparativa de las plataformas hardware Tmode Invent y Raspberry PI. Tmode Invest presenta serias limitaciones para mediciones acústicas, debido a su memoria RAM y su circuito de grabación de audio de bajo rendimiento frente a Raspberry PI. Las mediciones acústicas se realizaron con una tarjeta de sonido USB (Universal Serial Bus, en castellano Bus Serie Universal) modelo Logilink UA0053 con un micrófono electret de condensador omnidireccional. Los datos obtenidos con la Raspberry PI muestran una buena correlación con las mediciones con sonómetro y grabadoras de audio de alta calidad, tanto en valores acústicos objetivos como psicoacústicos.

Un proyecto similar es el desarrollado por Noriega- Linares y Navarro Ruiz (2016), usando de igual manera la Raspberry PI como plataforma principal y con un micrófono electret de condensador USB, T-Bone GC 100 USB, para la adquisición de audio donde se incluye un conversor analógico-digital interno. Según los autores, esta solución integrada ofrecía mejores prestaciones en términos de ruido que el uso de un micrófono externo con una tarjeta de sonido USB. En dicho estudio se menciona la ecualización de la respuesta en frecuencia del micrófono, la calibración del micrófono, el filtrado de banda de 1/3 de octava y la implementación del algoritmo para el procesado en tiempo real. Las

comparaciones de las mediciones con un sonómetro de referencia demuestran un buen rendimiento del sensor. Además, se aprovechó la conectividad en la nube para el almacenamiento de datos.

Alsina-Pagès et al. (2017) presentan en su trabajo un sensor compuesto por un microcontrolador ARM de 32 bits en un chip NXP FRDM-KL25Z con un conversor analógico-digital de 12 bits que utiliza un micrófono electret omnidireccional (CMA-4544PF-W) con un amplificador de micrófono (Maxim MAX9814) con control automático de ganancia. Para optimizar la transmisión de datos los autores recomiendan considerar dos protocolos de transmisión de datos, una conexión Wi-Fi (utilizando el módulo Wi-Fi ESP8266) y una red GSM, utilizando el módulo celular Adafruit FONA 808, que incluye un sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System)

Mydlarz et al. (2017) diseñan en su trabajo un sensor de bajo coste basado en la plataforma hardware Tronsmart MK908ii con un procesador Rockchip RK3188 quad core Cortex A9. Este sensor fue equipado con un micrófono tipo MEMS Knowles SPU0410LR5H-QB y una interfaz de audio USB eForCity, todo ello protegido contra los efectos meteorológicos. Se demostró que este dispositivo cumple en general los criterios de la clase 2 de sonómetros. Recientemente este sensor ha sido modificado, cambiando el micrófono MEMS analógico por un digital. Dicho micrófono cuenta con un amplio rango dinámico de 32dB(A)-120dB(A). Además, sustituyen la unidad de procesamiento por un dispositivo R-Pi 2 Modelo B para aumentar las prestaciones de cálculo (Mydlarz et al., 2019; Bello et al., 2019) alojando esta unidad en una carcasa de aluminio para reducir las interferencias de radio frecuencia y evitar el calentamiento de la placa debido a su exposición solar.

Peckens et al. (2018) realizan mediciones con un sensor formado por un micrófono tipo ECM Omnidireccional (PUI POW-1644P-B-R), un filtro analógico A-Weighing y un circuito amplificador, cuya calibración es implementada con circuitos analógicos para reducir el consumo de energía. Este grupo de investigadores hacen uso de la plataforma Teensy 3.6 compuesto por una MCU

ARM Cortex-M4 de 32 bits, sobre un chip MK20DX256VLH7, utilizando un módulo ZigBee XBee-PRO (S2B).

Las investigaciones descritas hasta ahora utilizan un único canal de sonido. Sin embargo, las mediciones a través de un micrófono difieren de la naturaleza del sistema auditivo del ser humano, que es binaural, por lo que sería interesante realizar captación de varios canales mediante un array o arreglo de micrófonos.

En Noriega-Linares et al. (2017) se presenta un novedoso dispositivo portátil y autónomo que permite la captación del sonido a través de un array de micrófonos, para posteriormente sintetizar la respuesta binaural del humano, mediante un algoritmo de dirección de llegada y una función de transferencia relacionada con la cabeza. Este nodo es capaz de calcular parámetros acústicos básicos y parámetros psicoacústicos que permiten evaluar la molestia acústica monoaural y binaural. Este dispositivo se utilizó como unidad de captación, calculando en tiempo real varios indicadores sonoros estándar, como son niveles sonoros instantáneos, niveles equivalentes, percentiles y niveles de presión sonora de 1/3 de octava. Posteriormente el dispositivo fue modificado para el análisis y la evaluación de parámetro psicoacústico loudness de manera binaural, definido en el apartado 2.4.3.2. En dicha investigación, los investigadores destacan la viabilidad de utilizar el dispositivo para realizar un muestreo temporal de larga duración. El dispositivo ha sido diseñado y testado por el grupo de investigación en telecomunicaciones avanzadas de la Universidad Católica de Murcia. Tomando este nodo acústico como punto de partida, se ha desarrollado esta tesis doctoral, realizando una serie de mejoras y evaluaciones que son descritas en el apartado 3.

#### **2.5.4 Redes de sensores**

Un sensor puede ser usado de manera independiente como un único medidor. Sin embargo, se le puede incorporar tecnología de comunicación, lo que permite una interconexión con otros sensores. Este conjunto de sensores permite obtener datos al mismo tiempo en diferentes localizaciones. A este conjunto de sensores interconectados se le conoce como red de sensores, que en el caso de ser una comunicación inalámbrica se le llama red inalámbrica de sensores, del inglés



Wireless Sensor Network (WSN). El objetivo de estas redes es proporcionar una herramienta para la vigilancia del medio ambiente y la captura de datos de los diferentes entornos, para así poder evaluar la necesidad de la comunidad en materia de protección ecológica, ambiental, social y económicas.

En el campo de la acústica, en los últimos tiempos se han desplegado numerosas redes inalámbricas de sensores acústicos (WASN, Wireless Acoustic Sensor Network) que se han convertido en una herramienta imprescindible para la monitorización y gestión de los niveles de ruido (Peckens et al., 2018; Bello et al., 2019). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el desarrollo de sensores de bajo coste para la medición acústica y el despliegue de una red de sensores ad-hoc pueden ser complejos de implementar, debido a la gran variabilidad espacial y temporal de los entornos sonoros. Para ello, se requiere de un número importante de sensores y unas capacidades avanzadas de procesamiento de los mismos.

Para la creación y despliegue de este tipo de redes, tal y como hemos resaltado en el apartado 1.1, juega un papel fundamental el paradigma IoT, y las tecnologías asociadas a él. Las WASNs presentan una serie de ventajas y desventajas, las cuales son presentadas a continuación:

- Los nodos pueden diseñarse para captar el sonido con una calidad adecuada en las mediciones acústicas y a un coste asequible mediante nuevas plataformas hardware como, por ejemplo, Arduino (Arduino - Home, s. f.) o Raspberry Pi (Raspberry Pi, 2021) entre otros.
- Las comunicaciones inalámbricas de los nodos proporcionan un despliegue de la red fácil y rápido a través de tecnologías más eficientes y seguras, como por ejemplo, LoRa Alliance (LoRa Alliance, 2021) y Zigbee Alliance (Zigbee - Alianza de estándares de conectividad, 2019).
- El almacenamiento y análisis de datos en una plataforma basada en la nube en tiempo casi real puede ayudar a los gestores a tomar decisiones tempranas (Navarro et al., 2017).

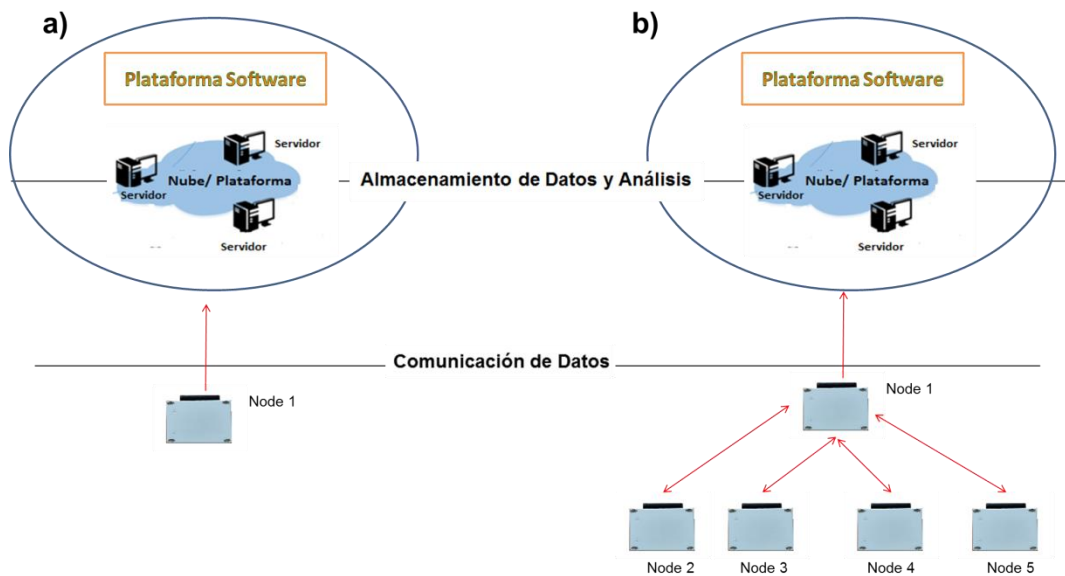
- Los nodos pueden ser controlados y supervisados a distancia (Sethi et al., 2018), aun así, se requiere un mantenimiento periódico in situ.
- Estos dispositivos, son una buena herramienta para mediciones de larga duración y a gran escala (Santini et al., 2009).
- Algunos dispositivos pueden tener limitaciones a la hora de realizar cálculos complejos, como, por ejemplo, los parámetros psicoacústicos. Sin embargo, estas limitaciones de computación pueden superarse con la computación en el borde (on-edge computing), algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) (Ali et al., 2020) y las mejoras en las características de los futuros dispositivos (Lopez-Ballester et al., 2019).
- Aunque conseguir un elevado número de equipos desplegados puede ser costoso, es posible aplicar técnicas de interpolación espacial para estimar los valores en otros lugares (Segura Garcia et al., 2016).

En las redes de sensores, un pilar fundamental es la comunicación entre los diferentes nodos y el lugar de almacenamiento de la información obtenida en las mediciones:

- Comunicación directa: Cada nodo o sensor trabaja de manera independiente, es decir, recoge su propia información, realiza su preprocesamiento y transmite la información a los servidores de forma directa para su almacenamiento, para su posterior procesamiento. tal y como se muestra en la figura 13a.
- Comunicación a través de una pasarela: Los sensores se comunican con un nodo sumidero, denominado Gateway o pasarela. Dicho nodo recoge la información de los otros sensores y la transmite a los servidores para su almacenamiento tal y como se muestra en la figura 13b.

**Figura 13**

*Comunicación de los Nodos de una Red con la Plataforma de Datos a) Directa b) Gateway o pasarela*



La transmisión de datos de un nodo al servidor, en la nube u on-premise, o a la pasarela puede realizarse en modo cableado o inalámbrico. Hoy en día, el modo de transmisión inalámbrica es la más utilizada de las redes de sensores para la vigilancia del medio ambiente por la versatilidad y facilidad en el despliegue. Los nodos y las pasarelas también pueden incluir simultáneamente varios protocolos de transmisión inalámbrica, en el que un protocolo interviene en caso de fallo del protocolo principal. Para más detalle sobre las tecnologías de comunicaciones, ver el apartado 3.1.1.4.

En los últimos años se han desarrollado diferentes investigaciones mediante el uso de redes de sensores acústicos en diferentes ámbitos de la acústica, principalmente en: detección y localización de fuentes sonoras (Kim et al., 2009; Jin et al., 2018; Jin et al., 2018; Faraji et al., 2019), evaluación de la biodiversidad, (Sheng et al., 2019 ; Sethi et al., 2020), estudio de contaminación acústica y

elaboración de mapas dinámicos (Benocci et al.,2017), evaluación de la molestia sonora (Noriega-Linares y Navarro Ruiz, 2016). A continuación, se hace un repaso de los trabajos más relevantes encontrados en la literatura reciente relacionados con las áreas anteriores.

La detección y localización de fuentes sonoras mediante redes de sensores es una tarea compleja, debido a las severas limitaciones de coste, energía y alcance efectivo de los dispositivos sensores. En caso de localización a través de la dirección de una fuente sonora, se utilizan dos métodos básicos. El primer método se basa en la diferencia de tiempo de llegada (TDOA) (Frampton, 2006) y segundo es el método beamforming o forma del rayo (Faraji et al.,2019). En referencia al método TDOA, Frampton (2006) en su estudio analiza varias fuentes de sonido cuya localización es conocida, dichas fuentes transmiten mientras que cada nodo de la red de sensores registra el tiempo de llegada del frente de onda. Los datos de los nodos se transmiten a un procesador central y se resuelven las ecuaciones no lineales de TDOA. Faraji et al. (2019) en su estudio usa el método beamforming para estimar la dirección de la fuente sonora, presentando un nodo sensor formado de ocho micrófonos MEMS síncronos, distribuyendo en la zona de estudio 8 nodos. Jin et al. (2018) utilizaron un smartphome de doble micrófono, una ventana de Hamming y un método de probabilidad ponderada para lograr una precisión de localización de la fuente acústica de 0,19 m en una escena estática. Kim et al. (2009) detalla un sistema de localización acústica automática que detecta eventos utilizando la comparación directa de la forma de onda con patrones acústicos en un área extensa con el uso de nodos sensores de bajo coste.

Sheng et al. (2019) hacen uso de una red de sensores acústicos inalámbricos integrada, en este caso, con una infraestructura de edge computing para la evaluación de la biodiversidad mediante una monitorización acústica remota y un análisis in situ. En otro estudio, Sethi et al. (2020) describen una red cuyos nodos están alimentados por energía solar basado en la plataforma hardware Raspberry Pi para grabar audio en lugares remotos de la isla de Borneo durante largos períodos de tiempo, enviando los datos directamente al servidor a través de la red telefónica 3G.

En el ámbito de la contaminación acústica, los estudios de Santini y Vitaletti (2007), Santini et al. (2008) utilizaron una WASN utilizando nodos basados en hardware Tmote-Sky y Tmote Invent respectivamente, para monitorizar el ruido de tráfico. El parámetro acústico calculado fue el nivel equivalente,  $L_{eq,T}$  y también implantaron un sistema para contar el número y tipo de vehículos. Sin embargo, el hardware utilizado tenía limitaciones con respecto a la calidad del audio capturado pues alcanzaba una frecuencia de muestreo de 8 kHz fija. A pesar de las limitaciones técnicas de los nodos de este estudio, presentadas en el apartado 2.5.3, los autores afirman que una WASN puede ser una buena herramienta para hacer mediciones a gran escala para aplicaciones de monitorización medioambiental de entornos sonoros. Posteriormente, Segura-Garcia et al. (2014) confirmaron que la misma plataforma Tmode Invest presenta serias limitaciones para mediciones acústicas y por tanto no da una solución operativa a monitorizaciones de calidad y larga duración.

En 2010 Hakala et al. (2010) presentaron una red de sensores de bajo coste para la medición de ruido en Ostrobothnia (Finlandia). Dicha red fue desplegada en diferentes entornos acústicos: un parque industrial, una zona residencial y un campus universitario. El sensor usado de CiNet, descrito en el apartado 2.5.3. realizaba las mediciones de nivel de presión equivalente con ponderación temporal modo fast (125 ms) y frecuencia de muestreo ampliada de 33 kHz. Cada uno de los nodos sensores mide el nivel de ruido  $L_{Aeq}$  en su ubicación y los datos son recogidos por un nodo maestro que se encarga de recopilar las mediciones en una base de datos (Kivela et al.,2011). En un trabajo posterior, la red de sensores se desplegó con éxito para realizar mediciones de larga duración en el patio de un colegio, mostrando una buena concordancia en comparación con un sonómetro de clase 2 (Kivelä & Hakala,2015). El despliegue de la red del sensor de Peckens et al. (2018), fue llevado a cabo por cuatro nodos como los comentados en el apartado 2.5., modelo Teensy 3.6 y un nodo central o sumidero basado en plataforma Raspberry Pi. Según los investigadores, el nodo acústico creado ofrece buenas prestaciones para el control de ruido, pero presentan limitaciones por un alto nivel ruido de fondo y dificultades de alimentación de energía, lo que producía cortes en las mediciones.

Las WASN también han sido utilizadas en ciudades para medición de ruido y creación de mapas sonoros. En la ciudad de Xiamen (China) (Wang et al., 2013) se realizó un proyecto para la monitorización de la ciudad con fines medioambientales. En dicho estudio, los dispositivos de medición incorporan medidores de ruido con comunicación con ZigBee y GPRS. La monitorización del ruido de tráfico se realizó en 35 carreteras. Los autores modelan el comportamiento de esos puntos de medición para simular el tráfico de otras 100 carreteras de la isla, a través de una red neuronal de retropropagación.

En otra ciudad, como es Pisa (Italia) (Vinci et al., 2017), se desarrolló el proyecto SENSEable Pisa. Dicho proyecto presenta un sistema de monitorización acústica urbana basado en un método de adquisición de datos, con el uso de sensores de ruido ubicados en casas privadas en el centro de Pisa, que proporcionan un buen modelo para el clima acústico actual de los centros de las ciudades mediterráneas. De esta forma, en este proyecto, la gestión del ruido en la ciudad se realizó con la participación de los ciudadanos. Además, este proyecto presenta un objetivo secundario que consiste en determinar el fuerte componente antropogénico del ruido, es decir, aquel generado por el ser humano, y que no suele reflejarse en los mapas estratégicos públicos. De forma similar en la ciudad de Monza (Italia) se ha llevado el proyecto LIFE MONZA, proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del programa LIFE. Silvaggio et al. (2019) desplegaron diez prototipos de sensores con el objetivo específico de comparar los niveles de ruido antes y después de intervenciones en el marco de las zonas urbanas de bajas emisiones. Los datos eran transmitidos usando tecnología GSM 2G/3G, y cuya energía fue suministrada a través de batería, paneles solares o la red eléctrica (Bartalucci et al., 2018; Silvaggio et al., 2019).

Otra ciudad que está monitorizando el ruido urbano en lugares exteriores, es la ciudad de Nueva York (Estados Unidos) (Bello et al., 2019), a través del proyecto Sound of New York City (SONYC), con más de 50 nodos acústicos de bajo coste, cuyas especificaciones técnicas se han presentado en la sección 2.5.3. Con dicho sensor se obtienen tanto los valores del nivel de presión sonora como la posibilidad de clasificar las fuentes de sonido a partir de la captura de la señal de audio. En las ciudades de Roma y Milán (Italia) se llevó a cabo un proyecto

europeo basado en WASN, llamado Dynamap (Alsina-Pagès et al., 2019). Su objetivo es ofrecer una imagen real del ruido generado por el tráfico rodado. Para ello se desarrolló un dispositivo y una plataforma de software específicos para elaborar la información obtenida de las diferentes estaciones de control del ruido distribuidas por la ciudad. Así mismo los datos recogidos son simulados mediante un método de predicción, explicado en el apartado 2.6.3, con el objetivo de calcular un mapa de ruido dinámico, capaz de detectar y representar en tiempo real el impacto acústico debido a infraestructuras viales (Bellucci et al., 2017).

Continuando con las aplicaciones en las ciudades, en la región de París, Francia, se desarrollaron diferentes versiones de un nodo acústico en el marco del proyecto Bruitparif (Mietlicki et al., 2015), centrado en el desarrollo de acciones de evaluación para mitigar el ruido y comunicar la información sobre el paisaje sonoro a los ciudadanos y las autoridades. En España, concretamente en la ciudad de Barcelona (Farres y Nova, 2018), se ha desplegado una red de 112 nodos compuestos 86 sensores de sonido y 26 sonómetros. Los sensores de sonido están ubicados en lugares fijos de la ciudad para realizar una monitorización a largo plazo, mientras que los sonómetros tienen ubicaciones temporales para realizar estudios específicos que requieren un análisis detallado de los datos. Los autores destacan que el mantenimiento de los nodos para las mediciones es más económico que los sonómetros, ya que son de clase I y necesitan un mantenimiento y calibración anual en el laboratorio. Este hecho implica la instalación y la desinstalación de los dispositivos de clase I cada año, mientras que el mantenimiento anual de los nodos se realiza de manera in situ.

También en España, concretamente en la ciudad de Málaga, Toutouh et al. (2017) presentan una innovadora monitorización del tráfico rodado, y el nivel de ruido generado por el mismo. Los sensores que forman la red son capaces de detectar el número de vehículos mediante la captura de las señales de radio frecuencia generadas por los dispositivos inteligentes que se encuentran en el interior de los vehículos, por ejemplo, los teléfonos móviles a partir de las tecnologías inalámbricas de Bluetooth y Wi-Fi. El número de dispositivos detectados por el sensor proporciona la densidad del tráfico rodado. El

experimento se realizó en una carretera de doble sentido de circulación, típicamente utilizada para entrar y salir del campus universitario de Málaga. Realizaron una medición corta de 20 minutos en un periodo con alta densidad de tráfico, obteniendo niveles de ruido no significativos para determinar el  $L_{eq}$  de la zona de estudio.

La mejora de las prestaciones de las plataformas hardware usadas para construir los nodos ha permitido el cálculo de índices acústicos que requieren mayor potencia de procesado, como es el caso de los parámetros psicoacústicos. En Segura-García et al. (2014), destacan las buenas prestaciones del nodo con el uso de una placa Raspberry Pi, descrito en la sección 2.5.3. y desarrollado en Noriega-Linares y Navarro Ruiz (2016). Esta solución se utilizó posteriormente en Segura-García et al. (2016) para recoger datos en una ciudad de España y probar una metodología geoestadística que permite la estimación de los niveles de ruido específicos y la caracterización de la variación espacio-temporal de la predicción de la contaminación acústica en una pequeña ciudad mediterránea, en este caso, Algemesí, Valencia, en España. Para este estudio se desplegó una red formada por 39 nodos, con nodos fijos y móviles. Posteriormente dicho dispositivo fue mejorado y usado en un trabajo que forma parte de esta tesis doctoral, donde se desplegó una red WASN en un entorno interior y otra en uno exterior (Segura-García et al., 2018) utilizando conectividad inalámbrica para transmitir datos, así como calcular parámetros psicoacústicos (Zwicker y Fastl, 1990) definidos en el apartado 2.4.3. Dichos experimentos, serán descritos con más detalle en el apartado 3.2.

En resumen, el uso de redes de sensores para la monitorización de diferentes entornos acústicos es un campo de investigación que está en auge durante los últimos años, debido a las mejoras importantes de prestaciones computacionales, bajada de coste y tamaño, así como la incorporación de tecnologías de comunicaciones. Además, esto se une a una mayor concienciación ciudadana sobre la contaminación acústica de las ciudades y las legislaciones con nuevos programas europeos que obligan a evaluar el estado acústico de la zona de estudio.



## 2.6 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL CAMPO SONORO

### 2.6.1 Reglamentación y normas internacionales

La Unión Europea, en el marco de la lucha contra las molestias sonoras, establece un enfoque común, cuyo fin es evitar, prevenir o reducir los efectos perjudiciales que surgen a la exposición al ruido ambiental. Dicho enfoque se basa en la determinación cartográfica de la exposición al ruido según métodos comunes y en la aplicación de planes de acción a nivel local.

#### 2.6.1.1 Normativa Europea

La primera medida para conseguir paliar las molestias sonoras fue la puesta en marcha de la directiva 2002/49/CE (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002). La directiva tiene por objeto sentar unas bases que permitan elaborar medidas comunitarias relativas a las fuentes de ruido. Para ello esta directiva realiza la definición de los indicadores de ruido comunes para todos los estados miembros, siendo esos indicadores el  $L_{den}$  y el  $L_n$ , definidos previamente en el apartado 2.4.2.2.3. Esta directiva busca también la definición de métodos comunes de evaluación y establecer el marco y los tiempos para la realización de mapas de ruido. Con dichos mapas se permite evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona sometida a distintas fuentes de ruido, así como realizar predicciones generales para dicha zona.

Las directivas 2002/49/CE (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002) y 2015/996 (Dir. 2015/996 de la Comisión, de 19 mayo de 2015), a través del END tiene como principios básicos (Alías y Alsina-Pagès, 2019):

- (i) Determinar la exposición al ruido.
- (ii) Proporcionar información pública actualizada relacionada con el ruido.
- (iii) Prevenir y reducir el ruido ambiental donde sea necesario.

Específicamente, esta directiva requiere que los estados miembros europeos publiquen el ruido mapas y planes de acción cada cinco años cuando se produce alguno de los siguientes casos:

- Población con más de 100.000 habitantes.
- Principales carreteras con un tráfico superior a 3 millones de vehículos/año.
- Principales líneas ferroviarias con más 30.000 trenes/año.
- Principales aeropuertos con una cifra superior a 50.000 movimientos/año.

Sin embargo, dicha directiva no ha incluido el ruido de ocio, ya que es considerado como ruido de vecindario, localizado en un tiempo y en un lugar específico de los entornos urbanos. Estas fuentes recreativas, aunque sean eventuales, tiene efectos en la contaminación acústica global (Prieto Gajardo et al., 2014).

La END de 2002 (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002) y su posterior versión (Dir.2017/0151 de la Comisión, de 30 de marzo de 2017) reconocen la importancia de la vigilancia y la cartografía de los niveles de presión acústica de las distintas infraestructuras de transporte con el fin de evaluar y controlar la exposición al ruido. En particular, el ruido del tráfico rodado, ya que es el principal problema de salud en materia acústica en Europa (Licitra et al., 2017) con más de 100 millones de personas expuestas a un nivel de  $L_{den}$  superior a 55 dB(A). Adicionalmente, la Directiva 2002/49/CE, además de exigir a los estados miembros la realización de Mapas Estratégicos de Ruido (MER) cada 5 años desde 2007, también exige la elaboración de planes de acción con el objetivo de lidiar con los problemas ligados a la contaminación acústica. En España, se establecieron cuatro fases de aplicación para la aprobación y entrega de los planes a la Comisión Europea. Los planes van encaminados a afrontar cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido si fuese necesaria con respecto a los lugares próximos a los grandes ejes viarios, grandes ejes ferroviarios, grandes aeropuertos y respecto a las aglomeraciones.

La primera fase acabó el 18 de julio del año 2008 y la segunda fase el 18 de julio de 2013. La tercera fue para el 28 de julio de 2018, mientras que la cuarta fase debe ser presentada antes del 31 de septiembre de 2024 (Ministerio para transición ecológica y el reto demográfico (2021).

Mientras que la elaboración de mapas de ruido, la primera fase en España tuvo lugar en 2007, con fecha límite el 30 de junio de ese año. Lo exigido fue la realización de Mapas Estratégicos de Ruidos (MER) para aglomeraciones con más de 250.000 habitantes, los grandes ejes viarios cuyo tráfico supere los 6 millones de vehículos al año, los grandes ejes ferroviarios con tráfico mayor a los 60.000 trenes al año y para todos los grandes aeropuertos existentes en el territorio. Estas condiciones se han de cumplir en la nueva elaboración de MER cada cinco años, siendo la segunda fase el 30 de junio de 2012 y la tercera fase para el 30 de junio de 2017. La cuarta fase para la elaboración de MER tiene fecha límite de 31 de septiembre de 2022 (Ministerio para transición ecológica y el reto demográfico. 2021).

#### *2.6.1.2 Mapas de Ruido*

La realización de un control efectivo de los niveles de contaminación acústica y la planificación adecuada de la lucha contra el ruido en una determinada ciudad o zona urbana se suele basar en la elaboración del correspondiente “mapa de ruido”. Genéricamente, se denomina mapa de ruido a un conjunto de medidas de niveles sonoros, distribuidas en el espacio y en el tiempo, de forma que la información que proporcionan sobre el ambiente acústico de un determinado entorno sea lo suficientemente completa como para poder orientar adecuadamente las acciones de control pertinentes. En particular, la realización del mapa acústico de una ciudad debe poner de manifiesto la localización de las zonas más ruidosas de la misma, para corregir dicha situación y también aquellos enclaves que son particularmente silenciosos para preservar dicha situación privilegiada.

Un MER, tal como lo define la Directiva 2002/49/EC (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002) es un “mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales para dicha zona”. Por tanto, un MER, a diferencia de un mapa de ruido, debe contener no solo información sobre los niveles de ruido evaluados para cada uno de los indicadores, sino que debe aportar datos sobre la población afectada.

Las clasificaciones de mapas acústicos pueden ser varias en función de los aspectos a estudiar. Atendiendo a su extensión territorial, se suelen clasificar en cuatro niveles: comarcal, municipal, urbanización o barrio y estudios de detalle. Por otro lado, se pueden clasificar en función del tipo o la cantidad de fuentes que actúan en dicho entorno. En esta segunda clasificación se pueden diferenciar tres tipos:

- Mapas de ruido tráfico: Son mapas que detallan los niveles sonoros producidos únicamente por el tráfico rodado, evitando que el resto de las fuentes afecten a la medición.
- Mapas de ruido urbano: son aquellos mapas que representan los niveles sonoros considerando todas las fuentes.
- Mapas para estudio de impacto ambiental: Son mapas que detallan los niveles sonoros producidos por una fuente o un grupo de fuentes de ruido.

La construcción de mapas de ruido se puede realizar con diferentes técnicas de recopilación de datos: mediante medición in situ, que será descrita en el apartado 2.6.2, con modelos predictivos, que son mostrados en el apartado 2.6.3, o bien, con sistemas híbridos. En el caso de las mediciones físicas reales, no es necesaria una información exhaustiva de la zona de estudio, mientras que para los modelos predictivos es necesaria una información muy detallada de la zona a simular.

A partir de aplicar las diferentes técnicas, se utilizan dos estrategias metodológicas distintas para la construcción de los mapas de ruidos: estática o dinámica. En ambas estrategias, se realiza un muestreo espacial (distintos puntos de medidas) y un muestreo temporal (ciclos de evolución del ruido), diferenciándose, sin embargo, en la forma de hacerlo (Mioduszewski et al., 2011).

La metodología estática prioriza la evolución temporal del ruido frente a la evolución espacial del mismo (Mioduszewski et al., 2011). Esta metodología conlleva la instalación de estaciones fijas de medición que evalúan de manera

ininterrumpida el ruido durante uno o más ciclos, recomendándose como mínimo un día completo y aconsejándose una semana. Esta metodología es propicia para el estudio de fuentes sonoras de las que se posee pocas referencias ya que proporciona información exhaustiva sobre el ruido medio, pero no es muy recomendable para estudios de grandes áreas, es decir, muchos puntos a evaluar, debido a los costes económicos y al desfase en tiempo entre la primera zona evaluada y la última.

La metodología dinámica conlleva una mayor elaboración y control del proceso de medida (Mioduszewski et al., 2011). Para la aplicación de dicha metodología, es necesario tener conocimiento de los ciclos de evolución del ruido, realizando un estudio previo de la emisión de las fuentes sonoras, en función de las características temporales de funcionamiento. Por tanto, se tiene que seleccionar los períodos de muestreo y los intervalos de tiempo entre medición para representen todo el tiempo en el que el ruido permanezca estable. Esta técnica de muestreo espacial y temporal simultáneo reduce la inversión en equipos de medida y permite evaluar extensiones considerables de superficies sin grandes desfases entre las medidas iniciales y finales.

En la elección de los períodos de medida existen varias tendencias:

- Determinar las horas de mayor tráfico y medir para obtener el valor medio de ese período.
- Medir durante el tiempo correspondiente al paso de, al menos, un cierto número de vehículos ligeros y/o pesados y considerar los resultados obtenidos como la energía sonora característica de la carretera.
- Medir durante largos períodos (más de 24 horas).

El tiempo de medición no tiene límite, pero tiene que ser suficientemente largo para tener datos fiables y conocer la estabilidad de ruido del área de estudio (Mioduszewski et al., 2011). En el caso del estudio de ruido por tráfico, el período de medida del ruido de tráfico depende del caudal de tráfico. A medida que el

caudal de tráfico disminuye o se hace más irregular, el tiempo de medición debe ser mayor, mientras que si el tráfico es intenso y estable el tiempo de medición puede ser menor.

Se suelen emplear los siguientes períodos de medición en función de las características del tráfico:

- Tráfico urbano diurno intenso: 5 a 10 minutos.
- Tráfico urbano diurno poco intenso: 10 a 15 minutos.
- Tráfico urbano nocturno: 20 a 30 minutos.
- Tráfico interurbano intenso: 10 a 20 minutos.
- Tráfico interurbano poco intenso: 20 a 30 minutos.

#### *2.6.1.3 Normativa Española*

En al ámbito estatal, se publicó la Ley 37/2003 de 17 de noviembre, de ruido (LR 37/2003, de 17 de noviembre). Esta ley regula la contaminación acústica con un alcance y un contenido más amplio que la Directiva 2002/49/CE (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002), ya que establece además los parámetros acústicos de ruido aéreo y vibraciones que no se pueden superar en el espacio interior de determinadas edificaciones. Así mismo, dota de mayor cohesión a la ordenación de la contaminación acústica, pues establece los instrumentos necesarios para la mejora de la calidad acústica del entorno. Un par de años después, en 2005, se aprueba el Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental (RDL 1513/2005, de 16 de diciembre).

Este Real Decreto completó la transposición de la Directiva 2002/49/CE (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002) y precisa los conceptos de ruido ambiental y sus efectos sobre la población, junto a una serie de medidas necesarias para la consecución de los objetivos previstos, tales como la elaboración de los mapas estratégicos de ruido y los planes de acción o las obligaciones de suministro de información.

Posteriormente en 2007, se publica 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 (RDL 1367/2007, de 19 de octubre). La finalidad de este Real Decreto 1367/2007 es abordar un tratamiento generalizado de la contaminación acústica, con especial atención a la actuación preventiva, la planificación acústica en la ordenación territorial y la incorporación de los conceptos de evaluación y gestión del ruido ambiental.

Adicionalmente a la normativa ya comentada, existe otra ley que trata también el ruido, en este caso en materia preventiva. Nos referimos a la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales (LRJSP 31/2005, de 8 de noviembre) que determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo, en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz. Según el artículo 6 de la ley 31/1995 (art.6 LRJSP 31/2005, de 8 de noviembre), las distintas normas reglamentarias deben ir concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas, estableciendo las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Entre dichas medidas, se encuentran las destinadas a garantizar la protección de los trabajadores contra los riesgos derivados de la exposición al ruido durante el trabajo.

Recientemente, en el ámbito de la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido, ha sido adoptada la Directiva 2003/10/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de febrero de 2003, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido) (Dir. 2003/10/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de febrero de 2003). Mediante el Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido (RDL 286/2006, de 10 de marzo), se transpone al derecho español la directiva europea 2003/10/CE (Dir. 2003/10/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de febrero de 2003). Este Real Decreto tiene por objeto, en el marco de la Ley

31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales (LRJSP 31/2005, de 8 de noviembre), establecer las disposiciones mínimas para la protección de los trabajadores contra los riesgos para su seguridad y su salud derivados o que puedan derivarse de la exposición al ruido, en particular los riesgos para la audición. Además, se regulan las disposiciones encaminadas a evitar o reducir la exposición, de manera que los riesgos derivados de la exposición a ruido se eliminen en su origen o se reduzcan al nivel más bajo posible.

Incluso añade la obligación empresarial de establecer y ejecutar un programa de medidas técnicas y organizativas destinadas a reducir la exposición al ruido, cuando se sobrepasen los valores superiores de exposición. La norma determina los valores límite de exposición y los valores de exposición que dan lugar a una acción. En el decreto, se especifican también las circunstancias y condiciones en que podrá utilizarse el nivel de exposición semanal en lugar del nivel de exposición diaria para evaluar los niveles de ruido a los que los trabajadores están expuestos. Adicionalmente, se establecen diversas especificaciones en materia de prevención. En primer lugar, la obligación de que el empresario efectúe una evaluación basada en la medición de los niveles de ruido, incluyendo aquellos aspectos necesarios para una correcta evaluación de los riesgos, además de los equipos de protección individual. Esta norma también especifica que los trabajadores no deberán estar expuestos en ningún caso a valores superiores al valor límite de exposición. Igualmente, se recogen dos de los derechos básicos en materia preventiva, como son la necesidad de formación y de información de los trabajadores, junto con el derecho a ser consultados y a participar en los aspectos relacionados con la prevención; se establecen disposiciones relativas a la vigilancia de la salud de los trabajadores en relación con los riesgos por exposición a ruido.

Para garantizar una correcta protección del trabajador, el Real Decreto 286/2006 (RDL 286/2006, de 10 de marzo), establece la evaluación de dos parámetros, Nivel diario equivalente ( $L_{Aeq,d}$ ) y Nivel de pico ( $L_{pico}$ ), que fueron definidos en los apartados 2.4.2.2.4 y 2.4.2.2.6, estableciendo en su artículo 5, los valores límite de exposición y aquellos valores de exposición que dan lugar a una



acción, referidos a los niveles de exposición diaria y a los niveles de pico. Estos valores límite se puede observar en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Valores Límites referidos a los Niveles de Exposición Diaria y a los Niveles de Pico de acuerdo al R.D. 286/2006*

	> 80 dB (A) y/o >135 dB (C) de $L_{pico}$	> 85 dB (A) y/o >137 dB (C) de $L_{pico}$	> 87 dB (A) y/o >140dB (C) de $L_{pico}$
Información y formación a los trabajadores y/o sus representantes	Si (1)	Si	Si
Evaluación de la exposición al ruido	Cada 2 años (2)	Anual	Anual
Protectores auditivos	Poner a disposición de toda el personal expuesto	Uso obligatorio para todo el personal expuesto(3)	Uso obligatorio para todo el personal expuesto

Los valores 80 dB(A), 85 dB(A), y 87 dB(A), corresponden a los niveles diarios equivalentes  $L_{Aeq,d}$  límites. Existen unas aclaraciones sobre los números de la tabla 5 a tener en cuenta:

1. Se informará y se formará a los trabajadores cuando  $L_{Aeq,d} > 80$  dBA y/o  $> 135$  dB (C) de  $L_{pico}$ .
2. Se evaluará la exposición al ruido cada tres años si  $L_{Aeq,d} > 80$  dB(A)
3. Se utilizarán protectores auditivos cuando  $L_{Aeq,d} > 85$  dB (A) y/o  $> 137$  dB (C) de  $L_{pico}$ .

Al aplicar los valores límite de exposición, se tendrá en cuenta la atenuación que procuran los protectores auditivos individuales utilizados por los trabajadores. Para los valores de exposición que dan lugar a una acción, no se tendrán en cuenta los efectos producidos por dichos protectores.

Finalmente, cabe indicar que en circunstancias debidamente justificadas y siempre que conste de forma explícita en la evaluación de riesgos, cuando la exposición diaria al ruido varíe considerablemente de una jornada laboral a otra, podrá utilizarse el nivel de exposición semanal al ruido en lugar del nivel de exposición diaria al ruido para evaluar los niveles de ruido a los que los trabajadores están expuestos, a condición de que el nivel de exposición semanal al ruido, obtenido mediante un control apropiado, no sea superior al valor límite de exposición de 87 dB(A), y se adopten medidas adecuadas para reducir al mínimo el riesgo asociado a dichas actividades.

Una vez repasadas las diferentes legislaciones que utilizaremos en las investigaciones de esta tesis, se presentan a continuación las metodologías más destacadas para la evaluación del campo sonoro: la medición in-situ, los métodos predictivos y los métodos más recientes para el paisaje o entorno sonoro.

### **2.6.2 Medición in situ**

Las mediciones “in situ” permiten la determinación de parámetros acústicos, definidos en el apartado 2.4, que, por sus características o inestabilidad, deben medirse de inmediato o porque es recomendable su medición en el propio campo de estudio. La evaluación in situ (Semidor 2006; Jeon et al., 2013; Axelsson et al., 2014; Aletta et al., 2019) proporciona una representación más realista del mundo exterior y se asocia a una alta validez ecológica. Sin embargo, los estudios realizados in situ adolecen de un escaso control experimental. En consecuencia, los resultados de estos estudios suelen representar únicamente el caso en cuestión y no contribuyen directamente a proporcionar un conocimiento general ni a desarrollar una teoría válida para el resto de entornos (Aletta et al., 2016). Estas pruebas se desarrollan a través de puntos de escucha fija o a partir de soundwalk (caminatas sonoras) (Aletta et al., 2019; Oberman et al., 2020).

### **2.6.3 Métodos predictivos**

Esta metodología se basa en el conocimiento de las teorías de emisión y propagación del sonido que permiten calcular los niveles sonoros mediante simulación de situaciones reales o predecibles, haciendo uso de modelos

matemáticos o físicos, para pronosticar los niveles de ruido según la fuente sonora que los genera (tráfico urbano, carreteras, zonas industriales, aeropuertos, etcétera.).

Estos métodos permiten la realización de predicciones de distintos escenarios en el tiempo y en condiciones cambiantes, tanto ambientales como urbanísticas de la zona de estudio, reduciendo los costes que supondría la realización de nuevas mediciones in situ. Además, permiten modelar las fuentes de ruido que se estiman que van a existir en dicho entorno en función de la distribución de tráfico, del diseño urbanístico, de la planificación territorial, etcétera.

Los métodos predictivos han revolucionado el análisis de los factores acústicos, gracias al uso de complejas ecuaciones y cálculos recursivos, los cuales solamente con el uso de un equipo informático de cálculo, se pueden realizar con relativa facilidad, en referencia a tiempo de cálculo y al uso de recursos requeridos. Esto es debido a que la acústica medioambiental se caracteriza por trabajar con métodos de análisis eminentemente empíricos, con toda una formulación que requiere muchos y repetitivos cálculos. Sin embargo, incluso cuando se utilice un método informatizado, es necesaria la realización de medidas “in situ” para su calibración o validación (WG-AEN, 2006).

Estos modelos matemáticos están implementados en software específicos para predecir el entorno sonoro. En el mercado existen varios software comerciales que permiten modelar situaciones acústicas en exteriores, como por ejemplo Mithra, SoundPlan, Cadna A, Predictor-Lima, IMMI, MSC, Noise3D etcétera. Cada uno de estos softwares utiliza sus propios modelos matemáticos y sus propios cálculos, ya que no hay un algoritmo consensuado de manera internacional. Algunos de estos modelos además se adaptan a las normativas vigentes tanto locales como internacionales, como es el caso por ejemplo de Cadna A que se basa en la normativa DIN 45687: 2006 (DIN 45687:2006-05) e ISO 17534, SoundPlan que contiene más de 50 normas de cálculo como por ejemplo ISO 9613, ISO 12354, etcétera o Noise3D cuyas soluciones son compiladas con ISO 9613, ISO 17534 y RLS-90 (modelo alemán).

Estas aplicaciones de software presentan como resultados unos mapas con niveles sonoros estimados. Los mapas simulados son históricamente el método preferido para elaborar los MER, que han sido presentados en el apartado 2.6.1. Estos mapas combinan cálculos de emisión de fuentes de sonido y su propagación que deben ser completados y actualizados con series temporales de medidas in situ de niveles sonoros en lugares estratégicos. Can et al. (2018) afirman que los métodos predictivos poseen una desventaja frente a las mediciones manual, y es que los mapas obtenidos son menos precisos al no ser construidos con valores obtenidos en condiciones reales.

En la literatura actual, existen numerosos métodos para realizar predicciones de ruido a partir de estudiar las fuentes sonoras y sus características, donde destacan los modelos matemáticos logarítmicos y los estadísticos de regresión lineal. Algunos ejemplos serían: ruido aéreo (Bobrovnitskii y Pavić, 2003; Moorhouse y Seiffert, 2006; Pavić, 2010; Pavić y Lindberg, 2017), ruido ferroviario (Givargis y Karimi, 2009), ruido generado por el tráfico rodado (Rahmani et al., 2011) y ruido urbano en general (Genaro et al., 2009).

Los modelos de predicción tienen en cuenta múltiples variables de entrada para estimar los niveles de las fuentes sonoras, por ejemplo, para ruido de tráfico rodado: número de vehículos, tipo de vehículo, velocidad de los vehículos, aceleración de los vehículos, el tipo de motor (gasolina o diésel), tipos de asfalto. Además requieren de datos geográficos y ambientales de la zona, tales como: viviendas en el entorno, pendiente de la calle, condiciones meteorológicas, etcétera. Con el fin de reducir este proceso, en muchas de estas aplicaciones se utilizan métodos simplificados que permiten obtener resultados válidos a partir de muy pocos parámetros que caractericen la fuente y el entorno (Bastián, 2015).

El objetivo de utilizar un modelo de ruido de tráfico es doble: por un lado, puede utilizarse en el diseño de nuevas infraestructuras viarias para evaluar el impacto acústico y evitar las acciones de mitigación posteriores a la construcción. Por otro lado, para evaluar el impacto acústico de la red de carreteras existente, de modo que la campaña de medición se puede minimizar y se puede utilizar sólo para la puesta a punto del modelo (Quartieri et al., 2009).

Los modelos de predicción del ruido del tráfico varían en la parametrización y, por tanto, pueden producir diferentes estimaciones de los niveles de ruido en función del entorno geográfico, a las fuentes de emisión y al campo de propagación (Khan et al., 2021). A continuación, se presentan algunos de los métodos normalizados en diferentes países.

El modelo escandinavo Nord2000, calcula el nivel de presión sonora en el punto de observación a partir del nivel de potencia sonora de la fuente corregido por la divergencia geométrica, el efecto suelo, el efecto de dispersión y la absorción atmosférica, según la norma ISO 9613-1 (Tarrero et al., 2008). El modelo se basa en la teoría geométrica de los rayos y la teoría de la difracción e incorpora los cálculos en bandas de tercios de octava.

El método inglés TRANEX (Traffic Noise Exposure Model) utiliza información sobre los flujos y velocidades del tráfico rodado, la geografía de las carreteras, la cobertura del suelo y las alturas de los edificios para estimar el nivel de presión sonora equivalente durante diferentes períodos de tiempo (Carey et al., 2016).

Por otra parte, bajo la Directiva sobre el ruido ambiental (2002/49/CE), aparece la metodología Common Noise Assessment Methods conocido como CNOSSOS-UE. Esta metodología describe el marco metodológico común para la planificación estratégica de mapas de ruido. Además es descrito el proceso y los actores clave involucrados en el desarrollo de Cnossos. Cnossos lleva en desarrollo desde 2009 y se basa en unificar los diferentes métodos existentes en la Unión Europea sobre predicción de ruido tanto para el tráfico rodado como para el tráfico aéreo y ferroviario.

Objetivo del CNOSSOS-EU es desarrollar e implementar un método consistente de evaluación, capaz de proporcionar resultados comparables de los Mapas Estratégicos de Ruido realizados por los Estados Miembros al cumplir con sus obligaciones de la END (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002). Este método presenta cierta sensibilidad a los datos de entrada, debido a que la incertidumbre asociada a cada dato de entrada se debe mantener en 2 dB(A),

considerando como tal el efecto exclusivo de cada uno de los datos de entrada en el resultado final del cálculo del Mapa Estratégico de ruido (valores  $L_{den}$  y  $L_n$ ). Cabe indicar que, el método CNOSSOS posee ciertas novedades, como, por ejemplo, que define 4 categorías de vehículos: vehículos de motor ligeros, vehículos pesados medianos, vehículos pesados y vehículos de dos ruedas.

Khan et al., 2021 hacen una comparativa de estos tres modelos analizando el ruido estimado ( $L_{Aeq}$ ) en 111 casos. El objetivo principal de este estudio era investigar el posible patrón de diferencias entre el rendimiento de los modelos para determinados tipos de configuraciones. Estos investigadores afirman que las discrepancias en el rendimiento pueden estar relacionadas con las diferencias en la parametrización. En la mayoría de los casos, tanto CNOSSOS como TRANEX reflejan niveles  $L_{Aeq}$ , con una diferencia de entre tres y cinco dB, respecto a Nord2000, en su versión 2006. Las diferencias en los niveles  $L_{Aeq}$  de CNOSSOS, en comparación con Nord2000, pueden estar relacionadas con varias deficiencias de los algoritmos actuales de CNOSSOS, por lo que estudio destaca la necesidad de mejorar el método CNOSSOS.

Otros métodos de simulación para ruido de tráfico rodada que podemos encontrar en la literatura son: el inglés CoRTN (Gulliver et al., 2015), el alemán RLS90 (Quartieri et al., 2009), el italiano C.N.R. (Cocchi et al., 1991), el francés NMPB (Besnard et al., 2009), o una mezcla de varios métodos como el Harmonoise (Czyzewski y Ejsmont, 2008). Todos ellos tienen en cuenta en mayor o menor medida las normas ISO 9613 (International Organization for Standardization, 1996) e ISO 12345 (International Organization for Standardization, 2021).

Las redes neurales artificiales (Artificial Neural Networks, ANN) (Livingstone, 2008; Walczak, 2018), están muy presentes para el cálculo de métodos predictivos y cuyo objetivo es crear o mejorar métodos predictivos del ruido de tráfico. Cammarata et al. (1993a) estudió la relación funcional entre el ruido del tráfico rodado y los parámetros físicos relacionados. Se aplicó una red de retropropagación para extraer la relación funcional entre determinados parámetros de la carretera (número de vehículos, altura media de los edificios,

anchura de la carretera) y el nivel de presión sonora. Las conclusiones que se desprende que la red neural da mejores predicciones comparándolo con las estimaciones realizadas con regresión lineal (Cammarata et al., 1993b). En la ciudad de Yavatmal (India) se realizó un estudio exhaustivo (Parbat y Nagarnaik, 2007, Parbat y Nagarnaik, 2008) sobre la evaluación y la modelización mediante ANN de los niveles de ruido debidos al flujo de tráfico de vehículos en condiciones de flujo de tráfico interrumpido. La técnica de modelización de la ANN proporciona menores errores de interpolación en comparación con otros métodos clásicos. La modelización con ANN se realizó con parámetros de entrada que incluían la composición del tráfico (autobuses/camiones, vehículos comerciales, bicicletas y otros), la anchura de la calzada y la distancia del receptor al pavimento.

En otro trabajo, Givargis y Karimi (2009) presentaron un estudio comparativo de modelos matemáticos logarítmicos, de estadísticos de regresión lineal y de redes neuronales capaces de predecir el nivel de ruido máximo ponderado A para el tren expreso Teherán-Karaj. El modelo de red neuronal se desarrolló a partir de las mediciones realizadas a diferentes distancias de la línea de ferrocarril y a una altura de 1,5 m. Se observó que ninguno de los modelos comparados supera a los demás como mejor ajuste de forma significativa. Por otro lado, Genaro et al. (2009) diseñaron e implementaron una ANN capaz de predecir el nivel de ruido urbano, basada en un conjunto de 25 características ambientales. Los resultados obtenidos por la red se compararon con los de los modelos de predicción del ruido urbano existentes, basados en modelos clásicos. Las pruebas confirmaron que los resultados producidos por la red eran mejores para todos los registros de datos.

Guarnaccia et al. (2017) prestan especial atención al ruido del tráfico rodado, y presentan un modelo de predicción híbrido. El modelo se basa en la mezcla de dos enfoques diferentes: el Análisis de Series Temporales (TSA, Time Series Analysis) y ANN. El modelo TSA se basa en la evaluación de la tendencia y la estacionalidad de los datos, mientras que el modelo ANN se basa en la capacidad de la red para aprender el comportamiento de los datos. Este enfoque mixto consistía en la evaluación inicial de los niveles de ruido mediante TSA y, un

cálculo posterior de las diferencias entre las estimaciones de la TSA y los datos observados. Finalmente, se hace uso de ANN sobre esas diferencias.

Otro modelo predictivo para obtener el ruido generado por el tráfico rodado fue desarrollado por Rahmani et al. (2011). En dicha investigación se han obtenido dos modelos matemáticos mediante el uso de algoritmos genéticos que pueden utilizarse para calcular el nivel equivalente y predecir la contaminación acústica del tráfico rodado en la ciudad de Mashhad (Irán). Los parámetros seleccionados para realizar el modelo fueron: el volumen de tráfico, la composición de vehículos ligeros y pesados y la velocidad media. Se concluye que los modelos son precisos con un margen de  $\pm 1\%$  respecto al tráfico medido y pueden utilizarse para la predicción del ruido de las carreteras planas.

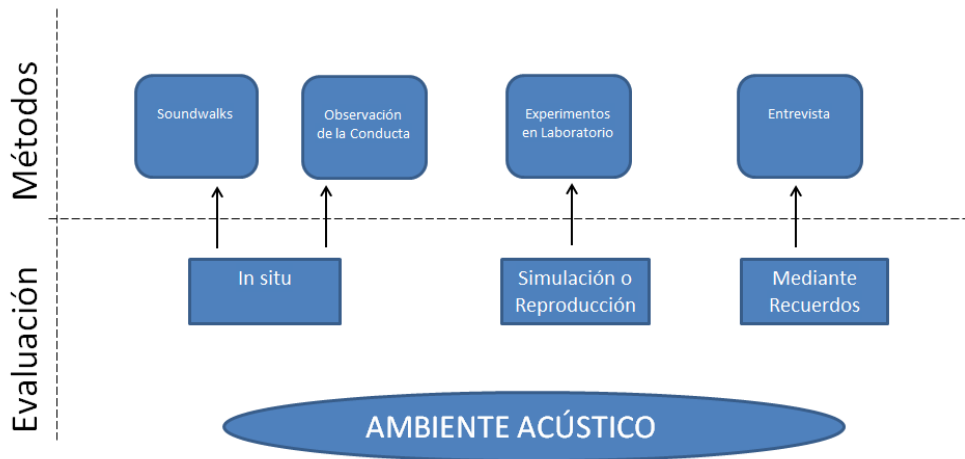
#### **2.6.4 Métodos para el ambiente o entorno sonoro**

En los últimos tiempos, y con el objetivo de realizar un estudio más completo de los entornos que tengan en cuenta las percepciones y otra serie de características del receptor, se han desarrollado metodologías para evaluar el ambiente o entorno sonoro, del inglés soundscape. Se puede realizar una clasificación de los diferentes modos de evaluación y sus correspondientes métodos, tal y como se muestra en la figura 14.



**Figura 14**

*Esquema de Modelos de Evaluación y sus Métodos para la Evaluación del Paisaje o Entorno Sonoro*



*Nota.* Adaptada de Schematic illustration of the relationships between data collection methods and tools used in soundscape studies. (Aletta et al., 2016)

La percepción obtenida del ambiente acústico viene caracterizada por manera de evaluarlo, dando lugar a diferentes formas (Aletta et al., 2016):

- Evaluación In situ.
- Evaluación mediante la Reproducción o Simulación de dicho ambiente.
- Evaluación mediante Recuerdos (Recalled in memory) del mismo.

La evaluación in situ ha sido descrita en el apartado 2.6.2. En esta evaluación las opiniones de los evaluados vienen acompañadas de estímulos visuales, táctiles y olfativos, lo cual hace una contextualización total al entorno.

Otra opción es realizar las evaluaciones mediante simulaciones o reproducciones, las cuales son llevadas a cabo en laboratorios interiores (Cain et al., 2013), donde se controlan los estímulos presentados del entorno evaluado. Esto permite investigar la relación entre causa y efecto, lo que puede contribuir al

desarrollo de la teoría. Debido a la limitada validez ecológica, los resultados obtenidos en un laboratorio deben ser validados in situ.

Finalmente, el modo de evaluación mediante recuerdos (Ge y Hokao, 2003) es la manera más indirecta de experimentar un entorno acústico, dado que la percepción que se tiene del entorno va a depender de la capacidad del individuo para recordar y rememorar situaciones pasadas. Por tanto, es importante que los individuos estén familiarizados con el entorno investigado, ya que en la mayoría de los casos se usa para evaluar la evolución y cambios que ha sufrido dicho entorno con el paso del tiempo.

A continuación se describen los métodos más importantes para la evaluación de los ambientes sonoros:

- Caminatas sonoras, del inglés soundwalks.
- Observación de la conducta.
- Experimentos en laboratorio.
- Entrevistas.

Los dos primeros métodos se identifican con experimentos in situ, los experimentos en laboratorio con la simulación y las entrevistas con el recuerdo, tal y como se muestra en la figura 14.

El primero de estos métodos, soundwalks, se basa en una metodología de escucha consciente del entorno sonoro y ayuda a revelar la estructura multisensorial de nuestra relación con el mundo (Engel et al., 2018). Se realizan in situ y consiste en un paseo sonoro, donde se pide a los participantes que caminen en silencio y escuchen el entorno acústico. Al final del paseo o en determinados lugares del paseo, se les indica que rellenen un cuestionario o participen en una entrevista sobre sus impresiones de la zona de estudio. Normalmente, los paseos sonoros se llevan a cabo con un grupo máximo de 5 personas o de manera individual, siguiendo una ruta de paseo predefinida sin que entre ellos puedan comentar sus evaluaciones o experiencias. En la medida de lo posible, es

interesante que los grupos evalúen las distintas zonas en distinto orden y utilizando un protocolo estructurado que permita la evaluación sonora y la recogida de datos contextuales (Jeon et al., 2013). Es habitual que en estos paseos se realicen grabaciones de audio para un posterior análisis en laboratorio, de manera que se evalúa y valida el paisaje sonoro analizado. Además de dichas grabaciones, también se suelen realizar mediciones acústicas que sirven para caracterizar el ambiente acústico (Aletta et al., 2016).

Otras de las metodologías usadas para la evaluación in situ se basa en la observación a través de un lenguaje no verbal u observación de la conducta, del inglés behavioural observations. Como ventaja resaltar que los participantes pueden no ser conscientes del estudio y de esta forma no puedan influir en los resultados. Por el contrario, es difícil controlar las condiciones experimentales para muchas variables a la misma vez, siendo aconsejable analizar una variable al mismo tiempo.

En la literatura actual son relativamente pocos los estudios que han investigado las relaciones entre el paisaje terrestre y los comportamientos humanos con el fin de mejorar los entornos ambientales. Lavia et al. (2012) y Witchet et al. (2013) alteraron en sus estudios los entornos acústicos exteriores introduciendo música. Para ello analizaron el comportamiento previo a la alteración del entorno, es decir, sin música y el comportamiento posterior con música. En ambos estudios no se presentaron resultados concluyentes.

Seguidamente, se tiene las pruebas en laboratorio como metodología, donde se presentan al oyente entornos sonoros simulados. Estas permiten al evaluador analizar los estímulos de interés, teniendo así un mayor control de las variables a las que está expuesto el evaluado. Según Otto (1997) y Otto et al. (2001), para las evaluaciones de calidad sonora es necesario un número determinado de sujetos evaluados. Dicho número, depende del grado de entrenamiento auditivo que posean los sujetos que realizan las pruebas, su relación con el objeto de estudio y la complejidad de la prueba. Si las pruebas son complejas, se recomienda usar de 5 a 10 sujetos con alto nivel de entrenamiento y experiencia. En el caso de que

requieran una alta relación con el estudio se recomiendan entre 25 y 75 evaluadores, mientras que, si se requiere una baja relación entre 75 y 100 sujetos.

Las simulaciones en los laboratorios habitualmente se realizan por medio de grabaciones binaurales, donde los métodos de reproducción (por ejemplo: altavoces, auriculares, etc.) requieren de una fidelidad suficiente para interpretar adecuadamente las características frecuenciales y temporales en el sistema de reproducción de sonido espacial. Por lo tanto, estas simulaciones van acompañadas de nuevas tecnologías de reproducción de audio espacial, como Ambisonic (Sudarsono et al., 2017), Auralización (Vorländer y Summers, 2008; Schröder y Vorländer, 2011; Pörschmann et al., 2017) o realidad virtual inmersiva donde interviene también el sentido de la vista (Maffei et al., 2016; Llorca, 2018; Hong et al., 2019)

La última metodología utilizada es la entrevista. Este método utilizado con frecuencia para explorar e identificar aspectos relevantes del paisaje sonoro (Aletta et al., 2016), además de poder proporcionar información en profundidad sobre la experiencia humana y la comprensión de los participantes del entorno acústico (Marry y Defrance, 2013). Sin embargo, presentan una gran limitación debido a que son interpretaciones individuales del investigador y, al no ser experimentales y numéricos, no pueden utilizarse para deducir causas y efectos (Aletta et al., 2016) y por tanto no es un método para ser generalizado.

Una vez finalizado el repaso a los diferentes métodos de evaluación del campo sonoro, cabe concluir que los modelos de gestión acústica ambiental no deben reducirse únicamente al control de los niveles de ruido existentes en los entornos, sino que deben tener en cuenta si son molestos o no. Ciertos estudios (Bento Coelho, 2010; Liu et al., 2014) han demostrado que altos niveles sonoros, superando incluso los niveles de ruido permitidos, no son considerados como molestos por el receptor, mientras que bajos niveles sonoros no son siempre confortables. Por lo tanto, la reducción de los niveles sonoros de ciertas fuentes de sonido, puede no ser la clave para la creación de un entorno acústico de alta calidad, porque la naturaleza es igualmente importante (Rådsten-Ekman et al., 2013; Axelsson, et al., 2014). Sería necesario para el futuro, que las normas y

legislaciones, detalladas en el apartado 2.6.1, no se centren únicamente en aspectos fisiológicos del ruido, sino que han de tener en cuenta otros aspectos tales como culturales, sociológicos y perceptivos.



**III - IMPLANTACIÓN Y  
VALIDACIÓN DEL  
DISPOSITIVO ACÚSTICO  
EN REDES DE SENSORES  
PARA LA EVALUACIÓN  
DE LA MOLESTIA DEL  
RUIDO**

### **III - IMPLANTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISPOSITIVO ACÚSTICO EN REDES DE SENSORES PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DEL RUIDO.**

Los dispositivos acústicos suelen utilizarse para la monitorización de niveles de presión sonora, es decir, obtener decibelios. Sin embargo, tal y como se ha presentado en el apartado 2.4., este parámetro no es suficiente para evaluar la molestia. En general, se introduce el uso de curvas isofónicas y ponderaciones para obtener una respuesta en frecuencia lo más próxima posible al humano. Pero se hace necesario contemplar otros aspectos psicoacústicos para una mejor evaluación del ambiente acústico.

Para ello, en esta tesis se ha evaluado la utilidad de una red inalámbrica de sensores acústicos para analizar el entorno sonoro y la molestia del ruido en diferentes ambientes urbanos. En este apartado se describen los materiales y la metodología general seguida en los experimentos realizados en los diferentes trabajos de esta tesis.

Este capítulo está organizado en las siguientes secciones: en el apartado 3.1. materiales y metodología se analiza y se presenta el dispositivo acústico utilizado en esta tesis, presentando sus componentes principales y funcionamiento, así como las recomendaciones y metodología empleada para el despliegue de un WASN. Seguidamente, en el apartado 3.2. se presentan los casos de uso de un WASN para la evaluación de las molestias siendo el 3.2.1. evaluación sonora en el interior de un vehículo durante un desplazamiento in-itinere, 3.2.2. evaluación sonora exterior de una urbanización y para finalizar 3.2.3. la evaluación sonora en un campus universitario.



### 3.1 MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 3.1.1 Nodo acústico

Tal y como se ha comentado en el apartado 2.5.3., el nodo acústico utilizado y mejorado en esta tesis doctoral, se puede englobar dentro del paradigma IoT, y está destinado a la obtención de parámetros acústicos y psicoacústicos. Como se quiere desplegar una red lo suficientemente amplia de sensores, éstos deben tener un coste ajustado, pero manteniendo la calidad, para así obtener una adecuada fiabilidad y precisión de los resultados.

El dispositivo utilizado en esta tesis está basado en la plataforma hardware Raspberry Pi, y será descrito en este apartado. El dispositivo piloto fue diseñado y testado por el grupo de telecomunicaciones avanzadas de la Universidad Católica de Murcia (Noriega-Linares y Navarro Ruiz, 2016; Noriega-Linares et al., 2017). Para los experimentos de esta tesis se le ha añadido la capacidad de desplegarse en una red de comunicación inalámbrica. De este modo, cada nodo es capaz de transmitir datos a una plataforma software implementada con su base de datos, que se encontrará desplegada en la nube o en infraestructura on-premise, para su almacenamiento y posterior análisis.

Para el diseño de este dispositivo se propone una serie de requisitos fundamentales para realizar las mediciones de forma fiable:

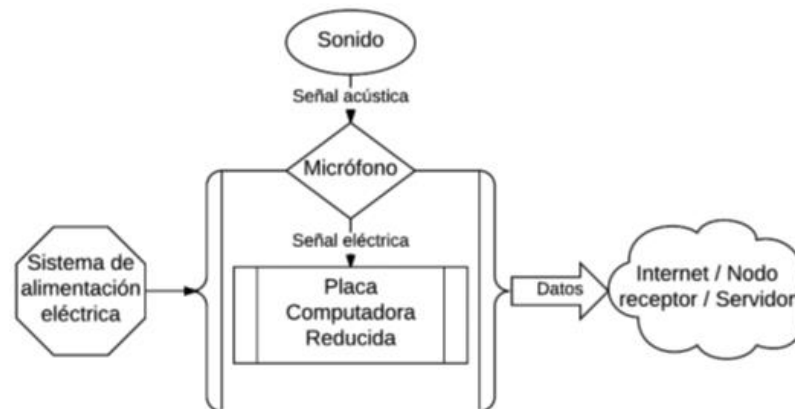
- Dispositivo de emisión sonora mínima.
- Dispositivo con procesador de calentamiento mínimo.
- Dispositivo de fácil instalación.
- El sistema de medición debe permitir la calibración.
- El dispositivo tiene que ser fiable para medidas de larga duración.
- El dispositivo debe permitir diferentes alternativas de conectividad, ya sea Ethernet, WiFi o telefonía móvil (3G,4G...), entre otras.
- Sistema capaz de analizar el sonido ambiente y adquirir parámetros acústicos y psicoacústicos.
- Implementar ponderaciones temporales y frecuenciales, principalmente ponderación A.

- Cada uno de los elementos que forman el dispositivo deben ser del menor consumo eléctrico y coste.
- El dispositivo debe ser capaz de proporcionar información en un formato de almacenamiento válido para su posterior análisis.
- El dispositivo debe poder conectarse a internet para recibir actualizaciones de software y para compartir los resultados de los datos analizados.

En general, un nodo acústico presenta un diagrama de bloques como el de la figura 15.

**Figura 15**

*Diagrama de Bloques Representando las Principales Partes de un Dispositivo Acústico para su Uso en Redes de Sensores.*



El equipo utilizado en esta tesis se compone principalmente de cuatro componentes: hardware, sistema de captación de sonido, software y módulo de comunicaciones, que serán detallados en las secciones 3.1.1.1, 3.1.1.2, 3.1.1.3 y 3.1.1.4 respectivamente. A continuación, en la figura 16 se presenta una imagen

del interior del primer prototipo diseñado (Noriega-Linares, 2017) para actuar de manera autónoma e independiente de una red:

**Figura 16**

*Detalle del Interior del Dispositivo Prototipo 1*



En la figura 16 se pueden observar sus componentes principales como la placa hardware Raspberry Pi, la cámara Eye de Sony PlayStation, del cual se utiliza el array de micrófonos que contiene, junto con una batería externa y la pantalla LCD que son descritos en el apartado 3.1.1.5. La figura 17 corresponde con el aspecto exterior del dispositivo acústico, pudiendo observarse en la parte superior de la caja estanca que es detallada en la sección 3.1.1.5.

**Figura 17***Detalle del Exterior del Dispositivo Prototipo 1***3.1.1.1 Hardware**

El principal componente del dispositivo de estudio es una placa computadora con un tamaño muy reducido frente a ordenadores convencionales y con un coste notablemente inferior. Estas plataformas de hardware son ordenadores construidos sobre una sola placa de circuitos, en la cual se integran: uno o varios microprocesadores, la memoria, los puertos de entrada y salida o

cualquier otra funcionalidad, como las antenas de comunicación, módulos de comunicación entre otros.

Para este trabajo, la plataforma hardware utilizada corresponde con una Raspberry Pi 3 Modelo B (Welcome to Python.org, s.f.), que permite la posibilidad de trabajar bajo un sistema operativo libre y gratuito. El núcleo de procesamiento de Raspberry Pi 3 modelo B, posee las características detalladas en la Tabla 6:

**Tabla 6**

*Especificaciones Técnicas de Raspberry Pi 3 Modelo B*

Componente	Características Técnicas
CPU	4X ARM Cortex-A 53 1,2 GHz
GPU	Broadcom VideoCore IV
Soc (System on a Chip)	Broadcom BCM 2837
RAM	1GB LPDDR2 (900 MHz)
Conectividad	10/100 Ethernet, 2.4GHz 802.11n wireless
Bluetooth	Bluetooth 4.1 Clásico, Bluetooth Low Energy
Puerto de salida video	HDMI (rev 1.3 & 1.4 Composite RCA (PAL and NTSC)
Puerto de salida audio	Jack analógico de 3.5mm jack, HDMI USB 4 x USB 2.0 Connector
Almacenamiento	Push/pull Micro SDIO
GPIO	40 pines

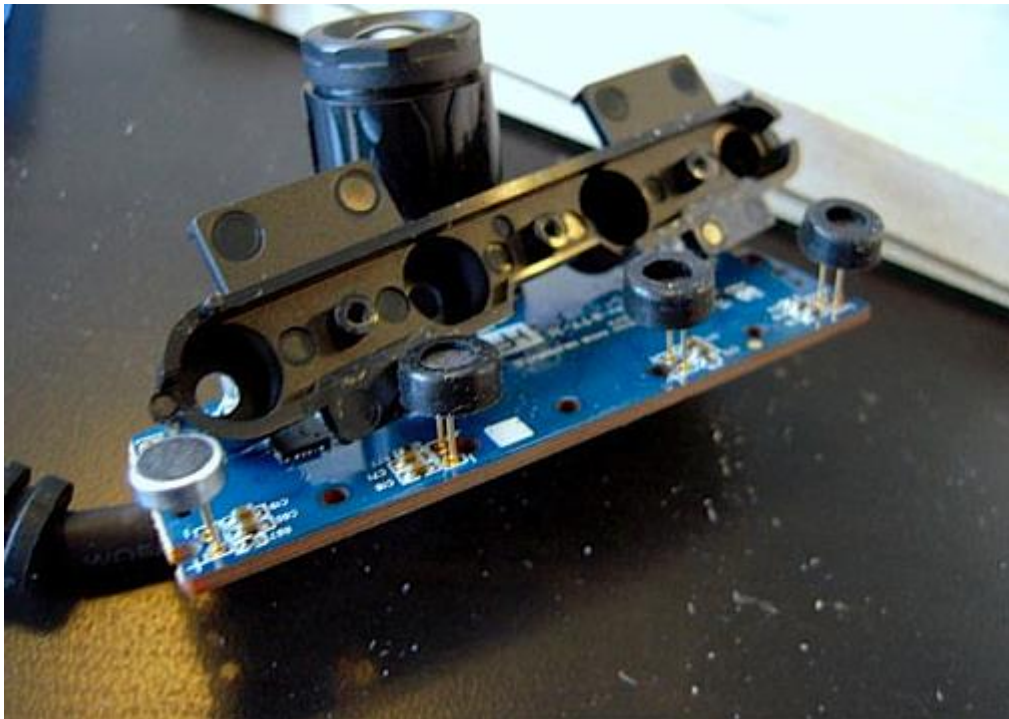
Tal y como muestra la tabla 6, las especificaciones técnicas de esta plataforma presentan unas buenas características para realizar tareas complejas. En este modelo de Raspberry Pi es posible la instalación de sistemas operativos que permiten incorporar lenguajes de programación para el desarrollo de código software.

### 3.1.1.2 Sistema de captación de sonido

La adquisición de sonido, necesaria para llevar a cabo la investigación de esta tesis, está basada en la cámara de PS3 Eye de Sony PlayStation formada por un array de cuatro micrófonos. Los micrófonos exteriores se encuentran distanciados aproximadamente 62 milímetros siendo los dos interiores invertidos sus canales de sonido, es decir, con un desfase de 180°. Los micrófonos están distribuidos en las posiciones -3,-1, 1 y 3 cm respecto del centro, donde se sitúa la cámara. Tal y como se muestra en la figura 18

#### Figura 18

*Detalle del Array de Micrófonos de la PSEye 3.*



Los dos micrófonos exteriores serán usados en esta tesis y mientras que los dos interiores están anulados. La calibración de los micrófonos fue llevada a cabo por el Grupo GRITA, a través de las investigaciones de Noriega-Linares (2017).

Los conversores analógico-digital de la PS3 Eye funcionan con cada canal procesando muestras de 16 bits a una frecuencia de muestreo de 48 kHz, obteniendo una relación señal-ruido de 90 dB, suficiente para la aplicación de medición de niveles de ruido en ambientes sin ruidos extremos. A cada uno de estos micrófonos les llegará el sonido en instantes diferentes pudiendo estimar la posición y dirección de la fuente sonora, al existir un desfase entre las señales captadas por los micrófonos. Por lo tanto, este sistema de dos micrófonos permite el procesamiento de la señal para la síntesis de audio binaural, tal y como se describe en el apartado 3.1.1.3. y así poder calcular los parámetros psicoacústicos binaurales.

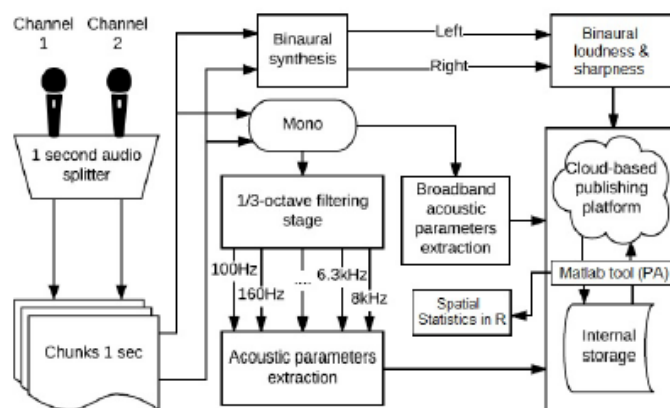
Aunque este dispositivo dispone de cámara incorporada, la captación de imágenes no es objeto de este proyecto. Este modelo PS3 Eye posee un usb de alta velocidad para la transferencia de datos que se utiliza para conectarla a la Raspberry Pi. Indicar que el consumo energético es de aproximadamente 50mAh.

### 3.1.1.3 Software

El lenguaje de programación utilizado para la creación del código software usado en este proyecto fue Python (Python, s.f.). Los procesos que se realizan en el algoritmo implementado se pueden observar en la figura 19.

**Figura 19**

*Diagrama de Bloques del Funcionamiento del Software*



*Nota.* Adaptación Diagram of the stages of the algorithm: acquisition, loudness and sharpness evaluation, binaural processing, sound pressure level calculation, and publishing, storing and processing (PA computation and spatial statistic processing) of the results (Segura et al., 2018).

Cada uno de esos procesos fueron programados de manera independiente en forma de librería, para después crear un código principal que ejecuta cada una de las tareas de manera secuencial y repetitiva. En esta tesis se desarrolló la parte correspondiente a la transmisión inalámbrica, aumentando las prestaciones de la versión inicial. En primer lugar, la captura del sonido es realizada por parte del sistema de adquisición detallado en el apartado 3.1.1.2. Después, la señal de audio es enviada a la Raspberry Pi para su almacenamiento en dos archivos, uno por cada canal de micrófono, y posterior procesado para el cálculo de los parámetros acústicos. A continuación, los datos obtenidos son almacenados localmente y formateados de tal manera que puedan ser enviados a la base de datos remota. Finalmente, se establece la comunicación con internet para remitir los datos a la plataforma software.

El código implementado permite la configuración de diferentes opciones de la medición. En concreto, se puede seleccionar la frecuencia de muestreo de sonido, la duración de la muestra de audio a capturar y el periodo de tiempo con la que se realizan esas capturas. El tiempo entre cada captura debe ser lo suficientemente grande como para permitir el procesado completo de la señal para la obtención y transmisión de los valores de los parámetros (Noriega-Linares et al., 2017).

Centrándonos en las fases de procesado y cálculo de parámetros acústicos, este dispositivo es capaz de obtener valores como el  $L_{eqA,T}$ , junto con el cálculo de los parámetros acústicos  $L_{eq,T}$  y percentiles  $L_{eq10}$  y  $L_{eq90}$  (Noriega-Linares et al., 2017). Adicionalmente, este dispositivo está diseñado para el cálculo de valores psicoacústicos como loudness y sharpness monaural (uno por cada canal) y sus respectivos valores binaurales. Para el análisis de los parámetros binaurales, se implementó en trabajos previos una etapa de procesado para la síntesis de la señal binaural a partir de las señales procedentes del array de micrófonos. En



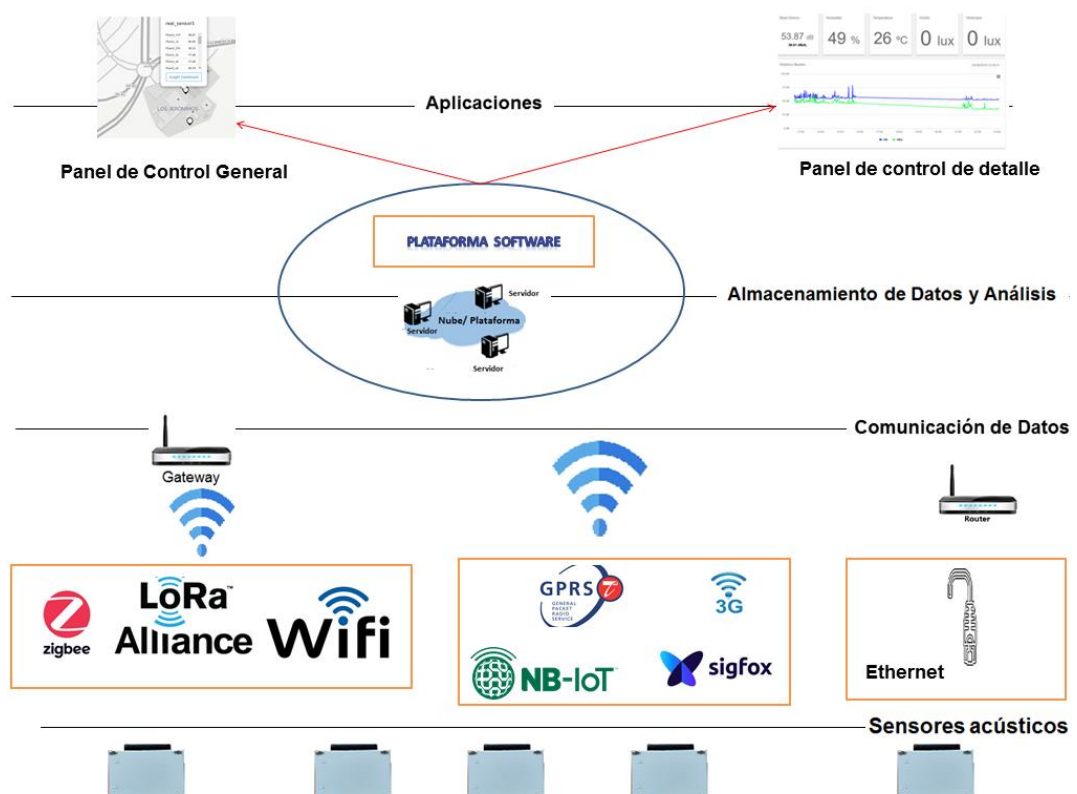
primer lugar, para esta síntesis se realiza una estimación de la dirección de llegada de las diferentes fuentes sonoras mediante un algoritmo DOA (Direction of Arrival) (Cobos et al., 2014). Seguidamente se aplica un proceso de filtrado en función del ángulo de llegada de las ondas mediante la función de transferencia relacionada con la cabeza humana, conocida como HRTF (Head Related Transfer Function) (Noriega-Linares et al., 2017).

### 3.1.1.4 Módulo de comunicaciones

Uno de los objetivos de esta tesis es dotar de conectividad al nodo acústico para que pudiera formar parte de una red de sensores. La transmisión de datos constante hace necesario disponer de un ancho de banda de red. Para ello, al nodo se le puede incorporar un módulo de comunicaciones para realizar su conectividad a la red tanto con las tecnologías de propósito general, como son Ethernet, WiFi (IEEE 802.11), o celular como GPRS o 3G, o con tecnologías IoT como ZigBee (IEEE 802.15.4), LoRa, NB-IoT o SigFox, entre otras.

Figura 20

### Arquitectura de la Red de Sensores



La figura 20 muestra la arquitectura construida para el servicio IoT de la red de sensores acústicos diseñada. Esta arquitectura se divide en 4 capas, correspondiendo la primera capa a los sensores o nodos acústicos que forman la red, la segunda capa a las comunicaciones formada por diferentes tipos de conectividad, una tercera capa donde nos encontramos con el hardware y software de la plataforma del servicio y una última capa software de aplicaciones de gestión y control del servicio.

Según se observa en la figura 20, las conectividades como Ethernet, LoRa, ZigBee y WiFi requieren de una pasarela o gateway para que los datos lleguen al servidor remoto. Sin embargo, en otras tecnologías como 3G, NB- IoT, GPRS y SigFox, el nodo acústico transmite directamente con la red de comunicaciones sin necesidad de gateway. Esta pasarela de acceso o gateway puede ser un equipo independiente u otro nodo acústico de la red con características avanzadas, también conocido como nodos de borde o edge node. Estos nodos pueden funcionar como un preprocesador para recoger información, almacenar y calcular los parámetros requeridos de otros nodos, y además dirigir el conjunto de datos a la plataforma de software una vez cada cierto tiempo, según las necesidades.

Los datos recogidos por los nodos acústicos se transmiten a través de protocolos como HTTP, CoAP y MQTT (Herrero, 2020). La cantidad de datos creados requiere técnicas eficientes para su análisis tanto en el dispositivo como en el servidor. Gracias a la plataforma IoT de software desplegada en la nube, se muestra una captura de pantalla en la capa superior de la figura 20, los datos pueden ser consultados y analizados accediendo a varios cuadros de mando de aplicaciones en la web. Esta plataforma proporciona opciones de gestión y control del dispositivo permitiendo las conexiones remotas para su mantenimiento, gracias al protocolo SSH o las actualizaciones de firmware mediante protocolo OTA.

En el caso de los trabajos realizados en esta tesis, la conexión de los equipos a la red fue realizada principalmente con Ethernet o WiFi. Mediante el uso de una conexión de red local por ethernet se consigue una transmisión más estable, pero como inconveniente hay que desplegar una infraestructura que no siempre es

posible realizar. En este caso se utiliza WiFi como red secundaria que se activará como respaldo cuando no está disponible la red cableada. En aquellas zonas donde no se dispone de esa infraestructura, la conectividad será realizada a través de WiFi, lo que aporta la ventaja de un menor coste de infraestructura y facilidad en el despliegue e instalación de la WASN.

#### 3.1.1.5 Otros componentes

El nodo acústico ha sido provisto de otros componentes adicionales y optativos en algunas ocasiones, los cuales proporcionan funcionalidades añadidas. La pantalla LCD táctil de 3,2 pulgadas de la marca Adafruit, montada en la Raspberry Pi permite la visualización del sistema operativo y de los resultados de las medidas, facilitando tareas como la instalación, el mantenimiento y las actualizaciones de software. Para ello, también existe la posibilidad de incorporar un teclado portátil con conectividad Bluetooth.

A lo largo del desarrollo de los trabajos de esta tesis, el dispositivo ha sido suministrado de energía eléctrica de dos maneras diferentes. La primera de ellas, utilizada en los casos de uso in itinere (Montoya-Belmonte et al., 2017) y en la zona residencial (Segura-Garcia et al., 2018) de los apartados 3.2.1 y 3.2.2. respectivamente, fue una fuente de alimentación portátil de 20.000mAh, que, debido al bajo consumo de los componentes del nodo acústico, permite su utilización autónoma durante más de 24 horas ininterrumpidas.

Cuando se desea realizar una campaña de medición de larga duración, como la presentada en el apartado 3.2.3. en un campus universitario (Montoya-Belmonte y Navarro,2020), fue necesario la alimentación del nodo mediante conexión eléctrica a la red. Para evitar picos y cortes de energía de corta duración, el dispositivo ha sido equipado con un pequeño sistema de alimentación ininterrumpida que permite mantenerlo en funcionamiento hasta el restablecimiento del suministro eléctrico o realizar un apagado seguro del mismo si se supera el tiempo de corte de 10 minutos.

La plataforma hardware Raspberry Pi permite la instalación de otros sensores a través de sus entradas y salidas digitales. Estos sensores pueden ser de

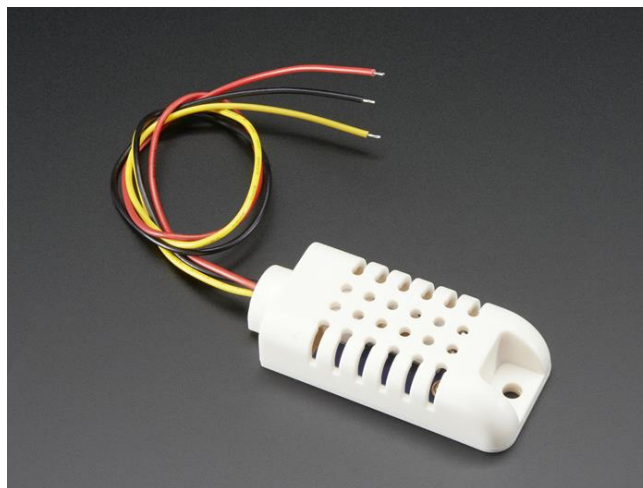
diferente naturaleza, aunque en nuestro caso han sido destinados para obtener parámetros ambientales.

Para la medición de la temperatura y la humedad se ha incorporado el sensor digital DHT 22, también conocido como AM2302, de bajo costo que utiliza una sonda de humedad capacitiva y un termistor para medir la temperatura del aire circundante. Sus características principales son las siguientes:

- Alimentación: 3 a 5V.
- Consumo: 2.5mA max durante la adquisición.
- Rango humedad: 0-100% ( $\pm 2-5\%$ ).
- Rango temperatura: -40 a 80°C ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ).
- Frecuencia de muestreo máxima: 0,5 Hz, es decir 1 vez cada 2 segundos.
- Dimensiones: 27x59x13.5mm.
- 3 cables de 23cm.

### Figura 21

*Sensor de Temperatura y Humedad DHT22*



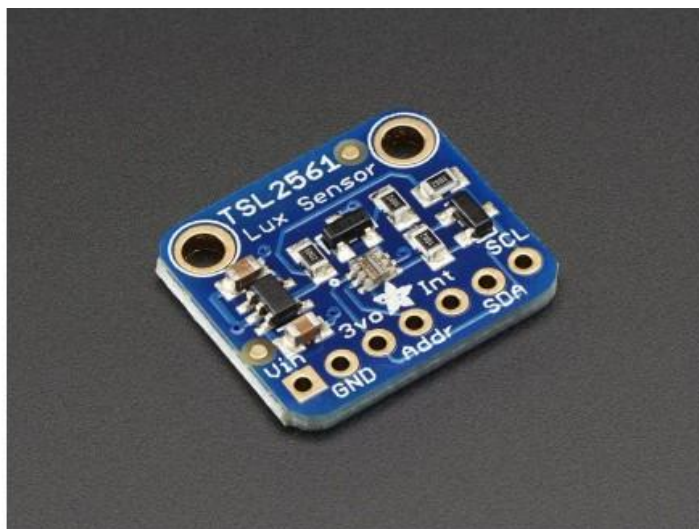
Este sensor fue verificado con una estación de temperatura de la marca Technoline en modelo WS 9118 (Willkommen bei der Technotrade Import-Export GmbH, s. f.).

Para la medición de la luminosidad, el sensor usado en los proyectos desarrollados fue un TSL 2561a. Es un sensor de luz de gran precisión que mide en un rango de 0,1 a 40000 lux. Dispone de dos diodos que le permiten medir tanto la luz ambiente en el espectro visible como la luz infrarroja. Sus características principales son las siguientes:

- Rango de visión: Infrarrojos y Espectro Visible.
- Temperatura de funcionamiento: -30 °C a 80 °C.
- Rango dinámico (Lux): 0,1 Lux a 40000 Lux.
- Alimentación: 2.7v - 3.6V.
- Corriente de Alimentación: 0,6mA
- Interfaz: I2C.
- Bajo coste y sencilla instalación.

**Figura 22**

*Senor de Luminosidad TSL 2561*



En resumen, todos los materiales usados en esta tesis son elementos de bajo coste con altas prestaciones. A continuación se presenta las tablas 7 y 8 con una relación del coste de los mismos

**Tabla 7**

*Lista de Componentes del Dispositivo Utilizado para los Casos 3.2.1 y 3.2.2.*

Componente	Descripción	Precio
Placa principal	Raspberry Pi 3 Model B	38€
Array de Micrófono	Sony Playstation 3 Eye Cámara Eyetoy	25 €
Pantalla LCD	3.2" TFT LCD with Touchscreen Breakout Board w/MicroSD Socket - ILI9341	25 €
Batería Portátil	Aukey PB de T5 Power Bank, 20000 mAh Negro	15€
Caja Protectora	150 mm X 200mmX 85mm IP 67 Caja	12€
Fungibles	Materiales varios: cables, conectores	10€
Precio Total		125€

**Tabla 8**

*Lista de Componentes del Dispositivo para el Caso 3.2.3*

Componente	Descripción	Precio
Placa principal	Raspberry Pi 3 Model B	38€
Array de Micrófono	Sony Playstation 3 Eye Camara Eyetoy	25 €
Pantalla LCD	3.2" TFT LCD with Touchscreen Breakout Board w/MicroSD Socket - ILI9341	25 €
Transformador eléctrico con SAI	Mini UPS DL 181	12,5€
Sensor de Temperatura y Humedad	DHT 22	8€
Sensor de Luminosidad	TSL 2561	4€
Caja Protectora	150 mm X 200mmX 85mm IP 67 Caja	12€
Fungibles	Materiales varios: cables, conectores	10€
Precio Total		135€

### **3.1.2 Red inalámbrica de sensores acústicos**

#### *3.1.2.1 Recomendaciones generales y específicas*

Para realizar un correcto despliegue de una red de sensores acústicos es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones generales, es por ello que se propone una serie de etapas a la hora de diseñar y decidir realizar una monitorización de un entorno acústico a través de un WASN.

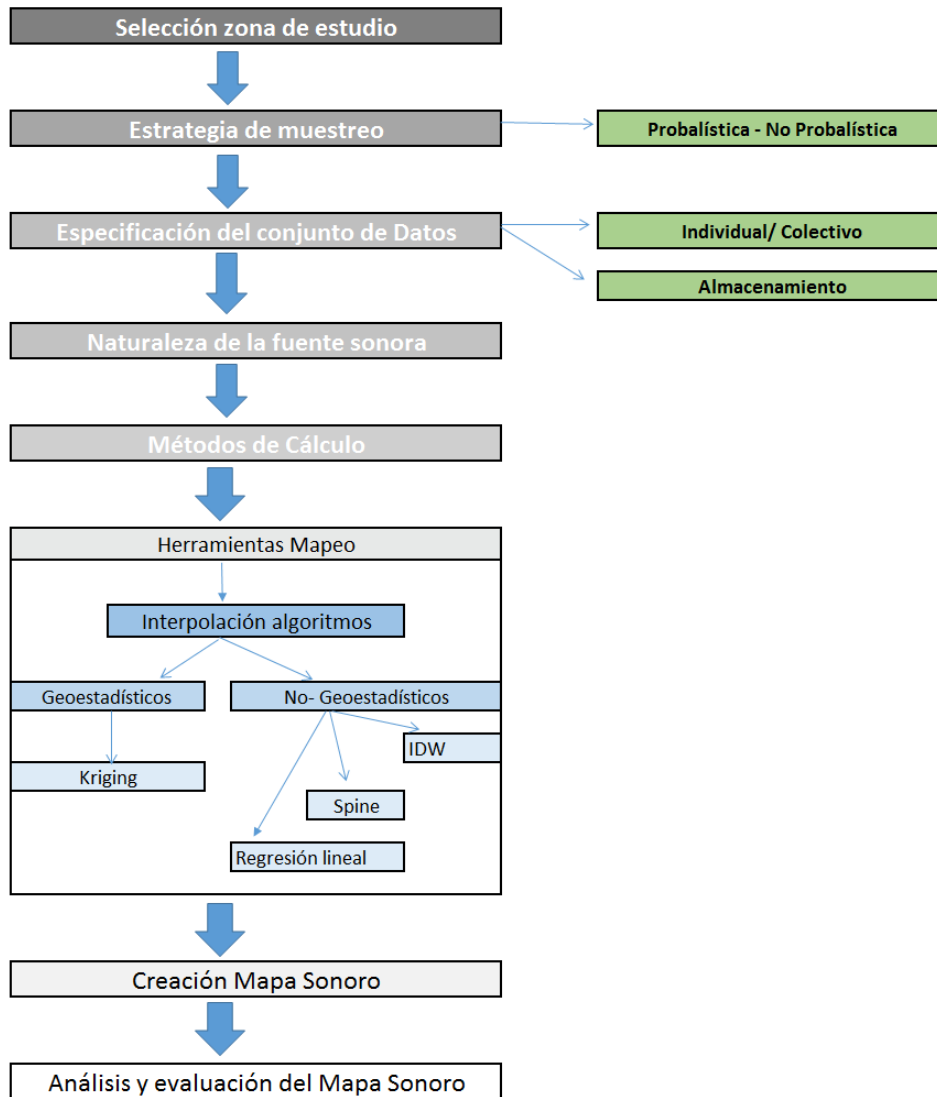
Esta metodología fue presentada en un congreso internacional, concretamente en FIA 2018, XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre y cuyo título fue: Estudio del despliegue de dispositivos IoT acústicos para el análisis del ruido en entornos educativos.

Para el desarrollo de estas consideraciones se sigue un modelo similar al diagrama diseñado para la planificación urbana por Margaritis y Kang (2017).



**Figura 23**

*Etapas para el Despliegue de una Red de Sensores*



*Nota.* Adaptación de Individual steps in the soundscape mapping process starting from the sampling strategy and ending in the assessment of the mapping effectiveness. Soundscape profiling is an optional step in this process. Margaritis y Kang (2017).

En primer lugar, se ha de seleccionar la zona de estudio, es decir, el área o las áreas a monitorizar, para conocer bien la orografía del lugar y ver las posibles dificultades técnicas y tecnológicas que puedan existir. A partir de conocer el área a monitorizar, se debe evaluar las zonas con mayor impacto acústico, ya que son puntos susceptibles de ser monitorizados y evaluados. Normalmente las redes de sensores se suelen desplegar en zonas de gran aglomeración de actividad y con niveles altos de ruidos como, por ejemplo, las carreteras de gran tránsito.

La segunda etapa se basa en la elección de la estrategia de muestreo a realizar. Esta estrategia va a depender de la geometría del lugar, el método de muestreo y la localización de los nodos de captación. Se recomienda elegir de manera adicional puntos cercanos externos de la zona principal de estudio permitiendo realizar una interpolación del mismo y así contemplar toda el área de estudio (Negreiros et al., 2010) y, por consiguiente, en caso de realizar un mapa de la zona, tener una representación fiable. Además, también se debe satisfacer el objetivo de igualdad de cobertura espacial, que suele utilizarse para estimar el total o la media de un parámetro en una zona y, así optimizar las estimaciones de los parámetros en lugares no muestreados (Wang et al., 2012).

Los métodos de muestreo se pueden considerar probabilísticos (aleatorio, sistemático, estratificado o por conglomerados) y no probabilísticos o selectivos. Se entiende por probabilísticos aquellos que realizan una selección aleatoria, es decir, seleccionar al azar un pequeño grupo de estudio de una gran población y partir de ese grupo control se estima como sería para el grupo en general, mientras que el muestreo no probabilístico es una técnica de muestreo en la cual se seleccionan muestras basadas en un juicio subjetivo en lugar de hacer la selección al azar. Dentro de los probabilísticos, el sistemático va a estar limitado por la distancia mínima entre los nodos, pero con mayor precisión que el aleatorio, por el contrario, en el aleatorio se representa mejor la variabilidad.

La tercera etapa que se presenta es la recopilación de datos. Esta recopilación de datos va a depender principalmente del método de evaluación del campo sonoro, los cuales fueron mostrados en el epígrafe 2.6, junto con la

selección de puntos de medición, del número de puntos de medición y la localización espacial. En relación a esta etapa, es importante la selección de puntos, que depende de si el punto o los puntos a estudiar son elegidos previos al despliegue o por el contrario van variando según el proceso de monitorización. El número de nodos es importante ya que, a mayor número de sensores, mayor cantidad de datos y mayor fiabilidad en los resultados obtenidos al tener el área un mayor número de mediciones. Estos a su vez pueden proporcionar los datos captados tanto de manera directa, como indirecta, donde los nodos se comunican usando protocolos de enrutamiento de varios saltos y al menos un dispositivo actúa como una puerta de enlace para la conexión externa, tal y como se explica en el apartado 3.1.4.

En esta etapa es importante conocer cómo y dónde esos datos van a ser almacenados, los datos de ruido o molestia recopilados son guardados típicamente en un registro de propiedad y se utilizan, junto con información adicional sobre las fuentes de ruido existentes, para alimentar modelos computacionales que proporcionan niveles extrapolados de exposición al ruido para aquellas áreas para las cuales los datos no están disponibles (Filipponi et al., 2008). Dichos datos pueden ser almacenados en memorias internas de los dispositivos o en bases de datos instaladas en servidores. Estos servidores a su vez pueden estar infraestructuras privadas en instalaciones on-premise o encontrarse en servidores alojados en la nube. Esta disponibilidad casi inmediata de los datos recopilados permite, por ejemplo, detectar niveles o áreas afectadas por el ruido.

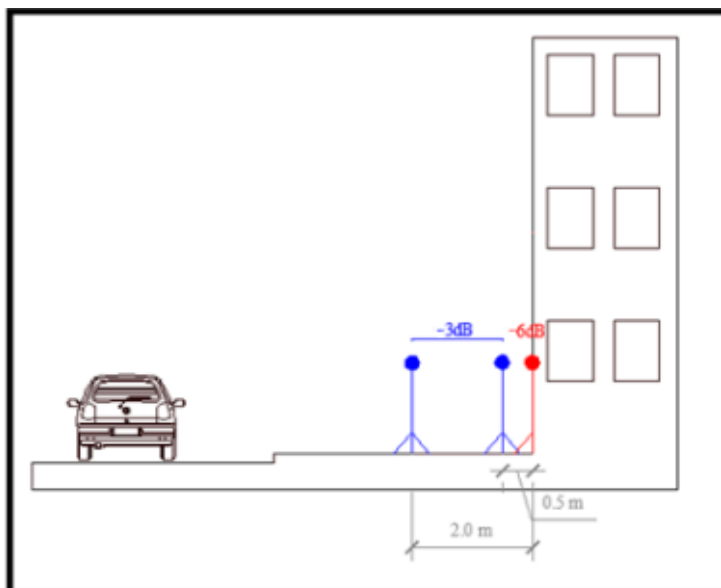
Otra característica a tener en cuenta en los nodos a la hora de monitorizar es, determinar si se va a utilizar con estaciones fijas o móviles, tal y como se explicó en el apartado de nodos acústicos 2.5.3. Cabe destacar también que, para evaluar parámetros de ruido, la ubicación de los dispositivos de medición debe seguir reglas específicas marcadas por Directiva 2002/49/EC. (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002). Algunas de las recomendaciones a destacar se describen a continuación.

Para los puntos de medida se indica que la altura para la evaluación será en función de la aplicación. Para la realización de mapas de ruido en el exterior y en las proximidades de edificios, el R. D. 1513/2005, (RDL 1513/2005, de 16 de diciembre) establece que la ubicación del punto o puntos de medición para la realización de cálculos han de estar a  $4,0 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$  (3,8 m-4,2 m) de altura sobre el nivel del suelo en la fachada más expuesta, es decir, aquella más próxima a la fuente sonora. Mientras que, si es para la realización de mediciones en interiores, no deberán ser inferiores a 1,5 m sobre el nivel del suelo y los resultados deberán corregirse de conformidad con una altura equivalente de 4 m. Por otro lado, para la planificación acústica y la determinación de zonas ruidosas, podrán elegirse otras alturas, si bien éstas nunca deberán ser inferiores a 1,5 m sobre el nivel del suelo.

También cabe revisar la norma ISO 1996-2:2007 (ISO,2007). Esta no hace referencia explícita a la distancia necesaria que el equipo de medida debe tener con respecto a la fachada y con respecto a la fuente sonora, ni a la altura a la que debe colocarse. Sin embargo, esta norma ISO expone la necesidad de realizar determinadas correcciones en función de la distancia a la que se sitúe dicho medidor con el objetivo de tener en cuenta los efectos de la reflexión respecto al campo sonoro incidente en la fachada tal y como indica la figura 24.

**Figura 24**

*Correcciones Propuestas por la Norma ISO 1996-2:2007 en Funcion de la Distancia a la Fachada Reflectante*



En la figura 24 se exponen las correcciones de la norma que hace distinción entre tres casos:

- Posición con el micrófono montado a ras de la superficie reflectante: -6 dB.
- Posición con el micrófono situado entre 0,5 y 2 m frente a la superficie reflectante: -3 dB.
- Posición de campo libre (condición de referencia): 0 dB.

Finalmente, el R.D. 1367/2007 (RDL 1367/2007, de 19 de octubre) por el que se desarrolla la Ley 37/2003 (LRJSP 37/2003, de 17 de noviembre) indica que la distancia a la fachada debe de ser, al menos, 1,2 m.

La norma ISO 1996-2 estima una incertidumbre mínima de 2 dB para los niveles de ruido medidos, que está asociada a factores como la instrumentación, las condiciones de funcionamiento (repetibilidad), las condiciones meteorológicas y del terreno y el sonido residual, al evaluar la exposición de la población a la contaminación acústica.

Siguiendo con la metodología para el despliegue de la red, la cuarta etapa consiste en definir la naturaleza de las fuentes que se quieren describir, tales como las naturales, antropológicas y tecnológicas (Brown et al., 2011). Con fuentes naturales se habla de fenómenos atmosféricos como lluvia, nieve, viento, truenos, etcétera y de fenómenos naturales tales como movimientos de tierras, sonidos provocados por animales tanto domésticos como no domésticos. En el caso de fuentes antropológicas, se corresponde aquellos sonidos propios del ser humano, como por ejemplo el sonido al andar, sonido generado por conversaciones, cierre de puertas, etcétera. Y la última clasificación de las fuentes sonoras serían los sonidos provocados por las tecnologías, como son terminales de telefonía, motores de coche, motocicletas, semáforos, etcétera.

La siguiente etapa son los métodos de cálculo. Como ya se ilustró en el epígrafe 2.6.3, existen diferentes tipos de modelos para la medición, predicción y creación de mapas de ruido, siendo el modelado basado en la recopilación de datos de tráfico y el cálculo de la propagación del sonido la técnica más

difundida, teniendo como inconveniente principal la necesidad de tener datos a priori y los dispositivos de adquisición de datos son costosos. Uno de los métodos más usados es el método de mallado (grid) (Gomez Escobar et., 2012), que consiste en la superposición de mallas a lo largo de la zona de estudio con un tamaño de malla regular. Según de Kluijver y Stoter (2003) las técnicas de interpolación espacial pueden usarse para determinar niveles de ruido con una resolución mayor que el mallado de resultados inicial. Sin embargo, se ha demostrado que esto puede generar incertidumbres, especialmente si los mapas se construyen en base a rejillas iniciales (Asensio et al., 2011).

Tras la elección del método de cálculo, la siguiente etapa son las herramientas de mapeo, cuya finalidad es ayudar a la elaboración de un mapa. Los niveles de ruido obtenidos por los dispositivos son promedios ponderados en el tiempo de la presión acústica, calculados sobre intervalos de tiempo diferentes, lo que hace necesaria la existencia de una sincronización de todos los nodos para un adecuado procesamiento y visualización de los valores obtenidos. Al realizar una monitorización se obtiene una gran cantidad de datos por ello la selección de una plataforma adecuada es importante.

Una herramienta útil para la realización de mapas está dada por geoestadísticas, que proporciona un conjunto de técnicas estadísticas específicamente diseñado para problemas espaciales. La geoestadística es el nombre genérico de una familia de técnicas que se utilizan para mapear superficies a partir de datos de muestra limitados y la estimación de valores en ubicaciones no muestreadas. La técnica básica de kriging ordinario usa un promedio ponderado de muestras vecinas para estimar el valor desconocido en una ubicación determinada (Negreiros et al., 2010). Los pesos se optimizan utilizando el modelo de semivariograma, la ubicación de las muestras y todas las interrelaciones relevantes entre valores conocidos y desconocidos. La técnica también proporciona un error estándar que se puede usar para cuantificar los niveles de confianza (Oloruntoba et al., 2012). Existen otros sistemas de interpolación como el Inverse Distance Weighted (IDW) (Can et al., 2014) donde se estima el nivel sonoro en cada punto como una media del nivel sonoro en una muestra fija de valores. IDW es una interpolación determinista simple e intuitiva, basada en el

principio de que los valores de muestra más cercanos a la ubicación de predicción tienen más influencia en valor de predicción que los valores de muestra más separados (Wong et al., 2004). Otro de los posibles métodos a utilizar sería la regresión lineal, muy usada para estimar los diferentes parámetros acústicos (Can et al., 2011). Spline es también un método de interpolación determinista que ajusta una función matemática a través de los datos de entrada para crear una superficie suave.

Las tecnológicas de localización espacial, como puede ser el Global Positioning Systems (GPS), permiten la realización de monitorizaciones en movimiento, ayudando a la creación de mapas. Estas monitorizaciones móviles permiten la creación de mapas de una zona y transmitir la información gracias a la conectividad a internet. De esta forma, la gestión del ruido es más proactiva, existiendo vínculos entre el software de cálculo y el ruido real, creando mapas dinámicos que permitan evaluación, planificación y actuación ante situaciones de riesgo acústico (Stapelfeldt y Manvell, 2011). Estos mapas actualizados permiten mejorar los mapas de ruido locales y complementar resultados de monitoreo de ruido.

La última etapa es el análisis y evaluación de los mapas sonoros por parte de los interesados en conocer el ambiente sonoro de la zona de estudio. La evaluación de los resultados de interpolación y el rendimiento del modelo en lugares desconocidos se puede realizar utilizando la validación o el proceso de validación cruzada, o cross-validation process. Todos los procesos funcionan bajo el mismo concepto, de forma consecutiva eliminar uno o más puntos de datos y predecir los valores respectivos usando las entradas de los datos restantes.

En resumen, en este apartado se han mostrado una serie de recomendaciones a tener en cuenta antes de realizar un despliegue de sensores acústicos con el fin de cumplir las especificaciones de normativas a la hora de realizar una evaluación del campo acústico con validez. En los trabajos de esta tesis, se han tenido en cuenta estas recomendaciones y se ha seguido la metodología de planificación y despliegue que se presenta en el siguiente apartado.

### *3.1.2.2 Metodología de planificación y despliegue*

El despliegue real de una red inalámbrica es una de las fases más críticas y delicadas de la implantación del proyecto. La posición y orientación de los nodos acústicos y las condiciones del entorno definen claramente el funcionamiento de la red, tanto a nivel de comunicaciones como de adquisición de datos. Es importante contar con la posibilidad de definir la localización de donde se va a situar cada uno de los componentes de la red, y conseguir así relacionar los datos medidos con las condiciones ambientales. Adicionalmente, se desplegará de manera segura evitando cualquier interferencia con el medio y que no suponga tampoco ningún riesgo ni a la hora de instalarlo, ni en la monitorización ni en su desmonte.

En primer lugar, se ha de realizar un reconocimiento del área de estudio, observando cuales son las zonas más susceptibles de monitorizar por niveles representativos de molestia. Una vez localizadas estas zonas con las fuentes más predominantes, se procede a estimar el número de nodos necesarios para monitorizar todas las zonas del área de estudio con el fin de obtener datos más precisos. Como se ha comentado, hay que prestar especial atención en la seguridad y al entorno, por tanto, hay que estudiar que materiales adicionales al nodo se deben adquirir para un correcto montaje de los sensores.

Tras decidir el número de sensores a desplegar y los materiales auxiliares necesarios para su montaje, hay que decidir entre las posibilidades de conectividad que ofrece el área de estudio. Para ello, es necesario realizar una serie de pruebas en cada uno del emplazamiento para elegir los tipos de conectividad óptimos, tal y como se mostró en el apartado 3.1.1.4. Adicionalmente, es importante resaltar que, el dispositivo debe ser colocado en una zona donde las condiciones climatológicas no afecten al mismo, ya que una exposición al sol puede provocar un sobrecalentamiento del nodo o el nodo expuesto a la lluvia puede crear problemas de impermeabilidad.

Seguidamente, se ha de realizar una búsqueda del tipo de sensor acústico más adecuado para el despliegue en función de sus prestaciones y de la precisión que se requiera. Los dispositivos pueden ser adquiridos directamente y por tanto



desplegar una red con nodos comerciales o bien, realizar una red con nodos personalizados, como es el caso del nodo usado en esta tesis. También se puede usar una combinación de nodos comerciales y nodos personalizados en una red, aunque se deberá prestar atención a las especificaciones de los diferentes modelos con respecto a incertidumbre de las medidas. En el caso de nodos acústicos personalizados, será necesario, antes de poder colocarlos en sus emplazamientos, realizar una calibración de los mismos, tomando como referencias sonómetros de clase 1 o clase 2, dependiendo de la precisión que se desee. En general, los comerciales ya vienen calibrados y testeados, aunque se recomienda una verificación previa a su instalación. Por lo tanto, para ambos tipos y previamente al despliegue, se debe realizar mediciones in situ para comprobar la fiabilidad en la toma de muestras y el funcionamiento de la conectividad con el servidor.

Finalizada esta fase de comprobaciones previas, se procede al despliegue de los nodos que forman la red y un periodo de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la red. Una vez terminado el periodo de pruebas de manera satisfactoria es el momento de realizar la campaña de monitorización o toma de datos de la zona de estudio, con un control diario para evitar desconexiones de los dispositivos. Es importante dotar a los dispositivos del acceso a control remoto para poder realizar mantenimiento, actualizaciones o incluso reinicios del dispositivo.

### 3.2 CASOS DE USO DE UNA RED DE SENSORES ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOLESTIA DE RUIDO

En esta sección se presentan los 3 estudios llevados a cabo durante el periodo de realización de esta tesis doctoral, donde se analiza la utilidad de las redes de sensores acústicos y se evalúa la molestia de diferentes entornos acústicos. En primer lugar, en el apartado 3.2.1, se desarrolla una investigación para evaluar la molestia que una persona recibe cuando hace un desplazamiento in itinere a su lugar de trabajo en el interior de su vehículo. Seguidamente, en el epígrafe 3.2.2, se estudia la afección al ruido que reciben los vecinos de una urbanización a través del despliegue de una red de sensores inalámbricos en el

exterior y la realización de una campaña de mediciones de unos días de duración. Finalmente, la última sección 3.3.3 corresponde al despliegue de una red de sensores inalámbricos en un campus universitario, para estudiar la molestia existe tanto en localizaciones interiores como exteriores en una campaña de larga duración.

En todos estos casos de estudio se ha usado el dispositivo desarrollado por el grupo GRITA, pero se han probado diferentes formas a la hora de desplegar la red, tipos de alimentación, modos de comunicación y aproximaciones de análisis de los datos obtenidos tras las campañas de monitorización.

### **3.2.1 Evaluación del entorno sonoro del interior de un coche durante desplazamientos in-itinere.**

#### *3.2.1.1 Descripción del experimento*

En este apartado se lleva a cabo la evaluación de un entorno real usando un nodo acústico con captación binaural, descrito anteriormente en el apartado 3.1.1, a través de un experimento en el cual se realiza un estudio preliminar sobre la afección al ruido recibida por los ciudadanos en sus desplazamientos en vehículo a su lugar de trabajo. Esta investigación fue presentada en el 48<sup>a</sup> Congreso Nacional de Acústica –Tecnacústica’17, que tuvo lugar en la ciudad de A Coruña del 3 al 6 de Octubre de 2017 y con el título “Análisis preliminar de la molestia acústica recibida por los ciudadanos en sus desplazamientos in-itinere en vehículo” (Montoya et al., 2017).

A través de un dispositivo de medición autónomo que fue instalado en el interior del vehículo, se ha realizado una campaña de mediciones de índices energéticos (ver apartado 2.4.2.2) y del parámetro psicoacústico loudness (ver apartado 2.4.3.2), con el objeto de evaluar la molestia del ruido en este escenario.

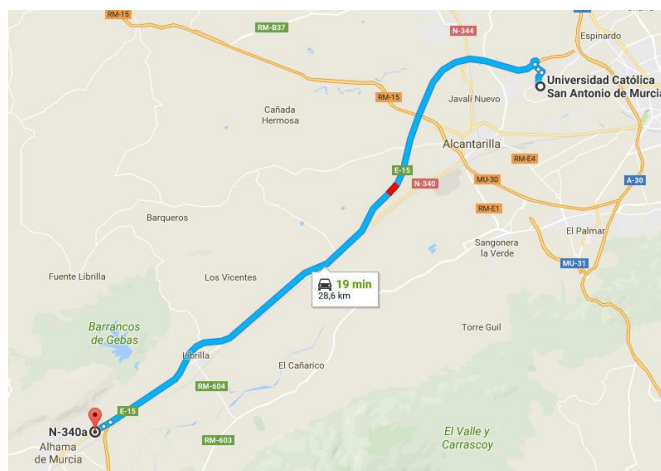
Tras un análisis de los resultados obtenidos, se observó que existe una buena correlación entre los índices energéticos y loudness, siendo loudness un parámetro que ofrece información complementaria sobre la molestia que no es obtenida por los índices.

El Real Decreto Legislativo 8/2015, de 30 de octubre (RDL 8/2015, de 30 de octubre), por el que se aprueba el texto refundido de la Ley General de la Seguridad Social, denomina *in itinere* a aquel desplazamiento que tiene lugar a consecuencia del desplazamiento que el trabajador realiza para ir o volver del trabajo. Se exige que se haya seguido el trayecto habitual, utilizando medios ordinarios de transporte y que no se haya producido una ruptura de la relación de causalidad. Cabe destacar que este estudio puede ser trasladado también a otros sectores laborales, como pueden ser taxistas, chóferes, transportistas y un largo etcétera, en su jornada ordinaria de trabajo, ya que existe cierta similitud en las condiciones acústicas.

Las mediciones son realizadas entre dos puntos intermedios del trayecto del trabajador tal y como se muestra en la figura 25. Estos puntos son zonas muy concretas que permiten estacionar el coche y así poder conectar y desconectar el dispositivo de medida, sin poner en riesgo al trabajador ni al resto de la circulación. Estas zonas de partida y llegada son el parking de la UCAM, como punto de partida en el horario matutino y como punto de llegada en el horario vespertino, y de manera análoga pero cambiando los horarios, la entrada al municipio de Alhama de Murcia por la nacional 340-A.

**Figura 25**

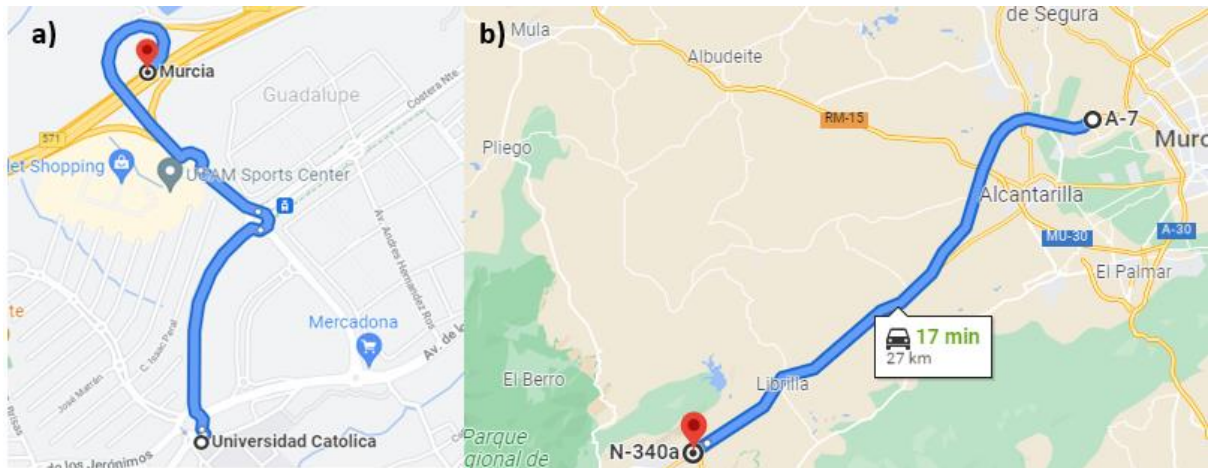
*Recorrido In Itinere del Trabajador*



El trayecto tiene una distancia de 28,6 km, siendo 1,6 km de carretera por población (tal y como muestra la figura 26), y los 27 km restantes son de autovía, concretamente la autovía del Mediterráneo A-7 a partir del km 571 y hasta el km 598. A continuación se muestra la figura 26 a) el trayecto por población que cuenta con 3 rotondas, mientras que b) el trayecto únicamente de autovía.

### Figura 26

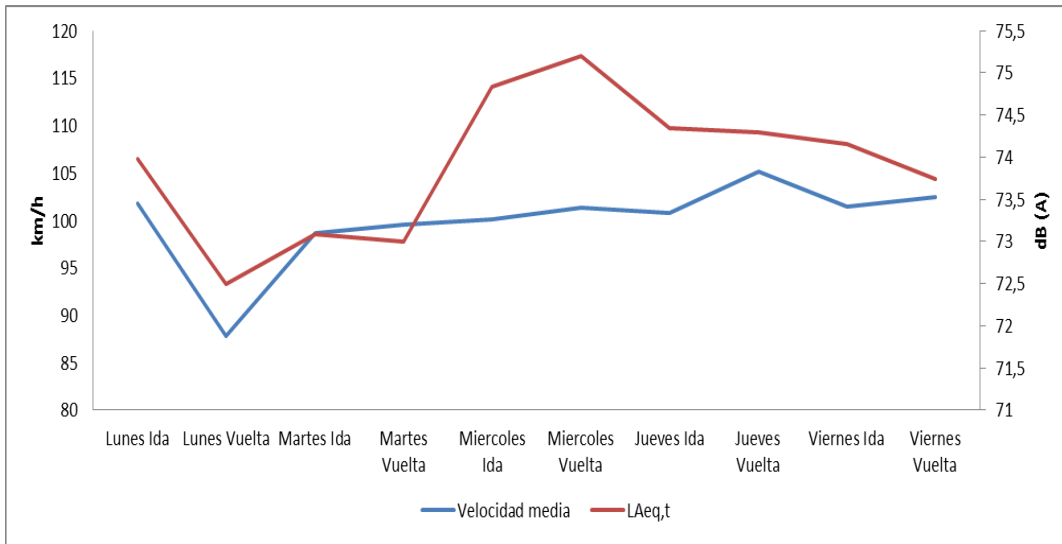
*Recorrido In Itinere del Trabajador: a) Tramo de Población b) Tramo de Autovía A7*



Los horarios de salida de la UCAM se fijaron a primera hora de la mañana, en torno las 7:10h- 7:20h a.m, y como horario de llegada alrededor de las 18:30h-18:40h. Por otro lado, la llegada a la población de Alhama es sobre las 7:30h-7:40h a.m. También es punto de salida en la vuelta del trabajador a su casa alrededor de las 18:10h-18:20 h.

La campaña de mediciones se llevó a cabo durante una semana, con dos mediciones por día, tanto en la ida como en la vuelta en el camino in itinere, con una duración aproximada de 15 minutos por recorrido con una velocidad media de  $100 \pm 4,6$  km/h y gracias al uso de una aplicación móvil de GPS. A continuación, la figura 27 muestra los valores de velocidad media en cada itinerario.

**Figura 27**



*Gráfico de la Velocidad Media del Vehículo durante la Campaña de Mediciones*

Las mediciones han sido realizadas sin hacer uso de ningún equipo de audio adicional, ya sea radio o teléfono móvil, para no perturbar las mediciones y de manera offline, guardándose los datos en la tarjeta SD del nodo acústico. La campaña de mediciones se ha realizado con un vehículo particular de la marca Seat, modelo Ibiza y del año 2012. Este modelo según su ficha técnica posee las siguientes características:

- Motor Diésel 1.6 TDI.
- 66 kW, lo que corresponde a 90 cv.
- 4 cilindro y cuya cilindrada es de 1.598 cc.
- Nivel sonoro en parado 73 dB(A).

De acuerdo con R.D. 1367/2007, en su artículo 18, el valor límite de emisión sonora del vehículo de motor en circulación se obtiene sumando 4 dB(A) al nivel sonoro que figura en la ficha técnica de homologación del vehículo, correspondiente al ensayo a vehículo parado, siendo por tanto el nivel sonoro de 77 dB(A).

Tras analizar las características propias del entorno donde se va a realizar el estudio, se procede a presentar el montaje del dispositivo. Para este estudio, el nodo acústico se instaló con una fuente de alimentación portátil 20.000 mAh, ya que no hay posibilidad de ser conectado a la corriente eléctrica del coche. A la hora de ubicar el dispositivo y que la medición fuera fiel a la presión sonora que el sujeto recibiría, el array de micrófonos fue colocado a la misma altura de los pabellones auditivos del trabajador, pero en el asiento de copiloto, tal y como se muestra en la figura 28. De esta manera se pretende evaluar el mismo nivel de ruido que un pasajero o el conductor puede recibir.

### Figura 28

*Instalación del Dispositivo en el Interior del Vehículo.*



3.2.1.2 Resultados y discusión del experimento

A continuación, se discuten los resultados obtenidos en esta campaña. En primer lugar, en la tabla 9 se presentan los niveles equivalentes de cada día calculados durante una semana laboral (5 días) y teniendo en cuenta únicamente el tiempo de desplazamiento. Seguidamente, la tabla 10 muestra los niveles equivalentes extrapolados a una jornada de 8 horas  $L_{Aeq,8h}$ , de acuerdo con la ecuación descrita en 2.4.2.2.4, estimando los valores a los que estaría expuesto un trabajador del transporte urbano, por ejemplo.

**Tabla 9**

Valores  $L_{Aeq,d}$  in itinere dB(A) del Trabajador a lo largo de una Semana.

Día semana	Desplazamiento In Itinere ida+vuelta trabajador				
	1	2	3	4	5
$L_{Aeq,d}$ in itinere dB(A)	62,21	61,55	62,14	62,47	62,19

**Tabla 10**

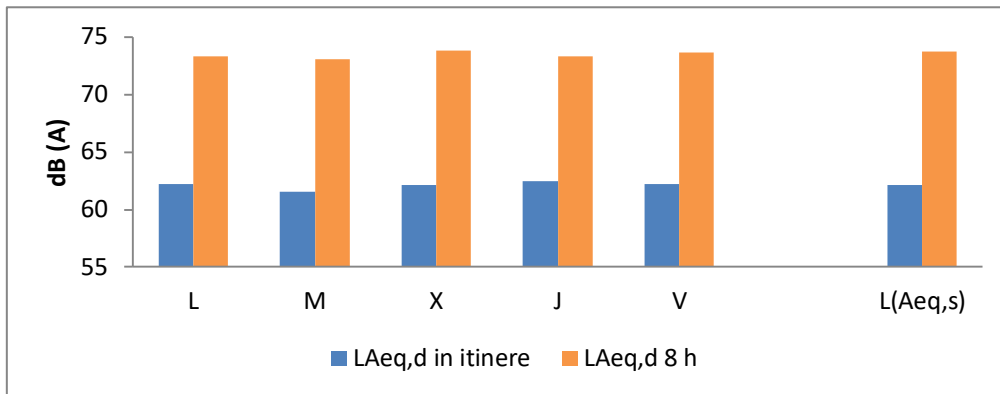
Valores  $L_{Aeq,d 8h}$  dB(A) a lo largo de una Semana.

Día semana	Desplazamiento In Itinere ida+vuelta 8 horas				
	1	2	3	4	5
$L_{Aeq,d 8h}$ dB(A)	73,28	73,05	73,85	74,32	73,97

Se puede observar que la tabla 9 muestra un nivel de exposición sonora inferior a la que corresponde a una jornada de 8 horas, mientras que la tabla 10 muestra  $L_{Aeq,d 8h}$  representa el nivel equivalente, considerando que la persona conduce durante una jornada laboral completa (8 horas), tal y como se observa en la figura 29.

**Figura 29**

Representación  $L_{Aeq,d}$  in itinere y  $L_{Aeq,d}$  8h en dBA durante una Semana y el Valor  $L_{Aeq,s}$



En la figura 29 es añadido el valor semanal,  $L_{Aeq,s}$ , calculado según la ecuación 2.4.2.2.5. El valor  $L_{Aeq,s}$  para los valores in itinere es de 66,12 dB(A), mientras que el valor obtenido de  $L_{Aeq,s}$  en el caso de estar toda una jornada laboral es de 72,73 dB(A). Los valores de exposición diaria al ruido durante la semana de medición muestran cierta similitud entre ellos, incluso con el nivel semanal equivalente, por lo que dicho término  $L_{Aeq,s}$  según el RD (286,2206) (RDL 286/2006, de 10 de marzo), no es necesario su cálculo ya que los resultados día a día presentan esa similitud.

Los valores obtenidos se encuentran por debajo de 80 dB(A), por lo que se cumple con la normativa (ver apartado 2.6.1.3) y no es necesario el uso de dispositivos protectores que atenúen el ruido. Por consiguiente, no existe penosidad en el trabajo, que es lo que ocurre cuando se alcanzan valores iguales o superiores a 80 dB(A).

A continuación, se procede al cálculo de los índices estadísticos de acuerdo con el apartado 2.4.2.3. En la siguiente tabla 11 se presentan los valores estadísticos a lo largo de la semana:



**Tabla 11**

*Valores Estadísticos en dB(A) Obtenidos en el Desplazamiento durante una Semana.*

Día	$L_{10}$	$L_{90}$	Media	Desviación Típica	$L_{50}$
1	76,11	60,33	70,45	6,61	73,74
2	75,17	63,31	71,28	5,49	73,26
3	76,83	63,66	71,94	5,09	73,73
4	76,76	66,23	72,90	4,73	74,26
5	76,26	62,73	72,33	4,87	74,31

A continuación, se muestran en las tablas 12, 13 y 14 otros índices estadísticos: índice de ruido de tráfico, clima sonoro e índice de contaminación acústica, respectivamente. Fueron calculados según las ecuaciones de los apartados 2.4.2.3.2, 2.4.2.3.3 y 2.4.2.3.4.

**Tabla 12**

*Índices de Ruido de Tráfico a lo largo de una Semana*

Día semana	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
TNI dB(A)	93,44	80,72	86,32	78,34	86,87

Los valores obtenidos en la tabla 12 son superiores respecto al valor establecido por Robison (1971) como valor aceptable, 72 dB(A). Por tanto, los niveles de ruido tráfico alcanzando en el desplazamiento in itinere genera molestia en la población.

**Tabla 13***Clima Sonoro a lo largo de una Semana*

Día semana	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
NC dB(A)	15,78	11,85	13,17	10,53	13,54

**Tabla 14***Índices de Contaminación Acústica a lo largo de una Semana*

Día semana	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
NPL dB(A)	90,20	87,12	86,89	86,42	86,44

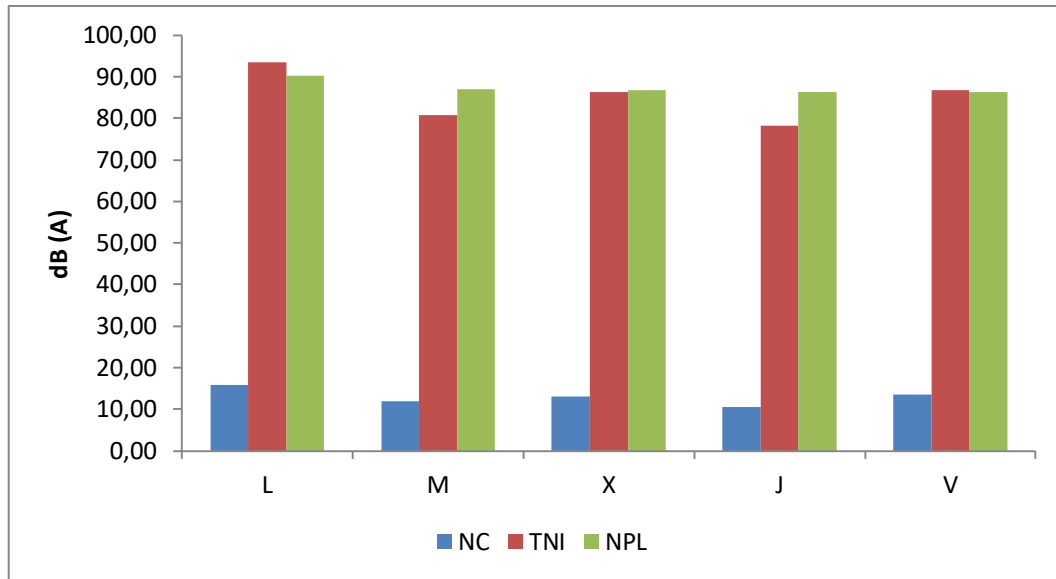
Los valores obtenidos en la tabla 14, son valores similares entre ellos. Estos valores superan los 75 dB(A) considerados por Rodríguez Flores (2008) como contaminación alta y por tanto el trayecto in itinere no supone un riesgo para la salud del trabajador, pero si existe una importante contaminación acústica.

Si se analizan los valores de NPL y TNI conjuntamente, de acuerdo con Tiwari et al. (2015), el primer día de la semana supondría una insatisfacción, es decir, molestia en el 50% de la población, debido a que se superan los valores de NPL de 88 dB(A) y TNI de 74 dB(A). En el resto de día el valor NPL se encuentra próximo a 88, por lo que se puede afirmar, que este desplazamiento genera molestia.

A modo de resumen, en la figura 30 se presenta una gráfica de barras de los valores mostrados en la tabla 12, tabla 13 y tabla 14.

Figura 30

*Representación de los Valores NC, TNI y NPL durante una Semana.*



Tras analizar los valores obtenidos de manera semanal, se procede a mostrar los valores obtenidos un día concreto. Se ha tomado el último día de la semana, viernes, como ejemplo dado que los días no muestran una diferencia representativa. El desplazamiento in itinere de ida tuvo una duración de 16 minutos y 20 segundos, mientras que el desplazamiento de vuelta fue de 15 minutos, siendo el desplazamiento in itinere total de 31 minutos 50 segundos.

La tabla 15 presenta los valores de nivel de presión sonora en dB(A) y dB para el desplazamiento de ida, mientras que la tabla 16 indica los valores obtenidos por el sistema de medición en la vuelta a casa del trabajador.

**Tabla 15**

*Valores  $L_{Aeq,d}$  in itinere dB(A) y  $L_{eq,d}$  in itinere dB en el Desplazamiento de Ida en un Día Concreto*

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{eq}$ dB(A)	61,90	62,86	73,20	75,17	75,87	75,65	75,65	75,49	75,50
$L_{eq}$ dB	68,35	67,01	69,98	71,37	71,37	71,68	70,74	72,20	70,88
Minuto	10	11	12	13	14	15	16	17	
$L_{eq}$ dB(A)	74,28	73,70	74,38	75,53	73,71	73,21	73,70	72,62	
$L_{eq}$ dB	69,87	69,62	69,21	69,86	69,33	69,71	68,78	67,69	

**Tabla 16**

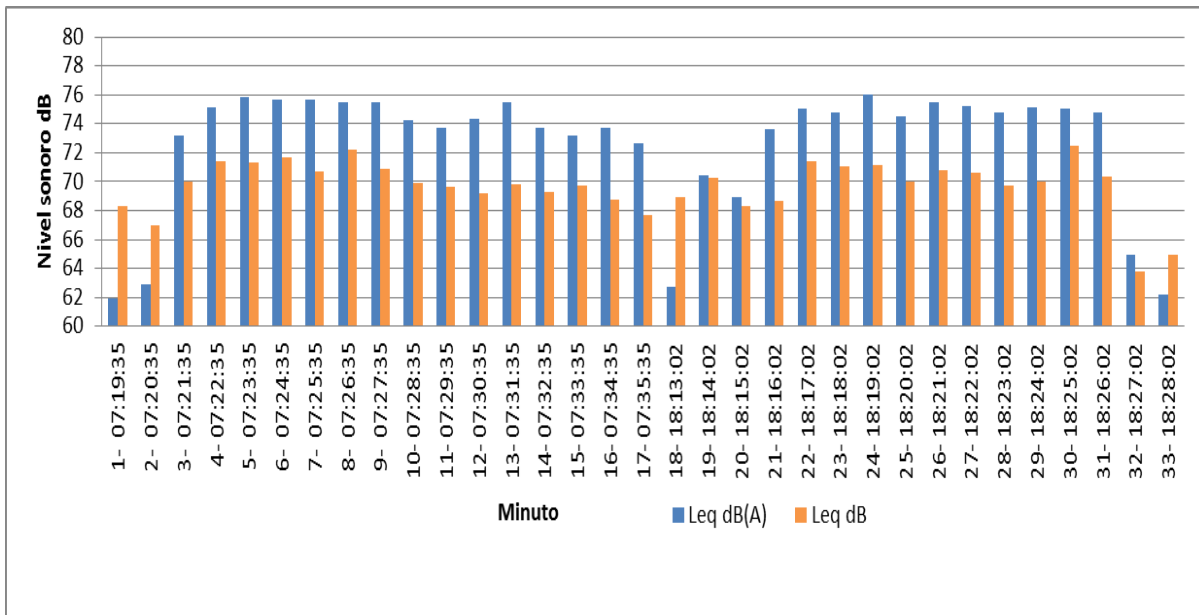
*Valores  $L_{Aeq,d}$  in itinere dB(A) y  $L_{eq,d}$  in itinere dB en el Desplazamiento de Vuelta en un Día Concreto*

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{eq}$ dB(A)	62,73	70,40	68,90	73,62	75,02	74,76	76,06	74,51
$L_{eq}$ dB	68,95	70,26	68,30	68,69	71,38	71,02	71,015	70,01
Minuto	9	10	11	12	13	14	15	16
$L_{eq}$ dB(A)	75,48	75,23	74,81	75,11	75,01	74,82	64,94	62,23
$L_{eq}$ dB	70,84	10,59	69,76	69,99	72,50	70,38	63,80	64,92

La representación gráfica de los valores expuestos en las tablas 15 y 16 se muestran en la figura 31.

**Figura 31**

Valores de la  $L_{Aeq,d}$  in itinere dB(A) y  $Leq,d$  in itinere dB en el Trayecto in Itinere de un Día Concreto



Tal y como se muestra en la figura los valores obtenidos no superan los niveles establecidos por la legislación, 80 dB(A), y por tanto no supone un peligro para el trabajador. Además, los minutos 1, 2, 32 y 33, que corresponde con el vehículo en la zona de población, cerca de la UCAM, se produce una reducción considerable de los niveles sonoros. Además, se observa que los niveles equivalentes se mantienen casi constantes a lo largo del trayecto por la Autovía A-7, siendo valores tanto en la ida como en la vuelta muy similares. El nivel diario equivalente para dicha medición es de 73,97 dB(A). Este valor es el obtenido si el trabajador estuviera en su vehículo durante 8 horas, mientras que el valor equivalente para dicho desplazamiento in itinere para dicho periodo es de 62,19 dB(A).

Los índices estadísticos obtenidos son los que se muestran en la tabla 17:

**Tabla 17**

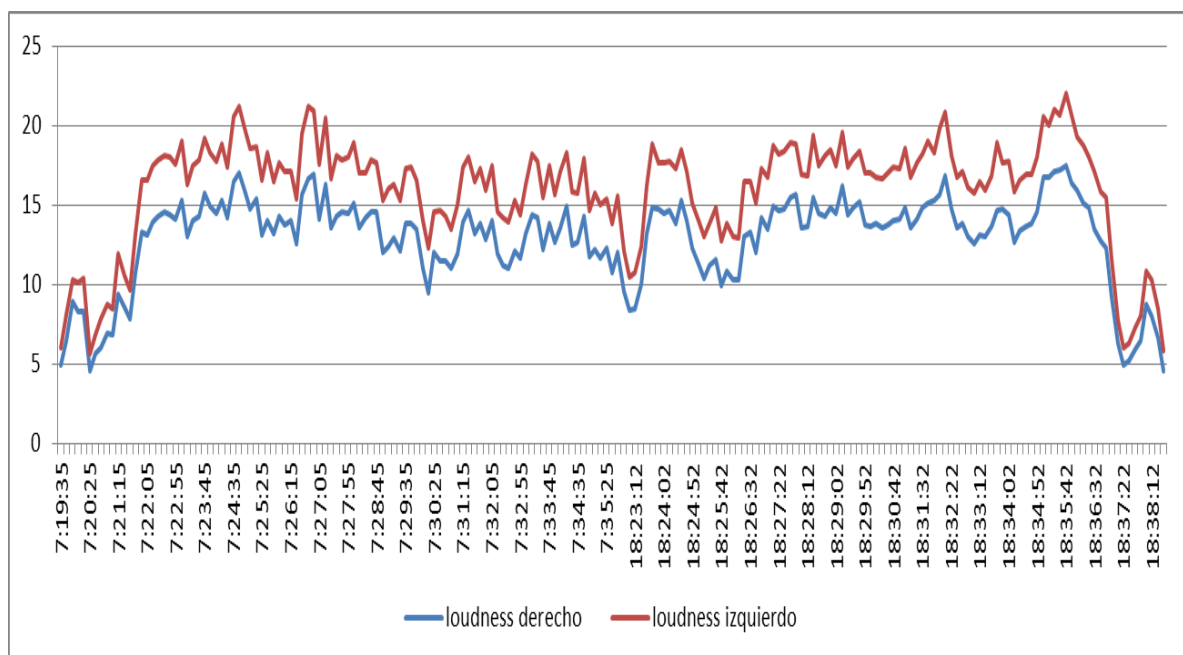
*Valores Estadísticos Obtenidos en dB(A) durante el Desplazamiento en un Día Concreto.*

Media	$\sigma$	L50	Var.	Máx	Mín	L90	L10	NC	TNI	NPL
72,34	4,87	74,31	23,74	78,26	54,10	62,73	76,26	13,54	86,87	84,44

Una vez obtenidos los parámetros básicos, a continuación en la figura 32 se presentan el estudio de loudness monoaural de ambos oídos, derecho e izquierdo.

**Figura 32**

*Comparativa Loudness Derecho e Izquierdo cada 10 Segundos*



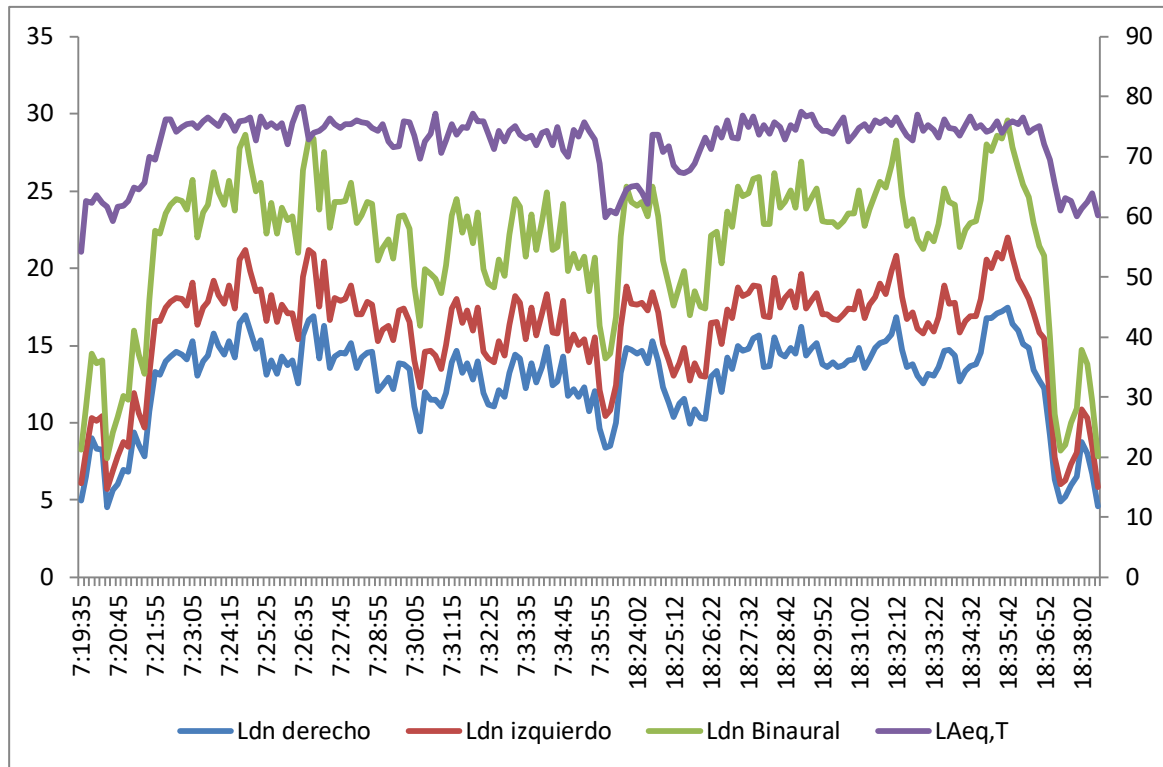
De la figura se desprende cierta similitud entre el loudness izquierdo y el loudness derecho dado el carácter difuso del entorno acústico del interior del coche. Los valores obtenidos de loudness, a excepción de los extremos de la figura

32 que corresponde a la zona por población, afirman que durante el desplazamiento in itinere existe una pérdida de confort.

De igual manera, se presenta ambos loudness y su combinación para dar como resultado el loudness binaural que es representado en la figura 33.

**Figura 33**

*Comparativa Loudness Derecho, Izquierdo, Binaural y Leq, en dB (A) cada 10 Segundos*



De la figura 33, se observa una buena correlación entre los valores de nivel equivalente y el loudness binaural. Los valores de loudness binaural muestran que existe una pérdida de calidad acústica o confort.

### 3.2.1.3 Conclusiones del experimento

En esta investigación se describe una evaluación preliminar sobre la molestia causada por el ruido en los desplazamientos in itinere de un trabajador, donde dicho estudio puede trasladarse a también a otros sectores laborales del transporte. Para estudiar dicha molestia, se realiza una campaña de mediciones en el interior de un vehículo en los trayectos de ida y vuelta del trabajo. Los datos fueron obtenidos mediante un sensor acústico autónomo capaz de proporcionar parámetros básicos y loudness tanto monaural como binaural.

Los resultados obtenidos indican que, en general, el trabajador en su desplazamiento in itinere o en el caso de que trabajase una jornada completa dentro del vehículo, se encuentra a niveles inferiores a los marcados por la normativa competente en materia de Prevención de Riesgos Labores, ya que se encuentra siempre por debajo de 80 dB (A). De esta manera, no es necesario el uso de dispositivos que atenúen el ruido. Al presentar los valores obtenidos por el sistema de medición cierta similitud a lo largo de la semana y de acuerdo con el R.D. 286/2006 (RDL 286/2006, de 10 de marzo), el valor de exposición semanal equivalente no es necesario calcularlo, aun así su valor es inferior a 87 dB(A), cumpliendo igualmente con el R.D 286/2006 (RDL 286/2006, de 10 de marzo). Sin embargo, los niveles subjetivos de molestia ocasionada por el ruido indican una posible pérdida de confort y de calidad acústica en aquellos trabajos en los que los desplazamientos se vean afectados por niveles de ruido.

Para enriquecer el modelo de evaluación de la molestia se considera necesario añadir otros parámetros psicoacústicos, como por ejemplo el sharpness, y que nos ayuden a obtener una imagen más completa del campo sonoro. Esto ha sido uno de los objetivos a cumplir para los trabajos de investigación de esta tesis mostrados en los apartados siguientes.



### 3.2.2 Evaluación del entorno sonoro exterior de una urbanización

#### 3.2.2.1 Descripción del experimento

Este caso de estudio ha sido publicado en la revista *Sensor* con el título de “Spatio-Temporal Analysis of Urban Acoustic Environments with Binaural Psycho-Acoustical Considerations for IoT-Based Applications” (Segura-Garcia et al., 2018).

En esta sección se presenta y analiza la aplicación de una red inalámbrica de sensores acústicos para evaluar la distribución espacial y la evolución temporal de un entorno acústico exterior, más concretamente una zona residencial. Para este experimento se realiza una campaña de mediciones instalando un grupo de nodos acústicos en varios balcones de una zona urbana de viviendas durante varias jornadas de manera continua. Mediante esta red de sensores se pretende estudiar el impacto acústico recibido por los ciudadanos en sus residencias, calculando parámetros acústicos básicos y complementándolos con psicoacústicos. Para ello, se propone el cálculo de la molestia acústica binaural simplificada con el uso de los parámetros psicoacústicos loudness y sharpness realizando una correlación entre ellos para validar dicha simplificación. Adicionalmente se realiza un análisis espacial mediante el método estadístico de Kriging.

En esta campaña de mediciones, el software del nodo acústico se prepara para el cálculo de loudness y sharpness binaural a partir de una señal binaural sintetizada previamente (ver sección 3.1.1.3 para más detalles). Cada nodo captura el sonido cada cierto tiempo, calculando además los parámetros en su lugar de emplazamiento y enviando los valores a una plataforma IoT, que está instalada en un servidor en la nube y que permitirá el análisis estadístico posterior, tanto temporal como espacial, mediante el método estadístico de Kriging.

La zona de estudio consistió en una urbanización cercana a la ciudad de Murcia. Esta urbanización está delimitada en su zona norte por la Autovía A7, por lo que cuenta con una posible afección por el ruido de tráfico. Esta zona de

urbanización es un complejo de 10 edificios con dos líneas de edificios paralelas. En general, se pueden separar tres entornos sonoros, uno más expuesto a la autovía afectada por tráfico denso, otro de tráfico suave de las calles interiores de la urbanización y otro cercano a una zona peatonal y un parque con ruido de actividades humanas.

**Figura 34**

*Localización Geográfica de la Zona de Estudio y Ubicación de los Nodos*



Cada bloque de edificio tiene aproximadamente 15 viviendas, contando cada edificio con 3 plantas, además de que cada vivienda posee un balcón. La red de sensores está compuesta por un total de 5 nodos distribuidos por diferentes edificios. Todos los nodos han sido desplegados en la fachada principal de cada edificio, tal y como se muestra en la figura 34 y figura 35. La localización fue elegida en los lugares donde puede existir más afección del ruido basadas en las

fuentes detectadas. Los nodos 1 y 2 fueron desplegados en el nivel más inferior o bajo, los nodos 3 y 5 se instalaron en segunda planta mientras que el nodo 4 se instaló en un primer piso.

**Figura 35**

*Despliegue Nodos Acústicos en las Viviendas*



Las distancias entre los distintos nodos vienen definidas en la Tabla 18

**Tabla 18***Distancia entre nodos desplegados en la urbanización*

	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5
Nodo 1	-				
Nodo 2	32,0 m	-			
Nodo 3	53,4 m	85,4 m	-		
Nodo 4	120,4 m	101,3 m	157,8 m	-	
Nodo 5	65,3 m	54,6 m	100,6 m	56,6 m	-

Todos los nodos han sido conectados a internet gracias a la tecnología IoT. Cada nodo se enlazó a un canal diferente en la plataforma ThingSpeak durante 8 horas. Las mediciones fueron captadas cada 10 segundos en cada nodo.

En la figura 36 se presenta un ejemplo de la visualización en la plataforma ThingSpeak.

**Figura 36**

*Ejemplo de Visualización de los Datos Obtenidos en la Monitorización de la Urbanización en la Plataforma ThingSpeak.*



El valor adicional que presenta este estudio está relacionado directamente con la evaluación de los parámetros psicoacústicos binaurales, obteniendo una estimación de la molestia binaural mediante una red inalámbrica de sensores acústicos. Para la estimación de molestia psicoacústica se procede a realizar una simplificación de la ecuación 42 por los siguientes motivos:

El cálculo de loudness y sharpness binaural se implementa de tal manera que su cálculo en tiempo real (para una ventana de 1 audio) tarda entre 5 y 6 s. Por razones computacionales se hace una primera aproximación con la plataforma hardware Raspberry Pi, quedando como una de las limitaciones de este trabajo de investigación y a la espera de poder trabajar con nodos más potentes. Adicionalmente a esas limitaciones, los parámetros roughness y

fluctuation strength están más relacionados con ruidos con picos, siendo la fuente de ruido que más afecta a la urbanización la del tráfico ocasionado por la autovía, y, por tanto, es una fuente que destaca por su continuidad y sin grandes alteraciones.

Por otro lado, analizando la fórmula propuesta por Zwicker y Fastl (1990), el mayor peso de la molestia es generada por el loudness. Sharpness también contribuye pero posee una relación lineal, mientras que roughness y fluctuation strength su contribución es inferior al ser valores que son en la ecuación de la molestia dividen dicho valor. Del mismo modo, se evaluaron roughness y fluctuation strength, junto con otro parámetro psicoacústico como es la tonalidad. La comparativa se lleva a cabo con una señal patrón, como es un tono puro, uno modulado, un ruido gaussiano y una grabación exterior, donde hay niños jugando y alguna motocicleta. Tal esto se muestra en la tabla 19.

**Tabla 19**

*Evaluación de la Contribución de Roughness y Fluctuation Strength según Señal Acústica*

	Señal			
	Senoidal (1kHz)	Diente de Sierra (1kHz)	Guassiano	Grabación exterior
$L_5$	55,20 soneGF	93,90 sone GF	95,40 soneGF	65,30 soneGF
$S_{max}$	2,23 acum	7,27 acum	8,33 acum	6,13 acum
$R_{max}$	1,08 asper	2,58 asper	5,27 asper	12,35 asper
$F_{max}$	0,11 vacil	0,14 vacil	0,16 vacil	0,59 vacil
$w_{fr}$	0,33	1,57	1,14	3,13
$w_s$	0,23	2,78	3,33	2,06

De los resultados se desprende que en la mayoría de los casos la contribución de la componente  $w_{fr}$  definida en la ecuación 44 es inferior a las de loudness y sharpness que forman parte de la componente de  $w_s$ , ecuación 43.

Por tanto, la ecuación 42 quedaría simplificada a:

$$PA = N_5 \cdot (1 + w_s) \tag{45}$$

### 3.2.2.2 Resultados y discusión del experimento

#### 3.2.2.2.1 Mediciones en entorno exterior

Tal y como se ha comentado anteriormente, para contemplar las molestias provocadas por sonidos de alta frecuencia para este estudio, se ha implementado en el software del nodo acústico el parámetro psicoacústico sharpness, según definición en la sección 2.4.3.3. Teniendo en cuenta las ecuaciones 6, 32 y 35 que corresponden al nivel de presión sonora ( $L_p$ ), loudness binaural ( $N_{bin}$ ) y sharpness binaural ( $S_{bin}$ ) se presentan los valores estadísticos para cada nodo en forma valor promedio (desviación típica) en el caso de los parámetros psicoacústicos, mientras que para el nivel de presión corresponde a su valor equivalente, tal y como se muestra en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Valores Estadísticos Promedio y Desviación Típica, entre Paréntesis, de cada Nodo en Todo el Periodo de Estudio sobre la Molestia en una Urbanización*

	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5
$L_p$ (dB(A))	38,54 (4,84)	50,09 (12,45)	39,73 (1,93)	51,74 (1,24)	53,72(14,02)
$N_{bin}$ (Sones)	4,53 (2,40)	12,83(14,91)	4,95 (0,74)	11,34 (0,98)	17,39 (15,95)
$S_{bin}$ (acum)	1,74 (0,23)	1,85 (0,40)	1,53 (0,09)	1,44 (0,08)	2,04 (0,18)

Las ubicaciones más cercanas al tramo de autovía, ofrecen los valores más altos de nivel de presión, mientras que el nodo 1, situado en una zona más protegida del ruido de tráfico, presenta el nivel de presión más bajo. El nodo 2 se encuentra en una zona intermedia entre las dos delimitadas, de ahí que presente

valores altos de varianza con respecto al resto de nodos. La ubicación 5 corresponde al lugar del nodo más expuesto al ruido del tráfico. De este modo, la varianza de los valores temporales para el  $L_p$ ,  $N_{bin}$  y  $S_{bin}$  es la más baja.

Con el objetivo de realizar el análisis de la evolución temporal de los parámetros, se aplica un estudio de la correlación temporal de las series obtenidas mediante el uso de la correlación de Pearson. Los resultados se muestran en la tabla 21. Es importante indicar que esta correlación se calcula usando la serie temporal completa, no del valor medio, con el objetivo de encontrar las relaciones entre  $L_p$ ,  $N_{bin}$  y  $S_{bin}$ .

**Tabla 21**

*Matriz de Correlación de Pearson para  $L_p$ , Loudness Binaural y Sharpness binaural en una Urbanización*

	Nodo 1			Nodo 2			Nodo 3		
	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_p$	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_p$	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_p$
$N_{bin}$	1,00	0,15	0,86**	1,00	0,87**	0,97**	1,00	0,63**	0,96**
$S_{bin}$	0,15	1,00	0,40**	0,87**	1,00	0,89**	0,63**	1,00	0,58**
$L_p$	0,86**	0,40**	1,00	0,97**	0,89**	1,00	0,96**	0,58**	1,00
	Nodo 4			Nodo 5					
	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_p$	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_p$			
$N_{bin}$	1,00	0,26**	0,21	1,00	0,30	0,88**			
$S_{bin}$	0,26**	1,00	0,96**	0,30	1,00	-0,02			
$L_p$	0,21	0,96**	1,00	0,88**	-0,02	1,00			

*Nota:* \*\* :  $p < 0,01$  p: nivel de significación.

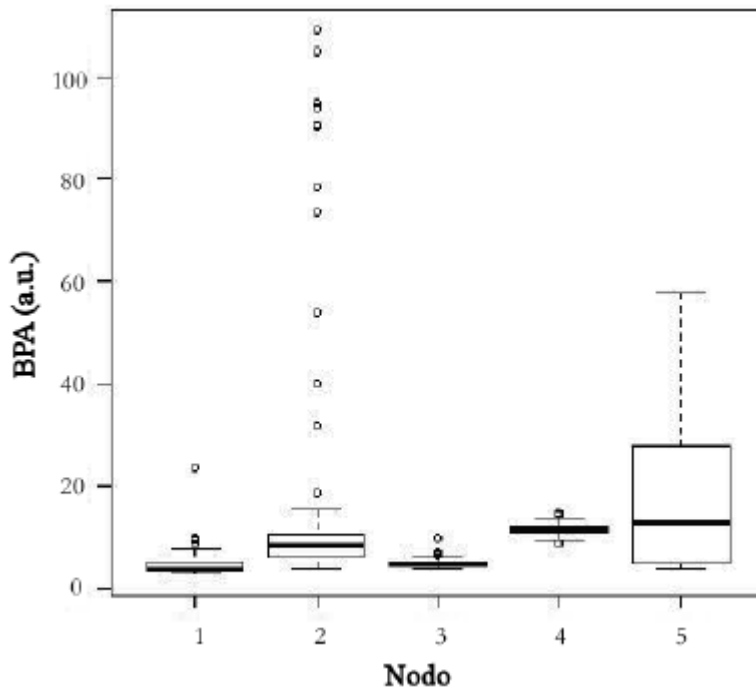
La tabla 21 muestra la alta relación entre el nivel de presión sonora y loudness binaural a excepción del nodo 4, mientras que en el caso de sharpness hay únicamente relación con el nivel de presión sonora en los nodos 2 y 4.



Finalmente, en la figura 37 se presentan los resultados del análisis descriptivo de la molestia binaural en cada localización, siendo *BPA* la molestia binaural (ver ecuación 45).

**Figura 37**

*Diagrama de Bloques de la Molestia Binaural en cada Localización del Entorno de la Urbanización*



En la figura 37, se observa para el nodo 2 valores extremos importantes. Al ser una planta baja, se ve más afectado por las actividades de ocio de los vecinos de la urbanización que provocan altos niveles en momentos concreto del día.

#### 3.2.2.2.2 Modelado y validación cruzada de los conjuntos de medida.

Para realizar una validación del número de puntos seleccionados y de los valores para la modelización lineal, se utilizó un algoritmo de validación cruzada

de tipo "Leave-One-Out-Cross-validation" (LOOCV) mediante el paquete de software R-Studio (con el método de "modelo lineal") aplicado a todo el conjunto de mediciones promediadas en el tiempo correspondientes a las ubicaciones espaciales.

El método LOOCV es un método iterativo que se inicia empleando como conjunto de entrenamiento todas las observaciones disponibles excepto una, que se excluye para emplearla como validación. Si se emplea una única observación para calcular el error, este varía mucho dependiendo de qué observación se haya seleccionado. Para evitarlo, el proceso se repite tantas veces como observaciones disponibles, excluyendo en cada iteración una observación distinta, ajustando el modelo con el resto y calculando el error con dicha observación. Finalmente, el error estimado por el LOOCV es el promedio de todos los  $i$ -errores calculados. Además, con este método se reduce la variabilidad, ya que al final del proceso de LOOCV se acaban empleando todos los datos disponibles tanto como entrenamiento como validación. Al no haber una separación aleatoria de los datos, los resultados de LOOCV son totalmente reproducibles.

**Tabla 22**

*Resumen de la Prueba de Validación Cruzada del Promedio Espacial usando Leave-One-Out con un Método de Modelo Lineal.*

	<i>BPA vs. <math>N_{bin} + S_{bin}</math></i>			<i>BPA vs. <math>L_p</math></i>		
Test%	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE
Training%						
20%/70%	1,9719	0,8255	1,8525	4,1603	0,4163	3,1738
40%/60%	3,0859	0,9893	1,9617	4,8855	0,7218	3,3964

En la tabla 22 se presentan los resultados de este test con las medidas de BPA promediadas, donde RMSE (Root Mean Squared Error) es el error cuadrático medio, R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación, y MAE (Maximum Absolute Error) es el Error absoluto máximo. Esta predicción se realiza mediante un modelo lineal para el % establecido en la primera columna (%test/%training) con el valor medio

del BPA en cada lugar. Según la tabla 22, la selección de un conjunto de validación con el 60% de los nodos es suficiente para la red de equipos de medición.

La tabla 23 muestra los resultados del test de correlación cruzada para predecir los valores temporales de BPA en cada localización.

**Tabla 23**

*Resumen de la Prueba de Validación Cruzada Temporal Leave-One-Out con un Método de Modelo Lineal en cada Ubicación*

	Test% Training%	BPA vs. $N_{bin} + S_{bin}$			BPA vs. $L_p$		
		RMSE	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE
Nodo1	10%/90%	0,1486	0,9966	0,1017	1,4697	0,6646	0,8459
	20%/80%	0,1053	0,9984	0,0786	1,5376	0,6491	0,8508
	30%/70%	0,1633	0,9964	0,1090	1,6677	0,6202	0,9639
	40%/60%	0,1671	0,9886	0,1192	0,8162	0,7285	0,5695
	50%/50%	0,1115	0,9987	0,0824	1,9067	0,6212	1,1335
Nodo2	10%/90%	1,9266	0,9927	1,2462	7,2511	0,8973	5,3961
	20%/80%	1,9589	0,9939	1,2616	7,8270	0,9025	5,7730
	30%/70%	2,0966	0,9933	1,3753	7,6228	0,9119	5,9002
	40%/60%	1,7522	0,9918	1,2066	6,8213	0,8759	5,1862
	50%/50%	2,4489	0,9849	1,4635	8,6762	0,8098	5,877
Nodo3	10%/90%	0,0392	0,9960	0,0209	0,2068	0,8892	0,1478
	20%/80%	0,0460	0,9969	0,0287	0,2445	0,9109	0,1722
	30%/70%	0,0456	0,9971	0,0298	0,2753	0,8931	0,1912
	40%/60%	0,0516	0,9965	0,0291	0,2873	0,8868	0,2036

	50%/50%	0,0429	0,9979	0,0280	0,2988	0,8924	0,2026
	10%/90%	0,0945	0,9914	0,0367	0,5353	0,7214	0,3166
	20%/80%	1,175e-15	1,000	7,772e-16	0,3548	0,8542	0,2496
Nodo4	30%/70%	0,1060	0,9907	0,0442	0,5217	0,7693	0,2925
	40%/60%	0,1180	0,9855	0,0492	0,5771	0,6487	0,3158
	50%/50%	7,390e-16	1,000	3,075e-16	0,4369	0,7464	0,2995
	10%/90%	0,8829	0,9975	0,7682	13,8890	0,3949	9,1463
Nodo5	40%/60%	0,9831	0,9974	0,7740	16,1680	0,2923	11,4480
	50%/50%	0,6828	0,9990	0,6348	13,9270	0,5045	0,2925

Esta predicción se realiza mediante un modelo lineal según porcentaje de prueba establecido en la primera columna (Test% / Training%). Se realiza toda la serie temporal en cada ubicación y partir de los resultados que se han obtenido, se puede predecir los valores con el modelo con el 50% de las mediciones, tal y como muestran los valores *RMSE* y *MAE*.

Hay que destacar el nodo 4, donde se obtiene valores muy bajos para el conjunto de entrenamiento de 80% y 50%, debido a una variabilidad baja en las mediciones de acuerdo con la tabla 19. Esto permite una buena predicción del  $L_p$  y *BPA*, a partir de loudness y sharpness binaural.

Los resultados obtenidos de ambas tablas, 22 y 23, demuestran que loudness y sharpness binaural poseen mejor correlación con la molestia que el nivel de presión sonora.

### 3.2.2.2.3 Análisis estadístico espacial mediante método de Kriging.

Esta investigación también tiene como objetivo evaluar la distribución espacial del entorno acústico exterior de la urbanización. Entre los principales métodos de estadística espacial nos encontramos con el método de la Distancia

Inversa Ponderada (IDW), el método Spline y el método Kriging, que fueron presentados en el apartado 3.1.2.1.

La elección Kriging se basa en un estudio llevado a cabo por Wong et al. (2004). En dicha investigación se analizan los diferentes métodos de interpolación obteniendo en Kriging un sesgo mínimo aplicado a la interpolación espacial de la calidad del aire, con coeficientes de regresión cercanos a 1. El valor  $R^2$  de Kriging fue el más bajo entre los tres métodos para este subconjunto limitado de datos, siendo estadísticamente significativos con  $p < 0,05$ , los tres coeficientes. Los coeficientes del método vecino más cercano y de promediación espacial no son significativamente diferentes entre sí, utilizando un intervalo de confianza del 95%. Sin embargo, son significativamente diferentes ambos con el coeficiente del método Kriging. En general, se considera que Kriging produce las estimaciones más realistas de los valores entre indicadores. El comportamiento de la predicción espacial depende principalmente de la estructura espacial de los sensores distribuidos.

El objetivo de este modelo propuesto es la predicción de  $Y(x_0)$  en cualquier localización  $x_0$ , en especial aquellas que estén en el conjunto de validación, y siendo  $Y(x_0)$ , la molestia binaural calculada a partir de la ecuación simplificada en la localización seleccionada.

Por tanto, se define el conjunto de datos como  $\{Y(x), x \in D\}$ , donde  $D$  son todas las localizaciones del conjunto modelado. De esta forma,  $Y(x)$  viene modelado como una función de tendencia de las covariables, ya que los informes de molestias presentan información del conjunto de covariables. Por tanto, ese modelado de  $Y(x)$  se adapta al proceso que explica su variabilidad, junto con un error aleatorio que es debido a la variabilidad a corto plazo.  $Y(x)$  se expresa como:

$$Y(x) = \mu(x) + \delta(x) \quad (46)$$

donde  $\mu(x) = E[Y(x)]$  y  $\delta(x)$  es un proceso gaussiano estacionario con promedio cero, cuya caracterización de la dependencia espacial viene dada por el variograma (Dibiasi y Bowman, 2001):

$$2\gamma(h) = V[Y(x+h) - Y(x)] = \text{Var}[\delta(x+h) - \delta(x)] \quad (47)$$

donde Var es la varianza y  $h$  es un offset.

Este variograma representa la función principal del método de Kriging, el cual presenta diferentes procedimientos como kriging simple, kriging ordinario, kriging universal, kriging indicador, co-kriging, etc, atendiendo a diferentes aspectos estadísticos considerados en el conjunto de covariables.

De los diferentes procedimientos se hace uso del más común, Kriging ordinario. Por consiguiente, el variograma se ha calculado usando Kriging ordinario y un modelo esférico, con el paquete estadístico RStudio para el ajuste del variograma. A continuación, en la figura 38 se muestra la representación espacial de los valores obtenidos para toda la zona de estudio tras la aplicación del método.

**Figura 38**

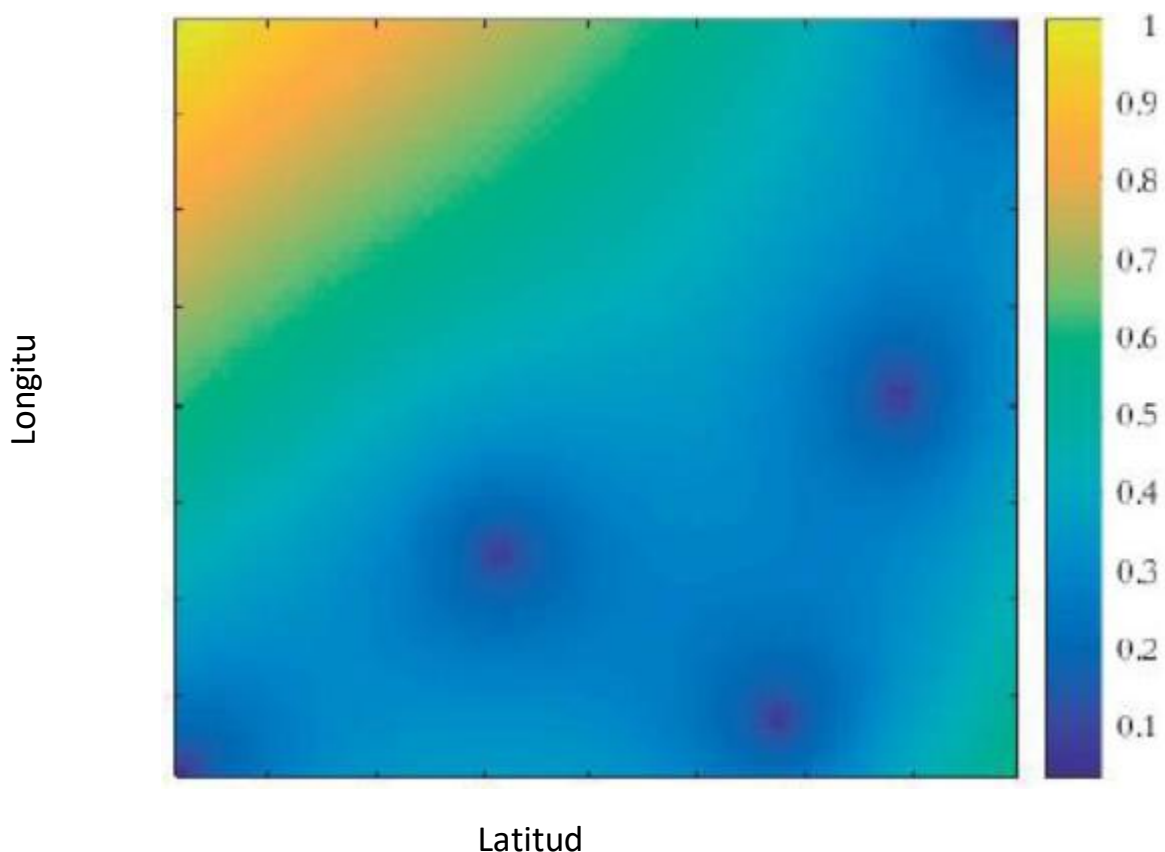
*Predicción Estadística Espacial de la Molestia Binaural con el Método de Kriging Esférico*



En la figura 38 se muestra la distribución espacial de la molestia binaural en la zona residencial. Adicionalmente, el programa también proporciona la distribución de error relativo obtenido en la estimación de Kriging. Se presenta la distribución estadística espacial del error relativo en la figura 39. El rango de error estimado es [0,9525, 24,2659], el cual es un rango mayor comparado con la molestia binaural obtenida de las medidas, encontrando error mayor en la zona próxima a la autopista.

**Figura 39**

*Distribución Estadística Espacial del Error Relativo Producido en la Estimación por el Método de Kriging Usando Valores Medios de Molestia Binaural*

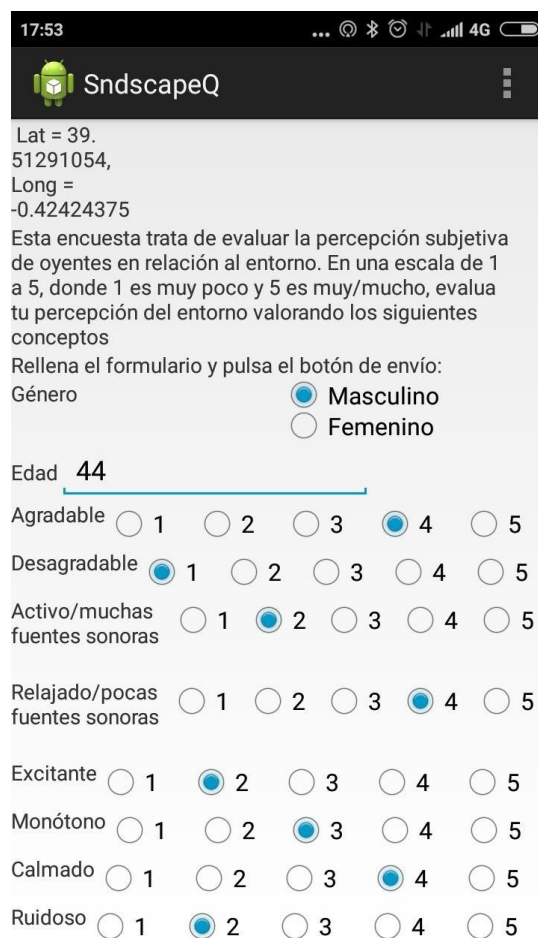


#### 3.2.2.2.4 Estudio subjetivo sobre la molestia mediante encuesta a vecinos

La molestia es una respuesta subjetiva, de ahí la necesidad de realizar una breve encuesta entre un grupo de personas relacionadas con este entorno. Para recoger datos de dicha encuesta, se creó una aplicación móvil basada en Android, que permite localizar la respuesta de cada persona que responde a la encuesta, registrándose las coordenadas GPS con la misma aplicación. En la figura 40 se muestra el interfaz de usuario de la aplicación realizada mostrando detalles sobre el formulario de preguntas realizado.

**Figura 40**

*Encuesta de Evaluación de la Percepción Subjetiva a través de Aplicación Android*



17:53

SndscapeQ

Lat = 39.  
51291054,  
Long =  
-0.42424375

Esta encuesta trata de evaluar la percepción subjetiva de oyentes en relación al entorno. En una escala de 1 a 5, donde 1 es muy poco y 5 es muy/mucho, evalúa tu percepción del entorno valorando los siguientes conceptos

Rellena el formulario y pulsa el botón de envío:

Género  Masculino  
 Femenino

Edad

Agradable  1  2  3  4  5

Desagradable  1  2  3  4  5

Activo/muchas fuentes sonoras  1  2  3  4  5

Relajado/pocas fuentes sonoras  1  2  3  4  5

Excitante  1  2  3  4  5

Monótono  1  2  3  4  5

Calmado  1  2  3  4  5

Ruidoso  1  2  3  4  5



La encuesta trata algunos aspectos sociales como edad y sexo y otros más relacionados con la acústica, más concretamente con la valoración de algunos aspectos relacionados con el paisaje sonoro, siguiendo el protocolo sueco Soundscape-Quality Protocol (Axelsson et al., 2012), que evalúa la calidad afectiva percibida mediante los siguientes ocho adjetivos: Activo (muchas fuentes sonoras), Relajado (pocas fuentes sonoras), Agradable, Desagradable, Calmado, Ruidoso, Monótono y Excitante tal y se presenta en el estudio de Jeon et al. (2018).

La encuesta se basa en responder del 1 al 5 los valores anteriormente mostrados, siendo 1 muy bajo y 5 muy alto. El resumen de los resultados de la encuesta para este entorno es presentado en la tabla 24.

**Tabla 24**

*Resultados de la Encuesta Realizada en el Entorno de la Urbanización*

	Resultados Sociales
% Sexo( Varón/ Mujer)	46/54
% Edad (18-30, 30-45, 45-55, 55-65)	8/69/23/0
	Valor Medio / Desviación Estándar
Activo	2,11/0,86
Relajado	4,08/0,86
Agradable	3,96/0,71
Desagradable	2,10/0,58
Calmado	4,08/0,76
Ruidoso	2,23/1,09
Monótono	3,84/0,80
Excitante	1,67/0,65

Los valores obtenidos son altos para relajado, calmado y agradable lo cual significa que aún teniendo cercana la autovía, es un ruido que los vecinos toleran que, junto con el ruido generado por las actividades de humanas, no supone molestia significativa para el vecindario.

### 3.2.2.3 Conclusiones del experimento

En este estudio se presenta el despliegue de una red de sensores inalámbricos en el entorno de una urbanización. Los nodos del sistema recogen información del sonido ambiente y calculan los parámetros acústicos básicos y psicoacústicos.

Se propone una versión simplificada del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker, para el cálculo de la molestia subjetiva en cada localización. A partir del valor de nivel de presión sonora y los parámetros psicoacústicos binaurales se realiza un análisis estadístico temporal de las diferentes ubicaciones.

Además, se lleva a cabo un estudio de correlación entre estos parámetros, mostrando que el loudness binaural y el nivel de presión sonora correlan bien en casi todas las localizaciones al 99% de nivel de significación. Y aunque el sharpness binaural se relaciona bien con el nivel de presión sonora, se observan valores menores del coeficiente de Pearson.

Seguidamente, se realiza un análisis estadístico espacial usando la técnica de Kriging Ordinario. El error de la estimación de Kriging se mantiene acotado dentro de la región entre los puntos de medida por debajo del 25% y crece fuera de esta región.

Finalmente, se ha hecho un pequeño estudio subjetivo, de donde se desprende que las fuentes de ruido existentes no generan molestia en los vecinos de la zona residencial. De los resultados obtenidos se concluye que el modelo simplificado propuesto de molestia binaural se puede considerar como válido.

### **3.2.3 Evaluación del entorno sonoro de un campus universitario**

#### *3.2.3.1 Descripción del experimento*

Este trabajo ha sido publicado en la revista Sustainability con el título de “Long-Term Temporal Analysis of Psychoacoustic Parameters of the Acoustic Environment in a University Campus Using a Wireless Acoustic Sensor Network” (Montoya-Belmonte y Navarro, 2020).

En esta investigación se presenta un caso de uso de una red inalámbrica de sensores acústicos para la evaluación del campo sonoro en una campaña de larga duración sobre el impacto acústico generado por el desarrollo de las actividades propias de un entorno universitario. El objetivo principal es la monitorización y posterior análisis de la molestia producida por las diferentes fuentes sonoras en el campus de los Jerónimos de la Universidad Católica de Murcia.

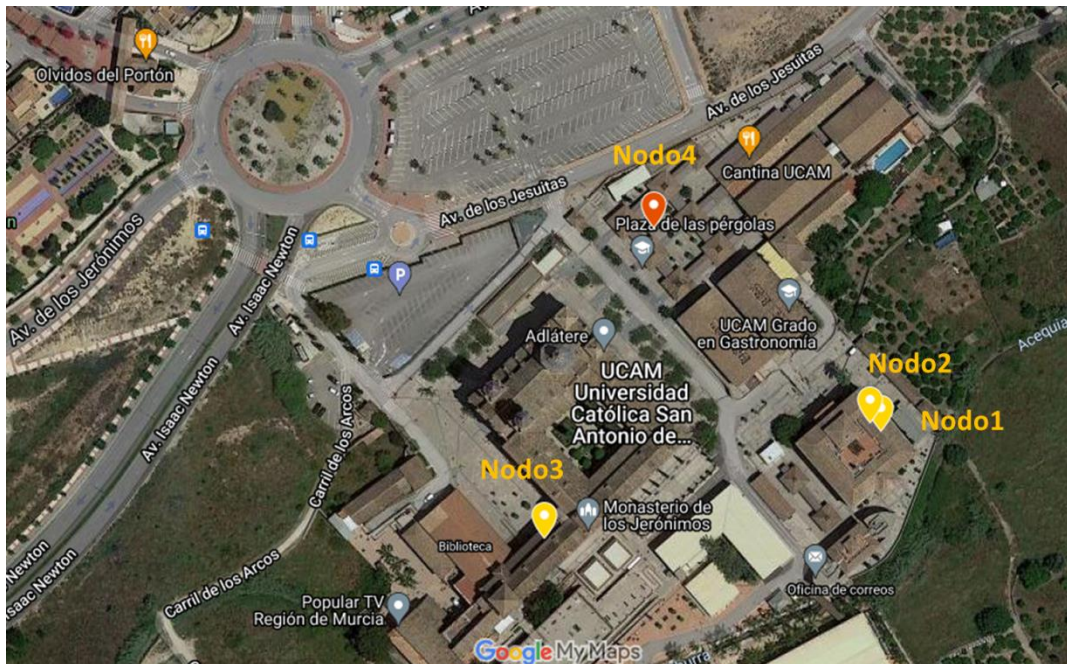
Los campus de las diferentes universidades han ido creciendo hasta convertirse en pequeñas ciudades, con las mismas necesidades que los grandes núcleos, y por tanto engloban grandes infraestructuras, aumento de población y muchos servicios a la comunidad universitaria. Para lograr un crecimiento sostenible es necesario tener en cuenta diferentes aspectos medioambientales, incluido el entorno acústico. Existen algunas publicaciones anteriores que exploran el ambiente acústico en los campus universitarios, dado que la calidad de vida y el rendimiento académico de los estudiantes pueden verse influidos por este factor.

Según Tristán Hernández et al. (2018), la principal fuente de ruido es la generada por los propios alumnos en sus actividades diarias y se suele amplificar en zonas sin tratamiento acústico como las salas comunes y los pasillos. Se han desarrollado diferentes investigaciones en instalaciones universitarias como el acondicionamiento y aislamiento acústico de las aulas (Hodgson y Nosal, 2002), las molestias por ruido en despachos y departamentos del personal (Segura et al., 2018), así como un estudio comparativo relacionado con el ruido en dos campus universitarios (Rauf et al., 2015).

En este trabajo se ha desplegado una red de sensores distribuidos a lo largo del campus universitario, tanto en entornos interiores como exteriores. Los nodos acústicos se ubican tal y como se presenta en la figura 41 y 42 y en la tabla 25. En concreto, la zona exterior es un lugar concurrido, donde el personal y los estudiantes utilizan para el descanso o la realización de actividades especiales (ferias, demostraciones de congresos...) en las que puede participar cualquier miembro de la comunidad universitaria. El resto de los nodos están en el interior, en particular, en una sala de profesores, en el hall principal de la universidad y en un aula de un pabellón.

**Figura 41**

*Localización de los Nodos en el Campus de la Universidad Católica San Antonio Murcia.*



**Figura 42**

*Despliegue Nodos Acústicos en Campus de la Universidad Católica San Antonio Murcia  
a) Nodo 3 y b) Nodo 4*



**Tabla 25**

*Ubicación y Localización de los Nodos Desplegados en la Red de Senores en el Campus de Universidad Católica de San Antonio Murcia*

Nodo	Ubicación	Localización
1	Sala de Profesores	Interior
2	Aula	Interior
3	Entrada Monasterio	Interior
4	Zona Pérgolas	Exterior

Las fuentes sonoras son externas (entorno de la universidad) e internas de distinta naturaleza como pueden ser naturales (movimiento de sillas, suelas de los zapatos, el propio edificio...), antropológicas (los alumnos al hablar, profesor al dar la lección...) y tecnológicas (aire acondicionado, proyector...).

La campaña de medición ha sido realizada durante nueve meses, incluyendo tres meses en los que se estableció el estado de emergencia debido a la pandemia COVID-19 y la universidad empezó a impartir clases en formato online, aunque algunos servicios críticos, por ejemplo, los servicios administrativos y de mantenimiento se mantuvieron a su actividad habitual.

Los datos obtenidos en las campañas de medición se envían a una plataforma software en la nube, donde son almacenados para su posterior análisis estadístico. Además, permite la representación de mapas de ruido y gráficas históricas de los datos de los equipos.

### *3.2.3.2 Resultados y discusión del experimento*

En esta sección se analizan y se discuten los datos obtenidos con la WASN durante la campaña de medición. En primer lugar, se resumen los resultados tras el despliegue en cada una de las ubicaciones de los nodos. A continuación, se profundiza en aquellos nodos con nivel de molestia más alto, uno en el exterior y otro en el interior.

Durante el desarrollo del despliegue tienen lugar dos escenarios diferentes. En el primero de estos escenarios, la universidad desarrolla su actividad en condiciones habituales: clases presenciales, actividades administrativas, etcétera. A este periodo se la denomina periodo regular. El segundo escenario se desarrolla del 16 de marzo al 15 de mayo, el periodo en el que comienza la pandemia y la formación pasa a formato online.

3.2.3.2.1 Resultado general del despliegue de sensores

La Tabla 26 presenta un resumen de los resultados de  $L_{A,eq}$ , loudness binaural ( $N_{bin}$ ) y sharpness binaural ( $S_{bin}$ ) de cada localización en el periodo regular. En esta tabla 26, los valores obtenidos tras la medición de largo plazo se describen mediante parámetros estadísticos, siendo el valor denotado por media, el nivel de presión equivalente en el caso de  $L_{A,eq}$  (ecuación 2.4.2.2.1) y la media aritmética para el caso de los valores psicoacústico.  $\sigma$  es la desviación estándar, mientras que  $L_N$  corresponde con percentiles, tal y como se describe en el apartado 2.4.2.3.1. El valor  $L_{dif}$  descrito corresponde a la diferencia de los valores percentiles de  $L_{90}$  menos  $L_{10}$ .

**Tabla 26**

*Valores Obtenidos por la Red de Sensores en el Periodo Regular en el Campus de la Universidad Católica San Antonio Murcia*

	Nodo 1			Nodo 2			Nodo 3			Nodo 4		
	$L_{Aeq}$	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_{Aeq}$	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_{Aeq}$	$N_{bin}$	$S_{bin}$	$L_{Aeq}$	$N_{bin}$	$S_{bin}$
Media	37,1	3,3	1,9	39,9	4,2	1,6	52,5	10,5	1,6	43,9	5,8	1,7
$\sigma$	7,3	3,0	0,2	7,0	3,6	0,1	7,9	5,9	0,2	7,5	3,9	0,1
$L_5$	30,5	1,5	1,6	34,3	1,9	1,5	43,7	4,9	1,4	35,9	2,6	1,5
$L_{10}$	30,8	1,5	1,7	34,4	1,9	1,5	44,0	5,0	1,4	36,3	2,7	1,5
$L_{50}$	33,7	1,8	2,0	38,1	3,2	1,6	51,0	8,7	1,6	41,6	4,3	1,6
$L_{90}$	47,2	6,6	2,1	48,9	7,2	1,7	63,7	18,7	1,9	55,3	11,1	1,8
$L_{dif}$	16,4	5,1	0,4	14,5	5,2	0,2	19,7	13,7	0,4	19,0	8,4	0,3

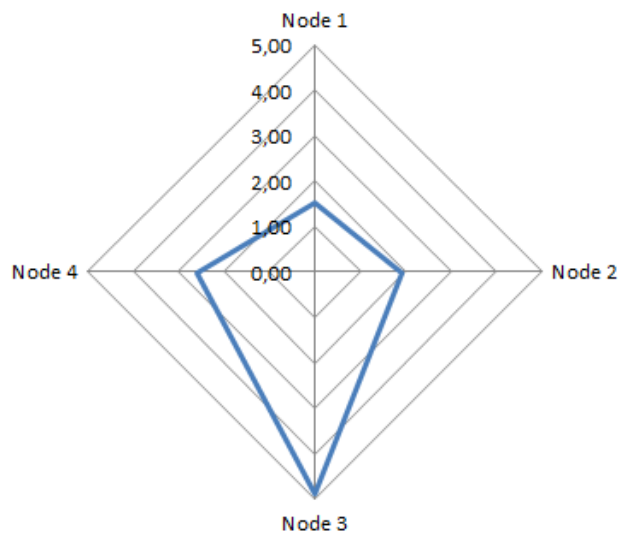
Se observa en la tabla 26 que el nodo 3 (interior) es el nodo con mayor valor de presión sonora equivalente, concretamente 52,5 dB(A). Esta localización es una zona bastante concurrida, ya que además de ser entrada principal de la universidad, es donde se encuentran las oficinas administrativas. Además, el nodo está situado en un largo pasillo del antiguo monasterio con un techo alto que aporta una alta reverberación. Otro dato que se desprende de la tabla es que el segundo nodo con mayor presión sonora equivalente es el nodo 4, con un valor de 43,9 dB(A). Este nodo se encuentra en una zona exterior del campus, un área de descanso frecuentada por el alumnado en su tiempo libre. Por otra parte, los

nodo 1 y 2 son zonas más tranquilas que corresponden a la sala de profesores y a un aula de tamaño normal de 50 m<sup>2</sup>, respectivamente.

De manera análoga al nivel de presión sonora equivalente, se observa que los valores superiores de loudness binaural corresponde a los nodos 3 y 4, con un valor de 10,5 sones y 5,8 sones, respectivamente. Por su parte, los valores de sharpness binaurales son similares en todos los nodos y muestran que las frecuencias altas no afectan mucho a la molestia psicoacústica, debido al poco contenido energético de las fuentes sonoras en esa banda de frecuencias. Por lo tanto, la evaluación de la molestia binaural se puede realizar de la misma forma al caso 3.2.2, realizando la simplificación de la componente *wf*. Los valores obtenidos de molestia binaural son expuestos en la figura 43.

#### Figura 43

*Representación de los Valores de Molestia Binaural en cada Nodo en el Despliegue de una Red de Sensores Inalámbricos en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia*



La figura 43 muestra que la molestia binaural que corresponde con la entrada principal al monasterio (nodo 3) es de 4,9. Al igual que ocurre con los

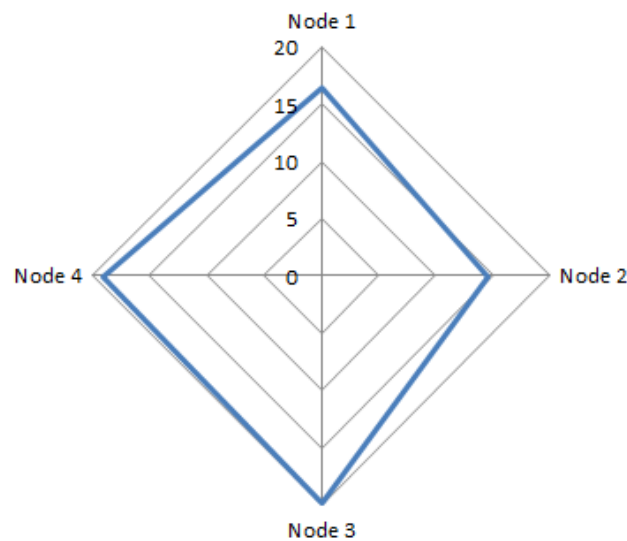


valores de loudness y el nivel de presión equivalente, el entorno de las pérgolas es el segundo con mayor valor de molestias binaural, con un valor de 2,6. Finalmente, los valores inferiores de molestia binaural corresponden al aula y tienen un valor de 1,9, mientras que en la sala de profesores es de 1,5.

Otro término que es analizado de la tabla 26 es el  $L_{dif}$ , quedando dichos valores representados en la figura 44:

**Figura 44**

*Representación de la Diferencia entre los Percentiles  $L_{90}$  y  $L_{10}$  de cada Nodo en el Despliegue de una Red de Sensores Inalámbricos en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia*

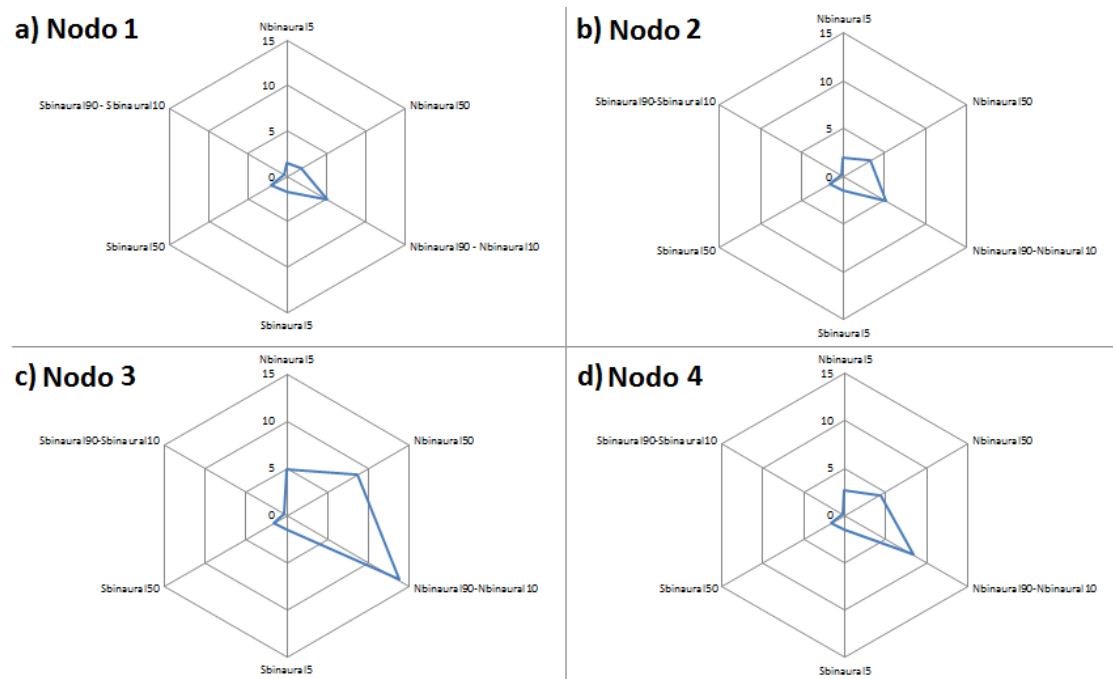


La figura 44 indica que la zona donde menor es la homogeneidad de nivel de presión sonora es la zona del nodo 3 y 4 con una diferencia de alrededor de 20 dB(A), y resultando para las zonas restantes un menor rango de valores, alrededor de 15,5 dB(A).

Para analizar la influencia de cada parámetro en la molestia se representan en la figura 45, mediante un gráfico radial, los valores de los percentiles de loudness y sharpness binaural.

**Figura 45**

*Representación de Valores de los Parámetros Psicoacústicos: Percentil de Loudness Binaural 5, 50 y Diferencia 90-10, Percentil de Sharpness Binaural 5, 50 y Diferencia 90-10 en cada Nodo desde (a) para el Nodo 1 hasta (d) para el Nodo 4 en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia*



La figura 45 presenta grandes valores en la diferencia del loudness binaural 90 y 10 y en el percentil 50, mostrándose de esta manera su correlación con la molestia. La figura 45d, correspondiente al nodo 4, presenta un menor valor de Loudness Binaural 50 y se relaciona con una menor molestia binaural de dicho nodo.

Los valores de los percentiles de sharpness binaural no muestran correlación clara con la molestia binaural en este caso. Como recomendación para mejorar la sostenibilidad acústica de estas zonas, se deberían realizar acciones

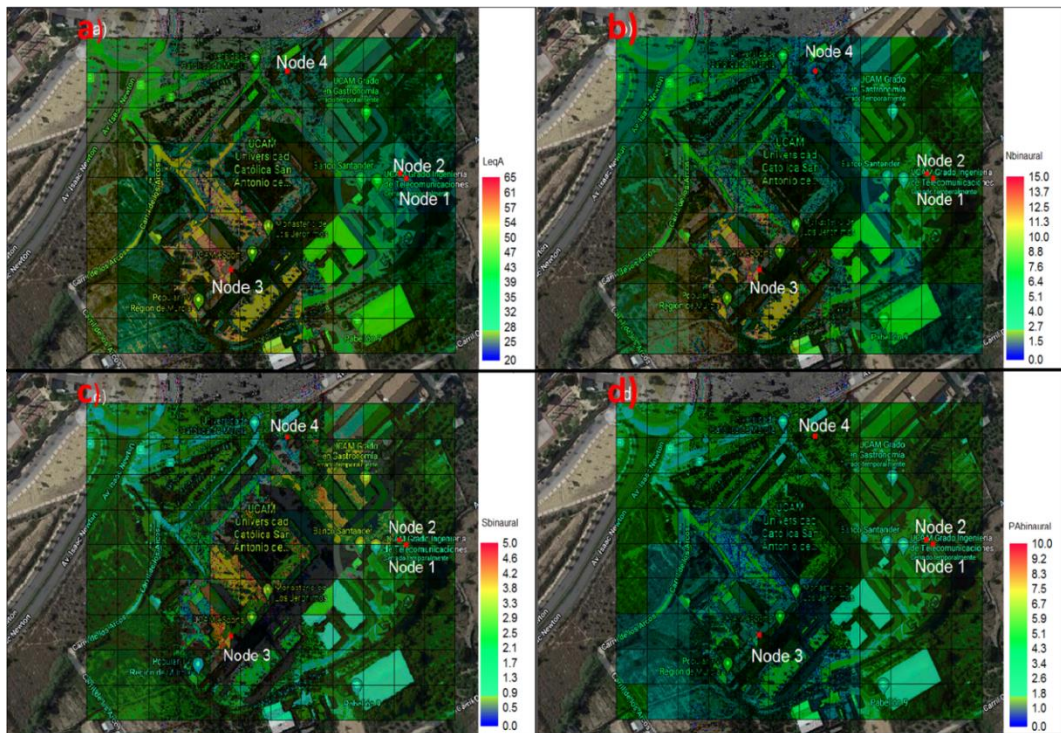
para disminuir los niveles máximos de ruido y crear un paisaje sonoro con fuentes sonoras que presentan menor variabilidad de niveles.

El almacenamiento de los datos en una plataforma basada en la nube permite también realizar análisis estadísticos espaciales utilizando un método de interpolación (Alsina-Pagès et al., 2019). En este estudio se realiza un análisis de la autocorrelación espacial, siendo Kriging el método para obtener un mapa de ruido completo del campus. Mediante la técnica ordinaria de Kriging se calculan las predicciones del nivel de presión equivalente y los valores medios de los parámetros psicoacústicos de la Tabla 26 en las diferentes ubicaciones.

En la figura 46 se presenta la distribución espacial de diferentes parámetros:

**Figura 46**

*Mapa de Ruido Aplicando la Interpolación Espacial de Kriging, a partir de los Valores de la Tabla 26 y la Molestia Binarual Obtenidos en la Monitorización en el Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia a)  $L_{Aeq}$  b)  $N_{bin}$  c)  $S_{bin}$  d) Molestia Binaural*



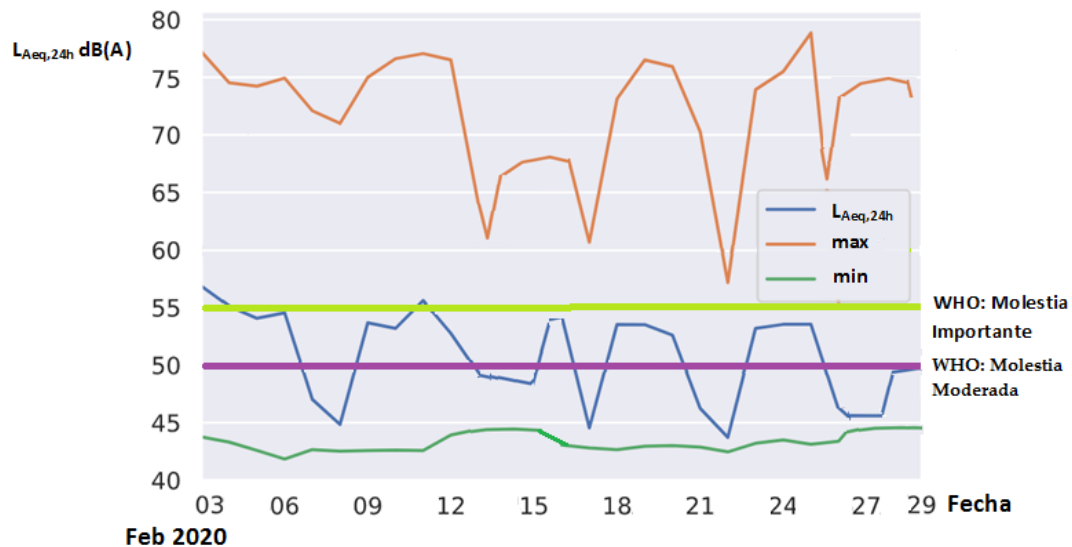
Tras este análisis de los nodos en su conjunto se procede a estudiar los dos nodos más desfavorables de acuerdo con la tabla 26, nodo 3 y nodo 4.

### 3.2.3.2.2 Mediciones en entorno interior del campus de la univesidad

El nodo 3 que corresponde a una zona interior, tal y como muestra la tabla 26, es el punto más ruidoso y por ese motivo va a ser objeto de análisis en el periodo regular. Cabe destacar que en el periodo de confinamiento se obtuvieron valores mínimos durante la mayor parte del tiempo. A continuación se presentan gráficamente los valores de  $L_{Aeq,24h}$ . Este término representa el nivel sonoro equivalente durante un día durante el mes de febrero de 2020, tal y como se observa en la figura 47.

**Figura 47**

*Valores de  $L_{Aeq,24h}$  Obtenidos en el Nodo 3 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia, durante el Periodo Regular, desde el 1 de Febrero al 29 de Febrero de 2020*



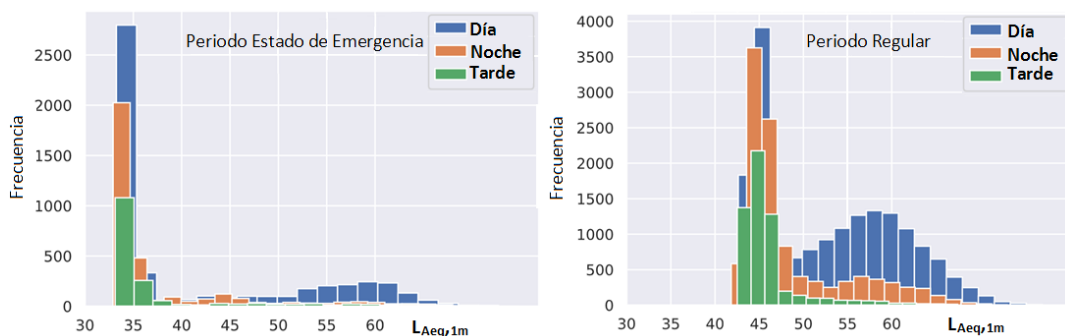
La figura 47 muestra los valores de  $L_{Aeq,24h}$ , junto con los valores máximos y mínimos registrados esos días. Se observa que  $L_{Aeq,24h}$  es inferior a 55 dB(A), valor

propuesto por la World Health Organization (WHO)(Berglund et al.,2000) como molestia importante.

Adicionalmente, se hace un estudio de la frecuencia con el que se obtienen valores de nivel de presión sonora,  $L_{Aeq,1m}$ , en cada intervalo de tiempo de acuerdo con la END 2002 (Dir. 2002/49/EC del Consejo, de 25 junio de 2002). Los intervalos quedan definidos de la siguiente manera: intervalo diurno de 6 a 18 h, intervalo vespertino de 18 a 22 h e intervalo nocturno de 22 a 6 h. Dicha frecuencia es representada en la figura 48, tanto para el estado de emergencia como para el periodo regular.

**Figura 48**

*Distribución de Frecuencias de  $L_{Aeq,1m}$  en el Nodo 3 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia, tanto en Periodo Regular como en Estado de Emergencia*



En esta ocasión, tal y como se observa en la figura 48, los valores del periodo de estado de emergencia muestran claramente que casi no hay actividad en ninguno de los intervalos, con un valor de nivel medio de 35 dB(A). Sólo el intervalo diurno presenta algunos eventos de alto nivel de presión sonora que están relacionados con trabajos de mantenimiento.

En el periodo regular, de manera general las tres distribuciones son asimétricas positivas con un nivel medio de unos 45 dB(A), representando el nivel de ruido de fondo. Además, en el periodo diurno cabe destacar que se forma una curva normal en el rango de 55 dB(A) y 65 dB(A), lo cual representa el nivel de

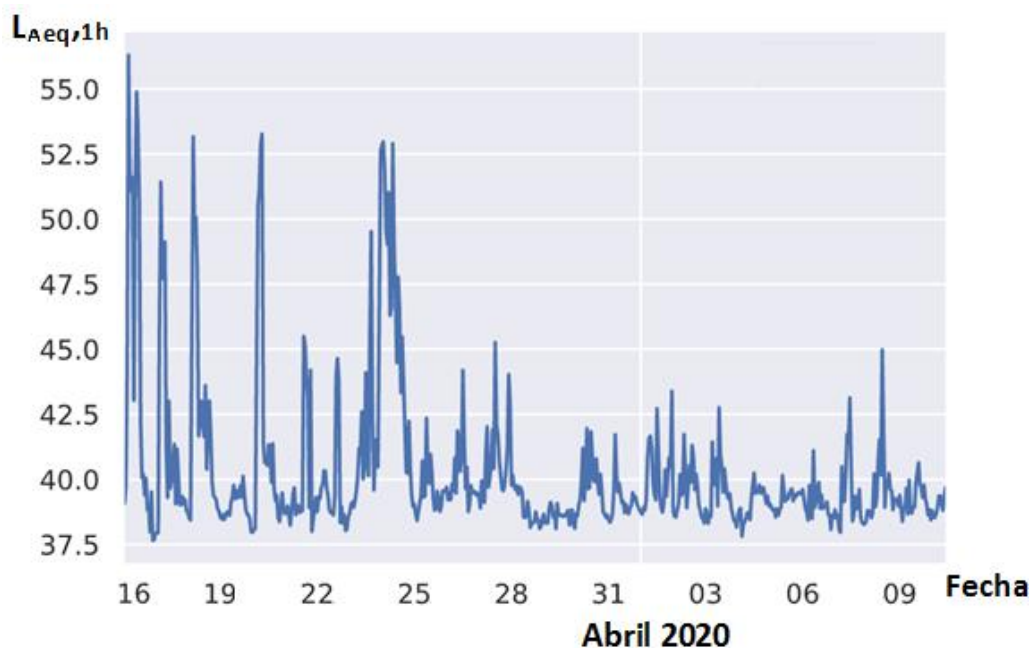
ruido de las actividades cotidianas de la universidad. Por lo tanto, la diferencia entre el nivel de ruido de fondo y las fuentes de ruido habituales en el periodo ordinario podría estimarse en 15 dB(A). Las principales fuentes de ruido son los estudiantes y las actividades del personal universitario, por lo que para reducir los niveles de presión sonora y alcanzar valores inferiores a 50 dB(A) se puede sugerir la instalación de materiales de absorción acústica que puedan disminuir el campo sonoro reverberante.

### 3.2.3.2.3 Mediciones en entorno exterior del campus de la universidad

A continuación, se realiza el estudio de la segunda localización con mayor nivel de molestia, el nodo 4. En primer lugar, se representa en la figura 49 la variación de los valores de  $L_{Aeq,1h}$ , con un periodo de integración de una hora y en el periodo de tiempo comprendido entre el 15 de marzo de 2020 y el 15 de abril de 2020, es decir, la evolución del nivel de presión sonora durante las primeras semanas del estado de alarma.

**Figura 49**

*Valores de  $L_{Aeq,1h}$  en el Nodo 4 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia durante el Estado de Alarma, desde 15 de Marzo al 15 de Abril.*

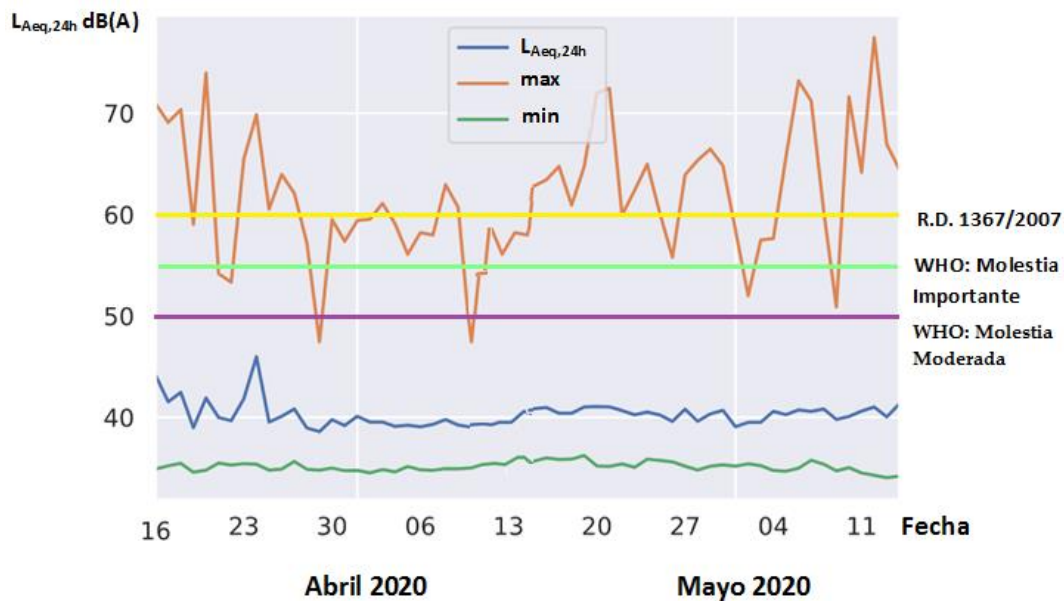


Las primeras fechas son días de tránsito hacia el estado de alarma. Durante este periodo de estudio hay que hacer referencia a los días 20, 23 y 24 de marzo de 2020 ya que fueron días con fuertes eventos de lluvia, por lo que aparece un período de altos niveles de ruido. Posteriormente, a estos primeros días tan singulares, y ya en periodo pleno de estado de alarma, se observa una reducción de alrededor de 10 dB(A), siendo valores regulares durante este periodo.

En la figura 50 se representa el nivel sonoro del nodo 4 durante el periodo de estado de emergencia, en este caso con integración de un día que se representará como  $L_{Aeq, 24h}$

**Figura 50**

*Valores de  $L_{Aeq, 24h}$  en el Nodo 4 del Campus de la Universidad Católica San Antonio de Murcia durante el Estado de Alarma, desde 15 de Marzo al 15 de Mayo*



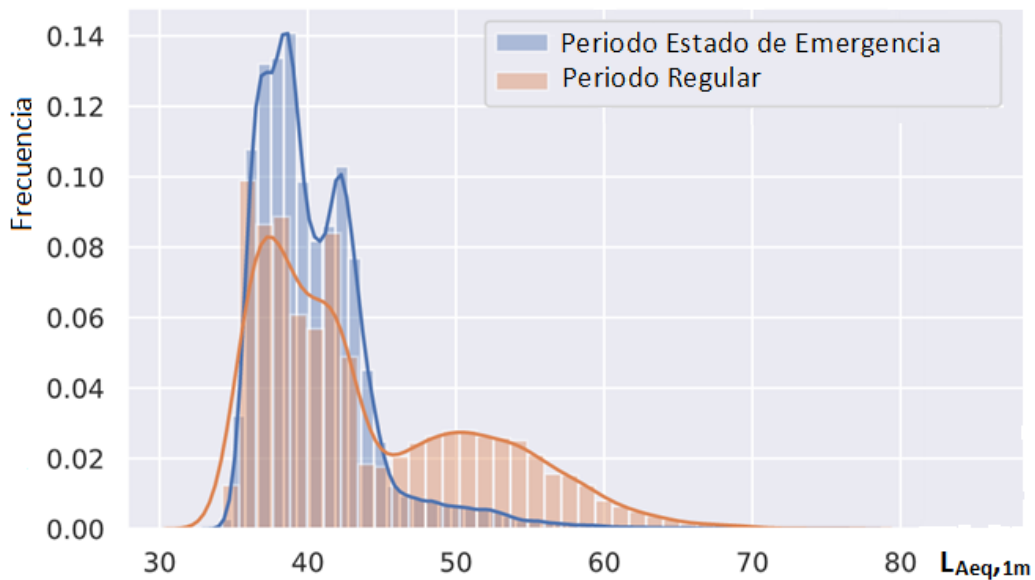
En dicha figura 50 se introducen los valores referencia con respecto a la molestia propuesta por la normativa española (RDL 1367/2007, de 19 de octubre) y los valores WHO (Berglund et al., 2000). En el caso de la normativa española, se

fija el valor de 60 dB(A) para evaluar el impacto del ruido exterior sobre la población en las instalaciones de educación, mientras que la WHO considera como molestia moderada y molestia importante los niveles de 50 dB(A) y 55 dB(A), respectivamente. Adicionalmente se presentan los valores máximos y mínimos que se producen en dicha zona. Estos valores máximos se producen de forma puntual, pero se muestran ya que se realiza una medición por minuto y son debidos a tareas que se realizan cuando no hay actividad académica en el lugar, como son trabajos de limpieza, jardinería o mantenimiento.

A continuación, se realiza un análisis comparativo de los dos periodos, el periodo regular y el periodo del estado de emergencia, para observar las diferencias y discutir los resultados. La figura 51 representa el histograma de los valores de  $L_{Aeq,1m}$  para ambos periodos.

### Figura 51

*Gráfico de Distribución de Frecuencias de los Valores de  $L_{Aeq,1m}$  en el Nodo 4 del Campus Universitario en Periodo Regular y en el Estado de Emergencia.*



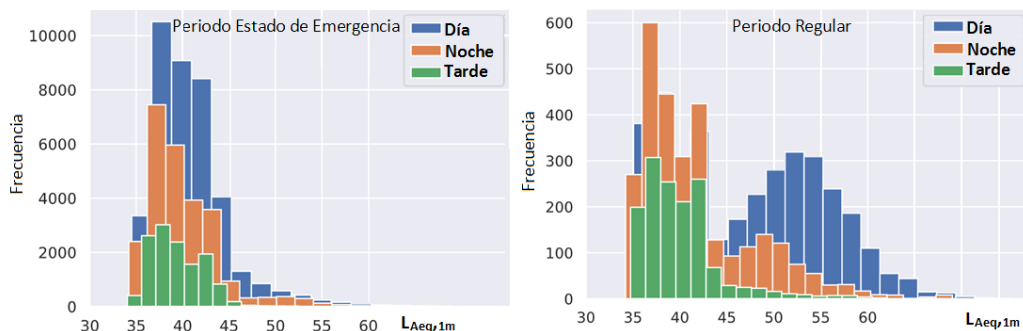


Se observan dos curvas de campana claramente separadas, una centrada en torno a 40 dBA y otra en torno a 50 dBA. El histograma del periodo de emergencia muestra una curva normal más estrecha que la del periodo regular y centrada en torno a 40 dBA, lo que da una idea del efecto en el entorno acústico causado por el cambio producido al impartir la formación de manera online.

De forma análoga al nodo 3, se realiza un estudio de frecuencia por periodos con un histograma, tal y como se presenta en la figura 52.

**Figura 52**

*Gráficos de Distribución de Frecuencias de los Valores de  $L_{Aeq,1m}$  en el Nodo 4 del Campus Universitario para los Intervalos de Día, Tarde y Noche Comparando el Estado de Emergencia y los Periodos Regulares.*



Como se observa en la figura 52, la presión sonora en periodo vespertino está en el mismo rango en ambos periodos, lo cual es algo normal ya que la actividad de la universidad es mínima al estar terminado la jornada. Sin embargo, en el periodo diurno y nocturno, se aprecian claramente dos curvas.

La primera curva corresponde a los valores más bajos y se identifica con el ruido de fondo, mientras que la segunda muestra los niveles de las fuentes sonoras que se producen durante el periodo regular. Por un lado se observa que en el periodo matutino la curva de frecuencia secundaria es más alta, con una

diferencia de aproximadamente 15 dB(A) entre el periodo regular y el periodo del estado de emergencia. Por otro lado, la curva es menos pronunciada en el periodo nocturno ya que la actividad cesa en el entorno del campus universitario. Los valores muestran una diferencia aproximadamente de 10 dB(A) respecto al ruido de fondo ya que se realizan actividad de limpieza y mantenimiento.

Estos resultados confirman que deben proponerse iniciativas de mejora óptimas para la sostenibilidad acústica para el intervalo diurno en el entorno exterior del campus.

### *3.2.3.3 Conclusiones del experimento*

En este trabajo de investigación, una red inalámbrica de sensores acústicos ha sido desplegada con el objetivo de monitorizar durante un largo periodo de tiempo el entorno del campus universitario de la UCAM. Los nodos de la red han sido distribuidos en 4 localizaciones que previamente han sido detectadas como zonas de ruido tanto internas como externas. Una campaña de mediciones ha sido realizada durante un largo periodo de tiempo, realizando mediciones cada minuto, obteniendo parámetros acústicos básicos y psicoacústicos.

Los nodos acústicos desplegados permiten el cálculo de parámetros psicoacústicos binaurales mediante el modelo de Zwicker proporcionando una evaluación de la molestia del ruido en humanos del entorno acústico. Una plataforma basada en la nube se ha utilizado para almacenar los datos y facilitar el posterior el análisis estadístico espacio-temporal del entorno acústico.

Los resultados obtenidos tras la campaña de medición determinan que para el periodo diurno, las principales fuentes de ruido son las generadas por los alumnos y el personal universitario al realizar sus actividades, estando dichos valores por debajo de los recomendados por la normativa española y normativas internacionales.

El nodo interior 3 es el nodo que presenta mayor nivel de presión sonora con 52,5 dB(A), seguido del área exterior analizada de 43,9 dB(A). Se ha demostrado que los valores de molestia psicoacústica binaural están correlacionados con los valores de loudness en cada una de las ubicaciones analizadas, sin embargo, los valores de sharpness tienen efectos menores. Posteriormente, se ha realizado un mapa de ruido aplicando la técnica de interpolación Kriging para estimar la distribución espacial de los niveles sonoros.

Finalmente, se analizan los nodos con mayores niveles durante dos períodos bien definidos, como son el primer mes del estado de alarma, donde la universidad cambió las clases presenciales por online, y el periodo regular donde la universidad se encontraba en su estado habitual. Los gráficos de distribución de frecuencia del nivel de presión sonora equivalente han mostrado curvas normales con medias diferentes entre los intervalos y períodos diurnos, vespertinos y nocturnos.

Este trabajo muestra la gran versatilidad que muestran las WASNs como herramienta para analizar el ruido ambiental en instituciones educativas de nivel superior, tanto en ambientes interiores como exteriores.



## **IV – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

## IV – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 4.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

La población de las ciudades continúa con un progresivo aumento, lo que conlleva un crecimiento de las infraestructuras y recursos de las mismas. Esta situación provoca no solo aspectos positivos sino también negativos, entre los que se encuentran los agentes contaminantes que las actividades emiten al medio ambiente. Entre estos agentes, esta tesis doctoral se centra en la evaluación de la contaminación acústica y la molestia provocada por el ruido.

La acústica en entornos urbanos es generada por diferentes fuentes sonoras, creando algunas de ellas niveles importantes de ruido que deben ser medidos y analizados por los agentes implicados en la gestión de las ciudades. Esta contaminación disminuye la calidad de vida de las personas, causando diferentes efectos adversos en la sociedad, tanto problemas de salud, físicos y psicológicos, como económicos y sociales.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta es la molestia acústica, efecto subjetivo negativo que los métodos tradicionales de medición del campo sonoro no han conseguido analizar adecuadamente. En general, se han utilizado parámetros acústicos básicos junto con ponderaciones espectrales, como la ponderación A, para cuantificar la molestia del ruido. En las investigaciones de esta tesis, se ha usado un modelo de la audición más completo (Zwicker y Fast) que permite el cálculo de parámetros psicoacústicos cuyo objetivo es cuantificar las sensaciones acústicas que las personas sufrirían ante un estímulo sonoro y por consiguiente la evaluación de la molestia.

El paradigma de Internet de las Cosas y las tecnologías que lo acompañan, han permitido la creación de nuevas herramientas para controlar y gestionar entornos acústicos, constituyen la base tecnológica de esta tesis de investigación. La aparición de plataformas hardware autónomas, pequeñas, de bajo coste y bajo

consumo ha fomentado la creación de dispositivos con sensores acústicos, es decir, micrófonos que capturan el sonido y lo procesan para obtener información muy valiosa para el análisis del entorno. Un conjunto de nodos acústicos forma una red de sensores con el potencial de realizar campañas de medición de larga duración y en muchas localizaciones simultáneamente.

En esta tesis se han realizado diversos casos de uso de la redes de sensores acústicos para validar su aplicación en la evaluación del entorno acústico y de la molestia del ruido en una determinada zona urbana. Los nodos desplegados además de medir parámetros acústicos y psicoacústicos, incorporan un grupo de micrófonos y un procesado de la señal que les permite simular el sistema auditivo humano, proporcionando así parámetros psicoacústicos binaurales. Se les ha proporcionado de conectividad a los nodos, permitiendo transmitir la información obtenida a una plataforma software, que puede estar alojada en la nube o en instalaciones on-premise. Este almacenamiento permite un análisis estadístico posterior, tanto del grupo de sensores como de uno en particular. Entre los análisis presentados en esta tesis, destacar el método de interpolación espacial de Kriging. Además, gracias a las campañas de larga duración se han podido aplicar métodos de análisis estadístico de las series temporales, que han ayudado a comprender mejor los entornos evaluados.

En el primer experimento presentado, ver sección 3.2.1 entorno sonoro del interior de un coche durante desplazamientos in-itinere, el objetivo fue la validación del dispositivo para conocer la afección de molestia recibida por un trabajador en su desplazamiento, introduciendo la medición del parámetro psicoacústico loudness. Los resultados obtenidos mostraron que el trabajador no sufría ningún riesgo al no superar en ningún caso los valores límites establecidos en materia de prevención de riesgos laborales. Por el contrario, los valores obtenidos de loudness confirman que durante el desplazamiento in itinere existe una pérdida de confort. Esta pérdida de calidad acústica es corroborada por los índices de ruido de tráfico y contaminación.

En el segundo trabajo presentado, ver 3.2.2 evaluación del entorno sonoro exterior de una urbanización, una red inalámbrica de sensores de acústicos se

desplegó en diferentes viviendas de la zona residencial con el objetivo de realizar una campaña de larga duración. Los resultados obtenidos tras realizar un modelo lineal de la serie temporal de los parámetros almacenados, demuestran que el parámetro psicoacústico loudness binaural y el nivel de presión sonora correlan bien en casi todas las localizaciones, mientras que el sharpness lo hace en menor medida. En base a estos resultados, se propone una simplificación del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker, para el cálculo en los nodos de la molestia binaural subjetiva en cada localización, demostrando la influencia que tiene el loudness en dicho término. Finalmente, los datos proporcionados por la red fueron comparados con una encuesta realizada a los habitantes de dicha urbanización, corroborando que las fuentes de ruido existentes no generan molestia en los vecinos. De los resultados obtenidos se concluye que el modelo simplificado propuesto de molestia binaural se puede considerar como válido.

En el tercer caso de uso desarrollado en esta tesis, en la sección 3.2.3 evaluación del entorno sonoro de un campus universitario, una red de sensores ha sido desplegada realizando una campaña de medición de 9 meses tanto en zonas de interior como de exterior, produciéndose durante la campaña un parón de la actividad principal de la universidad, la docencia de manera presencia, por motivos del estado de alarma decretado en España. Los resultados obtenidos tras la monitorización son comparados en ambos periodos, analizando con detenimiento aquellas localizaciones que presentan mayor nivel de presión, demostrado que los valores de molestia psicoacústica binaural están correlacionados con los valores de loudness en cada una de las ubicaciones analizadas, sin embargo, los valores de sharpness tienen efectos menores. De nuevo es planteada la simplificación del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker, y es demostrada la influencia del loudness en la molestia. Finalmente, un mapa de ruido es realizado aplicando la técnica de interpolación Kriging para evaluar el análisis espacial.

Tras evaluar los diferentes entornos que se han presentado en este trabajo de investigación, se concluye que las WASNs muestran una gran versatilidad como herramienta para analizar el ruido ambiental tanto en ambientes interiores como exteriores.



## 4.2 LÍNEAS FUTURAS

Los resultados de esta investigación sugieren diferentes líneas de investigación a desarrollar en un futuro cercano. A continuación se detallan algunas de esas nuevas líneas divididas en dos grupos

En referencia al modelo de evaluación de la molestia acústica binaural:

- Extensión y validación del modelo para la evaluación de la molestia binaural, estudiando para ello las prestaciones y ventajas que presenta, al igual que las limitaciones o desventajas del modelo propuesto.
- Creación de un modelo de evaluación y la incorporación del atributo acústico pleasantness (agradable) que, junto con el modelo de molestia, permita la creación de un modelo global de la subjetividad del campo sonoro.
- Evaluación del modelo creado mediante pruebas de escucha (listening test) y encuestas realizadas a los sujetos que conviven en dicho entorno acústico. Esto permitirá poder determinar que factor o factores son los que más inciden en la molestia ocasionada, pudiendo ser incluidos en el parámetro global de acústica binaural.
- Descubrimiento de nuevos factores que afecten al modelo de evaluación basados en técnicas de análisis Big Data, aprovechando la gran cantidad de información que se puede obtener en una monitorización de larga duración.

En referencia al dispositivo y las redes de sensores:

- Mejorar el dispositivo con la implantación de nuevos sensores ambientales, creando un equipo capaz de monitorizar a la vez todos los parámetros medio ambientales, que ayuden a evaluar la sostenibilidad del entorno y estudiar la correlación entre ellos.

- El uso de nuevos arrays de micrófonos para evaluar la capacidad de captación de sonido. Además de implantación de nuevos algoritmos que permita la medición del resto de parámetros psicoacústicos como tonality (tonalidad), roughness y fluctuation strength.
- La implantación de nuevas placas procesadoras, que proporcionen mayor capacidad de computación.
- Mejoras en el módulo de comunicación del nodo, evitando posibles cortes de conectividad y evaluar diferentes tecnologías de comunicación como son LoRA, SigFox, etcétera.

## **V - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## V – REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

Abbas, A. H., Mohammed, M. M., Ahmed, G. M., Ahmed, E. A., & Seoud, R. A. A. (2014, April). Smart watering system for gardens using wireless sensor networks. In *2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)* (pp. 1-5). IEEE.

Adams, M., Cox, T., Moore, G., Croxford, B., Refaee, M., & Sharples, S. (2006). Sustainable soundscapes: Noise policy and the urban experience. *Urban studies*, *43*(13), 2385-2398.

Ahangar, F. E., Freedman, F. R., & Venkatram, A. (2019). Using low-cost air quality sensor networks to improve the spatial and temporal resolution of concentration maps. *International journal of environmental research and public health*, *16*(7), 1252.

Aletta, F., Guattari, C., Evangelisti, L., Asdrubali, F., Oberman, T., & Kang, J. (2019). Exploring the compatibility of “Method A” and “Method B” data collection protocols reported in the ISO/TS 12913-2: 2018 for urban soundscape via a soundwalk. *Applied Acoustics*, *155*, 190-203.

Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. *Landscape and Urban Planning*, *149*, 65-74

Ali, S., Glass, T., Parr, B., Potgieter, J., & Alam, F. (2020). Low Cost Sensor With IoT LoRaWAN Connectivity and Machine Learning-Based Calibration for Air Pollution Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *70*, 1-11.

Alsina-Pagès, R. M., Hernandez-Jayo, U., Alías, F., & Angulo, I. (2017). Design of a mobile low-cost sensor network using urban buses for real-time ubiquitous noise monitoring. *Sensors*, *17*(1), 57.

Alsina-Pagès, R. M., Orga, F., Alías, F., & Socoró, J. C. (2019). A wasn-based suburban dataset for anomalous noise event detection on dynamic road-traffic noise mapping. *Sensors*, *19*(11), 2480.

Arduino - Home. (s. f.). Arduino. Recuperado 20 de septiembre de 2021, de <https://www.arduino.cc/>

Asensio, C., Gasco, L., De Arcas, G., López, J. M., & Alonso, J. (2018). Assessment of residents' exposure to leisure noise in Málaga (Spain). *Environments*, 5(12), 134.

Asociación Española de Normalización. UNE EN 61672-1 (2014). Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones

Asensio, C., Ruiz, M., Pavón, I., Ausejo, M., & Recuero, M. (2011). Uncertainty in noise maps isolines: the effect of the sampling grid. *Acta Acústica United with Acústica*, 97(2), 237-242.

Atmaca, E., Peker, I., & Altin, A. (2005). Industrial Noise and Its Effects on Humans. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(6).

Aumond, P., Can, A., Mallet, V., De Coensel, B., Ribeiro, C., Botteldooren, D., & Lavandier, C. (2018). Kriging-based spatial interpolation from measurements for sound level mapping in urban areas. *The journal of the acoustical society of America*, 143(5), 2847-2857.

Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2012). The Swedish soundscape-quality protocol. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3476-3476.

Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., Hellström, B., & Lundén, P. (2014). A field experiment on the impact of sounds from a jet-and-basin fountain on soundscape quality in an urban park. *Landscape and Urban Planning*, 123, 49-60.

Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM<sub>2.5</sub> monitoring. *Journal of Sensors*, 2018.

Bae, S.G., Lee, W.H., & Bae, M.J. (2016). A study on sound characteristics of home appliances noise using psychoacoustics parameters. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(3), 1606-1610.

Barham, R., Goldsmith, M., & Chan, M. (2008, April). Performance of a new MEMS measurement microphone and its potential application. In *Proceedings of the Institute of Acoustics, Spring Conference, Reading, UK* (pp. 10-11).

Barham, R., Goldsmith, M., Chan, M., Simmons, D., Trowsdale, L., Bull, S., & Tyler, R. (2009, October). Development and performance of a multi-point distributed environmental noise measurement system using MEMS microphones. In *Proceedings of the 8th European conference on noise control (Euronoise 2009)*.

Barham, R., Chan, M., & Cand, M. (2010, June). Practical experience in noise mapping with a MEMS microphone based distributed noise measurement system. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2010, No. 6, pp. 4725-4733). Institute of Noise Control Engineering.

Barrigón Morillas, J. M., Montes González, D. , & Rey Gozalo, G. (2016). A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. *Science of the Total Environment*, 565, 595-606.

Bartalucci, C., Borch, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Silvaggio, R., ... & Nencini, L. (2017, July). Design of a prototype of a smart noise monitoring system. In *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV24)*, London, UK (pp. 23-27).

Bartí Domingo, R. (2013). *Acústica medioambiental. Vol. I* (Vol. 1). Editorial Club Universitario.

Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The lancet*, 383(9925), 1325-1332.

Bastián, N. (2015). Elaboración de mapa de ruido de la ciudad de Valdivia mediante software de modelación utilizando métodos de simplificación. *Síntesis tecnológica*, 14.

Bayo Jimenez, M. T., Frenis, K., Kröller-Schön, S., Kuntic, M., Stamm, P., Kvandová, M., ... & Daiber, A. (2021). Noise-Induced Vascular Dysfunction, Oxidative Stress, and Inflammation Are Improved by Pharmacological Modulation of the NRF2/HO-1 Axis. *Antioxidants*, 10(4), 625.

Bello, J. P., Silva, C., Nov, O., Dubois, R. L., Arora, A., Salamon, J., ... & Doraiswamy, H. (2019). Sonyc: A system for monitoring, analyzing, and mitigating urban noise pollution. *Communications of the ACM*, 62(2), 68-77.

Bellucci, P., Peruzzi, L., & Zambon, G. (2017). LIFE DYNAMAP project: The case study of Rome. *Applied Acoustics*, 117, 193-206.

Benocci, R., Confalonieri, C., Roman, H. E., Angelini, F., & Zambon, G. (2020). Accuracy of the dynamic acoustic map in a large city generated by fixed monitoring units. *Sensors*, 20(2), 412.

Bento Coelho, J. L. (2010). A paisagem sonora como instrumento de design e engenharia em meio urbano. *Proceedings of the XXIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC)*, Salvador, Brazil, 19-21.

Beraneck, L. L. (Ed.). (1960). *Noise reduction*. McGraw-Hill Companies.

Berglund, B., Lindvall, T., & Schewela, D.H. (2000). New WHO Guidelines for Community Noise. *Noise & Vibration Worldwide*, 31(4), 24-29.

Bernhard, R., Wayson, R. L., Haddock, J., Neithalath, N., El-Aassar, A., Olek, J., ... & Weiss, W. J. (2005). An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement. *Institute of Safe, Quiet and Durable Highways*, Purdue University.

Besnard, F., Hamet, J. F., Lelong, J., Le Duc, E., Guizard, V., Fürst, N., ... & Dutilleul, G. (2009). Road noise prediction 1-Calculating sound emissions from road traffic. *SETRA*, Bagnoux.

Beutel, M. E., Junger, C., Klein, E. M., Wild, P., Lackner, K., Blettner, M., ... & Munzel, T. (2016). Noise Annoyance Is Associated with Depression and Anxiety in the General Population-The Contribution of Aircraft Noise. *PLoS ONE*, 11(5).

Beutel, M. E., Brähler, E., Ernst, M., Klein, E., Reiner, I., Wiltink, J., ... & Tibubos, A. N. (2020). Noise annoyance predicts symptoms of depression, anxiety and sleep disturbance 5 years later. Findings from the Gutenberg Health Study. *European journal of public health*, 30(3), 487-492.

Blonquist Jr, J. M., Jones, S. B., & Robinson, D. A. (2006). Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. *Agricultural water management*, 84(1-2), 153-165.

Bobrovnitskii, Y. I., & Pavic, G. (2003). Modelling and characterization of airborne noise sources. *Journal of sound and vibration*, 261(3), 527-555.

Bradley, J. S. (1993). Disturbance caused by residential air conditioner noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4), 1978-1986.

Brown, A. L., Kang, J., & Gjestland, T. (2011). Towards standardization in soundscape preference assessment. *Applied acoustics*, 72(6), 387-392.

Bunn, F., & Zannin, P. H. T. (2016). Assessment of railway noise in an urban setting. *Applied Acoustics*, 104, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.10.025>

Bureau, B., & Glachant, M. (2010). Évaluation de l'impact des politiques. *Economie prevision*, (1), 27-44.

Cai, M., Zhong, S., Wang, H., Chen, Y., & Zeng, W. (2017). Study of the traffic noise source intensity emission model and the frequency characteristics for a wet asphalt road. *Applied Acoustics*, 123, 55-63.

Cammarata, G., Cavalieri, S., Fichera, A., & Marletta, L. (1993 a, June). Noise prediction in urban traffic by a neural approach. In *International Workshop on Artificial Neural Networks* (pp. 611-619). Springer, Berlin, Heidelberg.

Cammarata, G., Cavalieri, S., Fichera, A., & Marletta, L. (1993b ). Neural networks versus regression techniques for noise prediction in urban areas. In *WCNN'93, Portland: World Congress on Neural Networks, July 11-15, 1993, Oregon Convention Center, Portland, Oregon* (Vol. 1). Psychology Press.

Cain, R., Jennings, P., & Poxon, J. (2013). The development and application of the emotional dimensions of a soundscape. *Applied acoustics*, 74(2), 232-239.

Can, A., Dekoninck, L., Rademaker, M., Van Renterghem, T., De Baets, B., & Botteldooren, D. (2011). Noise measurements as proxies for traffic parameters in monitoring networks. *Science of the total environment*, 410, 198-204.

Can, A., Dekoninck, L., & Botteldooren, D. (2014). Measurement network for urban noise assessment: Comparison of mobile measurements and spatial interpolation approaches. *Applied Acoustics*, 83, 32-39



Can, A., Aumond, P., De Coensel, B., Ribeiro, C., Botteldooren, D., & Lavandier, C. (2018). Probabilistic modelling of the temporal variability of urban sound levels. *Acta Acustica united with Acustica*, 104(1), 94-105.

Carey, I. M., Anderson, H. R., Atkinson, R. W., Beevers, S., Cook, D. G., Dajnak, D., ... & Kelly, F. J. (2016). Traffic pollution and the incidence of cardiorespiratory outcomes in an adult cohort in London. *Occupational and environmental medicine*, 73(12), 849-856.

Carrión, G., Huerta, M., & Barzallo, B. (2018, August). Internet of things (IoT) applied to an urban garden. In *2018 IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)* (pp. 155-161). IEEE.

cesva.com. (2021). *TA120 - Sensor de monitorización de ruido*. Recuperado 15 de Septiembre de 2021, de <https://www.cesva.com/es/productos/sensores-terminales/TA120/>.

Chang, J. S., & Kim, D. J. (2013). Hedonic estimates of rail noise in Seoul. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 19, 1-4.

Chang, T. Y., Yu, T. Y., Liu, C. S., Young, L. H., & Bao, B. Y. (2020). Occupational noise exposure and its association with incident hyperglycaemia: A retrospective cohort study. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.

Clark, C., Martin, R., Van Kempen, E., Alfred, T., Head, J., Davies, H. W., ... & Stansfeld, S. A. (2006). Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension: the RANCH project. *American journal of epidemiology*, 163(1), 27-37.

Cobos, M., Perez-Solano, J. J., Felici-Castell, S., Segura, J., & Navarro, J. M. (2014). Cumulative-sum-based localization of sound events in low-cost wireless acoustic sensor networks. *IEEE/ACM transactions on audio, speech, and language processing*, 22(12), 1792-1802.

Cocchi, A., Farina, A., & Lopes, G. (1991). Modelli matematici per la previsione del rumore stradale: verifica ed affinazione del modello CNR in base a rilievi sperimentali nella città di Bologna. *Acta of*, 19.

Coensel, B. D., Vanwetswinkel, S., & Botteldooren, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), EL148-EL153.

Crocker, M. J. (Ed.). (2007). *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley & Sons.

Czyzewski, A., & Ejsmont, J. A. (2008, August). Validation of Harmonoise/Imagine Traffic Noise Prediction Model by Long Term Noise and Traffic Monitoring. In *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting* (Vol. 17).

Dadvand, P., Bartoll, X., Basagaña, X., Dalmau-Bueno, A., Martinez, D., Ambros, A., ... & Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Green spaces and general health: roles of mental health status, social support, and physical activity. *Environment international*, 91, 161-167.

Daniel, P., & Weber, R. (1997). Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(1), 113-123.

Dalton, D. S., Cruickshanks, K. J., Wiley, T. L., Klein, B. E., Klein, R., & Tweed, T. S. (2001). Association of Leisure-Time Noise Exposure and Hearing Loss. *Audiology*, 40(1), 1-9.

Davis, A. C., & Hoffman, H. J. (2019). Hearing loss: rising prevalence and impact. *Bulletin of the World Health Organization*, 97(10), 646.

Deaconu, M., Cican, G., & Cristea, L. (2020). Noise Impact Mitigation of Shopping Centres Located near Densely Populated Areas for a Better Quality of Life. *Applied Sciences*, 10(18), 6484.

Diblasi, A., & Bowman, A. W. (2001). On the use of the variogram in checking for independence in spatial data. *Biometrics*, 57(1), 211-218..

DIN 45687:2006-05: Acoustics - Software products for the calculation of the sound propagation outdoors - Quality requirements and test conditions

Doygun, H., & Kuşat Gurun, D. (2007). Analysing and mapping spatial and temporal dynamics of urban traffic noise pollution: a case study in

Kahramanmaraş, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 142(1–3), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9908-7>.

Duvigneau, F., Nitzschke, S., Woschke, E., & Gabbert, U. (2016). A holistic approach for the vibration and acoustic analysis of combustion engines including hydrodynamic interactions. *Archive of Applied Mechanics*, 86(11), 1887-1900.

Dzhambov, A. M., & Lercher, P. (2019). Road traffic noise exposure and depression/anxiety: An updated systematic review and meta-analysis. *International journal of environmental research and public health*, 16(21), 4134.

Edmonds, B. A., & Culling, J. F. (2009). Interaural correlation and the binaural summation of loudness a. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(6), 3865-3870.

Engel, M. S., Fiebig, A., Pfaffenbach, C., & Fels, J. (2018). A review of socio-acoustic surveys for soundscape studies. *Current Pollution Reports*, 4(3), 220-239.

España. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Boletín Oficial del Estado, , núm. 276, de 18 de noviembre de 2003, pp. 40494 a 40505.

España. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. Boletín oficial del Estado, núm. 265, de 10 de noviembre de 1995.

España. Real Decreto 1513/2005 de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003 de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. Boletín Oficial del Estado, núm. 301, de 17 de diciembre de 2005.

España. Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido. Boletín Oficial del Estado, núm. 60, de 11 de marzo de 2006, pp.9842 a 9848.

España. 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. Boletín Oficial del Estado núm. 254, de de 23 de octubre de 2007.

España. Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial del Estado, núm. 254, de 23 de octubre de 2007, pp. 42992 a 43045.

España. Real Decreto Legislativo 8/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley General de la Seguridad Social. Boletín Oficial del Estado, núm. 261 de 31 de octubre de 2015.

European Commission (2000). Towards a Local Sustainability Profile: European Common Indicators; Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, Luxembourg, 2000.

Evandt, J., Oftedal, B., Hjertager Krog, N., Nafstad, P., Schwarze, P. E., & Marit Aasvang, G. (2017). A population-based study on nighttime road traffic noise and insomnia. *Sleep*, 40(2).

European Commission Working Group. (2006). *Assessment of exposure to noise (WG-AEN). Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure*. Technical report, European Commission, 2006. Position Paper–Final Draft.

*Exposure of Europe's population to environmental noise.(s.f)* European Environment Agency. Recuperado 7 de agosto de 2021, de <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-to-and-annoyance-by-2/assessment-4>

Faraji, M. M., Shouraki, S. B., Iranmehr, E., & Linares-Barranco, B. (2019). Sound Source Localization in Wide-range Outdoor Environment Using Distributed Sensor Network. *IEEE Sensors Journal*, 20(4), 2234-2246.

Farrés, J. C., & Novas, J. C. (2018, May). Issues and challenges to improve the Barcelona Noise Monitoring Network. In *Proceedings of the 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Heraklion, Crete, Greece* (pp. 27-31).

Fastl, H. (1985). Loudness and annoyance of sounds: Subjective evaluation and data from ISO 532 B. In *Proc. inter-noise'85* (pp. 1403-1406).

Faulkner, J. P., Murphy, E., Cassidy, M., Kennedy, J., & Rice, H. (2019, September). Europe's Transition to Strategic Noise Mapping Under CNOSSOS-EU: Data Needs Assessment and Recommendations in the Context of Ireland.

In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 259, No. 7, pp. 2220-2227). Institute of Noise Control Engineering.

Filipponi, L., Santini, S., & Vitaletti, A. (2008, June). Data collection in wireless sensor networks for noise pollution monitoring. In *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems* (pp. 492-497). Springer, Berlin, Heidelberg.

Foraster, M., Künzli, N., Aguilera, I., Rivera, M., Agis, D., Vila, J., ... & Basagaña, X. (2014). High blood pressure and long-term exposure to indoor noise and air pollution from road traffic. *Environmental health perspectives*, 122(11), 1193-1200.

Foraster, M., Eze, I. C., Vienneau, D., Schaffner, E., Jeong, A., Héritier, H., ... & Probst-Hensch, N. (2018). Long-term exposure to transportation noise and its association with adiposity markers and development of obesity. *Environment international*, 121, 879-889.

Frampton, K. D. (2006). Acoustic self-localization in a distributed sensor network. *IEEE Sensors Journal*, 6(1), 166-172.

Gagliardi, P., Fredianelli, L., Simonetti, D., & Licitra, G. (2017). ADS-B system as a useful tool for testing and redrawing noise management strategies at Pisa Airport. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(4), 543-551.

Gallin, L. J., Farges, T., Marchiano, R., Coulouvrat, F., Defer, E., Rison, W., ... & Nuret, M. (2016). Statistical analysis of storm electrical discharges reconstituted from a lightning mapping system, a lightning location system, and an acoustic array. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(8), 3929-3953.

Gallo, P., Fredianelli, L., Palazzuoli, D., Licitra, G., & Fidecaro, F. (2016). A procedure for the assessment of wind turbine noise. *Applied Acoustics*, 114, 213-217.

Ge, J., & Hokao, K. (2003). Research on the formation and design of soundscape of urban park-Case study of Saga prefecture forest park, Japan. In *International Symposium on City Planning*.

Genaro, N., Torija, A., Ramos, A., Requena, I., Ruiz, D. P., & Zamorano, M. (2009, November). Modeling environmental noise using artificial neural networks. In *2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications* (pp. 215-219). IEEE.

Givargis, S. H., & Karimi, H. (2009). Mathematical, statistical and neural models capable of predicting LA<sub>max</sub> for the Tehran–Karaj express train. *Applied Acoustics*, 70(7), 1015-1020.

Goines, L., & Hagler, L. (2007). Noise pollution: a modern plague. *South Med J*, 100(3), 287-94.

Gomez Escobar, V., Barrigon Morillas, J. M., Rey Gozalo, G., Vilchez-Gomez, R., Carmona del Rio, J., & Mendez Sierra, J. A. (2012). Analysis of the grid sampling method for noise mapping. *Archives of Acoustics*, 37, 499-514.

Guarnaccia, C., Quartieri, J., & Tepedino, C. (2017, June). A hybrid predictive model for acoustic noise in urban areas based on time series analysis and artificial neural network. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1836, No. 1, p. 020069). AIP Publishing LLC.

Gulliver, J., Morley, D., Vienneau, D., Fabbri, F., Bell, M., Goodman, P., ... & Fecht, D. (2015). Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. *Environmental Modelling & Software*, 74, 183-193.

Hahad, O., Prochaska, J. H., Daiber, A., & Muenzel, T. (2019). Environmental noise-induced effects on stress hormones, oxidative stress, and vascular dysfunction: key factors in the relationship between cerebrocardiovascular and psychological disorders. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2019.

Hakala, I., Kivelä, I., Ihalainen, J., Luomala, J., & Gao, C. (2010, July). Design of low-cost noise measurement sensor network: Sensor function design. In *2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications* (pp. 172-179). IEEE.

Halonen, J. I., Vahtera, J., Stansfeld, S., Yli-Tuomi, T., Salo, P., Pentti, J., ... & Lanki, T. (2012). Associations between nighttime traffic noise and sleep: the Finnish public sector study. *Environmental health perspectives*, 120(10), 1391-1396.

Halonen, J. I., Hansell, A. L., Gulliver, J., Morley, D., Blangiardo, M., Fecht, D., ... & Tonne, C. (2015). Road traffic noise is associated with increased cardiovascular morbidity and mortality and all-cause mortality in London. *European heart journal*, 36(39), 2653-2661.

Harris, C. M. (1997). *Manual de Medidas acústicas y Control del Ruido* (No. 614.7 H2406m Ej. 1). McGraw-Hill.

Hegewald, J., Schubert, M., Freiberg, A., Romero Starke, K., Augustin, F., Riedel-Heller, S. G., ... & Seidler, A. (2020). Traffic noise and mental health: a systematic review and meta-analysis. *International journal of environmental research and public health*, 17(17), 6175.

Herrero, R. (2020). MQTT-SN, CoAP, and RTP in wireless IoT real-time communications. *Multimedia Systems*, 26(6), 643-654.

Hodgson, M., & Nosal, E. M. (2002). Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(2), 931-939.

Hong, J. Y., Lam, B., Ong, Z. T., Ooi, K., Gan, W. S., Kang, J., ... & Tan, S. T. (2019). Quality assessment of acoustic environment reproduction methods for cinematic virtual reality in soundscape applications. *Building and environment*, 149, 1-14.

Hooper, P. D., Maughan, J. A., Flindell, I., & Hume, K. I. (2009). Indices to enhance understanding & management of community responses to aircraft noise exposure. *OMEGA Community Noise Project. CATE, Manchester Metropolitan University*.

Iglesias-Merchan, C., Diaz-Balteiro, L., & Soliño, M. (2015). Transportation planning and quiet natural areas preservation: Aircraft overflights noise assessment in a National Park. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.006>

Jackson, G. M., & Leventhall, H. G. (1975). Household appliance noise. *Applied Acoustics*, 8(2), 101-118.

Jadhav, P. S., & Deshmukh, V. U. (2012). Forest fire monitoring system based on ZIG-BEE wireless sensor network. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(12), 187-191.

Jariwala, H. J., Syed, H. S., Pandya, M. J., & Gajera, Y. M. (2017). Noise Pollution & Human Health: A Review. *Indoor Built Environ*, 1-4.

- Jeon, J. Y., Hong, J. Y., Lavandier, C., Lafon, J., Axelsson, Ö., & Hurtig, M. (2018). A cross-national comparison in assessment of urban park soundscapes in France, Korea, and Sweden through laboratory experiments. *Applied Acoustics*, 133, 107-117.
- Jeon, J. Y., Hong, J. Y., & Lee, P. J. (2013). Soundwalk approach to identify urban soundscapes individually. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 803-812.
- Jekosch, U. (2004). Basic Concepts and Terms of "Quality", Reconsidered in the Context of Product-Sound Quality. *Acta acustica united with Acustica*, 90(6), 999-1006.
- Jiménez, R. Z., Naderi, B., & Möller, S. (2020, May). Effect of environmental noise in speech quality assessment studies using crowdsourcing. In *2020 Twelfth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)* (pp. 1-6). IEEE.
- Jin, N., Zhou, X., Lin, C., Wang, L., Liu, Y., Wymore, M. L., & Qiao, D. (2018, June). ThunderLoc: Smartphone-based crowdsensing for thunder localization. In *2018 15th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)* (pp. 1-2). IEEE.
- Kaltenbach, M., Maschke, C., & Klinke, R. (2008). Health consequences of aircraft noise. *Deutsches Ärzteblatt International*, 105(31-32), 548.
- Kanjo, E. (2010). Noisespy: A real-time mobile phone platform for urban noise monitoring and mapping. *Mobile Networks and Applications*, 15(4), 562-574.
- Kang, J., Aletta, F., Margaritis, E., & Yang, M. (2018). A model for implementing soundscape maps in smart cities. *Noise Mapping*, 5(1), 46-59.
- Kang, J., Aletta, F., Oberman, T., Erfanian, M., Kachlicka, M., Lionello, M., & Mitchell, A. (2019, January). Towards soundscape indices. In *Proceedings of the International Congress on Acoustics* (pp. 2488-2495). International Congress on Acoustics.
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Common noise assessment (CNOSSOS-EU), 180-p.



Kerr, M. J., Brosseau, L., & Johnson, C. S. (2002). Noise Levels of Selected Construction Tasks. *AIHA Journal*, 63(3), 334-339. <https://doi.org/10.1080/15428110208984722>.

Khan, J., Ketzler, M., Jensen, S. S., Gulliver, J., Thysell, E., & Hertel, O. (2021). Comparison of Road Traffic Noise prediction models: CNOSSOS-EU, Nord2000 and TRANEX. *Environmental Pollution*, 270, 116240.

Kim, Y., Ahn, J., & Cha, H. (2009). Locating acoustic events based on large-scale sensor networks. *Sensors*, 9(12), 9925-9944.

Kivelä, I., Gao, C., Luomala, J., Ihalainen, J., & Hakala, I. (2010). Design of networked low-cost wireless noise measurement sensors. *International Journal on Sensors & Transducers*, 9, 171-190.

Kivelä, I., & Hakala, I. (2015, May). Area-based environmental noise measurements with a wireless sensor network. In *Proceedings of the Euronoise* (pp. 218-220).

Klatte, M., Spilski, J., Mayerl, J., Möhler, U., Lachmann, T., & Bergström, K. (2017). Effects of aircraft noise on reading and quality of life in primary school children in Germany: Results from the NORAH study. *Environment and Behavior*, 49(4), 390-424.

Kluijver, H., & Stoter, J. (2003). Noise mapping and GIS: optimising quality and efficiency of noise effect studies. *Computers, environment and urban systems*, 27(1), 85-102.

Koops, E. A., Husain, F. T., & van Dijk, P. (2019). Profiling intermittent tinnitus: a retrospective review. *International journal of audiology*, 58(7), 434-440.

Kuttruff, H. (2016). *Room acoustics*. Crc Press.

Kuwano, S., Yano, T., Kageyama, T., Sueoka, S., & Tachibana, H. (2014). Social survey on wind turbine noise in Japan. *Noise Control Engineering Journal*, 62(6), 503-520.

Lacerda, A., Ribas, A., Mendes, J., & Andrade, P. (2004). Noise level and its perception by commuters in urban buses of Curitiba. *Canadian Acoustics*, 32(4), 53-59.

Langdon, F. J., & Scholes, W. E. (1968). The Traffic Noise Index: A Method of Controlling Noise Nuisance.

Lee, J. (2020). Neighborhood Noise. In *Noise and Environment*. IntechOpen.

Lee, P. J., Hopkins, C., & Penedo, R. (2020). Attitudes to noise inside dwellings in three megacities: Seoul, London, and São Paulo. *International journal of environmental research and public health*, 17(16), 6005.

Lercher, P., Evans, G. W., & Meis, M. (2003). Ambient noise and cognitive processes among primary schoolchildren. *Environment and Behavior*, 35(6), 725-735.

Leung, T. M., & Tang, S. (2016, August). On the study of effects on different types of natural sounds on the perception of combined sound environment with road traffic noise. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 253, No. 5, pp. 3206-3212). Institute of Noise Control Engineering.

Licitra, G., Gallo, P., Rossi, E., & Brambilla, G. (2011). A novel method to determine multiexposure priority indices tested for Pisa action plan. *Applied Acoustics*, 72(8), 505-510. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.07.007>.

Licitra, G., Fredianelli, L., Petri, D., & Vigotti, M. A. (2016). Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Science of The Total Environment*, 568, 1315-1325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.071>.

Licitra, G., Ascari, E., & Fredianelli, L. (2017). Prioritizing process in action plans: A review of approaches. *Current Pollution Reports*, 3(2), 151-161.

Lin, J., Pan, D., Davis, S. J., Zhang, Q., He, K., Wang, C., ... & Guan, D. (2014). China's international trade and air pollution in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(5), 1736-1741.

Linares, C., Díaz, J., Tobías, A., Miguel, J. D., & Otero, A. (2006). Impact of urban air pollutants and noise levels over daily hospital admissions in children in Madrid: a time series analysis. *International archives of occupational and environmental health*, 79(2), 143-152.

Liu, J., Kang, J., Behm, H., & Luo, T. (2014). Effects of landscape on soundscape perception: Soundwalks in city parks. *Landscape and urban planning*, 123, 30-40.

Livingstone, D. J. (Ed.). (2008). *Artificial neural networks: methods and applications* (pp. 185-202). Totowa, NJ, USA:: Humana Press.

Loorbach, D., & Shiroyama, H. (2016). The challenge of sustainable urban development and transforming cities. In *Governance of urban sustainability transitions* (pp. 3-12). Springer, Tokyo.

Lopez-Ballester, J., Pastor-Aparicio, A., Segura-Garcia, J., Felici-Castell, S., & Cobos, M. (2019). Computation of psycho-acoustic annoyance using deep neural networks. *Applied Sciences*, 9(15), 3136.

LoRa Alliance. (2021). *Homepage-LoRa Alliance®*. Recuperado 7 de agosto de 2021, de <https://loro-alliance.org/>

Lyon, R. H. (2003). Product sound quality-from perception to design. *Sound and vibration*, 37(3), 18-23.

Llorca, J. (2018). Virtual reality for urban sound design: a tool for architects and urban planners. *Artificial Intelligence-Emerging Trends and Applications*.

Maffei, L., Masullo, M., Pascale, A., Ruggiero, G., & Romero, V. P. (2016). Immersive virtual reality in community planning: Acoustic and visual congruence of simulated vs real world. *Sustainable Cities and Society*, 27, 338-345.

Maisonneuve, N., Stevens, M., & Ochab, B. (2010). Participatory noise pollution monitoring using mobile phones. *Information polity*, 15(1, 2), 51-71.

Mariscal-Ramirez, J. A., Fernandez-Prieto, J. A., Gadeo-Martos, M. A., & Canada-Bago, J. (2011, November). Knowledge-based wireless sensors using sound pressure level for noise pollution monitoring. In *2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications* (pp. 1032-1037). IEEE.

Margaritis, E., & Kang, J. (2017). Soundscape mapping in environmental noise management and urban planning: case studies in two UK cities. *Noise Mapping*, 4(1), 87-103.

Mariscal-Ramirez, J. A., Fernandez-Prieto, J. A., & Gadeo-Martos, M. A. (2015). A new algorithm to monitor noise pollution adapted to resource-constrained devices. *Multimedia Tools and Applications*, 74(21), 9175-9189.

Marquis-Favre, C., Premat, E., Aubrée, D., & Vallet, M. (2005a). Noise and its effects—A review on qualitative aspects of sound. Part I: Notions and acoustic ratings. *Acta acustica united with acustica*, 91(4), 613-625.

Marquis-Favre, C., Premat, E., & Aubrée, D. (2005b). Noise and its effects—a review on qualitative aspects of sound. Part II: Noise and annoyance. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4), 626-642.

Marry, S., & Defrance, J. (2013). Analysis of the perception and representation of sonic public spaces through on site survey, acoustic indicators and in-depth interviews. *Applied Acoustics*, 74, 282-292.

Martínez, R., Vela, N., Aatik, A. E., Murray, E., Roche, P., & Navarro, J. M. (2020). On the use of an IoT integrated system for water quality monitoring and management in wastewater treatment plants. *Water*, 12(4), 1096.

Math, R. K., & Dharwadkar, N. V. (2017, January). A wireless sensor network based low cost and energy efficient frame work for precision agriculture. In *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)* (pp. 1-6). IEEE.

McDonald, P., Geraghty, D., Humphreys, I., & Farrell, S. (2008). Assessing environmental impact of transport noise with wireless sensor networks. *Transportation Research Record*, 2058(1), 133-139.

Michaud, D. S., Feder, K., Keith, S. E., Voicescu, S. A., Marro, L., Than, J., ... & van den Berg, F. (2016). Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3), 1443-1454.

Mietlicki, F., Mietlicki, C., & Sineau, M. (2015). An Innovative Approach for long term environmental noise measurement: RUMEUR Network in the Paris Region. In Proceedings of the EuroNoise.

Milenović, M., Živković, S., & Veljković, M. (2018). Noise and Aggressiveness in the Workplace. In *Acoustics and Vibration of Mechanical Structures—AVMS-2017* (pp. 99-104). Springer, Cham.

Mioduszewski, P., Ejsmont, J. A., Grabowski, J., & Karpiński, D. (2011). Noise map validation by continuous noise monitoring. *Applied Acoustics*, 72(8), 582-589.

Ministerio para transición ecológica y el reto demográfico (2021). Sistema Básico de Información sobre la Contaminación Acústica. Recuperado el 26 de Abril de 2021, de <http://sicaweb.cedex.es/>

Moore, B. C., & Glasberg, B. R. (2007). Modeling binaural loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3), 1604-1612.

Moorhouse, A. T., & Seiffert, G. (2006). Characterisation of an airborne sound source for use in a virtual acoustic prototype. *Journal of Sound and Vibration*, 296(1-2), 334-352.

Montoya-Belmonte, J., & Navarro, J. M. (2020). Long-Term Temporal Analysis of Psychoacoustic Parameters of the Acoustic Environment in a University Campus Using a Wireless Acoustic Sensor Network. *Sustainability*, 12(18), 7406.

Montoya-Belmonte, J., Noriega- Linares, J. E., & Navarro Ruiz, J. M. (2017). Análisis preliminar de la molestia acústica recibida por los ciudadanos en sus desplazamientos in-itinere en vehículo. *Proceedings of Tecniacústica 2017: 48<sup>o</sup> Congreso Español de Acústica; Encuentro Ibérico de Acústica; European Symposium on Underwater Acoustics Applications; European Symposium on Sustainable Building Acoustics: A Coruña 3-6 octubre 2017* (pp. 539-547). Sociedad Española de Acústica.

Montoya-Belmonte, J., Segura-García, J., & Navarro-Ruiz, J. M. (2018). Estudio del despliegue de dispositivos IoT acústicos para el análisis del ruido en entornos educativos. *Proceedings of XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49<sup>o</sup> Congreso Español de Acústica—TECNIACUSTICA'18. Cádiz 24-26 octubre 2018* (pp. 534-544). Sociedad Española de Acústica.

Morel, J., Marquis-Favre, C., & Gille, L. A. (2016). Noise annoyance assessment of various urban road vehicle pass-by noises in isolation and combined with industrial noise: A laboratory study. *Applied Acoustics*, 101, 47-57.

Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. D. (2005). Automatic irrigation based on soil moisture for vegetable crops. *EDIS*, 2005(8).

Murphy, E., & King, E. A. (2014). An assessment of residential exposure to environmental noise at a shipping port. *Environment international*, 63, 207-215.

Murray Schafer, R. (1977). *The tuning of the world*. McClelland and Stewart Limited, Toronto.

Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep medicine reviews*, 11(2), 135-142.

Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices. *Applied Acoustics*, 117, 207-218.

Mydlarz, C., Sharma, M., Lockerman, Y., Steers, B., Silva, C., & Bello, J. P. (2019). The life of a New York City noise sensor network. *Sensors*, 19(6), 1415.

Navarro, J. M., Tomas-Gabarron, J. B., & Escolano, J. (2017). A big data framework for urban noise analysis and management in smart cities. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(4), 552-560.

Navarro- Ruiz, J.M., Montoya -Belmonte, J., Botia, M.D., & Escolano J. Creación de un nodo acústico virtual para simulación de una red de sensores. *Proceedings of XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica-TECNIACUSTICA'18*. Cádiz 24-26 octubre 2018 (pp. 527-533). Sociedad Española de Acústica

Ncube, F., Ncube, E. J., & Voyi, K. (2017). Bioaerosols, noise, and ultraviolet radiation exposures for municipal solid waste handlers. *Journal of environmental and public health*, 2017.

Negreiros, J., Painho, M., Aguilar, F., & Aguilar, M. (2010). Geographical information systems principles of ordinary kriging interpolator. *Journal of Applied Sciences*, 10(11), 852-867.

Neitzel, R., & Seixas, N. (2005). The effectiveness of hearing protection among construction workers. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2(4), 227-238.

Neitzel, R. L., & Fligor, B. J. (2019). Risk of noise-induced hearing loss due to recreational sound: Review and recommendations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(5), 3911-3921.

Nilsson, M. E., Alvarsson, J., Rådsten-Ekman, M., & Bolin, K. (2010). Auditory masking of wanted and unwanted sounds in a city park. *Noise Control Engineering Journal*, 58(5), 524-531.

Noriega-Linares, J. E., & Navarro Ruiz, J. M. (2016). On the application of the raspberry Pi as an advanced acoustic sensor network for noise monitoring. *Electronics*, 5(4), 74.

Noriega Linares, J. E. (2017). *Análisis del campo sonoro y la molestia de la contaminación acústica en ciudades mediante el uso de redes de sensores* [Tesis Doctoral, Universidad Católica San Antonio de Murcia]. Repositorio Universidad Católica San Antonio de Murcia

Noriega-Linares, J. E., Rodriguez-Mayol, A., Cobos, M., Segura-Garcia, J., Felici-Castell, S., & Navarro, J. M. (2017). A wireless acoustic array system for binaural loudness evaluation in cities. *IEEE Sensors Journal*, 17(21), 7043-7052.

Notley, H., Grimwood, C., Raw, G., Clark, C., Zepidou, G., & Van de Kerchhove, R. (2014). National Noise Attitude Survey 2012 (NNAS2012): Summary Report. *Department for Environment and Rural Affairs: London, UK*.

Nunes, P. A., & Travisi, C. M. (2006). *Comparing Tax and Tax Reallocations Payments in Financing Rail Noise Abatement Programs: Results from a CE valuation study in Italy* (No. 12210). Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM).

Oberman, T., Jambrošić, K., Horvat, M., & Bojanić Obad Šćitaroci, B. (2020). Using virtual soundwalk approach for assessing sound art soundscape interventions in public spaces. *Applied Sciences*, 10(6), 2102.

Ohlwein, S., Hennig, F., Lucht, S., Matthiessen, C., Pundt, N., Moebus, S., ... & Hoffmann, B. (2019). Indoor and outdoor road traffic noise and incident diabetes mellitus: Results from a longitudinal German cohort study. *Environmental Epidemiology*, 3(1).

Oloruntoba, E. O., Ademola, R. A., Sridhar, M. K. C., Agbola, S. A., Omokhodion, F. O., Ana, G. R. E. E., & Alabi, R. T. (2012). Urban Environmental Noise Pollution and Perceived Health Effects in Ibadan, Nigeria. *African Journal of Biomedical Research*, 15(2), 77-84.

Organización Internacional de Normalización. ISO 9613-1 (1996) Acústica. Atenuación del sonido durante su propagación al aire libre. Parte 1: Cálculo de la absorción atmosférica.

Organización Internacional de Normalización. ISO 226 (2003) Acoustics—Normal Equal-Loudness-Level Contours.

Organización Internacional de Normalización. ISO 17534-1 (2015) Acoustics—Software for the calculation of sound outdoors — Part 1: Quality requirements and quality assurance.

Organización Internacional de Normalización. ISO 1996-1 (2016) Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise Part 1: Basic quantities and assessment procedures.

Organización Internacional de Normalización. ISO 532-1 (2017). Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 1: Zwicker method.

Organización Internacional de Normalización. ISO 12913-2 (2018). Acoustics. Soundscape—part 2: data collection and reporting requirements.

Organización Internacional de Normalización. ISO 12345 (2021). Diesel engines — Cleanliness assessment of fuel injection equipment. <https://www.iso.org/standard/77439.html>

Otto, N. C. (1997, September). Listening test methods for automotive sound quality. In *Audio Engineering Society Convention 103*. Audio Engineering Society.



Otto, N., Amman, S., Eaton, C., & Lake, S. (2001). Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. *Sound and Vibration*, 35(4), 24-47.

Ottoz, E., Rizzi, L., & Nastasi, F. (2018). Recreational noise: Impact and costs for annoyed residents in Milan and Turin. *Applied Acoustics*, 133, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.12.021>

Patel, N. L., & Bhave, P. P. (2014). Study of noise pollution during deepawali festival. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 1(6), 2349-2163.

Parbat, D. K., & Nagarnaik, P. B. (2007). Assessment and ANN modeling of noise levels at major road intersections in an Indian intermediate city. *Journal of research in science, computing and engineering*, 4(3), 1-1.

Parbat, D. K., & Nagarnaik, P. B. (2008, July). Artificial neural network modeling of road traffic noise descriptors. In *2008 First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology* (pp. 1017-1021). IEEE.

Pavić, G. (2010). Air-borne sound source characterization by patch impedance coupling approach. *Journal of Sound and Vibration*, 329(23), 4907-4921.

Pavić, G., & Lindberg, A. (2017). Airborne sound characterisation by a dummy source approach. *Journal of Sound and Vibration*, 392, 91-112.

Peckens, C., Porter, C., & Rink, T. (2018). Wireless sensor networks for long-term monitoring of urban noise. *Sensors*, 18(9), 3161.

Picaud, J., Can, A., Fortin, N., Ardouin, J., & Lagrange, M. (2020). Low-cost sensors for urban noise monitoring networks—A literature review. *Sensors*, 20(8), 2256.

Pierce, A. D. (2019). *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. Springer.

Piper, B., Barham, R., Sheridan, S., & Sotirakopoulos, K. (2017, July). Exploring the “big acoustic data” generated by an acoustic sensor network deployed at a crossrail construction site. In *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV), London, UK* (pp. 23-27).

Pi, R. (2021, 25 junio). Teach, Learn, and Make with. Raspberry Pi. Recuperado 20 de septiembre de 2021, de <https://www.raspberrypi.org/>

Pörschmann, C., Stade, P., & Arend, J. M. (2017, June). Binaural auralization of proposed room modifications based on measured omnidirectional room impulse responses. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 173EAA* (Vol. 30, No. 1, p. 015012). Acoustical Society of America.

Prieto Gajardo, C., Barrigón Morillas, J. M., Gomez Escobar, V., Vílchez-Gómez, R., & Rey Gozalo, G. (2014). Effects of Singular Noisy Events on Long-Term Environmental Noise Measurements. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(6).

Pyko, A., Eriksson, C., Lind, T., Mitkovskaya, N., Wallas, A., Ögren, M., ... & Pershagen, G. (2017). Long-term exposure to transportation noise in relation to development of obesity—a cohort study. *Environmental health perspectives*, 125(11), 117005.

Quartieri, J., Mastorakis, N. E., Iannone, G., Guarnaccia, C., D'ambrosio, S., Troisi, A., & Lenza, T. L. L. (2009, December). A review of traffic noise predictive models. In *Recent Advances in Applied and Theoretical Mechanics, 5th WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS'09) Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain December* (pp. 14-16).

Rådsten-Ekman, M., Axelsson, Ö., & Nilsson, M. E. (2013). Effects of sounds from water on perception of acoustic environments dominated by road-traffic noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(2), 218-225.

Rahmani, S., Mousavi, S. M., & Kamali, M. J. (2011). Modeling of road-traffic noise with the use of genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(1), 1008-1013.

Rauf, K. M., Hossieni, H., Ahmad, S. S., Ali, H., & Kawa, H. (2015). Study of the Improvement of Noise Pollution in University of Sulaimani in both New and Old Campus. *Journal of Pollution Effects & Control*, 1-3.

Rey Gozalo, G., Barrigón Morillas, J. M., Montes González, D., & Atanasio Moraga, P. (2018). Relationships among satisfaction, noise perception, and use of urban green spaces. *Science of The Total Environment*, 624, 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.148>

Roberts, L. E., Eggermont, J. J., Caspary, D. M., Shore, S. E., Melcher, J. R., & Kaltenbach, J. A. (2010). Ringing ears: the neuroscience of tinnitus. *Journal of Neuroscience*, 30(45), 14972-14979

Robinson, D. W. (1971a). Towards a unified system of noise assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 14(3), 279-298.

Robinson, D. W. (1971b). The concept of noise pollution level. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 13(12), 602.

Rodríguez Flores, J. S. (2008, November). Contaminación acústica proveniente del tráfico vehicular en la zona central de la ciudad de Oruro. In *Ponencia presentada en el vi Congreso Iberoamericano de Acústica-fía, Buenos Aires*.

Romeu, J., Jiménez, S., Salueña, X., & Capdevila, R. (2000). Field Survey of Noise Generated by Elevator Installations. *Building Acoustics*, 7(3), 225-232.

Romeu, J., Jiménez, S., & Capdevila, R. (2004). Noise emitted by water supply installations. *Applied Acoustics*, 65(4), 401-419.

Ryu, D. H., Kim, R. H., Choi, S. H., Kim, K. J., Ko, Y. M., Kim, Y. J., ... & Choi, D. G. (2020). Utilizing Electricity Consumption Data to Assess the Noise Discomfort Caused by Electrical Appliances between Neighbors: A Case Study of a Campus Apartment Building. *Sustainability*, 12(20), 8704.

Safeer, H. B. (1973). Community noise levels—a statistical phenomenon. *Journal of Sound Vibration*, 26(4), 489-502.

Sander, H. A. (2016). Assessing impacts on urban greenspace, waterways, and vegetation in urban planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(3), 461-479.

Santini, S., Ostermaier, B., & Vitaletti, A. (2008, April). First experiences using wireless sensor networks for noise pollution monitoring. In *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks* (pp. 61-65).

Santini, S., Ostermaier, B., & Adelman, R. (2009, June). On the use of sensor nodes and mobile phones for the assessment of noise pollution levels in urban environments. In *2009 Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)* (pp. 1-8). IEEE.

Santini, S., & Vitaletti, A. (2007). Wireless sensor networks for environmental noise monitoring. *6. Fachgespräch Sensornetzwerke*, 98.

Schenone, C., Pittaluga, I., Borelli, D., Kamali, W., & El Moghrabi, Y. (2016). The impact of environmental noise generated from ports: Outcome of MESP project. *Noise Mapping*, 3(1).

Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W. A., & Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment international*, 106, 234-24.

Schröder, D., & Vorländer, M. (2011, January). RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments. In *Forum acusticum* (pp. 1541-1546). Denmark: Aalborg.

Scopelliti, M., Carrus, G., Adinolfi, C., Suarez, G., Colangelo, G., Laforteza, R., ... & Sanesi, G. (2016). Staying in touch with nature and well-being in different income groups: The experience of urban parks in Bogotá. *Landscape and Urban Planning*, 148, 139-148.

Segura, J., Cerdá, S., Montell, R., Romero, J., Cibrián, R., Barba, A., & Giménez, A. (2012). Los parámetros psicoacústicos como herramienta para la evaluación subjetiva de diferentes entornos y actividades. In *Proceedings of VIII Congreso Iberoamericano de Acústica*.

Segura-Garcia, J., Felici-Castell, S., Perez-Solano, J. J., Cobos, M., & Navarro, J. M. (2014). Low-cost alternatives for urban noise nuisance monitoring using wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 836-844.

Segura Garcia, J., Perez Solano, J. J., Cobos Serrano, M., Navarro Camba, E. A., Felici Castell, S., Soriano Asensi, A., & Montes Suay, F. (2016). Spatial statistical analysis of urban noise data from a WASN gathered by an IoT system: Application to a small city. *Applied Sciences*, 6(12), 380.

Semidor, C. (2006). Listening to a city with the soundwalk method. *Acta Acustica united with acustica*, 92(6), 959-964

Sethi, S. S., Ewers, R. M., Jones, N. S., Orme, C. D. L., & Picinali, L. (2018). Robust, real-time and autonomous monitoring of ecosystems with an open, low-cost, networked device. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(12), 2383-2387.

Sethi, S. S., Ewers, R. M., Jones, N. S., Signorelli, A., Picinali, L., & Orme, C. D. L. (2020). SAFE Acoustics: An open-source, real-time eco-acoustic monitoring network in the tropical rainforests of Borneo. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(10), 1182-1185.

Sharpness and booming | Acoustics | University of Salford. (2020, 23 junio). Acoustics. Recuperado 7 de septiembre de 2021, de <http://hub.salford.ac.uk/sirc-acoustics/psychoacoustics/sound-quality-making-products-sound-better/an-introduction-to-sound-quality-testing/sharpness-and-booming/>

Sheng, Z., Pfersich, S., Eldridge, A., Zhou, J., Tian, D., & Leung, V. C. (2019). Wireless acoustic sensor networks and edge computing for rapid acoustic monitoring. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6(1), 64-74.

Shin, S. H. (2004). *Sound quality evaluation of non-stationary noise and its application to vehicle booming noise* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, KAIST).

Shin, S. H., Ih, J. G., Hashimoto, T., & Hatano, S. (2009). Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars. *Applied acoustics*, 70(2), 309-320.

Silvaggio, R., Curcuruto, S., Maggi, M., Fasanella, A., Cattani, G., Di Bucchianico, A. D. M., ... & Pessina, G. (2019). Noise Low Emission Zone implementation in urban planning: results of monitoring activities in pilot area of LIFE MONZA project. In *In 23rd International Congress on Acoustics-ICA 2019*. Aachen, Germany.

Singh, N., & Davar, S. C. (2004). Noise pollution-sources, effects and control. *Journal of Human Ecology*, 16(3), 181-187.

Sivonen, V. P. (2007). Directional loudness perception. The effect of sound incidence angle on loudness and the underlying binaural summation. *Acustica United with Acta Acustica*, 93(3).

Sørensen, M., Andersen, Z. J., Nordborg, R. B., Becker, T., Tjønneland, A., Overvad, K., & Raaschou-Nielsen, O. (2013). Long-term exposure to road traffic noise and incident diabetes: a cohort study. *Environmental health perspectives*, 121(2), 217-222.

Sørensen, M., Lühdorf, P., Ketzler, M., Andersen, Z. J., Tjønneland, A., Overvad, K., & Raaschou-Nielsen, O. (2014). Combined effects of road traffic noise and ambient air pollution in relation to risk for stroke?. *Environmental research*, 133, 49-55.

Stapelfeldt, H., & Manvell, D. (2011, July). Using dynamic noise mapping for proactive environment noise management. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2011, No. 2, pp. 4548-4556). Institute of Noise Control Engineering.

Sudarsono, A. S., Lam, Y. W., & Davies, W. J. (2017). The validation of acoustic environment simulator to determine the relationship between sound objects and soundscape. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(4), 657-667.

Suter, A. H. (2002). Construction noise: exposure, effects, and the potential for remediation; a review and analysis. *Aiha Journal*, 63(6), 768-789.

Sutriadi, R. (2018, November). Defining smart city, smart region, smart village, and technopolis as an innovative concept in Indonesia's urban and regional development themes to reach sustainability. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 202, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.

Szczepańska, A., Senetra, A., & Wasilewicz-Pszczółkowska, M. (2020). The influence of traffic noise on apartment prices on the example of a European Urban Agglomeration. *Sustainability*, 12(3), 801.

Tan, W. M., & Jarvis, S. A. (2013, December). Energy harvesting noise pollution sensing WSN mote: Survey of capabilities and limitations. In *2013 IEEE Conference on Wireless Sensor (ICWISE)* (pp. 53-60). IEEE.

Tan, W. M., & Jarvis, S. A. (2014). On the design of an energy-harvesting noise-sensing WSN mote. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014(1), 1-18.

Tang, U. W., & Wang, Z. S. (2007). Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 22(12), 1750-1764.

Tarrero, A. I., Martín, M. A., González, J., Machimbarrena, M., & Jacobsen, F. (2008). Sound propagation in forests: A comparison of experimental results and values predicted by the Nord 2000 model. *Applied Acoustics*, 69(7), 662-671.

Tiwari, Anurag V., Kadu, Prashant A., Deshmukh, Amey D. (2015) A Review on Evaluation of Traffic Noise Pollution using Noise indices in India. *International Journal of Research in Engineering, Science and Technologies*. India: Deepam Publications

Tobías, A., Díaz, J., Saez, M., & Alberdi, J. C. (2001). Use of Poisson regression and Box-Jenkins models to evaluate the short-term effects of environmental noise levels on daily emergency admissions in Madrid, Spain. *European journal of epidemiology*, 17(8), 765-771.

Toppila, E., Pyykkö, I., & Pääkkönen, R. (2009). Evaluation of the increased accident risk from workplace noise. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 15(2), 155-162.

Toutouh, J., Arellano-Verdejo, J., & Alba-Torres, E. (2017). Enabling low-cost smart road traffic sensing.

Tristán-Hernández, E., Pavón García, I., López Navarro, J. M., Campos-Cantón, I., & Kolosovas-Machuca, E. S. (2018). Evaluation of psychoacoustic annoyance and perception of noise annoyance inside university facilities. *Int. J. Acoust. Vib*, 23(1), 3-8.

Trojanek, R., Tanas, J., Raslanas, S., & Banaitis, A. (2017). The impact of aircraft noise on housing prices in Poznan. *Sustainability*, 9(11), 2088.

Unión Europea. Directiva (UE) 2002/49/EC del Consejo del 25 de junio de 2002, relativa a la evaluación y gestión del ruido ambiental, Periódico oficial de Comunidades Europeas , L 189 , diciembre de 2002

Unión Europea. Directiva (UE) 2003/10/ CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de febrero de 2003, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido)

Unión Europea. Directiva (UE) 2015/996 de la Comisión, 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. Publicado en: DOUE 168, de 1 de julio de 2015, páginas 1 a 823.

Unión Europe. Directiva (UE) 2017/0151 de la Comisión al parlamento Europe y al consejo, de 30 de Marzo de 2017, relativa a la aplicación de la Directiva sobre el ruido ambiental de conformidad con el artículo 11 de la Directiva 2002/49/CE

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. Recuperado 23 de septiembre de 2020, de <https://population.un.org/wup/Download/>.

Van Kempen, E., & Babisch, W. (2012). The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis. *Journal of hypertension*, 30(6), 1075-1086.

Vinci, B., Tonacci, A., Caudai, C., de Rosa, P., Nencini, L., & Pratali, L. (2017). The SENSEable Pisa Project: Citizen-Participation in Monitoring Acoustic Climate of Mediterranean City Centers. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 45(7), 1600137. <https://doi.org/10.1002/clen.201600137>.

Vorländer, M., & Summers, J. E. (2008). Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms, and acoustic virtual reality. *Acoustical Society of America Journal*, 123(6), 4028.

Wang, C., Chen, G., Dong, R., & Wang, H. (2013). Traffic noise monitoring and simulation research in Xiamen City based on the Environmental Internet of



Things. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 20(3), 248-253.

Wang, J. F., Stein, A., Gao, B. B., & Ge, Y. (2012). A review of spatial sampling. *Spatial Statistics*, 2, 1-14.

Walczak, S. (2018). Artificial neural networks. In *Encyclopedia of Information Science and Technology, Fourth Edition* (pp. 120-131). IGI Global.

*Willkommen bei der Technotrade Import-Export GmbH.* (s. f.). Technoline. Recuperado 24 de mayo de 2021, de <https://www.technoline-berlin.de/>

Witchel, H. J., Lavia, L., Westling, C. E., Healy, A., NEEDHAM, R., & Chockalingam, N. (2013, March). Using body language indicators for assessing the effects of soundscape quality on individuals. In *AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics*. AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics.

Wong, D. W., Yuan, L., & Perlin, S. A. (2004). Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 14(5), 404-415.

Whilby, S., Florentine, M., Wagner, E., & Marozeau, J. (2006). Monaural and binaural loudness of 5-and 200-ms tones in normal and impaired hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(6), 3931-3939.

Zamora, W., Calafate, C. T., Cano, J. C., & Manzoni, P. (2017). Accurate ambient noise assessment using smartphones. *Sensors*, 17(4), 917.

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 1(1), 22-32.

*Zigbee - Alianza de estándares de conectividad.* (2019, 9 diciembre). Connectivity Standards Alliance. Recuperado 7 de agosto de 2021, de <https://zigbeealliance.org/es/solution/Zigbee/>

Zwicker, E. (1961). Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 33(2), 248-248.

Zwicker, E., & Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: Facts and models*. Springer Science & Business Media.

Zwicker, E., & Terhardt, E. (1980). Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), 1523-1525.

