



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE METODOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN DE AGENTES FÍSICOS (VIBRACIÓN Y
RUIDO) EN INDUSTRIAS DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

DEVELOPMENT OF METHODOLOGIES FOR THE MANAGEMENT OF PHYSICAL AGENTS
(VIBRATION AND NOISE) IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Para la obtención del
TÍTULO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA CON MENCIÓN INTERNACIONAL
PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA CIVIL

Doctoranda:

María Luisa de la Hoz Torres

Directores:

Dra. M^a Dolores Martínez Aires

Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Granada

Dr. Diego Pablo Ruíz Padillo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada

Granada, 18 de febrero de 2022

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: María Luisa de la Hoz Torres
ISBN: 978-84-1117-716-0
URI: <https://hdl.handle.net/10481/80566>



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Título de la tesis:

DESARROLLO DE METODOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN DE AGENTES FÍSICOS (VIBRACIÓN Y
RUIDO) EN INDUSTRIAS DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

DEVELOPMENT OF METHODOLOGIES FOR THE MANAGEMENT OF PHYSICAL AGENTS
(VIBRATION AND NOISE) IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Para la obtención del

TÍTULO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA CON MENCIÓN INTERNACIONAL
PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA CIVIL

Doctoranda:

María Luisa de la Hoz Torres

Directores:

Dra. M^a Dolores Martínez Aires

Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Granada

Dr. Diego Pablo Ruíz Padillo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada

Granada, 18 de febrero de 2022

Mención internacional

Con el fin de obtener el Título de Doctor por la Universidad de Granada con Mención Internacional, que el Real Decreto 99/2011 establece en su artículo 15, se han cumplido los siguientes requisitos:

- i. Durante el periodo de formación necesario para la obtención del Título de Doctor, la doctoranda realizó una estancia mínima de tres meses en Portugal, en la Universidade do Minho, cursando estudios o realizando trabajos de investigación bajo la supervisión y dirección del Dr. Pedro Miguel Ferreira Martins Arezes en el Centro de Investigação ALGORITMI da Escola de Engenharia.
- ii. El Resumen, Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación que figuran en esta Memoria de tesis doctoral se han redactado y presentado en inglés y español.
- iii. La Tesis ha sido informada por tres expertos doctores: Dr. Alistair Gibb, Emeritus Professor of Construction Engineering Management at Loughborough University · Loughborough University (England); Dra. Sheyla M. Baptista Serra, Professora do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (Brasil) y Dr. João dos Santos Baptista, Professor do Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto (Portugal).
- iv. Dr. Nélon Bruno Martins Marques da Costa, experto perteneciente una institución de educación superior no española, con el título de doctor, y distinto del responsable de la estancia mencionada en el apartado i, forma parte del tribunal evaluador de la tesis.

Financiación

A continuación, se detallan las principales fuentes de financiación que han contribuido al desarrollo de esta Tesis Doctoral:

- Contrato de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y ciencia (FPU16/07108), en su resolución del 22 de diciembre de 2016, BOE nº 14.
- Proyecto denominado "Generación de herramientas y propuesta de procesos de actuación para controlar la exposición a factores ambientales usando la prevención desde el diseño sostenible con BIM (FACAMBIM)", (B-TEP-362-UGR18). Financiado por la Junta de Andalucía. Periodo: 01/01/2020 – 30/06/2022.
- Proyecto denominado "Marco de Trabajo basado en BIM para la edificación sostenible a través de la mejora de la calidad ambiental interior" (PID2019-108761RB-I00). Financiado por la Agencia de Investigación Estatal de España y los Fondos de Desarrollo Regionales Europeos. Periodo: 01/06/2020-31/05/2023.
- Ayuda para la realización de estancias breves en el marco de la Convocatoria de Movilidad Internacional 2020 para Estudiantes de programas de Doctorado de la Universidad de Granada.

A mis padres,

"Los hombres baten el acero"

Salvador de la Hoz Montilla

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Tras concluir este periodo de mi vida, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible que este trabajo llegue a buen término.

A mis directores de Tesis, Dra. María Dolores Martínez Aires y Dr. Diego Pablo Ruiz Padillo, quienes confiaron en mí y me proporcionaron la oportunidad de iniciar este camino. Gracias por haberme facilitado todos los recursos que he necesitado para llevar a cabo mi investigación. Pero sobretodo, gracias por vuestro apoyo incondicional, consejos e implicación en estos años.

Al Departamento de Produção e Sistemas de la Universidade do Minho, por la cálida acogida y disponibilidad durante mi estancia. Gracias por vuestra generosidad y por facilitarme todo el soporte profesional y logístico necesario para mi trabajo. Sin duda, os debo que hayáis contribuido a que esta experiencia mía haya sido enriquecedora, mejorado mi trabajo y formación como investigadora.

A Juan Antonio Torres, Luis Torres, Manuel Ángel Torres y Juan A. Casado, por su total disponibilidad y ayuda en el trabajo de campo que en esta Tesis se ha desarrollado.

A mis profesores, en especial al Dr. Ignacio F. Sánchez García, profesor del máster de Ingeniería Acústica de la Universidad de Granada, por su aporte a mi formación y motivación para aplicar nuevos métodos en este camino.

A mis compañeros de la Escuela de Edificación, por todo el apoyo durante estos años y la ayuda prestada en todo lo que he necesitado.

A Dr. Rafael Pérez Gómez, por todo el apoyo en esta etapa.

A mis amigos y compañeros predoc, para los que solo tengo palabras de agradecimiento y orgullo por todo vuestro trabajo. Gracias por vuestra ayuda y experiencia. Sin duda, esta etapa habría sido mucho más difícil sin vosotros.

A mis padres, para los que no tengo suficientes palabras de agradecimiento. Gracias por vuestra inquebrantable confianza y apoyo incondicional en todas mis expectativas. Gracias por proporcionarme una formación académica y nunca dejar que mirase hacia abajo. Mas, sobre todo, gracias por aportarme vuestros valores y hacer de mí una mujer libre. Mis logros son los vuestros.

A mi familia, en especial a mis tíos Luis, Angustias, Clemente y Conchi, por estar siempre dispuestos a viajar para verme, aunque solo sea para unas horas. Gracias por vuestro apoyo y por estar siempre cuando yo he estado ausente.

A todos mis amigos, porque, aunque pasemos meses sin vernos e incluso podamos estar en ciudades y continentes diferentes, siempre he podido contar con vosotros.

Por último, mi más sincera gratitud a Antonio. Gracias por aportarle ilusión y sentido a estos años. Gracias por buscar metas, proponerme aplicar nuevas metodologías y ayudarme a encontrar las respuestas que han conformado esta Tesis. Gracias por no dejar que lo mínimo fuera suficiente. Solo puedo disculparme por todos los planes pospuestos, lo viajes no hechos y las horas de sueño perdidas en este proceso.

Prometo devolveros todo el tiempo que no os dediqué. ¡Gracias a todos!

RESUMEN

En la actualidad, la exposición a ruido y vibraciones es una característica presente en muchos puestos de trabajo del sector de la Construcción y sus industrias afines. En todos los países de la Unión Europea existe una exhaustiva normativa para la gestión de la exposición a ambos Agentes Físicos desarrollada en forma de Directivas, a la que se unen las normas del Organismo Internacional de Estandarización (ISO). No obstante, a la vista de las graves consecuencias a largo plazo para la salud de los trabajadores, se observa que pueden ser mejoradas las metodologías y sistemas de gestión desarrollados en aplicación del marco normativo.

En este contexto, la presente Memoria de Tesis Doctoral se centra en el desarrollo de nuevas metodologías para la gestión de la exposición a Agentes Físicos en industrias del sector de la Construcción, concretamente, a las vibraciones transmitidas a cuerpo entero (VCE) y el ruido.

Para ello, y como primer paso, se aborda el análisis de los Agentes Físicos a los que están expuestos quienes trabajan en las industrias afines al sector de la Construcción, así como los riesgos para su salud teniendo en cuenta los límites de exposición permitidos legalmente. Además, se analizan las herramientas y metodologías empleadas para la gestión de dichos riesgos en el sector de la Construcción a partir de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones actuales.

En segundo lugar, se desarrolla un trabajo de campo consistente en una campaña de medición en dos industrias cuya actividad está vinculada al sector de la Construcción: una planta de gestión de residuos de la construcción y una planta de producción de hormigón. En esta campaña se identifica la presencia de ambos Agentes Físicos en dos escenarios claramente diferenciados: (1) exposición a VCE en los trabajos realizados fuera de las instalaciones industriales derivado de la conducción de vehículos y (2) exposición a ruido en las actividades desarrolladas en las propias instalaciones. De forma complementaria, se desarrolla otra campaña de medición para identificar los factores que condicionan los niveles de VCE transmitidos a los trabajadores y abordar un análisis crítico de las metodologías de evaluación de dicha exposición.

En tercer lugar, se ha abordado el diseño y propuesta de nuevas metodologías y marcos de trabajo para gestionar la exposición a VCE y ruido considerando los dos escenarios identificados en la primera campaña de medición. Por un lado, se ha propuesto una Metodología para la Gestión de la Exposición a largo plazo a VCE en conductores de maquinaria pesada. Esta metodología permite gestionar la exposición a través del diseño de actividades, considerando los efectos a largo plazo acumulativos de la exposición sobre el trabajador. A partir de esta propuesta se ha diseñado un Marco de Trabajo, implementado en GIS, para la Optimización del Diseño de Rutas basado en el rendimiento del trabajo y la minimización de la exposición a VCE. La validación del marco de trabajo se llevó a cabo a partir de su aplicación a un caso real, concretamente, a los desplazamientos que se realizan desde una planta de hormigón.

Por otro lado, se ha propuesto una Metodología, diseñada en un entorno BIM, para la Gestión de la Exposición al Ruido producido en las propias instalaciones de la industria, basado en la modelización de las fuentes y la simulación de la propagación del ruido en las instalaciones, que permite evaluar el nivel de exposición a ruido de los trabajadores a lo largo de la jornada laboral.

Para ilustrar el desarrollo de dicha propuesta se muestra su aplicación a un caso de estudio, específicamente en una planta de hormigón dispuesta en un sistema planta-torre.

Las aportaciones generadas en esta Tesis Doctoral constituyen nuevas herramientas de gestión de la exposición a VCE y ruido, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de los trabajadores durante sus años de vida laboral y posterior jubilación, ya que ambas proporcionan una evaluación a partir del diseño de actividades y generan una base de datos que permite realizar una evaluación a largo plazo de la exposición de los trabajadores a ambos Agentes Físicos.

PALABRAS CLAVE: vibración a cuerpo entero, ruido, sistemas de gestión, BIM, GIS

ABSTRACT

Nowadays, a large number of workers in the construction industry are exposed to physical agents such as vibration and noise on a daily basis. All the countries of the European Union have regulations for the management of exposure to both physical agents, developed in the form of Directives, in addition to the standards of the International Organization for Standardization (ISO). However, in view of the serious consequences for workers' health in the long term, it is noted that the methodologies and management systems developed in application of the regulatory framework can be improved.

In this context, the main objective of this thesis has been the Development of New Methodologies for the management of exposure to Physical Agents in Industries of the Construction Sector, specifically, whole-body vibration (WBV) and noise.

For this purpose, and as a first step, the analysis of the physical agents to which workers in the construction sector are exposed, as well as the risks to their health taking into account the legally permitted exposure limits, is addressed. In addition, the tools and methodologies used to manage these risks in the construction sector based on Information and Communication Technologies are analyzed.

Secondly, a field measurement campaign was carried out in two industries involved in the construction sector: a construction waste management plant and a concrete batching plant. From the results obtained in this fieldwork, Physical Agents were identified in two clearly differentiated scenarios: (1) WBV exposure in the activities performed outside the industrial facilities (i.e. driving heavy equipment vehicle) and (2) noise exposure in activities performed in the industrial facilities.

Additionally, a further measurement campaign was carried out to compare WBV assessment methods, to analysis the influence of different conditions of displacements and speed and to compare the results given by this evaluation procedure with the exposure limit values.

Thirdly, the design of new methodologies and frameworks to manage exposure to WBV and noise has been addressed taking into account the two scenarios identified in the first measurement campaign. On the one hand, a Methodology for the Management of Long-term Exposure to WBV in heavy vehicle drivers has been proposed. The proposed methodology allows managing exposure through the design of activities, considering the cumulative effects of WBV exposure in the long term worker's health. Based on this proposal, a GIS-based Framework has been designed for the Optimization of Route Design using the optimizing criteria of travelled time and WBV exposure. The validation of the framework was carried out by applying it to a real case, specifically to the activity of ready mix concrete delivery from a concrete batching plant.

On the other hand, a Methodology based on BIM has been designed to manage the Noise Exposure produced in the industrial facilities. From the modeling of noise sources and the simulation of noise propagation in the industrial facilities, the noise exposure level of workers is calculated. In order to illustrate the proposed BIM-based framework, its application to a case study is shown, specifically, a concrete batching plant arranged as a tower-plant system.

The contributions made through this thesis dissertation constitute new tools whose implementation facilitates the management and assessment of WBV and noise exposure on

worker's health. Both frameworks contribute to improve the quality of life of workers during their working life and subsequent retirement. Both proposals provide an evaluation based on the design of activities and generate a database that allows a long-term assessment of the exposure of workers to both physical agents

KEY WORDS: whole-body vibration, noise, management systems, BIM, GIS

Publicaciones científicas y difusión de los resultados

Parte de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la Tesis Doctoral han sido publicados en revistas de alto impacto indexadas en JCR (Journal Citation Report):

- **M.L. de la Hoz-Torres**, A.J. Aguilar, M.D. Martínez-Aires, D.P. Ruiz, A methodology for assessment of long-term exposure to whole-body vibrations in vehicle drivers to propose preventive safety measures, *Journal of Safety Research* 78 (2021) 47-58, Doi: 10.1016/j.jsr.2021.04.002
- **M.L. de la Hoz-Torres**, A.J. Aguilar, D.P. Ruiz, M.D. Martínez-Aires, GIS-based framework to manage Whole-Body Vibration exposure, *Automation in Construction* 131 (2021), Doi: 10.1016/j.autcon.2021.103885

Otras publicaciones en capítulos de libro:

- **M.L. de la Hoz-Torres**, A.J. Aguilar, D.P. Ruiz, M.D. Martínez-Aires, Analysis of Whole-Body Vibration Transmitted in Ready Mix Concrete Delivery Operations, *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 406, 2022, pp. 145-154. Doi: 10.1007/978-3-030-89617-1_13
- A.J. Aguilar-Aguilera, **M.L. De la Hoz-Torres**, M.D. Martínez-Aires, D.P. Ruiz, Noise Management in the Construction Industry Using Building Information Modelling Methodology (BIM): A Tool for Noise Mapping Simulation, *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 277, 2020, pp. 181-188. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41486-3_20
- **M.L. De la Hoz-Torres**, A.J. Aguilar-Aguilera, M.D. Martínez-Aires, D.P. Ruiz, Practical Use of Noise Mapping to Reduce Noise Exposure in the Construction Industry, *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 277, 2020, pp. 209-216. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41486-3_23
- **M.L. De la Hoz-Torres**, A.J. Aguilar-Aguilera, M.D. Martínez-Aires, D.P. Ruiz, A comparison of ISO 2631-5:2004 and ISO 2631-5:2018 standards for whole-body vibrations exposure: A case study, *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 202, 2019, pp. 711-719. Doi: 10.1007/978-3-030-14730-3_74

Comunicaciones en congresos:

- **M.L. De la Hoz-Torres**, A.J. Aguilar-Aguilera, M.D. Martínez-Aires, D.P. Ruiz, Assessment of whole-body vibration exposure using ISO2631-1:2008 and ISO2631-5:2018 standards, INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 2019. Doi: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/1731.pdf
- **M.L. de la Hoz-Torres**, M.D. Martínez-Aires, M. Martín-Morales, D.P.R. Padillo, Whole body vibration and acoustic exposure in construction and demolition waste management, *Occupational Safety and Hygiene VI - Selected contributions from the International*

Symposium Occupational Safety and Hygiene, SHO 2018, 2018, pp. 273-277, DOI: 10.1201/9781351008884-48.

- **M.L. De La Hoz-Torres**, M. López-Alonso, D.P. Ruiz Padillo, M.D. Martínez-Aires, Analysis of whole-body vibrations transmitted by earth moving machinery, Occupational Safety and Hygiene V - Proceedings of the International Symposium on Occupational Safety and Hygiene, SHO 2017, 2017, pp. 453-456, DOI: 10.1201/9781315164809-85
- **De la Hoz Torres, M. L.**, Aguilar Aguilera, A. J., Ruiz Padillo, D. P., & Martínez Aires, M. D. Análisis de la exposición a vibraciones transmitidas al cuerpo entero en tractores agrícolas. XI Congreso Iberoamericano de Acústica; Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica – Tecniacústica'18. http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Cadiz18/AEV-0_022.pdf

Premios

- Premio a Joven Científico de la Sociedad Española de Acústica (SEA) en el congreso internacional INTERNOISE 19', por el trabajo: "Evaluación de la exposición a las vibraciones de cuerpo entero mediante las normas ISO2631 1:2008 e ISO2631 5:2018. Año 2019.
- Premio "Andrés Lara" para Jóvenes Investigadores en su Decimoséptima Edición, concedido por la Sociedad Española de Acústica (SEA). Madrid, 18 de junio de 2019.

PRELIMINAR

Con esta Memoria de Tesis se pretende dar cumplimiento a lo establecido en el Real Decreto/2011, de 28 de enero (BOE: 10 de febrero de 2011) por el que se establece la ordenación de las Enseñanzas Universitarias Oficiales, para optar al Grado de Doctor Internacional por la Universidad de Granada.

La Memoria cumple con todos los requisitos establecidos en el artículo 16 en lo referente a Mención Internacional en el título de Doctor:

- Cuenta con dos directores de investigación de la Universidad de Granada: Dra. María Dolores Martínez Aires del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y Dr. Diego Pablo Ruiz Padillo del Departamento de Física Aplicada.
- En el Capítulo 4 se presentan los resultados de un trabajo de campo, de los cuales parte han sido publicados online en dos capítulos de libro (DOI: 10.1007/978-3-030-89617-1_13 y DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41486-3_23) y en un congreso internacional (DOI: 10.1201/9781351008884-48).
- En el Capítulo 5 se presentan los resultados del trabajo de campo, de los que parte de los resultados han sido presentados en un congreso internacional (http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/1731.pdf)
- En la primera sección del Capítulo 6 se presenta un artículo, aceptado y publicado *on line* (DOI: 10.1016/j.jsr.2021.04.002), en la revista *Journal of Safety Research*, cuyo Factor de Impacto en la categoría *Public, Environmental & Occupational Health* es 40/176 (Q1)
- En la segunda sección del Capítulo 6 se presenta un artículo, aceptado y publicado *on line* (DOI: 10.1016/j.jsr.2021.04.002), en la revista *Journal of Safety Research*, cuyo Factor de Impacto en la categoría de *Civil Engineering* es 2/137 (D1).
- En el Capítulo 7 se presenta un artículo que se encuentra en proceso de revisión en una revista.
- Por último, esta Memoria cuenta con los informes favorables de los directores de investigación de la misma, por lo que se deposita en la Secretaría de la Comisión de Doctorado con objeto de que sea conocida e informada por la dicha Comisión de Doctorado de la Universidad de Granada tras su exposición a la comunidad universitaria.

ÍNDICE

RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
Publicaciones científicas y difusión de los resultados	XV
PRELIMINAR	XVII
1. INTRODUCCIÓN	29
1.1. Antecedentes. Planteamiento del Problema de Investigación	31
1.2. Justificación de la investigación	32
1.3. Objetivos	33
1.4. Metodología	34
1.5. Estructura de la Investigación	35
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	39
2.1. Presencia de agentes físicos en la industria de la construcción	41
2.2. Efectos de la exposición en el cuerpo humano	45
2.2.1. Influencia de la exposición a VCE	45
2.2.2. Influencia de la exposición a ruido	48
2.3. Marco normativo e institucional en materia de Seguridad y Salud Laboral	50
2.4. Marco normativo y métodos para la evaluación de la exposición a VCE	50
2.5. Marco normativo y métodos para la evaluación de la exposición a ruido	52
2.6. Estado actual de la gestión de estos riesgos y metodologías aplicadas en la industria de la construcción	54
2.7. Establecimiento de las Hipótesis de investigación	57
3. METODOLOGÍAS ESPECÍFICAS	59
3.1. Evaluación de la exposición a VCE	61
3.1.1. Instrumentos utilizados en el proceso de adquisición de datos	61
3.1.2. Criterios utilizados en la estrategia de medición y procedimiento empleado durante la caracterización de las actividades que exponen al trabajador a VCE	63
3.1.3. Metodología de procesamiento de datos para el análisis de la exposición a vibraciones a partir de los métodos establecidos en la normativa	63
3.2. Evaluación de la exposición a ruido	81
3.2.1. Instrumentos utilizados para la adquisición de datos	81
3.2.2. Métodos empleados para la evaluación de la exposición a ruido	81
3.3. Valores límites de exposición	82

4.	TRABAJO DE CAMPO	83
4.1.	CASO 1: Planta de gestión de residuos de construcción y demolición	85
4.1.1.	Descripción de la planta objeto de estudio y los procesos desarrollados	85
4.1.2.	Resultados obtenidos de la campaña de medición de VCE	87
4.1.3.	Resultados obtenidos de la campaña de medición de ruido	88
4.2.	CASO 2: planta de producción de hormigón	91
4.2.1.	Descripción de la planta objeto de estudio y procesos desarrollados	91
4.2.2.	Resultados obtenidos de la campaña de medición de VCE	92
4.2.3.	Resultados obtenidos de la campaña de medición de ruido	95
4.3.	Discusión y Validación de la Hipótesis H1	96
5.	ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS METODOLOGÍAS Y LOS FACTORES QUE CONDICIONAN LA EXPOSICIÓN A VCE	97
5.1.	Introducción	99
5.2.	Diseño de campaña experimental	99
5.3.	Resultados	103
5.3.1.	Análisis de acuerdo con la norma ISO 2631-1:2008 y la Directiva 2002/44/CE	103
5.3.2.	Análisis de acuerdo con la norma ISO 2631-5:2004.	105
5.3.3.	Análisis de acuerdo con la norma ISO 2631-5:2018	109
5.4.	Discusión	113
5.5.	Conclusiones. Validación de la Hipótesis H2	116
6.	DISEÑO DE UN MARCO DE TRABAJO PARA LA GESTIÓN DE LA EXPOSICIÓN A VCE	117
6.1.	Propuesta de una nueva metodología de gestión de la exposición a VCE	119
6.1.1.	Metodología propuesta para la gestión de VCE	119
6.1.2.	Aplicación de la metodología propuesta a un caso de estudio de un conductor de EMP	123
6.1.3.	Discusión e implicaciones prácticas	133
6.2.	Marco metodológico basado en GIS para la gestión de la exposición a VCE	133
6.2.1.	Diseño del marco de trabajo propuesto	134
6.2.2.	Caso de estudio	134
6.2.3.	Discusión e implicaciones prácticas	145
6.3.	Conclusiones y validación de la Hipótesis H3	147

7. DISEÑO DE UN MARCO DE TRABAJO PARA LA GESTIÓN DE LA EXPOSICIÓN A RUIDO	149
7.1. Marco de trabajo basado en BIM para la para la gestión de la exposición a ruido	151
7.1.1. Definición del marco de trabajo	153
7.2. Aplicación a un caso ilustrativo	161
7.3. Discusión e implicaciones prácticas	163
7.4. Conclusiones y validación de la Hipótesis H4	165
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN • CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES	167
8.1. Versión castellano	169
8.1.1. Conclusiones	169
8.1.2. Futuras Líneas de Investigación	173
8.2. English Version	175
8.2.1. Conclusions	175
8.2.2. Future research lines	179
REFERENCIAS	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de la Estructura de la investigación.....	37
Figura 1-2. Fases de la investigación. Estructura de la Memoria	38
Figura 2-1. Porcentaje de personas que declaran estar expuestas a factores de riesgo que pueden afectar negativamente a la salud física en España.....	41
Figura 2-2. Exposición a ruido, vibraciones, calor o frío en el lugar de trabajo. Fuente: adaptado de (Irastorza et al., 2016).	42
Figura 2-3. Porcentaje de trabajadores expuestos a vibraciones y ruido en España por sectores laborales (Eurofound, 2017).	42
Figura 2-4. Comparación del porcentaje de trabajadores expuestos a vibraciones mecánicas y ruido en España y la media de la Unión Europea	43
Figura 2-5. Modelo mecánico del cuerpo humano".	46
Figura 2-6. Ejes basicéntricos del cuerpo humano en función de su posición	48
Figura 3-1. Equipo SV106 con acelerómetro triaxial SV38 en disco semirrígido	61
Figura 3-2. Respuesta en frecuencia del acelerómetro	62
Figura 3-3. Filtro HP utilizado para las mediciones de aceleración (la señal de vibración) en la frecuencia.....	63
Figura 3-4. Respuesta en frecuencia del filtro Wd.	68
Figura 3-5. Respuesta en frecuencia del filtro Wk.	68
Figura 3-6. Diagrama de cáisolo ISO2631-5:2004	69
Figura 3-7. Sistema de un grado de libertad (SDOF)	70
Figura 3-8. Diagrama de flujo para la aplicación de los modelos definidos en la norma ISO 2631-5:2018.	76
Figura 3-9. Valores de los grupos posturales dados en la Tabla 3-11.....	78
Figura 3-10. Esquema para el cálculo de C_{dyn}, i	79
Figura 3-11. 2260 Investigator Brüel&Kjaer	81
Figura 4-1. Ubicación de la planta de valorización de residuos.	85
Figura 4-2. Ubicación de los puntos de medición del NPS.	89
Figura 4-3. Emplazamiento de la planta de hormigón.	91
Figura 4-4. Resultados obtenidos tras aplicar el método A(8).....	93
Figura 4-5. Resultados obtenidos tras aplicar el método VDV.	93
Figura 4-6. Resultados obtenidos tras aplicar el método definido en la ISO2631-5.	94
Figura 4-7. Distribución de las instalaciones en la planta de hormigón.	95
Figura 5-1. Ruta seleccionada para la campaña experimental.	101
Figura 5-2. Tipos de superficie incluidas en la ruta.	101
Figura 5-3. Velocidad media de desplazamiento según tipo de superficie.	102
Figura 5-4. Comparación de los resultados obtenidos tras aplicar los métodos A(8) y VDV para cada conductor y tipo de superficie.	105
Figura 5-5. Comparación resultados de Sed obtenidos para cada superficie y conductor.....	106
Figura 5-6. Factor R de la exposición en cada tipo de superficie, desde los 20 hasta los 65 años, del conductor 1 (a)) y conductor 2 (b))......	108

Figura 5-7. Comparación de los valores <i>SDA</i> obtenidos en cada superficie para cada conductor.	110
Figura 5-8. Evolución del factor <i>RA</i> en cada nivel vertebral para cada tipo de superficie	112
Figura 5-9. Comparación de la evolución del Factor <i>R</i> y <i>RA</i> de los dos conductores para cada tipo de superficie.....	115
Figura 6-1. Diagrama de la metodología propuesta.	119
Figura 6-2. <i>SdA</i> frente la velocidad media.	125
Figura 6-3. Método GAP y Elbow para la selección del número de agrupaciones.	126
Figura 6-4. Agrupamiento tras aplicar el algoritmo k-means++ al <i>SdA</i> en base a la velocidad media de desplazamiento.	126
Figura 6-5. Relación entre <i>A(8)</i> y <i>SdA</i> en las cuatro agrupaciones generadas. Línea azul discontinua indica VLA respecto al método <i>A(8)</i>	127
Figura 6-6. Relación entre relación entre el VDV y <i>SdA</i> de nivel vertebral más desfavorable en cada una de las agrupaciones.....	128
Figura 6-7. Evolución de <i>RA</i> durante los años de exposición.	129
Figura 6-8. Mapa de color obtenido para carretera sin asfaltar.....	131
Figura 6-9. Mapa de color obtenido para carretera sin asfaltar.....	132
Figura 6-10. Marco de trabajo propuesto de la metodología desarrollada.	134
Figura 6-11. Red de vías en el área de estudio.	142
Figura 6-12. Puntos de origen y destino de la ruta.	143
Figura 6-13. Ruta óptima (basado en los criterios de optimización mostrados en la Tabla 6-4).....	143
Figura 6-14. Resultados del caso de estudio.	144
Figura 6-15. Resultados obtenidos tras aplicar el marco metodológico al caso de estudio.....	145
Figura 7-1. Diagrama de flujo del marco de trabajo desarrollado en BIM.	152
Figura 7-2. Ejemplo de elementos del BIM con coordenadas tridimensionales.....	154
Figura 7-3. Método de cálculo de la altura media <i>hm</i>	158
Figura 7-4. Esquema del análisis de las dimensiones de los elementos para considerarlos barreras acústicas.	158
Figura 7-5. Diferentes vías de propagación entre la fuente y el punto receptor con una barrera intermedia.....	159
Figura 7-6. Efecto de reflexión especular desde una barrera.	160
Figura 7-7. Imagen del Modelo digital de las instalaciones en Revit.....	161
Figura 7-8. Ejemplo de codificación de periodo de activación de las fuentes.....	162
Figura 7-9. Ejemplo de atributos asignados a los elementos del modelo.	162
Figura 7-10. Ejemplo de atributos asignados a los elementos del modelo.	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Actividades económicas con mayor exposición a Riesgos Físicos en España.	43
Tabla 2-2. Nivel de ruido emitido por equipos y máquinas, utilizados en el sector de la Construcción y sus subsectores, medido a 15 m de distancia de la fuente.....	44
Tabla 2-3. Efectos de las vibraciones.	46
Tabla 2-4. Efectos del ruido.	49
Tabla 2-5. Valores límite de exposición y valores de exposición que dan lugar a una acción, referidos a los niveles de exposición diaria y a los niveles pico.	53
Tabla 3-1. Características del equipo SV106 y SV38.....	62
Tabla 3-2. Criterios para la aplicación de las curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones principales.	64
Tabla 3-3. Criterios para la aplicación de las curvas de ponderación n frecuencia para factores de ponderación adicionales.....	64
Tabla 3-4. Parámetros de las funciones de transferencia en frecuencias principales.....	65
Tabla 3-5. Parámetros de las funciones de transferencia de las ponderaciones adicionales.	65
Tabla 3-6. Características de los filtros de ponderación en frecuencia.	66
Tabla 3-7. Cálculo matemático de los filtros de ponderación en frecuencia.....	67
Tabla 3-8. Coeficientes del modelo para el cálculo de la aceleración transmitida.	73
Tabla 3-9. Coeficientes para el modelo de cálculo de aceleración transmitida del eje z.	73
Tabla 3-10. Valores de los ángulos para los tipos de postura (ángulos en grados).....	77
Tabla 3-11. Características del calibrador acústico.....	81
Tabla 3-12. Valores límites de exposición a VCE.	82
Tabla 3-13. Valores límites de exposición a ruido.....	82
Tabla 4-1. Equipos y máquinas utilizadas en la planta de gestión de residuos de la construcción.....	86
Tabla 4-2. Identificación de los puestos de trabajo y su tiempo de exposición.	86
Tabla 4-3. Resultados obtenidos tras aplicar el método de evaluación A(8)	88
Tabla 4-4. Resultados obtenidos tras aplicar el método de evaluación VDV.....	88
Tabla 4-5. Niveles continuos equivalentes obtenidos.....	89
Tabla 4-6. Resultados obtenidos.	95
Tabla 5-1. Características de los conductores.....	100
Tabla 5-2. Características del vehículo.....	100
Tabla 5-3. Tipos de superficies incluidas en la ruta establecida.....	101
Tabla 5-4. Resultados obtenidos del conductor 1 de acuerdo a la ISO 2631-1:2008, método A(8).....	103
Tabla 5-5. Resultados obtenidos del conductor 2 de acuerdo a la ISO 2631-1:2008, método A(8).....	103
Tabla 5-6. Resultados obtenidos del conductor 1 de acuerdo con la ISO 2631-1:2008, método VDV.....	104
Tabla 5-7. Resultados obtenidos del conductor 2 de acuerdo con la ISO 2631-1:2008, método VDV.....	104
Tabla 5-8. Valores Sed obtenidos de la exposición a VCE del conductor 1.....	105

Tabla 5-9. Valores Sed obtenidos de la exposición a VCE del conductor 2.....	106
Tabla 5-10. Factor R obtenido en cada tipo superficie en el caso del conductor 1.....	107
Tabla 5-11. Factor R obtenido en cada tipo superficie en el caso del conductor 2.....	107
Tabla 5-12. Valores <i>SDA</i> obtenidos para cada nivel vertebral en el caso del conductor 1.	109
Tabla 5-13. Valores <i>SDA</i> obtenidos para cada nivel vertebral en el caso del conductor 2.	109
Tabla 5-14. Factor <i>RA</i> para cada nivel vertebral en cada tipo de superficie. Caso del conductor 1.	111
Tabla 5-15. Factor <i>RA</i> para cada nivel vertebral en cada tipo de superficie. Caso del conductor 2.	111
Tabla 5-16. Resumen de resultados obtenidos de riesgo para la salud.	113
Tabla 6-1. Valores de <i>SdA</i> obtenidos para los niveles vertebrales de T12/L1 a L5/S1 para los grupos definidos según el tipo de superficie.	129
Tabla 6-2. Coeficientes del modelo general obtenido del método de ajuste polinomial.	130
Tabla 6-3. Coeficientes (con nivel de confianza del 95%).....	131
Tabla 6-4. Criterios de elaboración del ráster de coste.....	137
Tabla 6-5. Resultados obtenidos en el proceso de caracterización de la actividad.	142
Tabla 6-6. Parámetros obtenidos tras analizar el caso de estudio.	144
Tabla 7-1. Atributos asignados a los elementos emisores (fuentes de ruido) y puntos receptores (puestos que ocupan los trabajadores).	154
Tabla 7- 2. Valores de emisión de ambas fuentes utilizados han sido seleccionados de la norma BS.	162
Tabla 7-3. Resultados obtenidos tras ejecutar el marco de trabajo.	163

ACRÓNIMOS

A(8)	Valor promedio de la exposición a la vibración normalizado para un periodo de 8 horas
A _{atm}	Atenuación atmosférica
A _{bar}	Atenuación debida a las barreras
A _{diff}	Atenuación por difracción
A _{div}	Atenuación geométrica
A _{gr}	Atenuación debida al efecto del suelo
A _{ref}	Atenuación por reflexión
a _w	Aceleración instantánea ponderada en frecuencia
AIC	Arquitectura, Ingeniería y Construcción
B	Área del disco vertebral
b	Edad a la que comenzó la exposición
BIM	Building Information Modelling
C _{dyn, i}	Suma de las fuerzas pico de compresión que actúan sobre el disco vertebral
D _k	Dosis de aceleración en la dirección k
EMP	Equipos de Maquinaria pesada
EU-OSHA	Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo
GIS	Sistema de información geográfica (en inglés Geographic Information System)
IMC	Índice de masa corporal
INSST	Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
ISO	Organización Internacional de Normalización (en inglés, International Organization for Standardization)
K	Factor de multiplicación definido para cada eje
L _{Aeq,d}	Nivel de exposición diario equivalente al ruido
LCP	Algoritmo de ruta de menor coste (en inglés, Least-Cost Path)
MDE	Modelo digital de elevación
NPS	Nivel de Presión Sonora
PtD	Prevención a través del diseño
R	Factor de riesgo según la norma ISO 2631-5:2004
R ^A	Factor de riesgo según la norma ISO 2631-5:2018
RMC	Hormigón preparado (en inglés, Ready mix concrete)
rms _w	valor medio cuadrático de la aceleración ponderada
S _d ^A	Dosis de compresión diaria equivalente según la norma ISO 2631-5:2018
S _{ed}	Dosis de compresión estática diaria según la norma ISO 2631-5:2004
T	Tiempo de duración de la medición
T _{exp}	Duración diaria de la exposición a vibraciones
T _{meas}	Período de medición

T_0	Duración de referencia de 8 horas
TME	Trastornos músculo-esqueléticos
$\bar{v}_s$	Velocidad media para recorrer 1 km sobre la s-esima superficie
VCE	Vibraciones transmitidas a cuerpo entero
VDV	Dosis de Vibración (en inglés Vibration Dosis Value)
vdv_w	Valor de la dosis de vibración de la aceleración media ponderada
VLA	Valor de exposición que da Lugar a una Acción
VLE	Valor Límite de Exposición

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se recogen los antecedentes sobre el Problema de Investigación, cuya solución será el resultado principal de la Tesis Doctoral, su planteamiento, la formulación de objetivos y el establecimiento del grupo de hipótesis apriorísticas de investigación que se describen en los Capítulos 4, 5, 6 y 7.

Cualquier investigación científica debe apoyarse en una metodología adecuada con la que desarrollarla de forma que se garantice tanto la bondad de los resultados que se obtengan como la consecución del Objetivo General establecido. Para ello, se han determinado unas etapas de actuación, que se corresponden con los diferentes capítulos de esta Memoria, en las cuales se abordan los Objetivos Específicos de investigación de forma que, tras el análisis de los resultados obtenidos a lo largo del proceso, se concluya, corroborándolo fehacientemente, la consecución del Objetivo General. Así mismo, se presentan las fuentes de información y la Estructura de la Investigación. Finaliza el capítulo mostrando las diferentes partes que configuran la Memoria de Tesis Doctoral.

1.1. Antecedentes. Planteamiento del Problema de Investigación

La sociedad se encuentra inmersa en una constante evolución fomentada por, entre otros factores, los avances tecnológicos. La innovación, el desarrollo y comercialización de nuevos materiales, equipos y herramientas están modificando tanto las costumbres y forma de vida de las personas como el desarrollo de su actividad laboral. La industrialización de los procesos productivos y la mecanización de los puestos de trabajo han eliminado muchos de los riesgos que existían previos a su implantación, pero ha determinado que los trabajadores tengan una mayor exposición a otros riesgos como los producidos por agentes físicos, entre los que se incluyen las vibraciones y el ruido (INSST, 2014; Raman et al., 2004). El último Informe General publicado sobre los datos obtenidos en la Encuesta Europea de Empresas y Riesgos Emergentes (ESENER) puso de manifiesto que el 70.9% de los trabajadores afirman encontrarse expuestos regularmente a ruido, vibraciones, calor, o frío, en su lugar de trabajo (Irastorza et al., 2016).

Por otro lado, la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA) resalta que un alto porcentaje de los trabajadores se encuentran expuestos a vibraciones transmitidas a cuerpo entero (VCE), existiendo evidencias epidemiológicas que relacionan dicha exposición con la aparición de trastornos músculo-esqueléticos (TME), lo que tiene un elevado coste para las empresas y la sociedad (EU-OSHA, 2019, 2022; Russo et al., 2020). De hecho, el informe publicado como primer avance de los resultados obtenidos en la encuesta ESENER 2019 revela que los TME se encuentran entre las mayores preocupaciones de las empresas europeas (EU-OSHA, 2020a). Según la EU-OSHA, evitar que los trabajadores sufran TME y promover su salud musculoesquelética a lo largo de su vida laboral, desde su primer empleo, es fundamental para hacer frente a los efectos a largo plazo del envejecimiento demográfico, objetivo este que está en consonancia con los de la Estrategia Europea 2020-2022 (EU-OSHA, 2022). La Unión Europea ya estableció límites a la exposición de los trabajadores a VCE en la Directiva 2002/44/CE. No obstante, investigaciones recientes han señalado que aún existe un riesgo elevado de sufrir TME relacionados con dolores lumbares en exposiciones a VCE incluso por debajo de dichos valores límites (Bovenzi et al., 2017).

Así mismo, el ruido es uno de los agentes físicos más habituales en los lugares de trabajo. La exposición a ruido tiene efectos negativos sobre el sistema auditivo que, si se detecta demasiado tarde, dichos efectos pueden ser irreversibles. Además, suele causar trastornos del sueño y aumentar el estrés (OIT, 2022), multiplicando el riesgo de sufrir un accidente (EU-OSHA, 2005).

Tanto el ruido como la exposición a VCE están muy presentes en el sector de la Construcción (Vitharana & Chinda, 2021). En él, los trabajadores presentan una mayor prevalencia de TME relacionados con el trabajo (EU-OSHA, 2020b; Nielsen et al., 2018), principalmente debido al manejo de la maquinaria pesada. Estudios previos evidenciaron que la mayor parte del ruido generado en las actividades de la construcción está vinculado al uso de equipos y maquinaria pesada (los cuales generan niveles de ruido entre 87-115 dBA) y herramientas eléctricas (las cuales generan entre 80 y 120 dBA) (Neitzel et al., 1999; Saleh et al., 2017). Así mismo, está demostrado que el riesgo de pérdida de audición inducida por la exposición a ruido es más alto en este sector en muchos países del mundo (Ballesteros et al., 2010; Dabirian et al., 2020; Dement et al., 2018; Fernández et al., 2009; Liang & Shi, 2021).

No obstante, no son solo los trabajadores en el emplazamiento de las obras los que se encuentran expuestos a elevados niveles de ruido y VCE, sino que otras actividades de industrias vinculadas al sector la Construcción (como proveedoras de materiales, gestoras de residuos, etc.) exponen a quienes trabajan en ellas a elevados niveles de ambos agentes físicos, pudiendo derivar en enfermedades profesionales e incluso accidentes indirectos (Lee et al., 2019). De hecho, el 30% del tonelaje transportado dentro de las ciudades es generado por las actividades de transporte de mercancías cuyo usuario final son las obras propias del sector de la Construcción (Guerlain et al., 2019).

Las industrias que dan servicios al sector de la Construcción tienen en común que su actividad empresarial se puede descomponer en dos grandes etapas: la actividad de producción desarrollada en las instalaciones propias de la empresa (*on-site*) y el transporte de materiales desde el emplazamiento de la planta a los puntos de entrega o recogida (*off-site*). Para evitar los riesgos para la salud de quienes desarrollan su actividad laboral en ambas etapas, es necesario realizar un control del nivel de exposición a vibraciones y ruido al que están sometidos a lo largo de toda su vida laboral (INSST, 2022).

Atendiendo a esta necesidad, se plantea el objetivo de diseñar estrategias que promuevan las intervenciones integradas y multidimensionales de prevención adaptadas a las características técnicas, organizativas y económicas en estas industrias. Por lo tanto, es necesario desarrollar métodos de evaluación y gestión de riesgos integrados en las organizaciones basados en enfoques preventivos que tengan en cuenta la exposición acumulativa a estos agentes físicos.

1.2. Justificación de la investigación

Un reciente estudio desarrollado por el INSST (Sánchez-Guardamino Elorriaga & García Tomás, 2021) ha puesto de manifiesto que, en España, las metodologías y sistemas de gestión de la exposición a ruido y vibraciones son insuficientes, dando como resultado un pobre cumplimiento de las directivas europeas. Este hecho tiene graves consecuencias, especialmente, en el sector de la Construcción, en el cual existe un mayor riesgo para los trabajadores derivado de la presencia de ambos agentes físicos. Las consecuencias a largo plazo sobre la salud de los trabajadores, como la aparición de TME, han determinado que se impulsen estrategias en toda Europa con el objetivo de desarrollar modelos, metodologías y herramientas prácticas orientadas a la evaluación y la gestión de todos los posibles determinantes de estas patologías de forma integradora (EU-OSHA, 2022).

Estas evidencias justifican la necesidad de plantear y diseñar nuevas metodologías y herramientas que contribuyan a mejorar la gestión de la exposición de los trabajadores a dichos riesgos. Los recientes avances en las Tecnologías de la Información y Comunicación ofrecen un gran potencial para el desarrollo de nuevos sistemas de gestión. En la actualidad, el sector de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC) está adoptando nuevas metodologías basadas en la evolución digital. El avance en el desarrollo de software y hardware ha contribuido a la evolución en este ámbito. El uso de la Metodología del Modelado de la Información del Edificio (en inglés *Building Information Modelling*, en adelante BIM) o el uso de los Sistemas de Información Geográfica (en inglés *Geographic Information System*, en adelante GIS) son ejemplos paradigmáticos de la aplicación de modelos digitales de gestión en el sector de la Construcción.

El uso de ambas metodologías, BIM y GIS, representa una oportunidad de futuras líneas de trabajos en el campo de la AIC. Recientes investigaciones han puesto de manifiesto el potencial del uso de GIS junto con BIM. Por un lado, GIS proporciona información geográfica detallada de la ubicación de las instalaciones y edificaciones, además de considerar su área de influencia, lo cual puede influir en el funcionamiento y rendimiento de las instalaciones (Santos et al., 2017). Por otro, BIM proporciona información de todas las instalaciones y su funcionamiento a partir de la información centralizada en un único modelo digital tridimensional (Sacks et al., 2018).

En este contexto, la presente Tesis Doctoral aborda el problema actual de la deficiente gestión del ruido y vibraciones en el lugar de trabajo. Por un lado, estableciendo nuevas metodologías de gestión de estos riesgos diseñadas a partir de la evaluación de estos, de forma que se garantice que las actividades sean seguras para los trabajadores. Por otro, generando marcos de trabajo que constituyan herramientas para incorporar estas nuevas metodologías de gestión en las industrias del sector de la Construcción.

1.3. Objetivos

La investigación que se presenta en esta Memoria de Tesis Doctoral tiene como Objetivo General: Desarrollar Metodologías para la Gestión de Agentes Físicos en Industrias del sector de la Construcción. Concretamente, el diseño de nuevos procedimientos basados en la Evaluación de Riesgos para la gestión de la Exposición a Vibración y a Ruido. Este Objetivo General se desglosa en los siguientes Objetivos Específicos:

- O1. Análisis de los Agentes Físicos a los que se someten quienes trabajan en las industrias afines al sector de la Construcción, así como los riesgos para su salud, teniendo en cuenta los límites de exposición permitidos legalmente. Además, realizar un análisis de las herramientas y metodologías empleadas para la gestión de dichos riesgos.
- O2. Identificación y cuantificación de los niveles de exposición a Agentes físicos presentes en los trabajos de las industrias afines al sector de la Construcción, VCE y ruido.
- O3. Análisis de las herramientas y las metodologías existentes para la gestión de la exposición a VCE presentes en conductores profesionales de vehículos pesados.
- O4. Propuesta de una metodología y desarrollo de un marco de trabajo basado en GIS para la gestión de la exposición a VCE.
- O5. Propuesta de una metodología y desarrollo de un marco de trabajo basado en BIM para la gestión de la exposición a ruido.

1.4. Metodología

La propuesta metodológica para desarrollar la investigación se adapta a cada uno de los objetivos específicos.

M1. Para alcanzar el O1 se realizó una revisión del estado del conocimiento relativo a la identificación de los Agentes Físicos presentes en las industrias afines al sector de la Construcción, así como de las herramientas y metodologías empleadas para la gestión de dichos riesgos. Para ello, se utilizaron las siguientes fuentes de información:

Investigaciones recientes

Bases de datos de publicaciones científicas (Web of Science, Scopus, ScienceDirect etc.)

Base de datos de TESEO que agrupa las tesis doctorales depositadas en los repositorios de las universidades españolas.

Normativa

Sitios web de instituciones públicas y privadas, nacionales y extranjeras.

Sitio web de Normas ISO.

Sitio web de Normas UNE.

Sitio web EUR-Lex, portal del Derecho de la Unión Europea.

Sitio web Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (EU-OSHA).

Sitio web Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST).

Sitio web Organización Mundial de la Salud (OMS).

Estadísticas relacionadas sobre la Seguridad y Salud en el sector de la Construcción

Sitio web de Eurostat, datos estadísticos oficiales de la Unión Europea.

Sitio web Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (EU-OSHA).

Las revisiones de las investigaciones realizadas permitieron el establecimiento de cuatro hipótesis apriorísticas de investigación.

M2. Para alcanzar los objetivos O2 y O3 se propuso la realización de un trabajo de campo consistente en la realización de una campaña de medición en dos industrias diferentes afines al sector de la Construcción, que han sido la herramienta para la obtención de los datos necesarios con los que contrastar las hipótesis de trabajo. Las industrias fueron seleccionadas por englobar actividades muy comunes en los procesos de construcción: una de producción de hormigón y otra de gestión de residuos de construcción y demolición. De forma complementaria, se propuso la realización de una tercera campaña de medición para desarrollar un análisis crítico de las metodologías de evaluación de VCE (dada la reciente publicación de un nuevo método definido en la ISO 2631-5:2018) y los factores que condicionan el nivel de dicha exposición.

M3. El O4 se abordó en dos etapas. En primer lugar, fue necesario diseñar una metodología de gestión de la exposición a VCE que considere la exposición acumulada a este agente físico, las diferentes superficies de desplazamiento y la velocidad. Para su validación se utilizó un caso de estudio real. Posteriormente, la metodología validada se implementó como parte de un marco de trabajo basado en GIS para el diseño de rutas que minimicen (1) la exposición a VCE y (2) el tiempo invertido en el desplazamiento. La validación del marco de trabajo se llevó a cabo a partir de su aplicación a un caso real, concretamente a los desplazamientos que se realizan desde una planta de hormigón.

M4. Para alcanzar con éxito el objetivo O5 se evaluó la integración de la información relativa a la exposición a ruido en el modelo BIM de las instalaciones de una industria afín al sector de la Construcción. Con tal fin, se propuso utilizar la información contenida en los elementos del modelo BIM para simular el nivel de presión sonora (NPS) en cada punto para cada posible escenario, a partir del cual se propone realizar la evaluación de la exposición de los trabajadores. Para la ilustrar el desarrollo de dicha propuesta se muestra su aplicación a un caso de estudio, específicamente en una planta de hormigón dispuesta en un sistema planta-torre.

1.5. Estructura de la Investigación

En la *Primera Fase* de la investigación se llevaron a cabo el Planteamiento del Problema y la Formulación del Objetivo General y los Específicos. Se estableció la Metodología a aplicar para obtener los resultados de investigación que corroborarán haber alcanzado los Objetivos Específicos como, por ende, el General.

En la *Segunda Fase* se realizó una revisión del estado del conocimiento de los distintos aspectos necesarios para realizar la investigación. En ella se obtuvo la información sobre los métodos de evaluación de exposición a vibraciones y ruido en los lugares de trabajo, identificándose los límites establecidos en la normativa vigente. Posteriormente, se realizó un análisis de la situación actual del sector de la AIC sobre el tema de estudio, identificando los métodos utilizados en la actualidad para gestionar estos riesgos y las nuevas metodologías que potencialmente podrían implementarse. Esta fase concluyó con la formulación de las Hipótesis de partida:

H1. Las actividades realizadas en las industrias afines al sector de la Construcción exponen a quienes las realizan a Agentes Físicos, concretamente:

- VCE en actividades desarrolladas fuera de las instalaciones, *off-site*; es decir, la conducción de vehículos pesados desde el emplazamiento de la planta a los puntos de entrega o recogida.
- Ruido en Actividades desarrolladas dentro de las instalaciones, *on-site*; es decir, actividades que tienen lugar dentro de la planta industrial.

H2. Es necesario la definición de un nuevo método de gestión de la Evaluación de riesgos que minimice el impacto sobre la salud de la exposición a VCE a largo plazo.

H3. Los sistemas GIS pueden ser utilizados para el desarrollo de un método para la gestión de la exposición a VCE a largo plazo.

H4. La metodología BIM puede ser la base para el desarrollo de un marco de trabajo para la gestión de la exposición a ruido.

La *Tercera Fase* de la investigación consistió en el establecimiento de las metodologías específicas que se emplearían en el desarrollo de la investigación para validar las hipótesis planteadas. Se definieron los instrumentos y métodos necesarios para medir y evaluar la exposición a VCE y ruido en el puesto de trabajo.

La *Cuarta Fase* se llevó a cabo en tres subfases:

- 1ª Subfase: Se realizó el Trabajo de campo, consistente en la medición en las industrias del sector de la Construcción indicadas en el M2: una planta de producción de hormigón y una planta de gestión de residuos de construcción y demolición. A partir de la identificación de los riesgos físicos presentes, se abordó la gestión de los riesgos dividiendo las actividades en dos grupos identificados en la *segunda fase*. Esto permitió realizar la validación de la Hipótesis H1. Así mismo, para la validación de la Hipótesis H2, se realizó un análisis crítico de las metodologías y los factores que condicionan la exposición a VCE.
- 2ª Subfase: Se diseñó una metodológica y un marco de trabajo para la gestión de la exposición a VCE en las actividades desarrolladas *off-site*. Se propuso la creación de una herramienta que minimice la exposición a VCE mediante la definición de un algoritmo para la optimización y toma de decisiones basado en GIS. Para la validación de la H3, se aplicó, como caso de estudio, a la actividad de transporte de hormigón desde la planta de hormigón a una obra.
- 3ª Subfase. Se diseñó una metodológica y un marco de trabajo basado en BIM para la gestión de la exposición a ruido en las actividades desarrolladas *on-site*. Para validar la H4, dicho marco se aplicó, de forma idéntica a la descrita en la 2ª subfase, pero en este caso a las instalaciones de la planta de hormigón.

La *Quinta Fase*. A la vista de los anteriores resultados de investigación, esta fase corresponde a la elaboración de Conclusiones y definición de Futuras Líneas de Investigación.

La Figura 1-1 muestra la Estructura de la Investigación realizada y la relación con los objetivos específicos planteados. Se organiza alrededor de seis actividades principales con las que se espera alcanzar el Objetivo General.

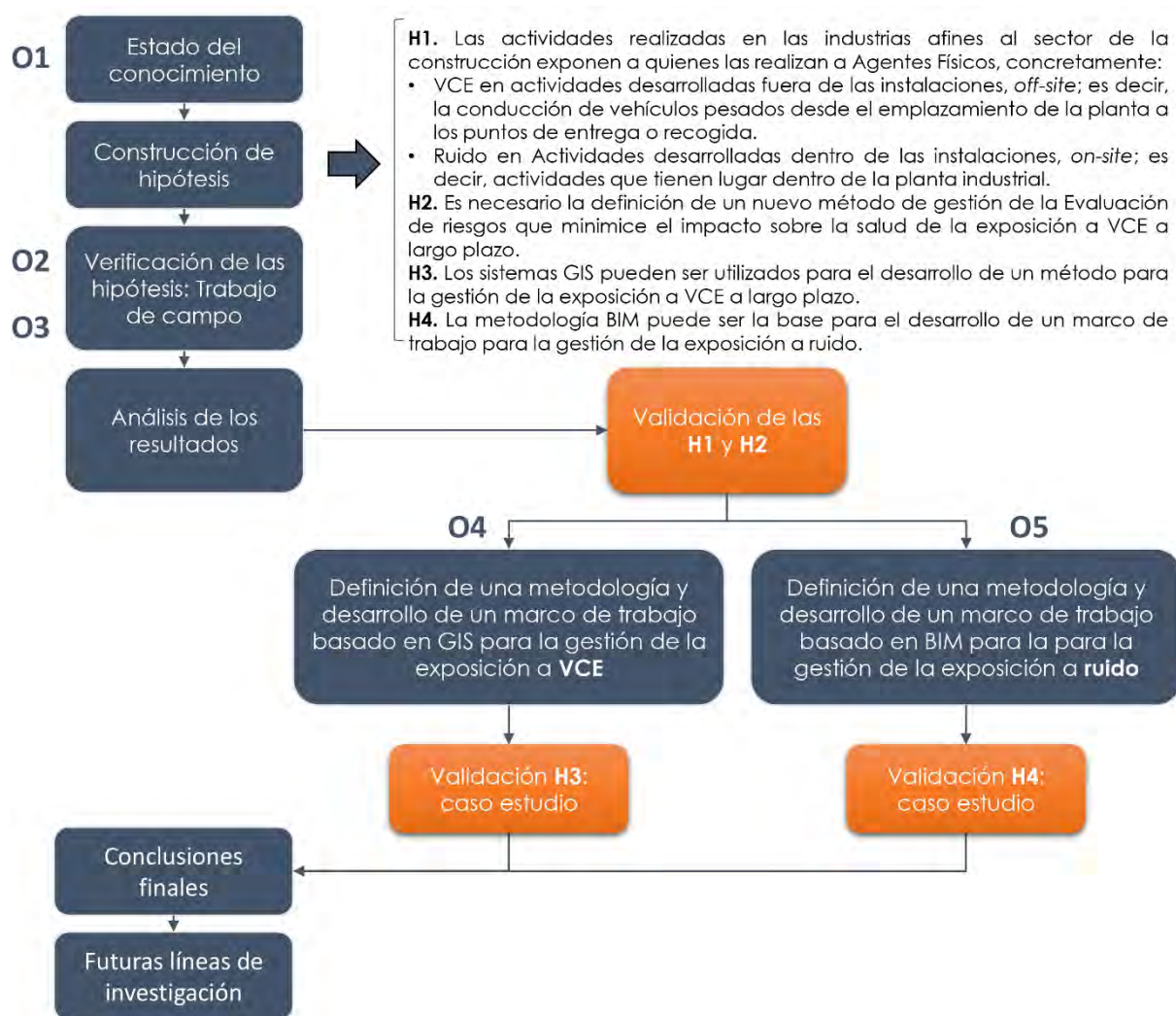


Figura 1-1. Esquema de la Estructura de la investigación

Los resultados obtenidos en cada una de las fases figuran en los distintos capítulos de esta Memoria de Tesis Doctoral:

- Capítulo 1. Introducción.
- Capítulo 2. Estado del conocimiento.
- Capítulo 3. Metodologías específicas.
- Capítulo 4. Trabajo de campo.
- Capítulo 5. Análisis crítico de las metodologías y los factores que condicionan la exposición a VCE.
- Capítulo 6. Diseño de un Marco de trabajo para la gestión de la exposición a VCE.
- Capítulo 7. Diseño de un Marco de trabajo para la gestión de la exposición a ruido.
- Capítulo 8. Conclusiones y Futuras líneas de investigación.
- Referencias.

La Figura 1-2 muestra las fases de investigación llevadas a cabo y la estructura de la Memoria de Tesis Doctoral que se presenta.

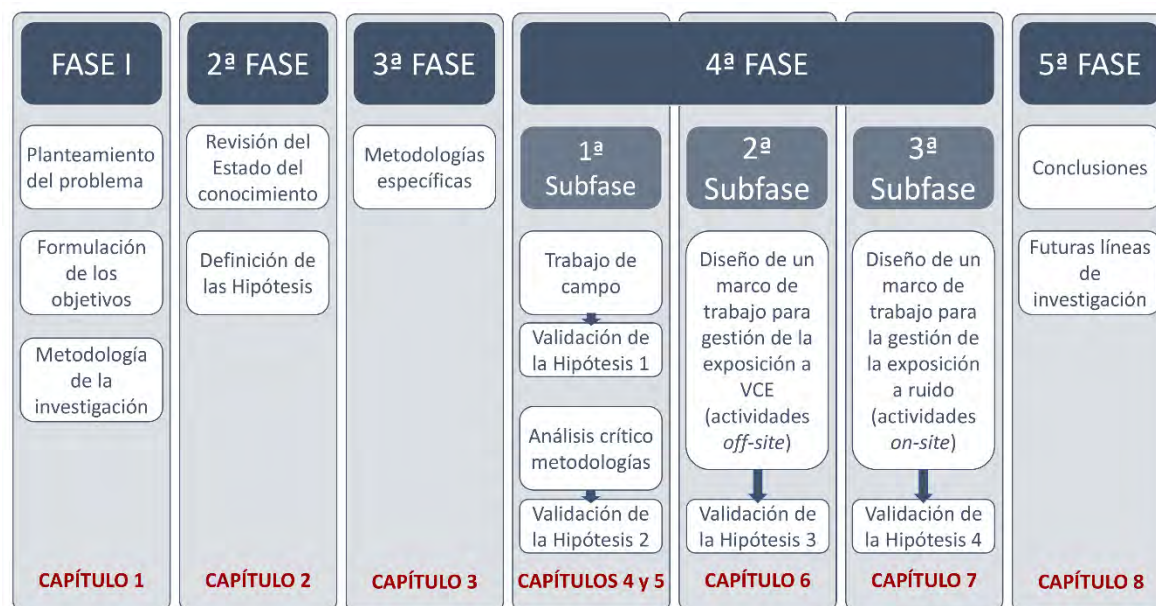


Figura 1-2. Fases de la investigación. Estructura de la Memoria

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo se lleva a cabo la revisión del estado del conocimiento sobre la presencia de los Agentes Físicos analizados, VCE y ruido, en el sector de la Construcción y sus industrias afines. Una parte destacada en el capítulo la constituye el estudio de los efectos de la exposición en el cuerpo humano.

Posteriormente, se aborda el estudio del marco normativo e institucional de la Seguridad y Salud Laboral, así como de la exposición a VCE y ruido, incluyendo los métodos de evaluación utilizados con carácter general.

Por último, se analizan el uso de los sistemas GIS y la metodología BIM para la evaluación de riesgos en el sector de la Construcción.

Todo lo anterior, ha permitido el establecimiento de las **Hipótesis de investigación** que se recogen en la sección 2.7.

2.1. Presencia de agentes físicos en la industria de la construcción

El sector de la Construcción continúa siendo una actividad productiva en la que existe una gran exposición a distintos factores de riesgos para la salud de los trabajadores (Martínez-Rojas et al., 2020; Trillo Cabello et al., 2021). La Figura 2-1 muestra que, en 2020, el porcentaje de personas en España que declaran estar expuestas a factores que pueden afectar negativamente a la salud física en dicho sector alcanza el 86% (Eurostat, 2022). Además, como se puede observar, este porcentaje ha presentado un ascenso desde 2013.

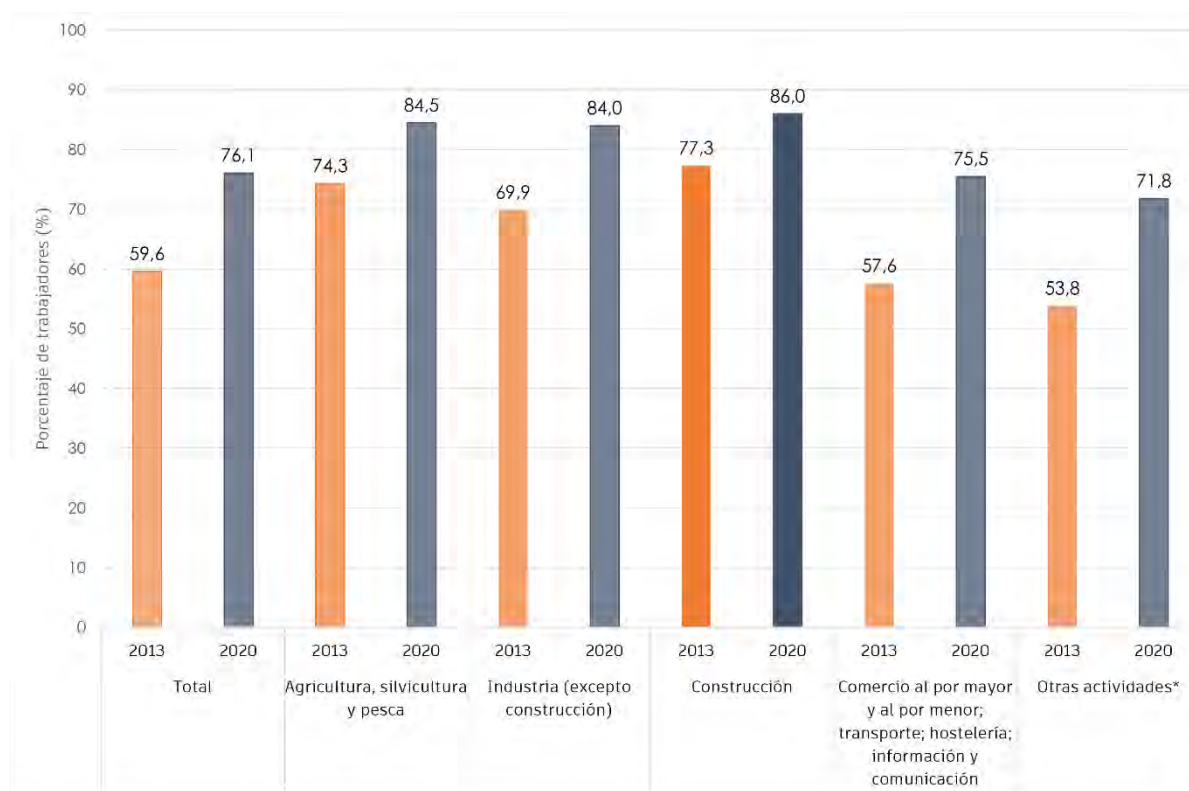


Figura 2-1. Porcentaje de personas que declaran estar expuestas a factores de riesgo que pueden afectar negativamente a la salud física en España.

* Actividades financieras y de seguros, actividades inmobiliarias, actividades profesionales, científicas y técnicas, actividades administrativas y servicios auxiliares, administración pública y defensa; seguridad social obligatoria, educación, actividades sanitarias y de servicios sociales, actividades artísticas, recreativas y de entretenimiento, otros servicios, actividades de los hogares como empleadores; actividades de los hogares como productores de bienes y servicios para uso propio, actividades de organizaciones y organismos extraterritoriales.

Entre los factores de riesgo para la salud en los puestos de trabajo se encuentra la exposición a ruido y la vibración. La *Segunda encuesta europea de empresas sobre riesgos nuevos y emergentes* (Iraitorza et al., 2016) puso de manifiesto que el 70.9% del total de los trabajadores se encuentran expuestos regularmente a ruido, vibraciones, calor, o frío, en su lugar de trabajo. Este valor asciende a un 88.9% en el sector de la Construcción, gestión de agua y residuos y en industrias extractivas (Eurofound, 2017). La Figura 2-2 muestra la distribución de respuestas a la pregunta de si el trabajador se encuentra expuesto de forma rutinaria a ruido, vibraciones, calor, o frío, en su puesto de trabajo.

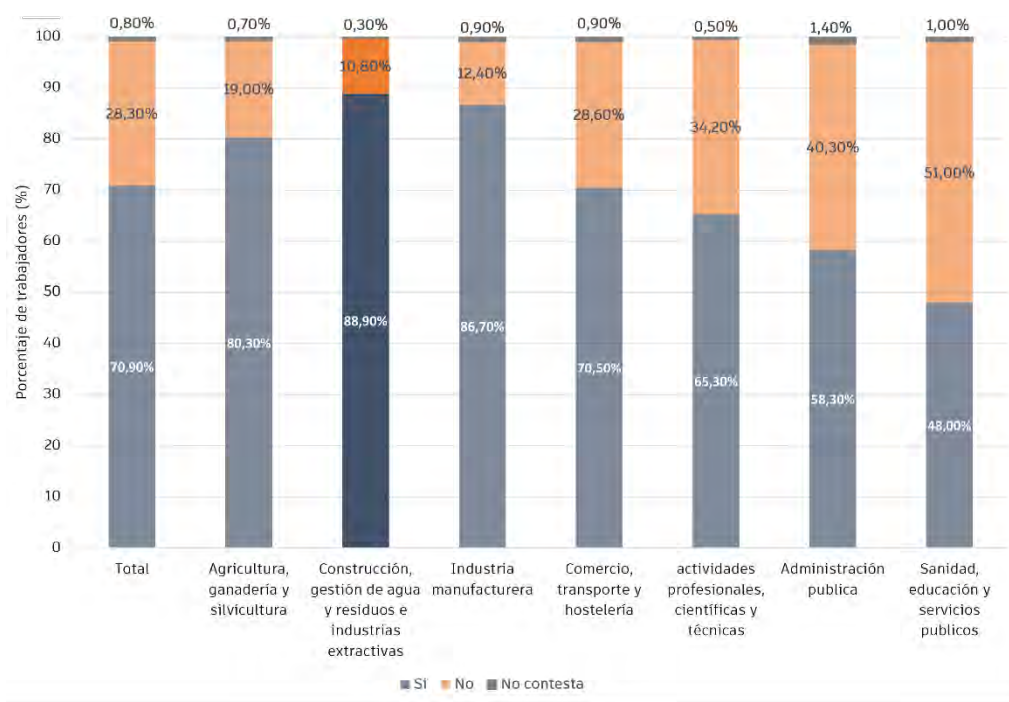


Figura 2-2. Exposición a ruido, vibraciones, calor o frío en el lugar de trabajo.

Fuente: adaptado de (Irastorza et al., 2016).

Por otro lado, la última *Encuesta Europea sobre Condiciones de Trabajo* (Eurofound, 2017) puso de manifiesto que los sectores de la Construcción y del Transporte son en los que existen el mayor porcentaje de trabajadores que afirman que se encuentran, al menos, el 25% del tiempo de trabajo expuestos a vibraciones y ruido (48% y 51% respectivamente) en España (ver Figura 2-3).

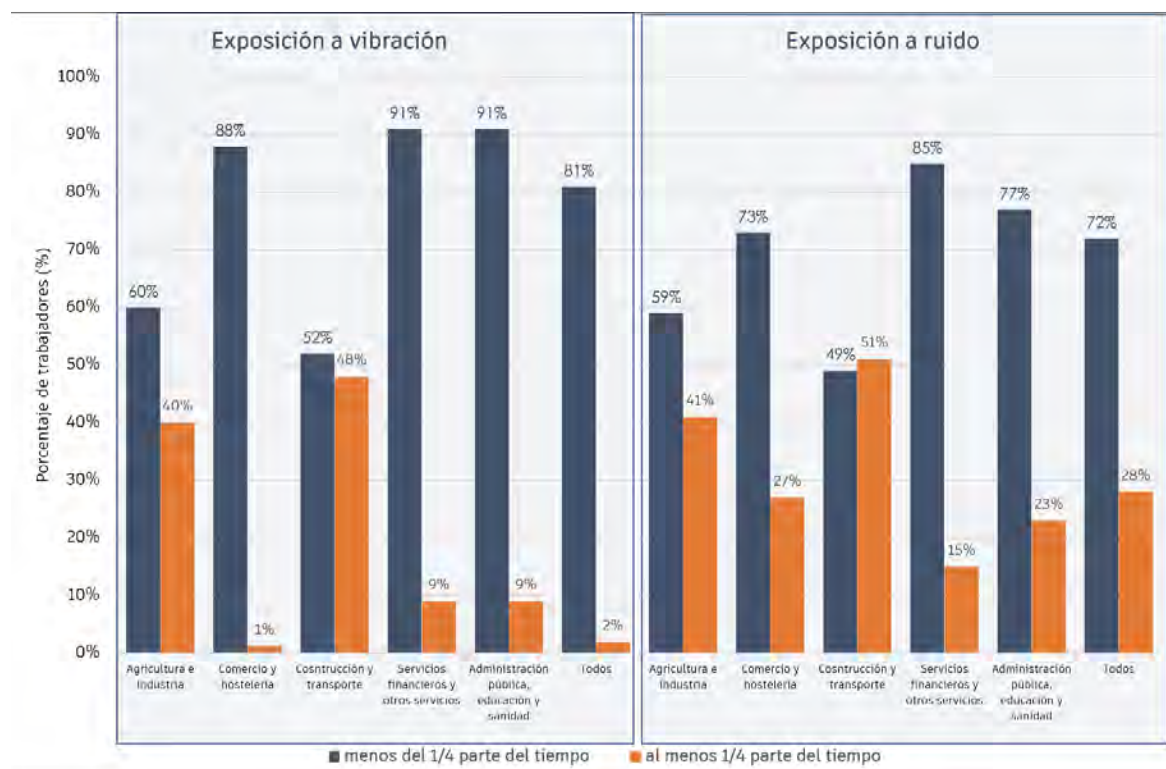


Figura 2-3. Porcentaje de trabajadores expuestos a vibraciones y ruido en España por sectores laborales (Eurofound, 2017).

Resultados similares fueron identificados en España en la última *Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo* (Pinilla García et al., 2017), donde se observó que existen diferencias significativas entre la exposición a ruido y vibraciones por actividad económica, siendo los sectores de la Construcción, la Agricultura y la Industria los que presentan mayores frecuencias de exposición a Riesgos Físicos (ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Actividades económicas con mayor exposición a Riesgos Físicos en España.

	Agricultura	Industria	Construcción	Salud	Total
Vibraciones	43%	41%	65%	8%	19%
Ruido	31%	45%	63%	13%	28%

* Las celdas sombreadas indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre el sector y el promedio total. Categoría de respuesta: 25% del tiempo, o más.

Si comparamos los resultados nacionales con los de la media de la Unión Europea (Figura 2-4), el porcentaje de trabajadores que afirman estar expuestos más de un cuarto de su jornada laboral a estos agentes físicos es superior a la media europea, tanto en ruido como en vibración.

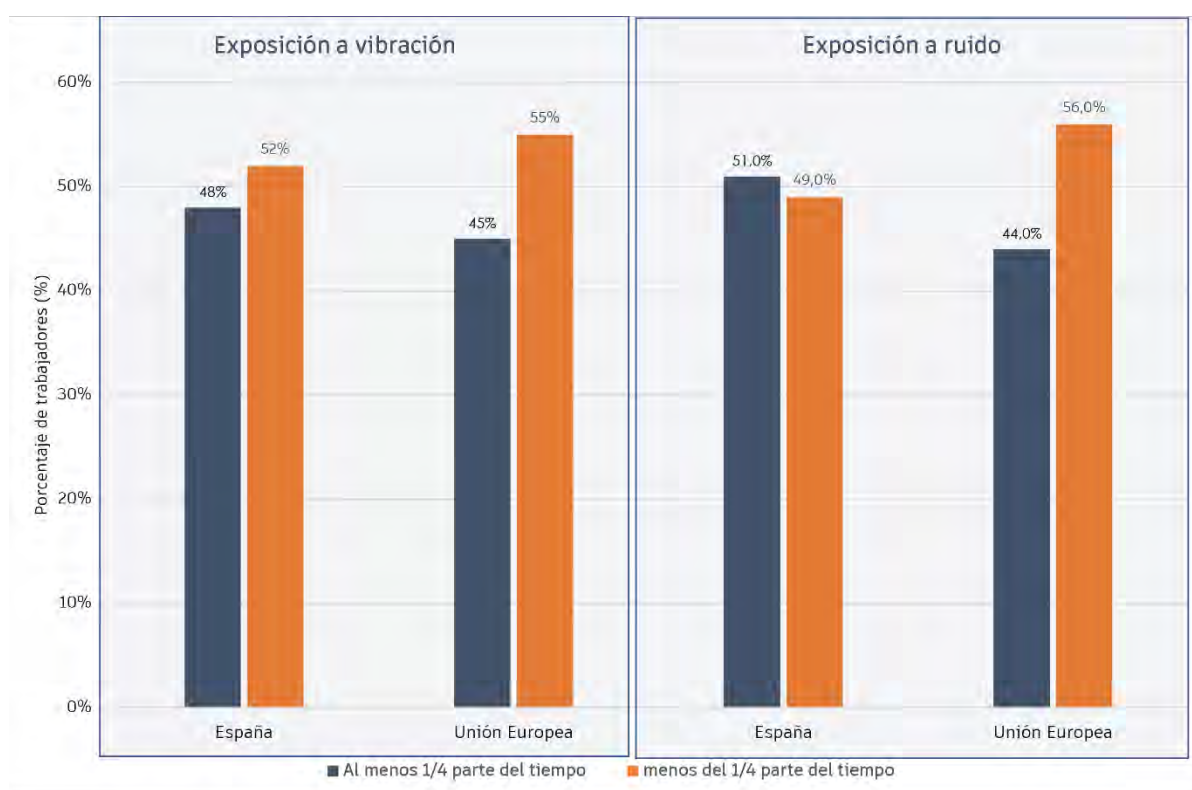


Figura 2-4. Comparación del porcentaje de trabajadores expuestos a vibraciones mecánicas y ruido en España y la media de la Unión Europea. (Eurofound, 2017).

En consecuencia, se puede afirmar que la exposición a ruido y vibración es una característica presente en gran parte de los puestos de trabajo en la industria de la Construcción en España, lo que constituye un factor de riesgo para sus trabajadores.

Por otro lado, los registros de accidentes y enfermedades profesionales también evidencian que los efectos adversos sobre la salud causada por dichas exposiciones no afectan por igual a todos los sectores económicos. Investigaciones previas han demostrado que los trabajadores del sector de la Construcción presentan una mayor prevalencia de TME relacionados con el trabajo (EU-OSHA, 2020b; Hagberg et al., 2012; Nielsen et al., 2018), los cuales han sido relacionados con la exposición a VCE (Punnett & Wegman, 2004). De hecho, el informe publicado por la EU-OSHA identificó qué factores físicos en el puesto de trabajo, como la exposición a VCE debido a la conducción de la maquinaria y vehículos pesados, son los principales factores a los que se atribuye la alta prevalencia de TME en las operaciones relacionadas con la Construcción (EU-OSHA, 2020b). En cuanto a la exposición a ruido, las actividades de construcción generan altos niveles durante su desarrollo (Lee et al., 2019). Dependiendo del tipo de obra, los niveles de ruido en los emplazamientos de construcción oscilan entre 80 y 120 dBA (Ng, 2000; Suter, 2002), exponiendo a los trabajadores a niveles potencialmente peligrosos (Ballesteros et al., 2010; Neitzel et al., 1999). No obstante, no son solo los trabajadores en el emplazamiento de la obra quienes están expuestos a altos niveles de ruido, sino que otros trabajos relacionados con la industria de la Construcción también exponen a sus trabajadores a niveles elevados. Por ejemplo, el uso de equipos y maquinaria en otras industrias afines a la Construcción pueden exponer a los trabajadores a niveles elevados de ruido (ver Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Nivel de ruido emitido por equipos y máquinas, utilizados en el sector de la Construcción y sus subsectores, medido a 15 m de distancia de la fuente. Fuente: adaptado de Lee et. al, (2019).

Equipo	Nivel de ruido (dBA)
Compresor de aire	81.0
Máquina de terminación de asfalto	76.5
Planta productora de asfalto	88.3
Excavadora	75.8
Compactador	82.0
Hormigonera	62.5
Planta productora de hormigón	72.8
Camión hormigonera	73.5
Vibrador de hormigón	68.3
Trituradora	85.6
Martillo compactador	77.4
Martillo neumático	88.0

Esta situación se ve agravada por las crisis económicas que han afectado al sector en la última década. La imposibilidad de adquirir nuevos equipos (ej., maquinaria para la construcción) hace que aumente la edad media de los vehículos y equipos en uso y, en consecuencia, los riesgos

relacionados con la obsolescencia (EU-OSHA, 2020b). Entre estos riesgos, la exposición a VCE es elevada en los operarios que utilizan estos vehículos a diario para realizar las diferentes tareas (Krajnak, 2018). Además, este tipo de operaciones no se limita a los emplazamientos de las obras de construcción, siendo muy elevado en las tareas de transporte de mercancías desde las industrias que dan servicio al sector (Guerlain et al., 2019) – suministros de hormigón, de cemento, de materiales de construcción, etc.-, donde los trabajadores están expuestos a la VCE a lo largo de la jornada laboral al conducir vehículos de reparto.

Con el objetivo de analizar en detalle las implicaciones derivadas de la exposición a ambos agentes físicos, en la siguiente sección se proporciona una revisión detallada de sus efectos sobre la salud de los trabajadores.

2.2. Efectos de la exposición en el cuerpo humano

2.2.1. Influencia de la exposición a VCE

Como se ha comentado en la sección 1.1., existe evidencia epidemiológica que relaciona la exposición a VCE con los TME: dolor lumbar (Bovenzi & Betta, 1994; Punnett & Wegman, 2004; Raffler et al., 2017), cambios degenerativos en la columna vertebral (Miyamoto et al., 2000), ciática (Burstrom et al., 2015a), dolor de cuello (Kim, Dennerlein, et al., 2018; Milosavljevic et al., 2011; Rehn et al., 2009) y trastornos relacionados con el rendimiento motor (Costa et al., 2014).

A la vista de los resultados mostrados en las encuestas sobre condiciones de trabajo en la sección 2.1, los TME han sido reconocidos como una de las principales causas de problemas de salud relacionados con el trabajo de los trabajadores europeos, destacando la industria de la Construcción, la Agricultura y el Transporte entre los sectores con mayor tasa de prevalencia (Nielsen et al., 2018). Entre los TME, los trastornos degenerativos de la columna vertebral son los que con más frecuencia son informados por los trabajadores del sector de la Construcción (Bakusic et al., 2018; Health and Safety Executive, 2018), siendo la degeneración de los discos intervertebrales el factor de riesgo más importante asociado con el dolor lumbar (Livshits et al., 2011). Además, el sobrepeso y la obesidad aumentan el riesgo de su aparición (Liuke et al., 2005; Shiri et al., 2009). De los afectados por lumbalgia, entre el 5.0% y el 10.0% desarrollará un problema de dolor crónico, cuya prevalencia aumenta linealmente desde los 30 hasta los 60 años (Meucci et al., 2015). Estas enfermedades profesionales tienen un gran impacto en los individuos y los sistemas de atención social, así como altos costes asociados a su tratamiento y la ausencia del puesto de trabajo por enfermedad (EU-OSHA, 2019; Woolf & Pfleger, 2003).

Las VCE pueden tener características muy variables (frecuencia, dirección, intensidad y duración) y la respuesta que se genera en el cuerpo humano a ese estímulo dependerá tanto de las características de la onda como de la parte del cuerpo en contacto con la superficie vibrante, las características del individuo (edad, sexo, historia clínica, costumbres, etc.), las características de la operación a realizar (postura, fuerza, movimientos repetitivos, etc.) y el ambiente físico (temperatura, humedad, ruido, etc.) (INSST, 2007).

Dada la cantidad de factores implicados, es complicado establecer el nexo de causalidad entre las vibraciones transmitidas al cuerpo humano y la respuesta de este. La sintomatología clínica de las vibraciones se relaciona con efectos de tipo agudo como *"discomfort y reducción de capacidad de trabajo debido a la fatiga que las vibraciones pueden producir en el organismo, aunque se han*

puesto de manifiesto alteraciones de tipo crónico sobre determinados órganos del cuerpo" (INSST, 2013). La Tabla 2-3 muestra los efectos que pueden causar las vibraciones sobre el cuerpo humano.

Tabla 2-3. Efectos de las vibraciones. Fuente: NTP 784 (INSST, 2007).

EFFECTOS PARA LA SALUD	OTROS EFECTOS
• Sistemas musculo-esqueléticos particularmente trastornos a nivel de la columna vertebral. • Alteraciones de las funciones fisiológicas. • Alteraciones neuromusculares. • Alteraciones cardiovasculares, respiratorias, endocrinas y metabólicas. • Alteraciones ginecológicas y riesgo de aborto. • Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso central.	• Malestar (discomfort) • Interferencia con la actividad. • Percepción. • Mareo inducido por movimiento.

Por otro lado, la respuesta del organismo causada por la exposición a VCE dependerá del contenido en frecuencia de la vibración transmitida. Los efectos causados en el cuerpo humano pueden ser importantes si la onda transmitida tiene una frecuencia coincidente con la frecuencia natural del órgano al que afecta, alcanzando un "punto resonante" (Díez, 2009).

El cuerpo humano, como todas las estructuras mecánicas, tiene frecuencias de resonancia que presentan una respuesta mecánica máxima. Cuando una parte del organismo entra en resonancia "sufrir oscilaciones, medibles o perceptibles de forma subjetiva, mayores que las de la estructura vibrante que las origina, lo que hace que el organismo sea especialmente susceptible a estas frecuencias" (Díez, 2009). La Figura 2-5 muestra un modelo mecánico del cuerpo humano.

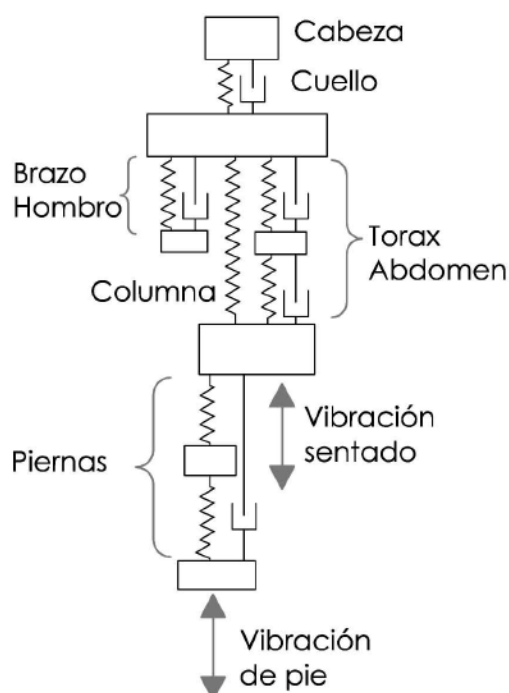


Figura 2-5. Modelo mecánico del cuerpo humano" (Díez, 2009).

Las frecuencias críticas o resonantes se establecen en:

- La cabeza es resonante entre 20 y 30 Hz.
- La columna es resonante entre 10 y 12 Hz.
- El abdomen es resonante entre 4 y 8 Hz.
- EL brazo es resonante entre 5 y 10 Hz.
- La mano es resonante entre 30 y 50 Hz.

Sin embargo, la frecuencia natural del cuerpo humano depende de varios factores: la postura, los materiales que constituyen la superficie del asiento, etc. (Kim, Marin, et al., 2018). La respuesta que genera la onda transmitida sobre el organismo del sujeto se puede describir mediante dos respuestas mecánicas: transmisibilidad e impedancia (Griffin, 1998).

La transmisibilidad representa la fracción de la vibración que se transmite y depende de la frecuencia, el eje de vibración y la postura del cuerpo. Una vibración vertical transmitida a través de un asiento causa vibraciones en varios ejes en la cabeza, tronco y cuello. Entre los valores 3 – 10 Hz alcanza valores máximos, en frecuencias altas (superiores a 50 Hz) la transmisibilidad disminuye progresivamente. La impedancia mecánica del cuerpo humano indica *“la fuerza que se requiere para que el cuerpo se mueva a cada frecuencia y depende de la masa corporal”* (INSST, 2013). La impedancia vertical del cuerpo humano suele presentar resonancia alrededor de los 5 Hz (IDEARA, 2014).

Estas circunstancias inciden en la forma en que a través de los asientos se transmiten las vibraciones a cuerpo completo. En el diseño de la suspensión no se debe tender a minimizar la respuesta del asiento a las vibraciones, sino que las frecuencias transmitidas por él sean diferentes a las frecuencias naturales de las diferentes partes del organismo, para evitar la resonancia y disminuir los daños sufridos por los trabajadores (Tiemessen et al., 2007).

Por todo ello, la relación entre dosis de vibración y respuesta fisiológica del cuerpo humano es muy compleja, lo que ha determinado que sean múltiples los métodos diseñados para evaluar la severidad de la exposición y sus posibles efectos sobre la salud del sujeto expuesto. Uno de los factores que influyen en la respuesta es la postura y el punto de contacto con la superficie vibrante. Para considerar este factor en el cálculo de la exposición se ha definido un criterio general común en la normativa, tomando los ejes basicéntricos del cuerpo humano en función de su posición como se define en la Figura 2-6.

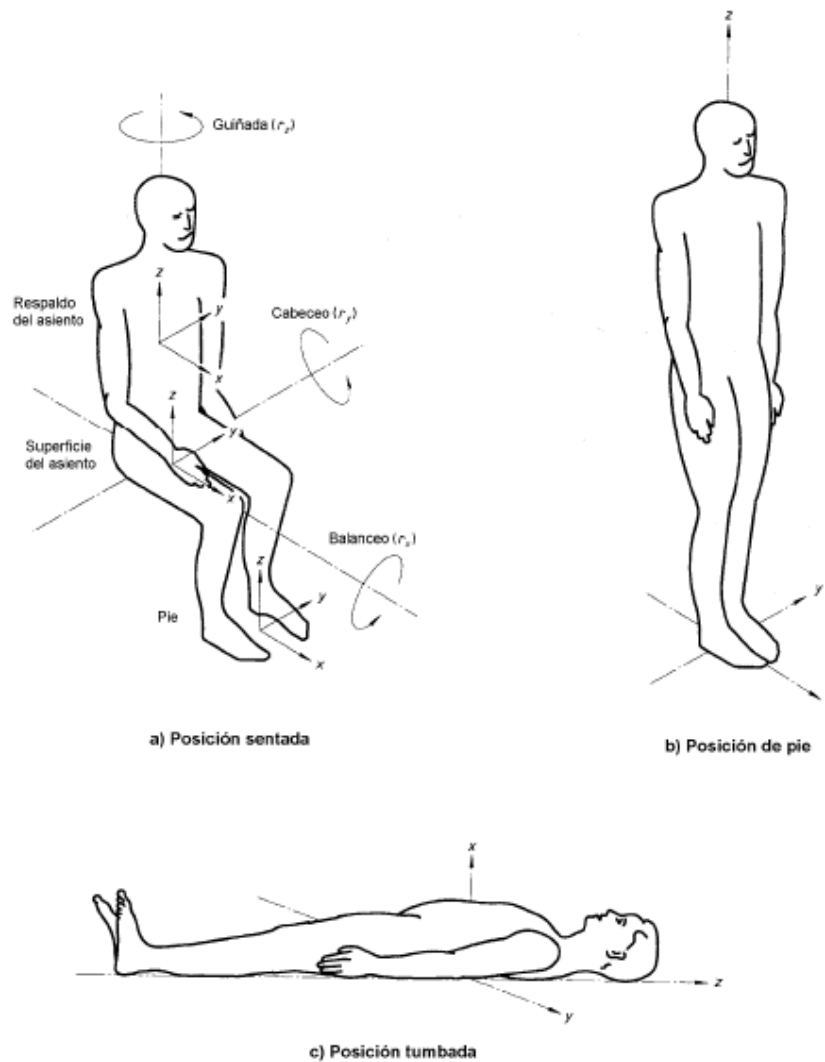


Figura 2-6. Ejes basicéntricos del cuerpo humano en función de su posición. Fuente: UNE-ISO 2631-1:2008.

2.2.2. Influencia de la exposición a ruido

Tal y como se indicó en la sección 2.1., son múltiples los equipos y máquinas utilizadas en las actividades ligadas al sector de la Construcción que generan niveles de ruido que pueden causar problemas a salud de los trabajadores (ver Tabla 2-4). Los efectos resultantes de la exposición a ruido sobre el organismo incluyen tanto efectos auditivos (variaciones temporales o permanentes en el umbral de audición, pérdida de audición o hipoacusia) (Harris, 1991; Seidman & Standing, 2010) como efectos fisiológicos (enfermedades cardiovasculares, aumento de la frecuencia respiratoria, efectos digestivos y visuales, alteraciones sobre el sistema nervioso y efectos sobre el embarazo) (García Callejo et al., 2004; Kwon et al., 2016; Münzel et al., 2018). Además, los efectos de la exposición pueden interferir con el normal desempeño del trabajador, causando daños que incluyen pérdida de la calidad del sueño, ansiedad psicológica, disminución de la capacidad de comunicación, disminución de la productividad, malestar, estrés y alteración de la comunicación verbal (Banbury & Berry, 2005; FLC, 2020; Hong et al., 2021; Hong et al., 2020).

Tabla 2-4. Efectos del ruido. Fuente: (INSST, 2008).

EFFECTOS PARA LA SALUD	OTROS EFECTOS
• Alteraciones auditivas temporales: fatiga auditiva • Alteraciones auditivas permanentes: hipoacusia o sordera • Trastornos visuales • Hipertensión arterial, alteración en la frecuencia cardíaca. • Alteraciones en la secreción gastrointestinal • Aumento cortisol, efectos hormonales	• Malestar • Alteraciones comportamentales • Trastornos de voz • Perturbación del sueño

En España, un total de 780 casos de hipoacusia o sordera profesional fueron comunicados al sistema de la Seguridad Social español en 2015. A nivel europeo, la hipoacusia constituye aproximadamente un tercio de las enfermedades de origen laboral. Si bien a primera vista pueden ser considerados un problema menor, los trabajadores afectados ven condicionada su vida cotidiana en gran medida y tiene una influencia del mismo orden que los TME (FLC, 2020).

Al igual que en el caso de la exposición a VCE, el efecto acumulativo de la exposición continuada a elevados niveles de ruido puede dar como resultado la pérdida progresiva de la audición. Al tratarse de un efecto que no se manifiesta de forma rápida, el trabajador sufre el proceso de forma gradual e indolora, pudiendo no ser consciente de los efectos irreversibles de la exposición. Este hecho da como resultado que la pérdida de la audición se encuentre en el tercer puesto de enfermedad crónica más común en el mundo, de la que se estima un coste global de 750 mil millones de dólares (FLC, 2020).

Características de la exposición a ruido como el contenido en frecuencia de la señal acústica, el tiempo de exposición, las características personales y la presencia de otros agentes contaminantes en el lugar de trabajo condicionan el efecto que se produce sobre el trabajador (FLC, 2020).

En el caso de que un trabajador se vea afectado por una única exposición a altos niveles de presión sonora, esta exposición puede causar un trauma acústico, resultando en un daño en los órganos auditivos de manera inmediata. Este exceso de energía puede hacer que se superen los límites fisiológicos y producir alteraciones en el aparato auditivo.

Sin embargo, la exposición prolongada a altos niveles de presión sonora puede provocar desplazamientos temporales o permanentes del umbral de audición. Los desplazamientos temporales del umbral de audición son el resultado de una elevación de los niveles auditivos posterior a la exposición al ruido. Esta pérdida auditiva es reversible con el paso del tiempo. El valor de desplazamiento, como la frecuencia y la recuperación a su valor inicial, está relacionado con el nivel al que se expuso, las características espectrales de la señal y su duración.

Para el caso de los desplazamientos permanentes del umbral de audición, estos no son reversibles. De hecho, estos desplazamientos son debidos a un trauma acústico o efectos acumulativos a una exposición prolongada.

Son múltiples los estudios que han evaluado el impacto negativo del ruido generado durante los procesos constructivos en los emplazamientos de la obra de construcción (Jung et al., 2020; Van

Kempen et al., 2018; Xiao et al., 2016). No obstante, debe considerarse también el ruido generado por las actividades realizadas en industrias afines a este sector que se desarrollan fuera del emplazamiento de la obra.

2.3. Marco normativo e institucional en materia de Seguridad y Salud Laboral

En la Comunidad Económica Europea se estableció, en 1989, la **Directiva Marco 89/391/CEE**, con la intención de establecer las disposiciones mínimas para promover la mejora del medio de trabajo. Su finalidad era elevar la protección de la Seguridad y Salud de los trabajadores, estableciendo principios generales relativos a la prevención de los riesgos profesionales y la protección de la Seguridad y Salud.

Los estados miembros, que hasta entonces tenían sistemas legislativos muy diferentes en materia de Seguridad y Salud en el lugar de trabajo, transpusieron esta Directiva a su legislación nacional. En España fue transpuesta por la **Ley 31/95, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales**.

Además de cumplir con la comunidad jurídica establecida por la Unión Europea, la Ley 31/95 desarrolla el mandato constitucional contenido en el artículo 40.2 de la **Constitución Española de 1978** (BOE de 29 de diciembre): *"...los poderes públicos fomentarán una política que garantice la formación y readaptación profesionales; velarán por la seguridad e higiene en el trabajo y garantizarán la seguridad e higiene en el trabajo."*

Esta Ley estableció las bases para la Prevención de Riesgos Laborales en España. Posteriormente, ha sido modificada por la Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la Prevención de Riesgos Laborales. Como se indica en su artículo 6, son las normas reglamentarias las que concretan los aspectos más técnicos de las medidas preventivas y establecen las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Por lo que, en años posteriores a su promulgación, se han desarrollado una gran cantidad de normas reglamentarias y complementarias de esta Ley.

Entre los reglamentos que desarrollan tales medidas preventivas se encuentran las destinadas a garantizar la protección de los trabajadores contra los riesgos derivados de la exposición a las vibraciones mecánicas y ruido.

2.4. Marco normativo y métodos para la evaluación de la exposición a VCE

El marco normativo europeo para la prevención de la exposición a vibración se desarrolla en la Directiva 2002/44/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las disposiciones mínimas de Seguridad y Salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los Agentes Físicos (vibraciones) (decimosexta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE).

En dicha Directiva las vibraciones se clasifican en función de la parte del cuerpo a la que afectan:

- Vibración transmitida al binomio mano-brazo (VMB): *"es aquella vibración mecánica que, cuando se transmite al sistema humano de mano y brazo, supone riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores; en particular, problemas vasculares, de huesos o de articulaciones, nerviosos o musculares"*.

- Vibración transmitida a cuerpo entero (VCE): "es aquella vibración mecánica que, cuando se transmite a todo el cuerpo, conlleva riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular, lumbalgias y lesiones de la columna vertebral."

Por otro lado, se definen dos métodos para evaluar la exposición a vibraciones conforme a los capítulos 5, 6, 7, anexo A y anexo B de la norma ISO 2631-1:2008:

- El método de evaluación del valor cuadrático medio (rms) o $A(8)$, proporciona un valor promedio de la exposición a la vibración normalizado para un periodo de 8 horas y es calculado como el mayor de los valores eficaces de las aceleraciones ponderadas en frecuencia determinadas según los tres ejes ortogonales (Ecuaciones 2-1 y 2-2). Donde T_{exp} es el tiempo de exposición (s).

$$rms_{max} = \max(1,4 \cdot a_{wx}, 1,4 \cdot a_{wy}, a_{wz}) \quad (2-1)$$

$$A(8) = rms_{max} \cdot \left(\frac{T_{exp}}{8h}\right)^{1/2} \quad (2-2)$$

- El método de evaluación del Valor de Dosis de Vibración (en inglés Vibration Dosis Value, en adelante VDV) que proporciona la exposición acumulada de la vibración durante la jornada laboral. Se define como "una dosis acumulativa basada en la raíz cuarta de la aceleración a la cuarta potencia y su unidad es el $m/s^{1.75}$ ". Se calcula como el mayor de los valores de dosis de vibración de las aceleraciones ponderadas en frecuencia determinadas según los tres ejes ortogonales (Ecuaciones 2-3 y 2-4).

$$vdv_{max} = \max(1,4 \cdot vdv_{wx}, 1,4 \cdot vdv_{wy}, vdv_{wz}) \quad (2-3)$$

$$VDV = vdv_{max} \cdot \left(\frac{T_{exp}}{T_{meas}}\right)^{1/4} \quad (2-4)$$

Normalmente, el uso del método de VDV en lugar del $A(8)$ implica la obtención de diferentes resultados al evaluar el riesgo para la salud del conductor. El VDV es un método más sensible a los picos, ya que utiliza como base para el promedio la cuarta potencia en lugar de la segunda potencia del histórico del tiempo de la aceleración (ISO 2631-1:2008).

Por otro lado, la Directiva 2002/44/CE establece límites de exposición:

- Valor de exposición que da Lugar a una Acción (VLA) diario normalizado para un período de referencia de 8 horas o $A(8)$ es de 0.5 ms^{-2} , o un VDV de $9.1 \text{ ms}^{-1.75}$.
- Valor Límite de Exposición (VLE) diario normalizado para un período de referencia de 8 horas o $A(8)$ es de 1.15 ms^{-2} , o un VDV de $21 \text{ ms}^{-1.75}$.

En ningún caso ningún trabajador puede exponerse a un valor por encima del VLE, y en caso de superar el VLA se deberán de tomar decisiones que limiten su exposición para que se encuentre por debajo de dicho valor.

La normativa española ha transpuesto la Directiva en el Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos

derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones. Sin embargo, solamente se contempla el método de evaluación $A(8)$, sin considerar el VDV.

No obstante, además de la normativa vigente de obligado cumplimiento en España, existen otros métodos definidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que pueden ser empleados para evaluar exposiciones a VCE, como la ISO 2631-5.

2.5. Marco normativo y métodos para la evaluación de la exposición a ruido

Al igual que la Directiva 2002/44/CE, la Directiva 2003/10/CE se engloba en las directivas enmarcadas en la Directiva Marco y en ella se definen las disposiciones mínimas de Seguridad y Salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados del ruido. En este documento se fijan los límites máximos de exposición al ruido y los parámetros empleados para evaluar dicha exposición.

En la Directiva 2003/10/CE se definen los parámetros físicos utilizados como indicadores de riesgo a exposición a ruido:

- Presión acústica de pico (P_{pico}): "el valor máximo de la presión acústica instantánea ponderada «C» en frecuencia"
- Nivel de exposición diaria al ruido ($L_{EX,8h}$) (dB(A), ref 20 μ Pa): "promedio ponderado en el tiempo de los niveles de exposición al ruido para una jornada de trabajo nominal de ocho horas tal como se define en la norma internacional ISO 1999: 1990, punto 3.6. Se considerarán todos los ruidos existentes en el trabajo, incluidos los ruidos de impulsos."
- Nivel de exposición diaria al ruido ($L_{EX,8h}$): "promedio ponderado en el tiempo de los niveles de exposición diaria al ruido para una semana de trabajo nominal de cinco jornadas de ocho horas, tal como se define en la norma internacional ISO 1999: 1990, punto 3.6 (nota 2)."

Por otro lado, la Directiva 2003/10/CE establece límites de exposición:

- Valores límite de exposición: $L_{EX,8h} = 87 \text{ dB(A)}$ y $P_{pico} = 200 \text{ Pa}$.
- Valores superiores de exposición que dan lugar a una acción: $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$ y $P_{pico} = 140 \text{ Pa}$.
- Valores inferiores de exposición que dan lugar a una acción: $L_{EX,8h} = 80 \text{ dB(A)}$ y $P_{pico} = 112 \text{ Pa}$.

La normativa española ha transpuesto la Directiva en el Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la Seguridad y Salud de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido. En el anexo I del Real Decreto 286/2006 se definen los procedimientos de cálculo para estimar los niveles de exposición diario y semanal.

A continuación, se definen el procedimiento de cálculo y los límites de exposición.

El nivel de presión acústica, L_p : el nivel, en decibelios, se estima a partir de la siguiente expresión (Ecuación 2-5).

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (2-5)$$

donde P_0 es la presión de referencia ($2 \cdot 10^{-5}$ pascuales) y P es el valor eficaz de la presión acústica, en pascuales, a la que está expuesto un trabajador (que puede o no desplazarse de un lugar a otro del centro de trabajo).

El nivel de presión acústica ponderado A , L_{pA} se define como valor del nivel de presión acústica, en decibelios, determinado con el filtro de ponderación frecuencial A , y se calcula a partir de la siguiente expresión (Ecuación 2-6).

$$L_{pA} = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_0} \right)^2 \quad (2-6)$$

donde P_A es el valor eficaz de la presión acústica ponderada A , en pascales.

Por otro lado, el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A , $L_{Aeq,T}$ se define como el nivel, en decibelios A , dado por la siguiente expresión (Ecuación 2-7).

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{P_A(t)}{P_0} \right)^2 dt \right] \quad (2-7)$$

donde $T = t_2 - t_1$ es el tiempo de exposición del trabajador al ruido.

Nivel de exposición diario equivalente, $L_{Aeq,d}$, se define como el nivel, en decibelios A , dado por la siguiente expresión (Ecuación 2-8).

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \log \frac{T}{8} \quad (2-8)$$

donde T es el tiempo de exposición al ruido, en hora/día. Se considerarán todos los ruidos existentes en el trabajo, incluidos los ruidos de impulsos.

Si un trabajador está expuesto a m distintos tipos de ruido y, a efectos de la evaluación del riesgo, se ha analizado cada uno de ellos separadamente, el nivel de exposición diario equivalente se calculará según las siguientes expresiones (Ecuaciones 2-9 a 2-11):

$$L_{Aeq,d} = 10 \log \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0.1(L_{Aeq,d})^i} = 10 \log \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=m} T_i 10^{0.1L_{Aeq,T_i}} \quad (2-9)$$

Donde $L_{Aeq,d}$, T_i es el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A correspondiente al tipo de ruido i al que el trabajador está expuesto T_i horas por día, y $(L_{Aeq,d})^i$ es el nivel diario equivalente que resultaría si solo existiese dicho tipo de ruido.

Nivel de exposición semanal equivalente, $L_{Aeq,s}$: el nivel, en decibelios A , dado por la expresión:

$$L_{Aeq,s} = 10 \log \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0.1L_{Aeq,d_i}} \quad (2-10)$$

donde m es el número de días a la semana en que el trabajador está expuesto al ruido y L_{Aeq,d_i} es el nivel de exposición diario equivalente correspondiente al día i .

Nivel de pico, L_{pico} se define como el nivel, en decibelios, dado por la expresión:

$$L_{pico} = 10 \log \left(\frac{P_{pico}}{P_0} \right)^2 \quad (2-11)$$

donde P_{pico} es el valor máximo de la presión acústica instantánea (en pascales) a que está expuesto el trabajador, determinado con el filtro de ponderación frecuencial C y P_0 es la presión de referencia ($2 \cdot 10^{-5}$ pascales). Estos parámetros son utilizados por la directiva para definir los límites de exposición (ver Tabla 2-5).

Tabla 2-5. Valores límite de exposición y valores de exposición que dan lugar a una acción, referidos a los niveles de exposición diaria y a los niveles pico.

	$L_{Aeq,d}$ dB(A)	L_{pico} dB(C)
Valores límite de exposición	87	140
Valores superiores de exposición que dan lugar a una acción	85	137
Valores inferiores de exposición que dan lugar a una acción	80	135

En el Anexo II del Real Decreto 286/2006 se describe el proceso de medición del ruido en los puestos de trabajo. Las mediciones de campo para evaluar la exposición a ruido se realizarán, siempre que sea posible, sin la presencia de los trabajadores. Para ello se colocará el micrófono donde se encontraría su oído durante su actividad. En el caso de que el trabajador deba estar presente durante las mediciones, el micrófono deberá colocarse, preferentemente, frente a su oído (10 cm de separación). Se deberán efectuar los ajustes necesarios para que la medición sea equivalente a la ausencia del trabajador durante la medición. La duración y el número de mediciones dependerán de las actividades desarrolladas por el trabajador, de tal manera que la muestra sea representativa de su trabajo.

2.6. Estado actual de la gestión de estos riesgos y metodologías aplicadas en la industria de la construcción

La alta siniestralidad en la industria de la Construcción, en comparación con otros sectores, hace necesaria la definición de nuevas metodologías específicas para la evaluación de riesgos más eficaces (Carpio de los Pinos et al., 2021; Cortés-Pérez et al., 2020; Los Pinos et al., 2021; Manzoor et al., 2021). La exposición a ruido y VCE no son una excepción.

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) desarrolló un estudio en el que se analizó el nivel de cumplimiento de las Directivas Europeas 2003/10/EC (ruido) y 2002/44/EC (vibraciones) de las empresas españolas (Sánchez-Guardamino Elorriaga & García Tomás, 2021). Para ello, realizaron un análisis de los datos publicados desde 2009 a 2018 en el registro público del Sistema de Notificación de Enfermedades Profesionales del Servicio Social de Salud (CEPROSS). Identificando las enfermedades profesionales causadas por la exposición a ruido (Grupo 2A Hipoacusia y sordera inducidas por el ruido) y a VCE (Grupo 2B Trastornos osteoarticulares o angioneuróticos causados por vibraciones mecánicas) en el análisis. Además, su estudio desarrolló un análisis de campo a través de la evaluación de 556 empresas para determinar cómo realizan la gestión preventiva de los riesgos de ruido y vibraciones mediante una encuesta. En su estudio concluyeron que:

- Respecto a la gestión preventiva de la exposición a ruido, el estudio concluye que existen serias deficiencias en cuanto a la caracterización de la exposición. Además, afirma que existe muy baja efectividad en la reducción del riesgo por parte de las empresas. De hecho, sólo una de cada cinco empresas que había identificado el riesgo de exposición al ruido consiguió reducirlo a niveles aceptables mediante una actuación como resultado de la planificación preventiva.
- Respecto a la gestión preventiva de la exposición a VCE, el estudio detectó una deficiente aplicación de la normativa. En sus resultados identificaron un porcentaje muy elevado de

empresas con trabajadores expuestos a vibraciones que carecen de una evaluación específica de dicho riesgo. De hecho, en la mayoría de ellas ni siquiera se identificó su presencia. Por estas razones, es difícil encontrar empresas que realicen medidas de control contra la exposición a vibraciones. En consecuencia, se podría afirmar que el nivel de cumplimiento de la aplicación de la Directiva 2002/44/CE es muy pobre.

La omisión de la gestión del ruido y VCE en los puestos de trabajo, así como la infravaloración de los riesgos debido a una caracterización no representativa de las exposiciones, impide la adopción de medidas preventivas necesarias para evitar futuros daños en la salud de los trabajadores.

A la vista de estos hechos, el desarrollo de metodologías y marcos de trabajo que faciliten a las empresas la gestión de la exposición a estos agentes físicos es esencial para mejorar las condiciones de trabajo, proteger la salud de los trabajadores y asegurar el cumplimiento de la legislación vigente. Para ello, debe tenerse en cuenta los nuevos recursos tecnológicos con los que cuenta el sector en la actualidad (Belle, 2017).

Entre ellos, la implantación de la metodología BIM ha potenciado la transformación del sector AIC al basarse en el proceso de generación y gestión de los datos sobre las características y propiedades de un proyecto de construcción (Sacks et al., 2018). La metodología BIM concentra toda la información del edificio y sus instalaciones en un único modelo digital en 3D. El modelo BIM es la "representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación" (Fallon et al., 2007) y constituye una base de datos fiable del edificio e instalaciones que puede consultarse durante todo el ciclo de vida del mismo (desde el diseño hasta su demolición). El uso de un único modelo centralizado facilita la interoperabilidad y la colaboración de todos los especialistas que intervienen en el proyecto sin generar una pérdida de información en el proceso. Por lo tanto, esta metodología no se limita al diseño y la gestión del modelo 3D, sino que permite otras funcionalidades, como la gestión de los plazos, la gestión de los costes, la gestión de las instalaciones y el mantenimiento, así como el almacenamiento de toda la información y los datos relacionados con el edificio (Smith, 2014).

El análisis y la gestión de la Seguridad y Salud en las obras, no queda al margen de los campos de trabajo que pueden abordarse con la metodología BIM (Aguilar et al., 2019; Torrecilla-García et al., 2021). La literatura científica ha puesto de manifiesto el potencial de la metodología BIM en su aplicación durante el periodo de operación del edificio y sus instalaciones (Martínez-Aires et al., 2018; Tender et al., 2022). Cabe destacar la investigación desarrollada por Yao et al., (2020), quienes proponen una metodología para la evaluación del ciclo de vida de edificaciones industrializadas. Entre los parámetros analizados incluyen la valoración de la contaminación acústica producida durante el desarrollo de las actividades de montaje. Butorina et al., (Butorina, Drozdova, & Kuklin, 2019; Butorina, Drozdova, Kuklin, et al., 2019) implementan los datos obtenidos de SoundPLAN (software para la gestión acústica y del ruido) dentro de modelos BIM, con el fin de enriquecer estos modelos con datos acústicos y de ruido. Deng et al., (2016) realizan una plataforma para integrar BIM y GIS con el fin de gestionar y evaluar de manera más eficiente y detallada el ruido del tráfico en las edificaciones. Wei et al., (2017) desarrollan un marco de trabajo para la integración de datos de sensores en BIM para la gestión de los riesgos por exposición a ruido en entorno de trabajadores de la construcción. Wei y Wang (2018) proponen una herramienta basada en BIM para la formación y el entrenamiento de trabajadores frente a la exposición a ruido a través de la monitorización de sus actividades neuropsicológicas. Buhamdan

et al., (2021) proponen un marco en BIM para correlacionar la especificación de los conectores de vigas laminadas de madera con el riesgo potencial de exposición al síndrome de vibración mano-brazo. Su marco incorpora un sistema de gestión basado en la localización de dichos conectores añadiendo la dimensión de riesgo para la salud.

Por otro lado, si bien la metodología BIM gestiona el edificio a un nivel local (incluyendo en el modelo digital todas las instalaciones que conforman el mismo), existen en la actualidad otras metodologías que permiten gestionar el área de influencia de la industria (incluyendo las instalaciones y las zonas de actuación fuera de la misma). Para ello son utilizados los sistemas GIS. Investigaciones recientes han propuesto aplicaciones y metodologías basadas en GIS para la gestión de riesgos físicos (VCE y ruido) en el lugar de trabajo. De hecho, GIS proporciona herramientas que han sido ampliamente utilizadas para gestionar la exposición a ruido en diferentes ámbitos, como la gestión del ruido de tráfico rodado (Li et al., 2002; Puyana-Romero et al., 2020), la gestión de la contaminación acústica en las ciudades (Baffoe et al., 2022) o generar mapas de ruido para la gestión del ruido procedente de industrias (de Kluijver & Stoter, 2003). Liu et al., (2021) desarrolla una herramienta que integra la metodología BIM y GIS (GeoBIM 4D) para la gestión de Seguridad en entornos de obras de construcción. Para ello analiza su potencial en tres escenarios diferentes; identificación de edificaciones colindantes que puedan verse afectadas por el ruido de la obra, la gestión de riesgos en trabajos confinados y garantizar que se cumplen las distancias de seguridad en el desplazamiento de grúas.

Por otro lado, GIS también ha sido empleado para la evaluación de la exposición de VCE, sobre todo enfocado a la evaluación del confort en diferentes tipos de vehículos y vías. Bodini et al., (2007) desarrolla una metodología basada en GIS para obtener y visualizar un índice de confort a partir de las vibraciones transmitidas a los usuarios de autobuses urbanos. Kang y Kaizu (2011) desarrolla un marco de trabajo basado en GIS para la generación de mapas que permiten la visualización de las aceleraciones máximas producidas por un tractor durante las tareas de labranza. Zoccali et al., (2018) desarrolla una metodología para evaluar el confort (aplicando la ISO 2631-1) durante los viajes en ferrocarril y visualiza los resultados en un sistema GIS. Reza Kashyzadeh y Amiri (2022) utiliza GIS para analizar y evaluar el efecto de la velocidad en el confort basado en las VCE transmitidas a los ocupantes de vehículos. Peulić et al., (2021) desarrolla una metodología basada en GIS para el reconocimiento automático de causas de incomodidad relacionadas con la exposición a VCE durante el transporte de pacientes a hospitales. Tripodi et al., (2012) desarrolla un sistema de apoyo a la toma de decisiones basado en GIS para seleccionar medidas de seguridad que reduzcan el riesgo de accidentes.

No obstante, además de las aplicaciones realizadas por las investigaciones señaladas previamente, cabe destacar que el trazado de rutas es una de las funcionalidades que proporciona GIS y que podría ser empleada para gestionar la exposición a VCE.

2.7. Establecimiento de las Hipótesis de investigación

Una vez concluido el Estado del conocimiento de los Agentes físicos estudiados, vibración y ruido, el marco normativo que regula la evaluación a la exposición en los lugares de trabajo, así como el estado actual de la gestión de la exposición de los trabajadores de las industrias del sector de la Construcción, se plantearon las siguientes Hipótesis de partida que deberían corroborarse tras la investigación:

H1. Las secciones 2.1 y 2.2 sobre la presencia de Agentes Físicos en la industria de la Construcción y los efectos de la exposición en el cuerpo humano, tiene como resultado la definición de la siguiente hipótesis: ***Las actividades realizadas en las industrias afines al sector de la Construcción exponen a quienes las realizan, entre otros, a los Agentes Físicos:***

- *VCE en actividades desarrolladas fuera de las instalaciones, off-site; es decir, el transporte de materiales desde el emplazamiento de la planta a los puntos de entrega o recogida.*
- *Ruido en Actividades desarrolladas dentro de las instalaciones, on-site; es decir, actividades que tienen lugar dentro de la planta industrial.*

H2. Una vez analizado el marco normativo y los métodos para la evaluación de la exposición a VCE actualmente utilizados (secciones 2.3 y 2.4), se conjeturó que ***es necesario definir un nuevo Método de Gestión de la Evaluación de Riesgos que minimice el impacto sobre la salud derivado de la exposición a VCE a largo plazo.***

H3. Realizada la revisión de la literatura científica en relación con el potencial que supone GIS para la Evaluación de la exposición de VCE en otros sectores industriales (sección 2.6), se definió la siguiente premisa: ***Los sistemas GIS pueden ser utilizados para el desarrollo de un Método para la Gestión de la Exposición a VCE a largo plazo.***

H4. Tras revisar los distintos usos de BIM, incluyendo los usos actuales para la gestión de Seguridad y Salud en obras de construcción, se definió la siguiente hipótesis: ***La metodología BIM puede ser la base para el desarrollo de un Marco de Trabajo para la Gestión de la Exposición a Ruido.***

3. METODOLOGÍAS ESPECÍFICAS

En este capítulo se describen los métodos empleados para la evaluación de VCE y ruido, así como la instrumentación utilizada para la adquisición de datos durante las campañas de medición.

Por un lado, se muestran las metodologías utilizadas en el trabajo de campo realizado en el Capítulo 4 y 5, tanto para la campaña de medición de VCE como de ruido. Se recogen los instrumentos utilizados en el proceso de adquisición de datos y los métodos empleados para la evaluación a la exposición a VCE y ruido.

Estas mismas metodologías han sido necesarias para el desarrollo de los marcos metodológicos presentados en los Capítulos 6 y 7.

3.1. Evaluación de la exposición a VCE

Tal y como se indicó en el Capítulo 2, los métodos de evaluación del riesgo asociado a la exposición a VCE están definidos en la ISO 2631-1 y la ISO 2631-5. Ambos métodos utilizan la aceleración medida en la interfaz de la superficie vibrante y el cuerpo humano (ej.: la superficie del asiento si el trabajador se encuentra sentado o la superficie donde el trabajador apoya los pies si se encuentra de pie) como base para la evaluación. La señal de aceleración registrada es utilizada para estimar la dosis de exposición a vibraciones, proceso en el que se extrapola de la medida grabada durante el tiempo que se muestrea la señal a la duración de la exposición que se estima que el trabajador estará expuesto en el futuro. En esta sección se indican los instrumentos utilizados para la adquisición de datos y se definen en detalle los métodos para la evaluación de la exposición a VCE.

3.1.1. Instrumentos utilizados en el proceso de adquisición de datos

Para el estudio se utilizó un acelerómetro triaxial incorporado en un disco semirrígido (SV38, Svantek®) con una frecuencia de respuesta (± 3 dB) de 0.1 Hz – 100 Hz y sensibilidad (± 5 %) de 50 mV/(ms⁻²) a una frecuencia de 15.915 Hz. Su rango de medición es de 0.01 (ms⁻²) rms a 50 rms⁻² pico. El acelerómetro se conecta con el equipo SV106 dónde se registra y almacena la aceleración muestreada sin ponderar (ver Figura 3-1 y Tabla 3-1).

El equipo SV38 se coloca en la superficie donde se produce el contacto entre el cuerpo humano y la fuente de vibración para registrar la señal transmitida al trabajador durante las operaciones. La señal es muestreada con una frecuencia de 6000 Hz. Ambos instrumentos cumplen con los requisitos establecidos en la norma ISO 2631-1&5.



Figura 3-1. Equipo SV106 con acelerómetro triaxial SV38 en disco semirrígido. Fuente: SVANTEK®

Tabla 3-1. Características del equipo SV106 y SV38

Características del equipo	
Equipo	SAVANTEK SVAN 106
Canales para la aceleración	6 (TIPO IEPE)
Normas	ISO 8041: 2005, ISO 2631-1,2 y 5, la norma ISO 5349, la Directiva 2002/44 / CE
Modo de medición.	Medición simultánea en seis canales con conjunto independiente de filtros y detectores constantes.
Filtros en perfil 1	W_d , W_k , W_m , W_b , W_c , W_j , W_G , W_E , W_f (ISO 2631), W_h (ISO 5349)
Filtros en perfil 2	HP, Vel3 (para la medición VPP) y el filtro de limitación de banda correspondiente
RMS y RMQ Detectores	Detectores digitales de RMS real y RMQ con detección de picos, la resolución de 0.1 dB
Rango de medición:	Transductor: 0.01 ms^{-2} RMS ÷ 50 ms^{-2} pico (con SV 38V y el filtro W_d)
Rango de frecuencia.	0.1Hz ÷ 2kHz.

La elección de este equipo responde a que tiene una respuesta lineal en el rango de frecuencias objeto de estudio (ver Figura 3-2), para ello se han tenido en consideración aquellas frecuencias a las que hace referencia la normativa citada en el apartado anterior (0.4 – 100 Hz).

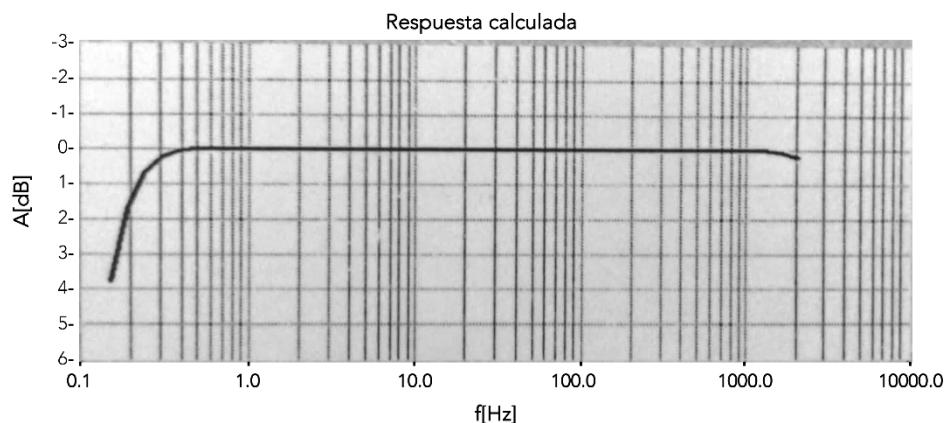


Figura 3-2. Respuesta en frecuencia del acelerómetro

En aquellas actividades que requerían que el trabajador condujera un vehículo, además del registro de la aceleración transmitida a través del asiento, también se registró la ubicación del vehículo durante la ruta. El equipo utilizado para determinar el desplazamiento del vehículo ha sido un GPS TomTom® que dispone de: QUICK GPS FIX. La frecuencia de muestreo de la posición del vehículo es de 1 Hz.

3.1.2. Criterios utilizados en la estrategia de medición y procedimiento empleado durante la caracterización de las actividades que exponen al trabajador a VCE

Durante la medición, el acelerómetro triaxial se ubica en el lugar donde se produce el contacto entre el cuerpo humano y la fuente de vibración. Su fijación con cinta adhesiva permite evitar que ocurra cualquier tipo de desplazamiento relativo entre el sensor y el asiento, aunque el propio peso del trabajador asegura su colocación.

El sensor requiere que en su configuración inicial siempre se aplique un filtro, en este caso se estableció el filtro HP (High Pass, ver Figura 3-3). Considerando que las frecuencias que más afectan a la salud del sujeto cuando se encuentra expuesto a VCE son aquellas comprendidas en el intervalo 0.4 – 100 Hz (ISO 2631-1), la pérdida de información de la señal en frecuencias inferiores no es relevante para el análisis.

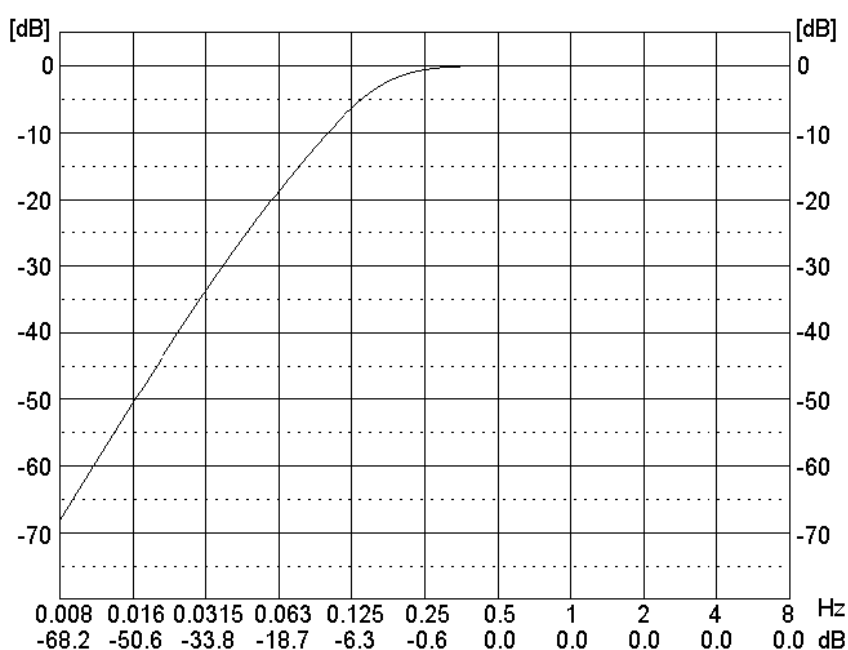


Figura 3-3. Filtro HP utilizado para las mediciones de aceleración (la señal de vibración) en la frecuencia.

Durante el proceso de medición, se realiza un control visual con el objetivo de minimizar la posibilidad de que factores aleatorios no contemplados en el diseño de la estrategia medición influyan en los resultados obtenidos. Los datos registrados se obtienen mediante el software SUPERVISOR (Svantek®). Dicho programa permite obtener la forma de onda de la señal transmitida al sujeto, en ms^{-2} , sin ponderar.

Por otro lado, los datos que contienen la posición del vehículo durante la actividad analizada son obtenidos al descargar los archivos .gpx utilizando el programa informático del fabricante del GPS.

3.1.3. Metodología de procesamiento de datos para el análisis de la exposición a vibraciones a partir de los métodos establecidos en la normativa

En esta sección se describen los métodos indicados en la Directiva 2002/44/CE para la evaluación de la exposición a VCE, los cuales se definen en la norma ISO 2631-1. No obstante, dado que en la norma ISO 2631-5 se definen métodos para evaluar la exposición a VCE que contienen múltiples

choques, también se proporciona un análisis detallado de los métodos definidos en las versiones de 2004 y 2018 de dicha norma. Los métodos definidos en las tres normas a continuación descritas han sido utilizados al evaluar la exposición a VCE. Como resultado del proceso de análisis de dichos métodos, se ha generado una biblioteca en MATLAB donde se han definido todas las funciones y aplicaciones necesarias para el análisis presentado en la presente memoria de Tesis Doctoral.

3.1.3.1. ISO 2631-1:2008. Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a VCE. Parte 1: Requisitos generales

En esta norma se definen métodos para la medición de VCE periódicas, aleatorias y transitorias, además de proporcionar información sobre sus posibles efectos sobre la salud, bienestar, percepción y mal del movimiento en el sujeto. La norma no proporciona valores límites de exposición.

Dependiendo de las características de la exposición a VCE y el efecto a analizar en el sujeto, se definen diferentes ponderaciones en frecuencia a utilizar (ver Tabla 3-2 – 3-5).

Tabla 3-2. Criterios para la aplicación de las curvas de ponderación en frecuencia para las ponderaciones principales. Fuente: ISO 2631-1

Ponderación en frecuencia	Salud	Bienestar	Percepción	Mal del movimiento
W_k	z- superficie asiento	z-superficie asiento z- de pie tumbado vertical (excepto cabeza) x,y,z,- pies sentados	z-superficie asiento z- de pie tumbado vertical (excepto cabeza)	-
W_d	x-superficie asiento y-superficie asiento	x-superficie asiento y-superficie asiento x,y -de pie tumbado horizontal z-respaldo asiento	x-superficie asiento y-superficie asiento x,y -de pie tumbado horizontal z-respaldo asiento	-
W_f	-	-	-	vertical

Tabla 3-3. Criterios para la aplicación de las curvas de ponderación n frecuencia para factores de ponderación adicionales. Fuente: ISO2631-1.

Ponderación en frecuencia	Salud	Bienestar	Percepción	Mal del movimiento
W_c	x- respaldo asiento	x- respaldo asiento	x- respaldo asiento	-
W_e	-	r_x, r_y, r_z -superficie asiento	r_x, r_y, r_z -superficie asiento	-
W_j	-	Tumbado vertical	Tumbado vertical	vertical

Tabla 3-4. Parámetros de las funciones de transferencia en frecuencias principales. Fuente: ISO2631-1.

Ponderación	Banda limitante		Transición aceleración-velocidad			Subida de escala			
	f_1 Hz	f_2 Hz	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6
W_k	0.4	100	12.0	12.5	0.63	2.37	0.91	3.35	0.91
W_d	0.4	100	2.0	2.0	0.63	∞	-	∞	-
W_f	0.08	0.63	∞	0.25	0.86	0.80	0.80	0.1	0.80

Tabla 3-5. Parámetros de las funciones de transferencia de las ponderaciones adicionales. Fuente: ISO2631-1.

Ponderación	Banda limitante		Transición aceleración-velocidad			Subida de escala			
	f_1 Hz	f_2 Hz	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6
W_c	0.4	100	8.0	8.0	0.63	∞	-	∞	-
W_e	0.4	100	1.0	1.0	0.63	∞	-	∞	-
W_j	0.4	100	∞	∞	-	3.75	0.91	5.32	0.91

Al establecer los criterios de evaluación, esta norma se basa en el método *rms* (en inglés root-mean-square) de la aceleración ponderada (Ecuación 3-1). La magnitud debe expresarse como la media cuadrática de la aceleración ponderada. Las unidades empleadas son m.s^{-2} en caso de que la vibración se produzca en un eje traslacional, y rad.s^{-2} si se produce en un eje rotacional.

$$rms_j = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{wj}^2(t) dt} \quad (3-1)$$

donde:

rms media cuadrática de la aceleración ponderada (ms^{-2}) para $j = x, y, z$

T duración de la exposición (s)

$a_w(t)$ aceleración ponderada (ms^{-2}) instantánea en el tiempo para $j = x, y, z$;

Para evaluar los efectos de las vibraciones y choques repetidos sobre la salud, la norma establece que en primer lugar debe determinarse el Factor Cresta (*FC*) de la señal (Ecuación 3-2).

$$FC = \frac{\text{Valor pico instantáneo de la aceleración ponderada en frecuencia}}{\text{rms de la aceleración ponderada en frecuencia}} \quad (3-2)$$

El valor pico se determina como el pico instantáneo máximo en un periodo determinado, que será el mismo para el que se ha calculado el *rms* de la aceleración. En función del módulo obtenido, la norma establece dos métodos diferentes:

- Si $FC \leq 9$, la norma define que el método de evaluación básico, es decir, el *rms* del histórico del tiempo de la aceleración debe aplicarse.
- Si $FC > 9$, implica que la señal contiene múltiples choques, y el método básico podría subestimar la severidad de la exposición para la salud del sujeto. En este caso, la norma define el método del VDV, al cual también hace referencia la Directiva 2002/44/CE. La

norma define este valor considerando que es más sensible a los picos porque parte del promedio de la cuarta potencia del histórico del tiempo de la aceleración en lugar de la segunda (como es el caso del *rms*) (Ecuación 3-3).

$$v_{dv_j} = \left[\int_0^T a_{jw}^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (3-3)$$

donde:

v_{dv_j} Valor de Dosis de Vibración para $j = x, y, z$

$a_{jw}(t)$ aceleración ponderada ($ms^{-1.75}$) para $j = x, y, z$

T periodo total del día (s) en el que ha ocurrido la exposición

Por lo tanto, para la aplicación del método definido en la presente norma se ha partido de los datos obtenidos del acelerómetro, los cuales constituyen la señal muestreada en los ejes 'x', 'y' y 'z' sin ponderar.

Para ello, el primer paso ha sido aplicar filtros de ponderación en frecuencia para correlacionar la magnitud de las vibraciones transmitidas con la respuesta producida en el cuerpo humano respecto a dicha vibración. Considerando que el sujeto siempre se encuentra en la misma posición y que el análisis tiene como objeto determinar los posibles efectos sobre su salud, las características de los filtros W_d y W_k implementados se muestran en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Características de los filtros de ponderación en frecuencia.

Ejes	Filtro	Banda limitante		Transición aceleración- velocidad			Subida de escala			
		f_1 Hz	f_2 Hz	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6
x y	W_d	0.4	100	2.0	2.0	0.63	∞	-	∞	-
z	W_k	0.4	100	12.5	12.5	0.63	2.37	0.91	3.35	0.91

La norma incluye factores de multiplicación en bandas de tercios de octava para ponderar la señal transmitida en el dominio de la frecuencia. Aplicar estos factores requiere que los datos obtenidos de la medición (el equipo almacena la señal muestreada en el dominio del tiempo) se transformen al dominio de la frecuencia y se dividan en tercios de octava.

Las normas no indican cómo implementar los filtros para ponderar los datos obtenidos tras realizar el muestreo de la señal en el dominio del tiempo. No obstante, el Anexo C de la ISO 8041:2017 sugiere un método: utilizar la transformada bilineal para transformar las ecuaciones de filtros analógicos en los estándares de filtros digitales.

La norma ISO 2631-1 incluye la definición matemática de las ponderaciones en frecuencia con los parámetros de las funciones de transferencia: filtro paso-banda, filtro de transición aceleración-velocidad y filtro de subida de escala (pendiente de aproximadamente 6 dB por octava).

Filtro paso banda (diseñado como filtro de dos polos con características Butterworth $Q_1 = Q_2 = 1/\sqrt{2}$), obtenido como el producto de $H_h(s) \cdot H_l(s)$

- Filtro paso alto $H_h(s)$:

$$|H_h(s)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2} \omega_1/s + (\omega_1/s)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (3-4)$$

- Filtro paso bajo $H_l(s)$:

$$|H_l(s)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2} s / \omega_2 + (s / \omega_2)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \quad (3-5)$$

Filtro de transición aceleración-velocidad $H_t(s)$:

$$|H_t(s)| = \left| \frac{1 + s / \omega_3}{1 + s / (Q_4 \omega_4) + (s / \omega_4)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_4^2}{f^4 \cdot Q_4^2 + f^2 \cdot f_4^2 (1 - 2 Q_4^2) + f_4^4 \cdot Q_4^2}} \quad (3-6)$$

Filtro de subida de escala $H_s(s)$:

$$H_s(s) = \left| \frac{1 + s / (Q_5 \omega_5) + \left(\frac{s}{\omega_5}\right)^2}{1 + s / (Q_6 \omega_6) + \left(\frac{s}{\omega_6}\right)^2} \cdot \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2 \right| = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_5^2 + f^2 \cdot f_5^2 (1 - 2 Q_5^2) + f_5^4 \cdot Q_5^2}{f^4 \cdot Q_6^2 + f^2 \cdot f_6^2 (1 - 2 Q_6^2) + f_6^4 \cdot Q_6^2}} \quad (3-7)$$

La función de transferencia de ponderación se obtiene del producto de $H_t(p) \cdot H_s(p)$. Por lo tanto, la función de los filtros W_k y W_d ponderación se obtiene como se definen en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Cálculo matemático de los filtros de ponderación en frecuencia.

Filtro	Función
W_k	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s)$
W_d	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$

Para implementar los filtros y tratar la señal se ha utilizado el programa MATLAB, a partir de la transformada bilineal con el objetivo de obtener un filtro digital con una respuesta temporal similar a la respuesta del filtro analógico definido en la normativa. Se parte de la función de transferencia que permite, a partir de un filtro analógico (en el dominio s), pasar a un filtro digital (en el dominio z) (Oppenheim, 1999).

En MATLAB se han utilizado las funciones *butter*, *bilinear* y *filter* para el diseño de los filtros. La respuesta en frecuencia obtenida de ambos filtros se muestra en la Figuras 3-4 y 3-5.

Tras la definición de los filtros, estos han sido aplicados a las señales de aceleración registradas y se han utilizado para calcular los métodos A(8) (Ecuación 2-2) y VDV (Ecuación 2-4) para evaluar las exposiciones diarias.

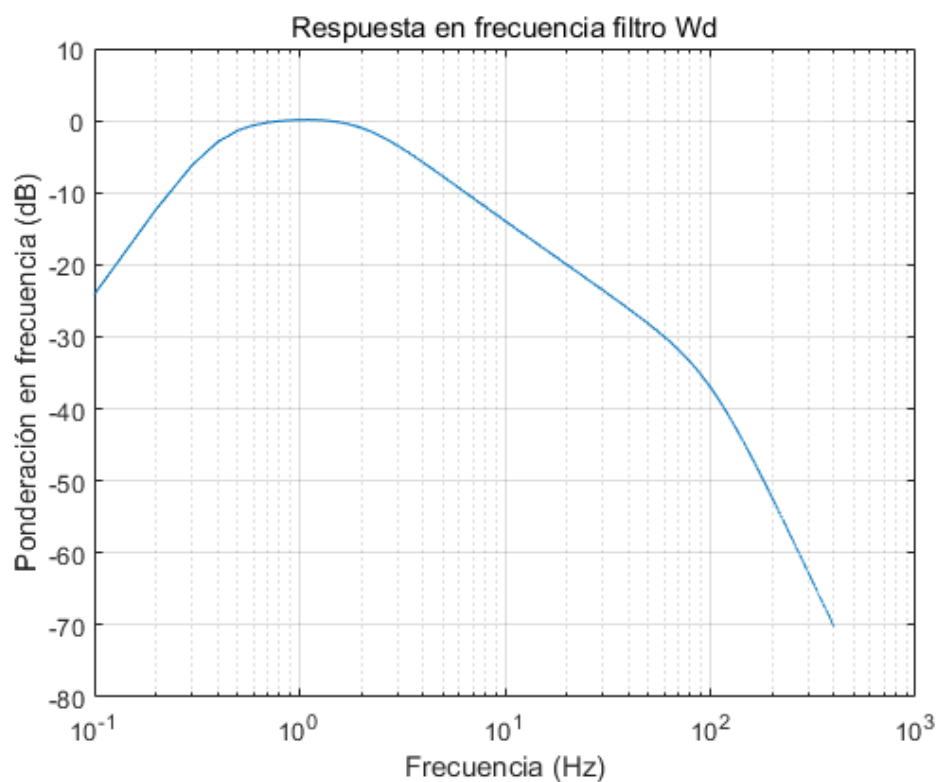


Figura 3-4. Respuesta en frecuencia del filtro Wd.

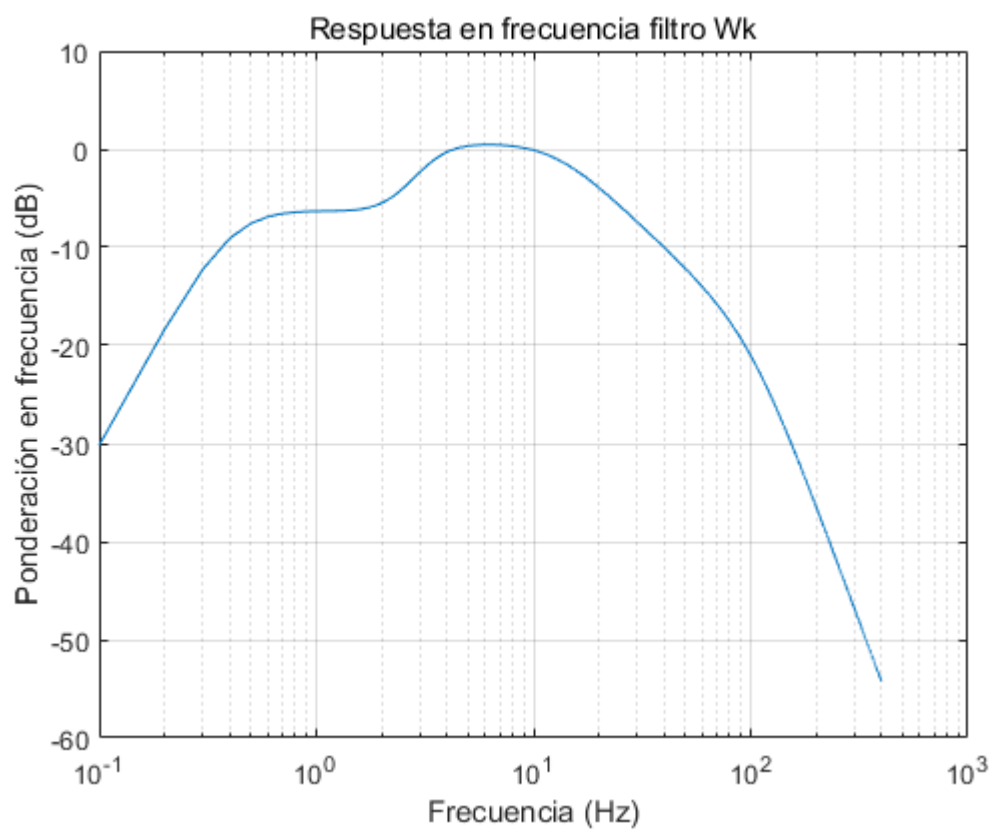


Figura 3-5. Respuesta en frecuencia del filtro Wk.

3.1.3.2. ISO 2631-5:2004. Vibraciones mecánicas y choques. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas al cuerpo entero. Parte 5: Método de evaluación de las vibraciones que contienen múltiples choques

Esta norma describe un método aplicable a la exposición a VCE que contiene múltiples choques que afectan principalmente a la columna vertebral. Esta situación se da comúnmente en vibraciones transmitidas a sujetos que se encuentran sentados y las vibraciones se transmiten a través de la superficie del asiento. A diferencia de otras normas, esta es la única que aporta una relación dosis-efecto sobre el sujeto expuesto a vibraciones.

Determinar la Dosis de aceleración de la columna vertebral implica: (1) Calcular la respuesta de la columna, (2) determinar el número de picos y su magnitud y (3) calcular la dosis de aceleración aplicando el modelo de dosis derivado de la teoría de fatiga de Palmgren-Miner (ver Figura 3-6).

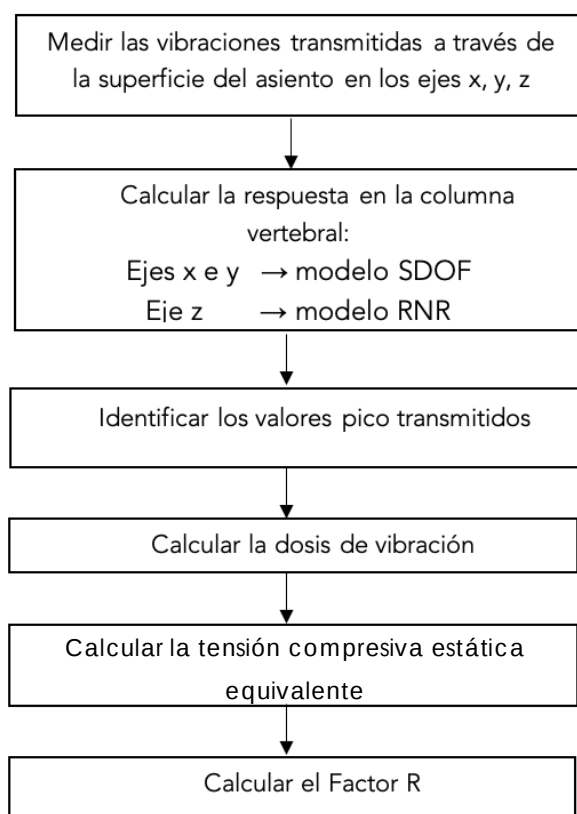


Figura 3-6. Diagrama de cáissolo ISO2631-5:2004

Para la aceleración transmitida en los ejes 'x' e 'y', la norma establece que se debe calcular la función de transferencia de la aceleración mediante un Sistema de un grado de libertad (en inglés, Single Degree of Freedom Systems, SDOF) sometido a una aceleración en su base. Para el análisis del método, se ha considerado que analizar la repuesta de dicho sistema que es excitado en su base es igual que analizar las vibraciones producidas por una carga externa (ver Figura 3-7).

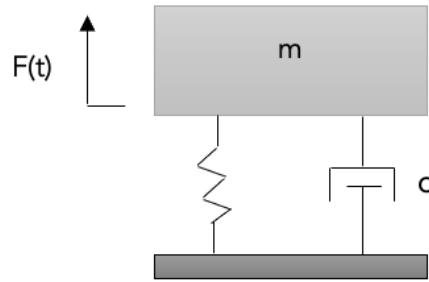


Figura 3-7. Sistema de un grado de libertad (SDOF)

donde m es la masa del sistema, c es el coeficiente de amortiguamiento, k es la rigidez del sistema y $f(t)$ es la fuerza aplicada.

$$\sum F(t) = 0 \quad (3-8)$$

$$f_l(t) + f_k(t) + f_d(t) = f(t) \quad (3-9)$$

$$m \ddot{y}(t) + c \dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (3-10)$$

Si $f(t) = I \delta(t)$

$$m \ddot{y}(t) + c \dot{y}(t) + ky(t) = I \delta(t) \quad (3-11)$$

$$\ddot{y}(t) + \frac{c}{m} \dot{y}(t) + \frac{k}{m} y(t) = \frac{I}{m} \cdot \delta(t) \quad (3-12)$$

Considerando:

$$\omega_N = \left(\frac{k}{m}\right)^{1/2} \quad (3-13)$$

$$\frac{c}{m} = 2 \zeta \omega_N \quad (3-14)$$

$$Q = \frac{1}{2 \zeta} \quad (3-15)$$

$$\ddot{y}(t) + 2 \zeta \omega_N \dot{y}(t) + \omega_N^2 y(t) = \frac{I}{m} \cdot \delta(t) \quad (3-16)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$L\{\ddot{y}(t) + 2 \zeta \omega_N \dot{y}(t) + \omega_N^2 y(t)\} = L\left\{\frac{I}{m} \cdot \delta(t)\right\} \quad (3-17)$$

$$L\{\ddot{y}(t)\} = s^2 y(s) - s y(0) - \dot{y}(0) \quad (3-18)$$

$$L\{2 \zeta \omega_N \dot{y}(t)\} = 2 \zeta \omega_N \cdot L\{\dot{y}(t)\} = 2 \zeta \omega_N y(s) - 2 \zeta \omega_N y(0) \quad (3-19)$$

$$L\{\omega_N^2 y(t)\} = \omega_N^2 L\{y(t)\} = \omega_N^2 y(s) \quad (3-20)$$

$$L\left\{\frac{I}{m} \cdot \delta(t)\right\} = \frac{I}{m} L\{\delta(t)\} = \frac{I}{m} \cdot 1 = \frac{I}{m} \quad (3-21)$$

$$s^2 y(s) - s y(0) - \dot{y}(0) + 2 \zeta \omega_N y(s) - 2 \zeta \omega_N y(0) + \omega_N^2 y(s) = \frac{I}{m} \quad (3-22)$$

$$(s^2 + 2 \zeta \omega_N s + \omega_N^2) y(s) = \left(\frac{I}{m}\right) + (s + 2 \zeta \omega_N) \cdot y(0) + \dot{y}(0) \quad (3-23)$$

$$y(s) = \frac{\left(\frac{I}{m}\right) + (s + 2 \zeta \omega_N) \cdot y(0) + \dot{y}(0)}{s^2 + 2 \zeta \omega_N s + \omega_N^2} \quad (3-24)$$

El denominador se puede expresar como:

$$s^2 + 2 \zeta \omega_N s + \omega_N^2 = (s + \zeta \omega_N)^2 - (\zeta \omega_N)^2 + \omega_N^2 = (s + \zeta \omega_N)^2 - \omega_N^2 (1 - \zeta^2) \quad (3-25)$$

$$\omega_D = \omega_N (1 - \zeta^2)^{1/2} \quad (3-26)$$

$$s^2 + 2 \zeta \omega_N s + \omega_N^2 = (s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2 \quad (3-27)$$

Por lo tanto:

$$y(s) = \frac{\left(\frac{I}{m}\right) + (s + 2 \zeta \omega_N) \cdot y(0) + \dot{y}(0)}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \quad (3-28)$$

$$y(s) = \underbrace{\frac{\left(\frac{I}{m}\right)}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2}}_A + \underbrace{\frac{(s + 2 \zeta \omega_N)}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \cdot y(0)}_B + \underbrace{\frac{1}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \cdot \dot{y}(0)}_C \quad (3-29)$$

$$y(t) = L^{-1}\{y(s)\} = L^{-1}\{A\} + L^{-1}\{B\} + L^{-1}\{C\} \quad (3-30)$$

$$L^{-1}\{A\} = L^{-1}\left\{\frac{I}{m} \cdot \frac{1}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2}\right\} = \frac{I}{m} \frac{1}{\omega_D} L^{-1}\left\{\frac{\omega_D}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2}\right\} = \frac{I}{m \omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}((\omega_D t)) \quad (3-31)$$

$$L^{-1}\{B\} = L^{-1}\left\{\frac{(s + 2 \zeta \omega_N)}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \cdot y(0)\right\} = L^{-1}\left\{\left(\frac{(s + \zeta \omega_N)}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} + \frac{\zeta \omega_N}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2}\right) y(0)\right\} \quad (3-32)$$

$$L^{-1}\{B\} = e^{-\zeta \omega_N t} \cos(\omega_D t) y(0) + \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} L^{-1}\left\{\left(\frac{\omega_D}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2}\right)\right\} y(0) = e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \cos(\omega_D t) \cdot y(0) + \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \text{sen}(\omega_D t) \cdot y(0) = e^{-\zeta \omega_N t} \left(\cos(\omega_D t) + \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \text{sen}(\omega_D t)\right) y(0) \quad (3-33)$$

$$L^{-1}\{C\} = L^{-1}\left\{\frac{1}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \cdot \dot{y}(0)\right\} = \frac{1}{\omega_D} L^{-1}\left\{\frac{\omega_D}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2}\right\} \dot{y}(0) = \frac{1}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \text{sen}(\omega_D t) \cdot \dot{y}(0) \quad (3-34)$$

$$y(t) = \frac{I}{m \omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}((\omega_D t)) + e^{-\zeta \omega_N t} \left(\cos(\omega_D t) + \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \text{sen}(\omega_D t)\right) y(0) + \frac{1}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}(\omega_D t) \dot{y}(0) \quad (3-35)$$

Si consideramos que las condiciones iniciales del sistema nulas ($y(0) = 0$; $\dot{y}(0) = 0$)

$$y(t) = \frac{I}{m \omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}((\omega_D t)) \quad (3-36)$$

Por lo tanto, la función de respuesta al impulso obtenida es:

$$y(t) = h(t) * f(t) \quad (3-37)$$

$$h_d(t) = \frac{1}{m \omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}((\omega_D t)) \quad (3-38)$$

Es posible calcular la función velocidad a partir del desplazamiento:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) = & -\zeta \omega_N t y(0) e^{-\zeta \omega_N t} \left[\cos(\omega_D t) + \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \text{sen}(\omega_D t) \right] + y(0) e^{-\zeta \omega_N t} \left[\cos(\omega_D t) + \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \cdot \right. \\ & \left. \text{sen}(\omega_D t) \right] - \frac{\zeta \omega_N \dot{y}(0)}{\omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}(\omega_D t) + \dot{y}(0) e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}(\omega_D t) - \frac{\zeta \omega_N I}{m \omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}(\omega_D t) + \frac{I}{m} e^{-\zeta \omega_N t} \cos(\omega_D t) \end{aligned} \quad (3-39)$$

Si se mantiene que las condiciones iniciales son nulas ($y(0) = 0$; $\dot{y}(0) = 0$):

$$\dot{y}(t) = \frac{I}{m} e^{-\zeta \omega_N t} \left[\cos(\omega_D t) - \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} \text{sen}(\omega_D t) \right] \quad (3-40)$$

$$h_v(t) = \frac{e^{-\zeta \omega_N t}}{m} \left[\cos(\omega_D t) - \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} \text{sen}(\omega_D t) \right] \quad (3-41)$$

Por lo tanto:

$$\ddot{y}(t) + 2 \zeta \omega_N \dot{y}(t) + \omega_N^2 y(t) = \frac{I}{m} \cdot \delta(t) \quad (3-42)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{I}{m} \cdot \delta(t) - 2 \zeta \omega_N \dot{y}(t) - \omega_N^2 y(t) \quad (3-43)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{I}{m} \cdot \delta(t) - 2 \zeta \omega_N \left(\frac{e^{-\zeta \omega_N t}}{m} \left[\cos(\omega_D t) - \frac{\zeta \omega_N}{\omega_D} \text{sen}(\omega_D t) \right] \right) - \omega_N^2 \left(\frac{1}{m \omega_D} e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}((\omega_D t)) \right) \quad (3-44)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{I}{m} \cdot \left(\delta(t) + e^{-\zeta \omega_N t} \left(2 \zeta \omega_N \cos(\omega_D t) - \frac{2 \zeta^2 \omega_N^2 - \omega_N^2}{\omega_D} \text{sen}(\omega_D t) \right) \right) \quad (3-45)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{I}{m} \cdot \left(\delta(t) + e^{-\zeta \omega_N t} \left(2 \zeta \omega_N \cos(\omega_D t) + \frac{\omega_N^2}{\omega_D} (1 - 2 \zeta^2) \text{sen}(\omega_D t) \right) \right) \quad (3-46)$$

Por lo tanto, la función de transferencia:

$$\ddot{y}(t) = h_a(t) \cdot a_s \quad (3-47)$$

$$h_a(t) = e^{-\zeta \omega_N t} \left(2 \zeta \omega_N \cos(\omega_D t) + \frac{\omega_N^2}{\omega_D} (1 - 2 \zeta^2) \text{sen}(\omega_D t) \right) \quad (3-48)$$

Su transformada de Laplace:

$$H_a(s) = L \{h_a(t)\} = L \{e^{-\zeta \omega_N t} (2 \zeta \omega_N \cos(\omega_D t))\} + \frac{\omega_N^2}{\omega_D} (1 - 2 \zeta^2) \cdot L \{e^{-\zeta \omega_N t} \text{sen}(\omega_D t)\} \quad (3-49)$$

$$H_a(s) = (2 \zeta \omega_N) \frac{s + \zeta \omega_N}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} + \frac{\omega_N^2 (1 - 2 \zeta^2)}{\omega_D} \cdot \frac{\omega_D}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \quad (3-50)$$

$$H_a(s) = \frac{2 \zeta \omega_N s + \omega_N^2}{(s + \zeta \omega_N)^2 + \omega_D^2} \quad (3-51)$$

Para implementar la función de transferencia en Matlab se ha calculado la transformada bilenal, obteniendo la función en el dominio Z:

$$H_a(z) = \frac{z^2 \left(1 - \frac{e^{-\zeta \omega_N T} \operatorname{sen}(\omega_D T)}{\omega_D T} \right) - 2z \left(e^{-\zeta \omega_N T} \cos(\omega_D T) + \frac{1}{\omega_D T} e^{-\zeta \omega_N T} \operatorname{sen}(\omega_D T) \right) + \left(e^{-2\zeta \omega_N T} - \frac{e^{-\zeta \omega_N T} \operatorname{sen}(\omega_D T)}{\omega_D T} \right)}{z^2 - 2ze^{-\zeta \omega_N T} \cos(\omega_D T) + e^{-2\zeta \omega_N T}} \quad (3-52)$$

Se han considerado los siguientes parámetros, de acuerdo a lo propuesto en la norma ISO2631-5:

$$f_n = 2.125 \text{ Hz} \quad (3-53)$$

$$\omega_N = 13,35 \text{ s}^{-1} \quad (3-54)$$

$$\zeta = 0.22 \quad (3-55)$$

Para el cálculo la respuesta en la dirección del eje z, dado que no es lineal, la norma ISO 2631-5 propone su cálculo a partir de un modelo de Red Neuronal Recursiva (RNR).

$$a_{lz} = \sum_{j=1}^7 W_j u_j(t) + W_8 \quad (3-56)$$

$$u_j(t) = \tanh \left[\sum_{i=1}^4 w_{ji} a_{lz}(t-i) + \sum_{i=5}^{12} w_{ji} a_{sz}(t-i+4) + w_{j13} \right] \quad (3-57)$$

Los coeficientes de las ecuaciones se muestran en las tablas 3-8 y 3-9.

Tabla 3-8. Coeficientes del modelo para el cálculo de la aceleración transmitida.

W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
57,96539	52,32773	49,78227	53,16885	56,02619	-27,79550	72,34446	21,51959

Tabla 3-9. Coeficientes para el modelo de cálculo de aceleración transmitida del eje z.

j	1	2	3	4	5	6	7
w_{j1}	0,00130	0,01841	-0,00336	0,01471	0,00174	0,00137	0,00145
w_{j2}	-0,00646	-0,00565	-0,00539	0,01544	-0,00542	0,00381	0,00497
w_{j3}	-0,00091	-0,02073	0,00708	-0,00091	0,00255	-0,00216	0,01001
w_{j4}	0,00898	-0,02626	0,00438	-0,00595	-0,00774	-0,00034	0,01283
w_{j5}	0,00201	0,00579	0,00330	-0,00065	-0,00459	-0,00417	-0,00468
w_{j6}	0,00158	0,00859	0,00166	0,00490	-0,00546	0,00057	-0,00797
w_{j7}	0,00361	0,00490	0,00452	0,00079	-0,00604	-0,00638	-0,00529
w_{j8}	0,00167	-0,00098	0,00743	0,00795	-0,01095	0,00627	-0,00341
w_{j9}	-0,00078	-0,00261	0,00771	0,00600	-0,00908	0,00504	0,00135
w_{j10}	-0,00405	-0,00210	0,00520	0,00176	-0,00465	-0,00198	0,00451
w_{j11}	-0,00563	0,00218	-0,00105	0,00195	0,00296	-0,00190	0,00306
w_{j12}	-0,00372	0,00037	-0,00045	-0,00197	0,00289	-0,00448	0,00216
w_{j13}	-0,31088	-0,95883	-0,67105	0,14423	0,04063	0,07029	1,03300

A partir de la aceleración transmitida, se define la dosis de aceleración para cada eje (Ecuación 3-58)

$$D_k = [\sum_i A_{ik}^6]^{1/6} \quad (3-58)$$

donde:

A_{ik} es el pico de respuesta de aceleración entre dos valores cero consecutivos
 $k = x, y \text{ o } z$ son los ejes

Para los ejes 'x' e 'y' se considerarán los picos tanto positivos como negativos, para el eje 'z' solo se considerarán los picos positivos (de compresión, que suponen mayor severidad para el sujeto expuesto). La exposición total diaria, en caso de que se produzcan múltiples exposiciones, se expresará como la Ecuación 3-59.

$$D_{kd} = \left[\sum_{j=1}^i D_{ik}^6 \frac{t_{dj}}{t_{mj}} \right]^{1/6} \quad (3-59)$$

dónde:

t_{dj} es la duración de la exposición diaria durante la exposición a vibraciones j
 t_{mj} es la duración de la medición de la exposición

La exposición a múltiples choques causa cambios transitorios de presión en las vértebras que, con el tiempo, puede tener efectos adversos sobre la salud como consecuencia de los procesos de fatiga del material. Para la evaluación de los efectos sobre la salud, la norma define el cálculo del parámetro de tensión compresivo estático equivalente (S_e) (Ecuación 3-60), en MPa. Este modelo usa la aproximación del modelo biomecánico de Palmgren-Miner, en la cual se asume que existe una relación lineal entre la parte de la tensión a compresión que se debe a los choques de entrada y la respuesta máxima de aceleración de la columna vertebral.

$$S_e = [\sum_{k=x,y,z} (m_k D_k)^6]^{1/6} \quad (3-60)$$

donde:

D_k es la dosis de aceleración en la dirección k
 m_k son factores recomendados $m_x = 0.015 \text{ MPa}/(ms^{-2})$; $m_y = 0.035 \text{ MPa}/(ms^{-2})$;
 $m_z = 0.032 \text{ MPa}/(ms^{-2})$

El parámetro de dosis de compresión estática diaria equivalente S_{ed} , es el valor parámetro S_e calculado para la dosis de aceleración diaria equivalente D_{kd} (Ecuación 3-61).

$$S_{ed} = [\sum_{k=x,y,z} (m_k D_{kd})^6]^{1/6} \quad (3-61)$$

A partir del S_{ed} se calcula el factor R utilizado para determinar la severidad de la exposición (Ecuación 3-62). Este parámetro es utilizado para la evaluación de los efectos nocivos para la salud relacionado con la dosis de aceleración de respuesta en el ser humano. Este parámetro tiene en cuenta el aumento de la edad del sujeto que se encuentra expuesto y la duración de la exposición (Ecuación 3-63).

$$R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ed} \cdot N^{1/6}}{S_{ui-c}} \right)^6 \right]^{1/6} \quad (3-62)$$

$$S_{ui} = 6.75 - 0.066 (b + i) \quad (3-63)$$

donde:

- N es el número de días de exposición por año
- i es el número de años
- n es el número total de años de exposición
- c es la constante que representa la tensión estática debida a la fuerza gravitacional. La norma recomienda $c = 0.25 \text{ Mpa}$
- S_{ui} es la tensión de rotura de la columna vertebral para una persona de edad $(b+i)$ años.

La norma aporta límites para el factor R que permiten evaluar la exposición:

$R < 0.8 \rightarrow$ la probabilidad de que existan efectos adversos sobre la salud del sujeto es baja.

$R > 1.2 \rightarrow$ la probabilidad de que existan efectos adversos sobre la salud del sujeto es alta.

Por otro lado, también aporta límites para el parámetro S_{ed} :

$S_{ed} < 0.5 \text{ MPa} \rightarrow$ la probabilidad de que existan efectos adversos sobre la salud del sujeto es baja.

$S_{ed} > 0.8 \text{ MPa} \rightarrow$ la probabilidad de que existan efectos adversos sobre la salud del sujeto es alta.

3.1.3.3. ISO 2631-5:2018. Vibraciones mecánicas y choques. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas al cuerpo entero. Parte 5: Método de evaluación de las vibraciones que contienen múltiples choques.

La norma ISO 2631-5:2018 mantiene el objetivo de su versión precedente, es decir, proporcionar un método de cuantificación de las VCE que contienen múltiples choques en relación a la salud considerando que la exposición se produce cuando el trabajador está sentado.

La norma específica que los métodos pueden utilizarse para evaluar el riesgo de daño crónico derivado de la exposición a múltiples choques en escenarios como la conducción de vehículos militares, vehículos de construcción o vehículos pesados campo a través, entre otros. Los métodos descritos en la norma se basan en la respuesta biomecánica estimada de la placa vertebral ósea en un sujeto que se encuentra en una buena condición física y que no evidencia patologías en su columna vertebral.

A diferencia de la versión de 2004, esta norma ISO define dos métodos de evaluación que se utilizaran en función del régimen de exposición. Los regímenes de exposición pueden diferenciarse:

- a) **Condiciones severas de exposición.** Este tipo de exposición es típica de vehículos militares que realizan desplazamiento campo a través, embarcaciones de alta velocidad, etc. Estas condiciones pueden contener periodos de caída libre, en las que predomina la aceleración en el eje 'z' y los sujetos expuestos pueden perder el contacto con la superficie del asiento. La evaluación de este tipo de exposiciones utiliza el **método severo** (definido en el apartado 5, Anexo C y D de la norma), y asumen nulas la aceleración en las direcciones de los ejes 'x' e 'y' en el proceso de cálculo de las fuerzas compresivas en la columna vertebral. Los requisitos de medición de la señal de la aceleración difieren de las establecidas para la ISO 2631-1.

- b) **Condiciones menos severas de exposición.** A diferencia del caso anterior, las condiciones de exposición a VCE no contienen periodos de caída libre y el sujeto no pierde el contacto con la superficie del asiento durante todo el periodo de exposición. Este tipo de exposición es más probable en el contexto industrial, incluyendo conducción de vehículos pesados, tractores, maquinaria de construcción y de movimiento de tierras, desplazamientos sobre superficies irregulares (fuera de carretera, vías con baches, etc.) Este tipo de exposiciones son evaluadas con el **método menos severo** (definido en los anexos A y E de la norma). Los requisitos de medición son los mismos que los descritos en la parte 1 de la ISO 2631 para la medición de la aceleración no ponderada en el tiempo.

Por lo tanto, la aplicación de los métodos de evaluación definidos en la norma debe considerar, en primer lugar, cual es el tipo de régimen de exposición. En este proceso deben analizarse ambas condiciones: (1) si la exposición contiene periodos de caída libre o pérdida de contacto con la superficie del asiento y (2) si la señal contiene picos por encima de 9.81 ms^{-2} . Si se satisfacen ambas o una de las dos condiciones, debe aplicarse el método de condiciones severas. En caso contrario, se debe aplicar el método de condiciones menos severas. La Figura 3-8 muestra un diagrama para seleccionar el método aplicando los requisitos establecidos en la norma.

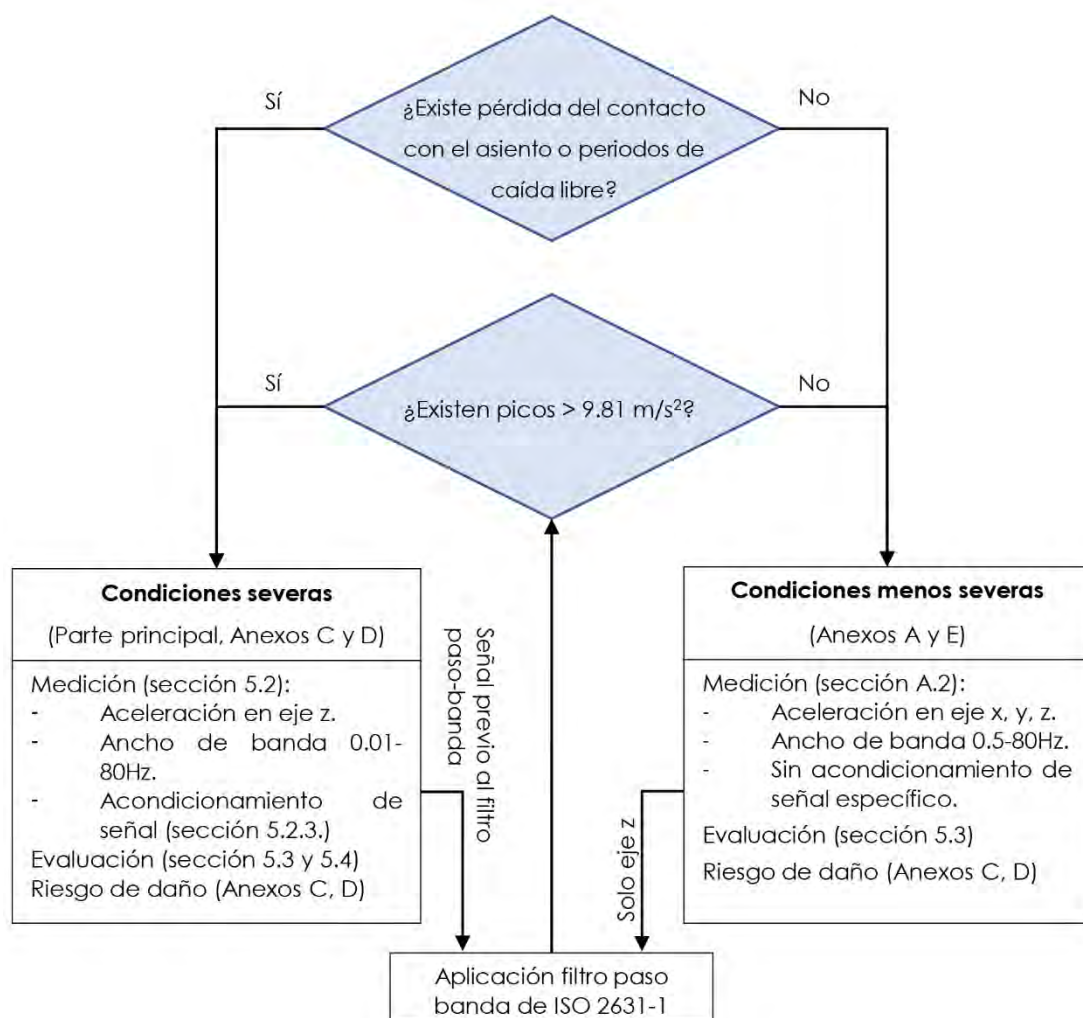


Figura 3-8. Diagrama de flujo para la aplicación de los modelos definidos en la norma ISO 2631-5:2018. Fuente: Adaptado de la norma ISO2631-5:2018.

Dado que en el sector de la construcción y en las actividades de sus industrias afines el tipo usual de exposición es el definido como condiciones menos severas, en adelante en este documento se presenta el método menos severo de evaluación de la exposición.

Este método utiliza como entrada, al menos, la aceleración medida en los tres ejes en la superficie del asiento. No obstante, a diferencia de la versión anterior, también puede incluir en la evaluación la medición de la aceleración que se transmite a través del respaldo del asiento, de los pies (a través del suelo de la cabina) y manos. Estas series temporales de la aceleración son utilizadas para calcular la fuerza de compresión entre las vértebras a partir de funciones de transferencia de un modelo biomecánico.

Las funciones de transferencia del modelo biomecánico dependen de la postura, la masa corporal y del índice de masa corporal (en adelante, IMC) del sujeto expuesto a VCE. Por lo tanto, a partir de la aceleración medida, las condiciones de exposición y las características del conductor, el modelo calcula mediante funciones de transferencia la respuesta de la columna vertebral en términos de fuerza de compresión. Las fuerzas de compresión máximas obtenidas en este proceso se utilizan para calcular la dosis de compresión.

En la norma se especifica que en caso de disponer únicamente de la aceleración transmitida al conductor a través del asiento, este valor se utilice también como la aceleración transmitida a través del respaldo y se omitan la transmitida a través de las manos y el suelo de la cabina. Además, dado que el modelo necesita incluir el histórico de exposición a vibraciones a lo largo de la vida laboral del conductor, la norma propone que en caso de no contar con este dato se asuma una exposición típica de 4 horas/ diarias y que el sujeto estuvo expuesto desde la edad de 20 años hasta los 65, por un total de 240 días/año.

Además, debe considerarse la postura del conductor durante la exposición, para lo que la norma proporciona grupos de posiciones tipo (ver Tabla 3-10 y Figura 3-9), de las que deberá seleccionarse una para introducir en el modelo.

Tabla 3-10. Valores de los ángulos para los tipos de postura (ángulos en grados). Adaptado de la norma ISO2631-5:2018.

Postura	$\delta 1$	$\delta 2$	$\delta 3$	$\delta 4$	$\delta 5$	$\delta 6$	$\delta 7$
Grupo 1	72.0	7.3	18.0	92.7	129.3	48.7	-6.0
Grupo 2	68.0	11.8	18.0	89.5	119.5	43.7	25.5
Grupo 3	64.0	2.0	18.0	100.0	125.5	75.4	6.1
Grupo 4	75.5	8.0	18.0	89.7	121.7	75.8	9.3
Grupo 5	84.7	7.9	18.0	93.2	122.0	76.9	13.0

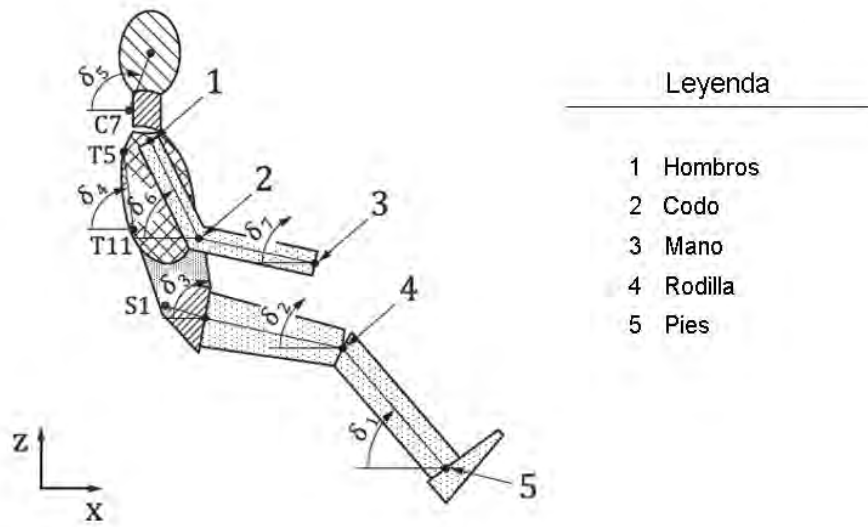


Figura 3-9. Valores de los grupos posturales dados en la Tabla 3-11. Fuente: Adaptado de ISO 2631-5:2018.

Definidas las variables de entrada, el modelo estima las fuerzas lumbares internas en la columna vertebral a partir de funciones de transferencia derivadas de modelos de elementos finitos (en adelante, EF) del cuerpo humano sentado. Estos modelos de EF presentan variaciones de la postura en base a la anatomía de un sujeto sentado y erguido, considerando el impacto de las diferentes magnitudes de las aceleraciones. Este modelo ha sido validado a partir de un gran número de mediciones de la masa aparente y de las funciones de transferencia de las diferentes partes del cuerpo humano. El modelo fue adaptado para su aplicación a las cinco posturas (definidas en la Tabla 3-10). Los modelos fueron utilizados para calcular las funciones de transferencia de las aceleraciones para las diferentes clases de magnitud de aceleración considerando los cuatro puntos de contacto entre el hombre y la máquina (superficie del asiento, respaldo, pies y manos).

A partir de las funciones de transferencia ($h_{e\,d,\,el,\,fd}^{dl}$) y de la transformada de Fourier de las series temporales de la aceleración medidas en los puntos de contacto del conductor con la máquina, el modelo calcula las fuerzas vertebrales para cada punto de contacto y dirección de la excitación en el dominio de la frecuencia. La suma de las excitaciones transmitidas a partir de cada punto y dirección da lugar a las fuerzas de compresión y cizallamiento (f_{fd}^{dl}) entre las vértebras como consecuencia de la excitación combinada (Ecuación 3-64).

$$f_{fd}^{dl} = \sum_{el=1}^4 \sum_{ed=1}^3 h_{e\,d,\,el,\,fd}^{dl} \cdot a_{ed,\,el} \quad (3-64)$$

donde f_{fd}^{dl} es el vector de las fuerzas en el nivel del disco $dl \in (T12 - L1, \dots, L5 - S1)$. Como en este documento se utiliza la fuerza de compresión-descompresión (cd), se asume la dirección de la fuerza $fd = cd$; $h_{e\,d,\,el,\,fd}^{dl}$ es la función de transferencia de las aceleraciones en el lugar de transmisión $el \in (asiento = 1, respaldo = 2, manos = 3, pies = 4)$ en la dirección $ed \in (x = 1, y = 2, z = 3)$ de las fuerzas en el nivel del disco dl para las direcciones de la fuerza fd ; $a_{ed,\,el}$ es la transformada de Fourier de la aceleración en el lugar de excitación el en la dirección ed .

Posteriormente, las fuerzas de compresión-descompresión se transfieren al dominio del tiempo mediante la aplicación de la transformada inversa de Fourier. Esto da lugar a fuerzas de compresión-descompresión dependientes del tiempo C_{dyn} (N).

La suma de los picos de las fuerzas compresivas $C_{dyn,i}$ (N) actuando sobre el área del disco vertebral B (mm) para cada exposición se define como dosis compresiva (S^A). Estas tres magnitudes son determinadas por separado para cada nivel de disco vertebral. Las fuerzas de compresión máximas son valores negativos y se definen como un valor máximo de la fuerza de compresión adicional entre dos cruces de valores medios consecutivos (ver Figura 3-10). El valor de S^A se estima a partir de la Ecuación 3-65.

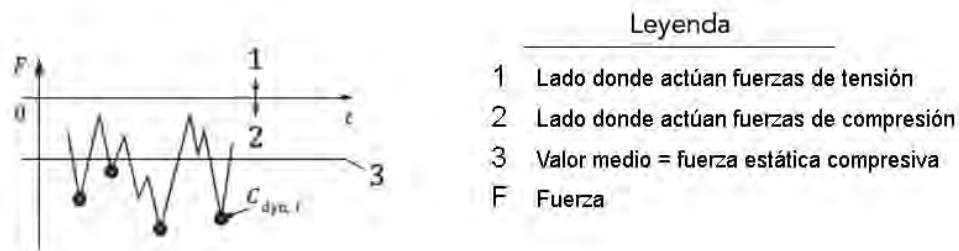


Figura 3-10. Esquema para el cálculo de $C_{dyn,i}$. Fuente: Adaptado de ISO 2631-5.

$$S^A = \left(\sum_i \left(\frac{C_{dyn,i}}{B} \right)^6 \right)^{1/6} \quad (3-65)$$

El área de cada nivel vertebral ha sido seleccionada a partir de los datos publicados en la literatura científica (Wilder et al., 1988) y están incluidos en el propio modelo proporcionado por la norma. Los valores medios de B para el nivel vertebral T12/L1 es 1460 mm², L1/L2 1 es 520 mm², L2/L3 es 1580 mm², L3/L4 es 1590 mm², L4/L5 es 1600 mm² y L5/S1 es 1550 mm².

La norma ha seguido un criterio conservador en la selección de la sexta potencia en el cálculo del S^A a efectos de estimar los efectos adversos sobre la salud. Los datos experimentales muestran que el valor del exponente de Palmgren-Miner varía en función del tejido biológico y la metodología empleada en el ensayo, pudiendo variar de 5 a 14 para el hueso cortical y hasta 20 para el cartílago. Debido a la consideración de la sexta potencia en el proceso de cálculo del S^A , los valores pico de la fuerza compresiva considerablemente menores (por un factor de tres o más) respecto al pico máximo no contribuyen significativamente a la dosis de compresión.

Al igual que la versión anterior de la norma, la estimación de los efectos de la exposición de VCE sobre la salud requiere determinar la dosis de compresión diaria equivalente (S_d^A) (MPa). En este caso, se debe calcular para cada nivel de la columna vertebral considerando las j -ésimas exposiciones a lo largo del día.

$$S_d^A = \left(\sum_j S_j^A{}^6 \frac{t_{d,j}}{t_{m,j}} \right)^{1/6} \quad (3-66)$$

donde S_j^A es el esfuerzo dinámico de compresión de la columna vertebral lumbar debido a la j -ésima exposición a VCE; $t_{d,j}$ es el periodo de tiempo del día que el trabajador está expuesto a la

j-ésima exposición a VCE; $t_{m,j}$ es el periodo de tiempo sobre el que la exposición S_j^A ha sido medida.

A partir de los valores de S_d^A obtenidos de los patrones de exposición diarios, es posible calcular el factor de riesgo R^A para cada nivel vertebral (del T12/L1 al L5/S1) para el histórico de exposición de un individuo a lo largo de su vida laboral. El factor R^A puede utilizarse para evaluar si el valor de dosis S_d^A puede causar un efecto adverso para la salud a largo plazo. En el proceso de cálculo se considera el año en el que se inició la exposición y la duración de la exposición en relación con la edad del sujeto expuesto. Para un patrón de exposición constante al día en todos los años desde que se inició hasta que se finaliza la exposición, el factor R^A se estima utilizando la siguiente expresión (Ecuación 3-67).

$$R^A = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_d^A N_i^{1/6}}{S_{u,j}^A - S_{stat,i}^A} \right)^6 \right)^{1/6} \quad (3-67)$$

donde S_d^A es la dosis diaria compresiva, i es el índice utilizado como contador de los años, N_i es el número de exposiciones por día al año i ; n es el número de años en los que se produce exposición; $S_{u,j}^A$ es la resistencia máxima de una vértebra para una persona de $(b + i)$ años de edad, siendo b la edad a la que comenzó la exposición y $S_{stat,i}^A$ es el valor medio de la fuerza de compresión-descompresión en la ecuación (Ecuación 3-64) dividido por el área de la placa de una vértebra B (mm^2) para el año i .

El valor de $S_{u,j}^A$ varía con la densidad ósea de las vértebras, la cual normalmente se reduce con la edad. A partir de estudios in vitro se ha derivado la siguiente relación entre $S_{u,j}^A$ (MPa) y $(b + i)$ (en años), y se ha considerado asumiendo la siguiente relación (Ecuación 3-68).

$$S_{u,j}^A = 6.765024 \text{ MPa} - 0.067 \text{ MPa} (b + i) \quad (3-68)$$

Si en lugar de considerar que la exposición diaria es igual en todos los días al año que el sujeto está expuesto a VCE, se considera que los patrones de exposición varían con los años, esta condición debe incluirse en el cálculo del factor R^A . Para ello, debe calcularse el valor de la dosis compresiva diaria S_q^A para h patrones de exposición al año de acuerdo a la Ecuación 3-69.

$$S_q^A = \left(\sum_h S_{d,h}^A \frac{N_h}{N} \right)^{1/6} \quad (3-69)$$

donde $S_{d,h}^A$ es la dosis compresiva diaria para el patrón de exposición h -ésimo; N_h es el número de días por año que tiene una exposición con el patrón h -ésimo, N es el número total de días con exposición a VCE al año. El valor obtenido de $S_{d,h}^A$ es el utilizado para calcular el factor R^A .

En la norma se especifica los siguientes valores para considerar los efectos adversos sobre la salud del trabajador:

- $R^A < 0.8$ indica una baja probabilidad de sufrir efectos adversos para la salud.
- $R^A > 1.2$ indica una alta probabilidad de sufrir efectos adversos para la salud.

Cabe destacar que la obtención de un valor $R^A = 1$ no indica que la probabilidad de fallo sea seguro. Este factor indica la carga dinámica debida al choque mecánico ha alcanzado el mismo orden de magnitud que la resistencia máxima (estática) que la vértebra es capaz de resistir.

3.2. Evaluación de la exposición a ruido

3.2.1. Instrumentos utilizados para la adquisición de datos

Durante las campañas de medición y el desarrollo de trabajo de campo, el sonómetro analizador 2260 Investigator de Brüel&Kjaer (ver Figura 3-11) ha sido utilizado para medir el NPS en los escenarios analizados. Este sonómetro es de tipo 1 y cuenta con la aprobación de modelo en España para realizar medidas con validez legal. Además, permite realizar medidas en banda ancha con múltiples ponderaciones simultáneas, así como en análisis en bandas de 1/1 o 1/3 de octava.



Figura 3-11. 2260 Investigator Brüel&Kjaer . Fuente: Brüel & Kjaer (2017).

El sonómetro ha sido comprobado mediante un calibrador acústico antes y después de cada medición realizada. Para la calibración se ha utilizado un calibrador sonoro modelo 4231 de Brüel&Kjaer (ver Tabla 3-11). El criterio de aceptación de dicha calibración se marca en una desviación máxima de ± 0.5 dB.

Tabla 3-11. Características del calibrador acústico

Precisión de calibración	± 0.2 dB
Nivel de calibración	94 dB o 114 dB SPL
Frecuencia de calibración	1 kHz
Adaptable a micrófonos	1", 1/2", 1/4" y 1/8",

3.2.2. Métodos empleados para la evaluación de la exposición a ruido

Los métodos empleados para la evaluación a la exposición al ruido se basan en medidas con el sonómetro fijo en el puesto de trabajo con presencia del operario. Además, se han realizado un muestreo espacial de las instalaciones.

Para las medidas con el sonómetro en el puesto fijo se ha seguido el procedimiento descrito en el Real Decreto 286/2006. En este sentido, la medida se ha realizado con el micrófono a la altura de la cabeza del trabajador y situado a 10 cm del oído que este más expuesto a la fuente ruidosa.

Por otro lado, se ha realizado un muestreo espacial de las instalaciones, colocando el sonómetro en diferentes puntos de la zona a estudiar, de tal manera que se pueda estudiar la variación espacio-temporal de los niveles sonoros. Con los niveles medidos se puede obtener un mapa de ruido de la zona estudiada. Un mapa de ruido es un instrumento que nos permite evaluar la exposición al ruido mediante la interpolación de los puntos medidos en función de un índice de ruido. Estos mapas ayudan a la gestión de los trabajadores, ya que permite conocer de manera ágil los potenciales trabajadores que están expuestos a niveles elevados de ruido.

Para la generación de dichos mapas en primer lugar se deben definir los puntos de medición, para ello, se ha realizado una visita previa a las instalaciones con el fin de definir la matriz de puntos. Para la selección de los puntos se tuvo en cuenta las zonas donde la presencia de los trabajadores era alta. En cada punto se registra el NPS y la posición mediante un GPS. Posteriormente, se realiza un procesamiento de los datos obtenidos mediante el software Arcmap (ESRI, 1995) para la obtención de los mapas de ruido.

3.3. Valores límites de exposición

Tras analizar la normativa vigente y los métodos actuales para la evaluación de ambos agentes físicos, en la Tabla 3-12 y 3-13 se muestra un resumen de los valores límite de exposición a VCE y ruido respectivamente.

Tabla 3-12. Valores límites de exposición a VCE.

Directiva 2002/44/EC			ISO 2631-5		
Valores límites de exposición			Probabilidad de efectos adversos para la salud		
VLA	A(8) = 0.5 ms ⁻²	VDV=9.1 ms ^{-1.75}	Baja	$S_d^A < 0.5 \text{ MPa}$	$R^A < 0.8$
			Moderada	$S_d^A \geq 0.5 \text{ MPa}$	$R^A \geq 0.8$
VLE	A(8) = 1.15 ms ⁻²	VDV=21.0 ms ^{-1.75}		$S_d^A < 0.8 \text{ MPa}$	$R^A < 1.2$
				Alta	$S_d^A \geq 0.8 \text{ MPa}$

Tabla 3-13. Valores límites de exposición a ruido.

	$L_{Aeq,d}$ dB(A)	L_{pico} dB(C)
Valores límite de exposición	87	140
Valores superiores de exposición que dan lugar a una acción	85	137
Valores inferiores de exposición que dan lugar a una acción	80	135

4. TRABAJO DE CAMPO

Este Capítulo recoge la 1ª Subfase de la 4ª Fase que permitirá el contraste de la Hipótesis H1.

Se presenta los resultados obtenidos en una campaña de medición desarrollada con el objetivo de identificar la presencia de riesgos físicos (VCE y ruido) en actividades de industrias afines al sector de la Construcción.

La campaña de medición se desarrolló en dos tipos diferentes de instalaciones: una planta de gestión de residuos de construcción y demolición (caso 1) y una planta de producción de hormigón (caso 2). Ambas han sido seleccionadas porque desarrollan dos de las actividades más comunes en el proceso de construcción, requeridas tanto en la construcción de edificaciones como de ingeniería civil.

Para el trabajo de campo realizado, se han aplicado las metodologías expuestas en el Capítulo 3 para la evaluación de la exposición a VCE y ruido.

4.1. CASO 1: Planta de gestión de residuos de construcción y demolición

4.1.1. Descripción de la planta objeto de estudio y los procesos desarrollados

En este primer caso de estudio se seleccionó una industria de gestión de residuos de construcción. Esta actividad requiere del uso de máquinas y equipos que pueden exponer a los trabajadores a niveles de VCE y ruidos superiores a los límites de exposición establecidos en la legislación vigente. La planta seleccionada se encuentra ubicada en Granada (España). La Figura 4-1 muestra el emplazamiento de las instalaciones. En la planta objeto de estudio seis trabajadores se encontraban a cargo del desarrollo del proceso de reciclaje, cinco de ellos afirmaban tener más de un año de experiencia en la empresa y solo uno de ellos menos de 3 meses.



Figura 4-1. Ubicación de la planta de valorización de residuos. Fuente: Google Maps.

El proceso de gestión de residuos en la planta seleccionada se compone de una serie de etapas de trabajo consecutivas. En primer lugar, los residuos son recibidos en la planta de reciclaje, los cuales son transportados en camiones desde las diferentes obras y pueden ser de diferente naturaleza. Una vez recibidos son inspeccionados visualmente, pesados y registrados. Dependiendo de su tipología (albañilería, hormigón, etc.) son acopiados en diferentes áreas específicas. Una retroexcavadora (KOMATSU WA380) es utilizada para mover el material y desplazarlo entre las diferentes áreas.

El proceso de valorización de los residuos continúa con la carga del trómel utilizando la máquina giratoria Caterpillar 321 LCR. Esta máquina no realiza desplazamiento sobre su tren de rodaje (en este caso, cadenas). La máquina se coloca entre la zona de acopio y el trómel, y rota sobre su eje

vertical para cargar el material sobre este último. Si en algún momento el material no puede ser alcanzado por la máquina giratoria, la KOMATSU WA380 impulsa el material hacia la zona de recepción y lo acerca para facilitar su recogida.

En el trómel se separa el material en función de su diámetro y pasa a la cinta de triaje. En esta cinta cuatro trabajadores se encuentran de pie sobre una plataforma dónde se encargan de realizar una limpieza manual y separan los elementos que contaminan el residuo, derivándolos a contenedores adecuados para su posterior tratamiento (ej.: papel, plástico, madera, metales no férricos, etc.). En el caso de los elementos contaminantes que se componen de materiales férricos, estos son separados de los residuos mediante un electroimán.

Posteriormente, el final de la cinta de triaje deposita el residuo en una cinta transportadora que alimenta una trituradora de mandíbulas. Este equipo tritura los residuos y produce un árido reciclado del tamaño que previamente se ha prefijado en su configuración. En el punto de salida de la trituradora se encuentra ubicada una criba, la cual se compone de paños de diferentes diámetros y separa el material en función de su tamaño.

Tras la inspección y análisis de la planta, se identificaron los equipos susceptibles de transmitir vibraciones y ruido a los trabajadores. La Tabla 4-1 muestra un resumen del tipo de maquinaria y sus principales características.

Tabla 4-1. Equipos y máquinas utilizadas en la planta de gestión de residuos de la construcción.

Tipo	Fabricante	Modelo	Año de fabricación	Tipo de tren de rodaje
Retroexcavadora	Komatsu	WA380	2012	Ruedas
Trómel	Trommelscreen	615	1995	-
Trituradora	Supertrack	1110	2005	-
Criba	Powerscreen set time	400	2007	-
Giratoria	Caterpillar	321 LCR	2006	Cadenas

Una vez identificada la maquinaria, se procedió al estudio de los diferentes trabajos desarrollados en la planta. Para ello, se realizó una observación de los métodos de trabajo con el fin de determinar qué trabajadores están expuestos a ruido y vibraciones a lo largo de la jornada laboral (ver Tabla 4-2).

Tabla 4-2. Identificación de los puestos de trabajo y su tiempo de exposición.

Puesto de trabajo	Maquinaria	Tiempo de exposición diario
Operario giratoria	Caterpillar 321 LCR	6 horas
Operario retroexcavadora	Komatsu WA380	6 horas
Operario en puesto de triaje manual	Cinta de transporte	6 horas

Posteriormente, se realizó una campaña de medición de VCE en todas las actividades en las que los trabajadores están expuestos a este agente físico. Para su caracterización se realizó la medición de ciclos de trabajo completos de cada actividad. A continuación, se proporcionan las características de cada una de ellas:

- Actividad #1: operario de máquina giratoria (Caterpillar 321 LCR). La tarea desarrollada por el operario consistía en alimentar el trómel utilizando la máquina Caterpillar 231 LCR. El trabajador que realizó la tarea era el que habitualmente ocupa ese puesto en la planta. Cabe destacar que la máquina no realiza ningún desplazamiento, sino que el proceso solo requiere que gire en torno al eje vertical (eje z) para cargar el trómel.
- Actividad #2: Operario de pala retroexcavadora (Komatsu WA3820). Durante la ejecución de esta actividad la retroexcavadora se encontraba en constante movimiento durante el proceso de descarga de camiones, realizando el desplazamiento de material a diferentes áreas. El trabajador que conducía esta máquina era el que realiza esta tarea de forma habitual en la planta.
- Actividad #3: Operario en puesto de triaje manual. Durante el desarrollo de esta actividad cuatro trabajadores se encontraban realizando la selección de material contaminante de los residuos, distribuidos dos a cada lado de la cinta transportadora. Cada trabajador se encargaba de seleccionar elementos transportados en la cinta y lo redirigían a contenedores para su diferente tratamiento en función de su naturaleza.

Además, se realizó una campaña de medición de NPS en los diferentes puntos de tránsito de los trabajadores así como los puestos fijos de trabajo (actividad #3).

Dado que las condiciones de trabajo eran las típicas de una jornada normal, los datos obtenidos en la campaña de medición han sido considerados representativos de las actividades analizadas y los resultados obtenidos han sido extrapolados para calcular la exposición asociada a una jornada laboral completa. En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos.

4.1.2. Resultados obtenidos de la campaña de medición de VCE

La campaña incluyó la medición de las tres actividades descritas en la sección anterior. En dos de ellas, el trabajador se encontraba sentado (actividad 1 y 2), por lo que el acelerómetro se ubicó en la superficie del asiento. En el tercer caso (actividad 3) el trabajador se encontraba de pie, por lo que el acelerómetro se colocó en la superficie donde el trabajador apoyaba los pies.

Los resultados de exposición diaria obtenidos tras aplicar el método establecido en la ISO 2631-1 y la Directiva 2002/44/EC se muestran en la Tabla 4-3 y 4-4. El tiempo diario de exposición considerado en cada puesto de trabajo ha sido de 6 horas (así lo afirmaron los trabajadores previamente al inicio de la medición).

Tabla 4-3. Resultados obtenidos tras aplicar el método de evaluación A(8)

Actividad	rms_{wx} [ms ⁻²]	rms_{wy} [ms ⁻²]	rms_{wz} [ms ⁻²]	A(8) [ms ⁻²]	Tiempo en alcanzar VLA [hh:mm]	Tiempo en alcanzar VLE [hh:mm]
#1	0.03	0.02	0.23	0.20	>24:00	>24:00
#2	0.03	0.02	0.07	0.06	>24:00	>24:00
#3	0.01	0.01	0.04	0.03	>24:00	>24:00

Tabla 4-4. Resultados obtenidos tras aplicar el método de evaluación VDV.

Actividad	vdv_{wx} [ms ^{-1.75}]	vdv_{wy} [ms ^{-1.75}]	vdv_{wz} [ms ^{-1.75}]	VDV [ms ^{-1.75}]	Tiempo en alcanzar VLA [hh:mm]	Tiempo en alcanzar VLE [hh:mm]
#1	0.16	0.08	0.80	5.01	>24:00	>24:00
#2	0.22	0.07	0.67	3.73	>24:00	>24:00
#3	0.01	0.02	0.08	0.69	>24:00	>24:00

Respecto a la actividad 1 y 2, los resultados muestran que ambos trabajadores están expuestos a aceleraciones que presentan la componente principal en el eje z, mientras que los valores rms de los ejes x e y son inferiores. Los resultados obtenidos de la actividad 3 también proporcionan un valor más elevado en el eje z respecto al eje x e y, no obstante, los valores de la aceleración son significativamente inferiores en comparación con las otras dos actividades.

Respecto a los parámetros de evaluación A(8) y VDV, los resultados obtenidos indican que la exposición a VCE no es perjudicial para la salud de ninguno de los trabajadores dado que en ningún caso se alcanza el límite VLA establecido en la directiva. De hecho, el tiempo que los trabajadores tendrían que realizar las tareas para alcanzar dicho límite es superior a 24 h, una cifra muy por encima del tiempo que realmente emplean en el desempeño de estas tareas. Por lo tanto, a partir de la evaluación obtenida en ambos métodos es posible concluir que la exposición a VCE es segura.

4.1.3. Resultados obtenidos de la campaña de medición de ruido

La campaña de medición del NPS en la planta ha incluido la selección de un total de 10 puntos para la evaluación. La ubicación de los puntos de medición se muestra en la Figura 4-2.

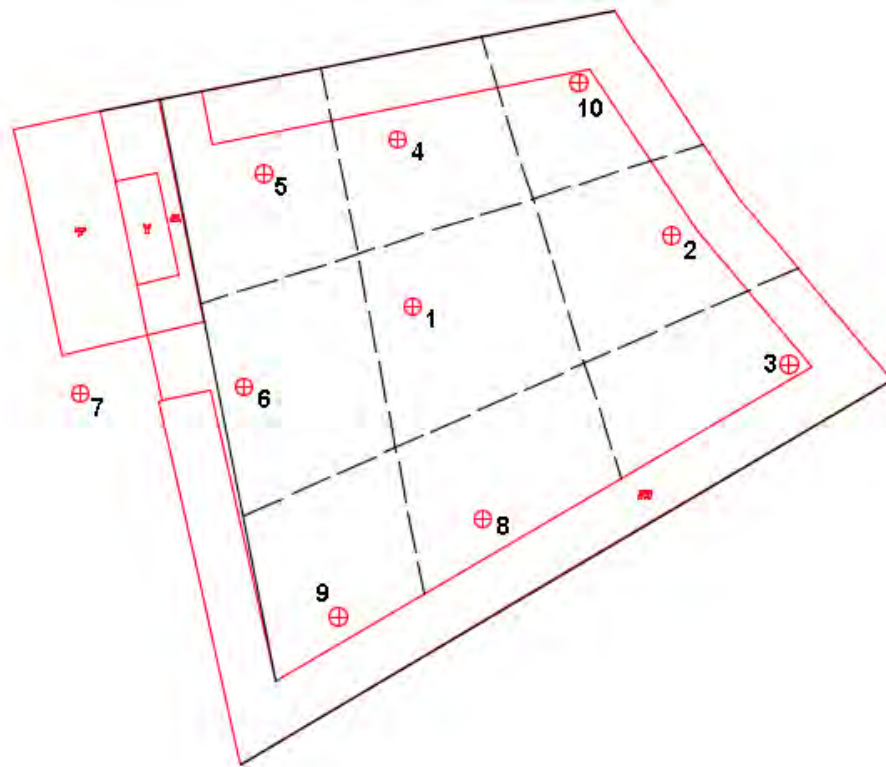


Figura 4-2. Ubicación de los puntos de medición del NPS.

La Tabla 4-5 muestra el nivel continuo equivalente ponderado A obtenido en cada punto. Varias ubicaciones presentan valores elevados, que en caso de que el trabajador estuviera las 8 horas en esa zona de trabajo, la exposición estaría por encima del límite establecido en la Directiva Europea 2003/10/EC. Entre los niveles obtenidos, solo los valores medidos en los puntos 8 y 9 (los más cercanos a la cinta clasificadora) superan el nivel límite de exposición, es decir, son superiores a 87 dBA. El resto de los valores son inferiores al nivel que da lugar a una acción, es decir, son inferiores a 85 dBA.

Tabla 4-5. Niveles continuos equivalentes obtenidos.

Punto de medición	L_{Aeq} [dBA]
#1	81.0
#2	78.9
#3	82.8
#4	77.2
#5	76.7
#6	79.2
#7	73.5
#8	89.2
#9	88.7
#10	77.6

A la vista de los resultados obtenidos en la campaña de medición llevada a cabo en esta industria, considerando los datos obtenidos de VCE y ruido, es posible concluir que los trabajadores que realizan tareas en la planta de gestión de residuos se encuentran expuestos a niveles de VCE que no superan los límites VLA y VLE establecidos en la Directiva Europea 2002/44/EC. Sin embargo, los resultados de la exposición a ruido han puesto de manifiesto que en varias ubicaciones (8 y 9) sí se supera el valor de exposición límite a ruido establecido en la Directiva Europea 2003/10/EC. Estos puntos corresponden a las zonas más cercanas a la cinta de clasificadora donde varios trabajadores se encuentran realizando tareas de selección de materiales. Además de una exposición a ruido superior al VLE (87 dBA) también se encontraban expuestos a VCE (aunque los niveles eran muy inferiores a los límites establecidos en la normativa).

4.2. CASO 2: planta de producción de hormigón

4.2.1. Descripción de la planta objeto de estudio y procesos desarrollados

El segundo caso de estudio corresponde a una planta de producción de hormigón ubicada en Porcuna (Jaén). La instalación está dispuesta como un sistema de planta-torre, tal y como se muestra en la Figura 4-3. Al igual que el caso anterior, la producción de hormigón requiere del uso de equipos y maquinaria que pueden implicar que los trabajadores estén expuestos a niveles elevados de ruido y VCE en su jornada laboral. La empresa cuenta con 3 trabajadores: dos trabajadores encargados de la conducción de camiones hormigonera para la entrega en obra del hormigón fabricado en la planta y un trabajador encargado de las tareas de oficina y mantenimiento de las instalaciones.



Figura 4-3. Emplazamiento de la planta de hormigón. Fuente: Google Earth.

La producción de hormigón en planta (en inglés ready mix concrete, en adelante RMC) requiere, en primer lugar, que el camión hormigonera se coloque en el punto de carga. Una vez colocado, desde la oficina se indica la cantidad y el tipo de hormigón para iniciar el proceso de carga. Los materiales que compondrán el hormigón (áridos, cemento y aditivos) se encuentran almacenados en tolvas, silos y tanques. Una vez se inicia la producción, estos materiales son transportados a través de tornillos sin fin y cintas transportadoras, para posteriormente ser pesados y así determinar la cantidad necesaria en la dosificación. Finalizado este proceso, el material es desplazado y descargado en la boca de carga del camión. Una vez en el tambor del camión hormigonera se inicia la fase de mezclado. En esta fase el tambor gira y mezcla el hormigón con las paletas helicoidales ubicadas en su interior. Finalizado el proceso de carga, el camión sale del punto de carga y transporta el hormigón hasta la obra. Tras entregar el hormigón en la obra, el camión vuelve a la planta y se prepara para el siguiente reparto.

En esta ocasión se dividieron las actividades desarrolladas en la planta de hormigón en dos categorías claramente diferenciadas: por un lado, las actividades desarrolladas en las instalaciones

de la planta de hormigón (u *on-site*), y por otro, las actividades de transporte desarrolladas fuera de las instalaciones (u *off-site*). Esta distinción ha sido tomada en cuenta al analizar la exposición de los trabajadores a ruido y VCE.

Respecto a las actividades realizadas dentro de las instalaciones de la planta, ninguna actividad implica que los trabajadores estén expuestos a VCE. Sin embargo, existen una amplia variedad de equipos que exponen a los trabajadores a elevados niveles de ruido. Aunque estas instalaciones suelen estar muy automatizadas y con poca intervención humana, el índice de accidentes indica que se producen lesiones de muy diversa índole (INSST, 1984). Alrededor de la torre de producción se llevan a cabo varias actividades: (1) recepción y almacenamiento de áridos, (2) recepción y almacenamiento de cemento, (3) dosificación de áridos, cemento, agua y aditivos, (4) mezcla de hormigón, (5) mantenimiento y (6) zonas de tránsito. Las fuentes de ruido en esta zona son múltiples: camión hormigonera, caídas de áridos, camiones de transporte de áridos, elementos neumáticos, compresor, etc. Con el objetivo de evaluar el ruido en las instalaciones de la planta de hormigón, se ha medido el NPS en 12 puntos distribuidos en las ubicaciones donde podrían encontrarse trabajadores mientras que las instalaciones están en funcionamiento.

Por otro lado, respecto a las actividades realizadas fuera de las instalaciones de la planta, se ha evaluado la exposición a VCE al transportar el hormigón desde las instalaciones de la planta hasta la obra. En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos en ambas campañas de medición.

4.2.2. Resultados obtenidos de la campaña de medición de VCE

Con el objetivo de caracterizar la exposición a VCE asociada al transporte de hormigón desde las instalaciones de la planta de producción hasta el punto de vertido en obra, se realizó una entrevista a los conductores de camiones hormigonera de la empresa. De los dos trabajadores entrevistados, se seleccionó para el estudio de campo al conductor con más años de experiencia y sin antecedentes de TME. El trabajador contaba con más de 20 años de experiencia como conductor de camiones, medía 1.85 m y pesaba 118 kg. El vehículo seleccionado fue un camión hormigonera MAN TGS 35.420 8 × 4 BB. Este vehículo es el que el trabajador utiliza de forma habitual para transportar el hormigón.

Tras seleccionar al trabajador y el vehículo, se midió la exposición a VCE durante las operaciones normales de entrega de hormigón producido en la planta. Para ello, se midió la aceleración en el interfaz conductor/asiento. Los instrumentos utilizados fueron el medidor y analizador de vibraciones humanas SVAN 106 y el acelerómetro triaxial de asiento SV 38V fabricado por SVANTEK. Al mismo tiempo que se registraba la aceleración transmitida al trabajador, la hora y la posición del vehículo se registraron mediante un sistema de posicionamiento global (GPS).

Respecto a la estrategia de medición, se ha tenido en cuenta que la actividad se realiza fuera de las instalaciones de la planta y que existen múltiples factores aleatorios que pueden afectar al itinerario (variaciones en la superficie, cambios de velocidad de desplazamiento del camión, etc.). Por ello, a diferencia del caso anterior de la planta de gestión de residuos donde se midieron ciclos completos de trabajo, en esta actividad se tomaron 20 medidas para asegurar que los valores obtenidos eran representativos. Además, se ha tenido en cuenta la naturaleza de la superficie sobre la que se desplazaba el vehículo, diferenciando entre superficie asfaltada y superficie no asfaltada.

A partir de los datos obtenidos se han aplicado los métodos de evaluación establecidos en la Directiva 2002/44/CE de la UE y la ISO 2631-1. Además, dado que se detectó que algunas mediciones contenían múltiples choques, también se aplicó el método definido en la norma ISO 2631-5:2018. Los métodos aplicados se encuentran descritos en el Capítulo 3. El tiempo de exposición se normalizó a una exposición diaria típica de 4 horas con el fin de comparar la exposición a VCE en cada superficie. Las Figuras 4-4 y 4-5 muestran los resultados obtenidos tras aplicar los métodos A(8) y VDV respectivamente.

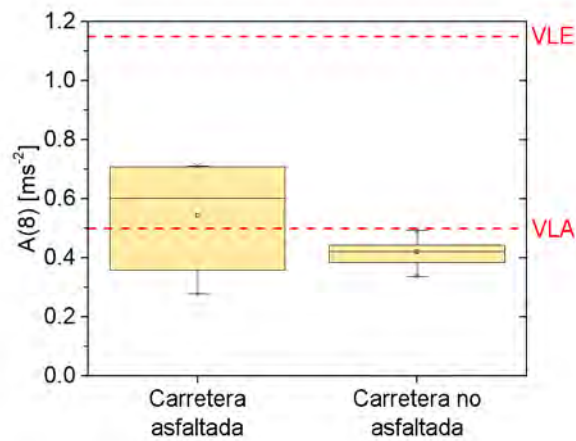


Figura 4-4. Resultados obtenidos tras aplicar el método A(8)

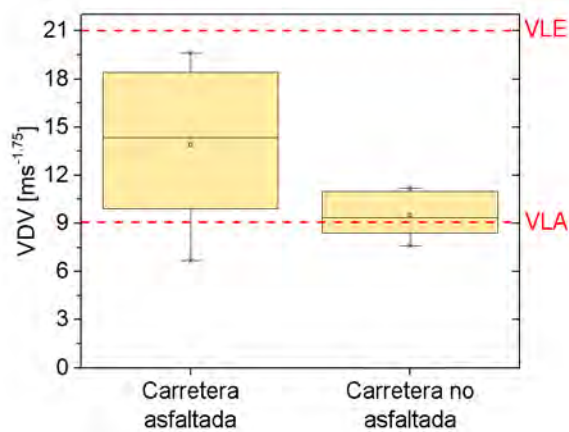


Figura 4-5. Resultados obtenidos tras aplicar el método VDV.

Como puede apreciarse en ambas figuras, los resultados indican que el conductor de camiones hormigonera está expuesto a un alto nivel de VCE. Si se comparan los valores obtenidos con los límites establecidos en la Directiva 2002/44/CE se aprecia que la exposición a VCE es mayor en los desplazamientos en carreteras asfaltadas que en las no asfaltadas. Cabe destacar que, dado que la carretera no asfaltada tiene una superficie más irregular, la velocidad media de desplazamiento en esta superficie era inferior (10.16 Km/h) a la de la carretera asfaltada (63.48 Km/h).

Los resultados de VDV obtenidos para la carretera asfaltada están por encima del VLA, así como más de la mitad de los resultados A(8) obtenidos. Sin embargo, ninguno de los valores obtenidos

superó el VLE en las operaciones realizadas en ambos tipos de superficies. En cuanto a los datos obtenidos en carreteras no asfaltadas, ninguno de los valores de $A(8)$ superó el límite del VLA. Sin embargo, este no es el caso cuando se comparan los VDV obtenidos con el VLA. Dado que el VDV se calcula a partir de la cuarta potencia del historial temporal de la aceleración, es más sensible a los picos que el método $A(8)$, que se calcula a partir del cuadrado medio de la aceleración. Además, la carretera no asfaltada es una superficie irregular y puede dar lugar a mayores choques y picos contenidos en la exposición; por lo tanto el método VDV es más restrictivo que el método $A(8)$.

Respecto a los resultados obtenidos tras aplicar el método definido en la ISO2631-5:2018, la Figura 4-6 muestra la dosis de compresión diaria equivalente para los niveles de la columna vertebral.

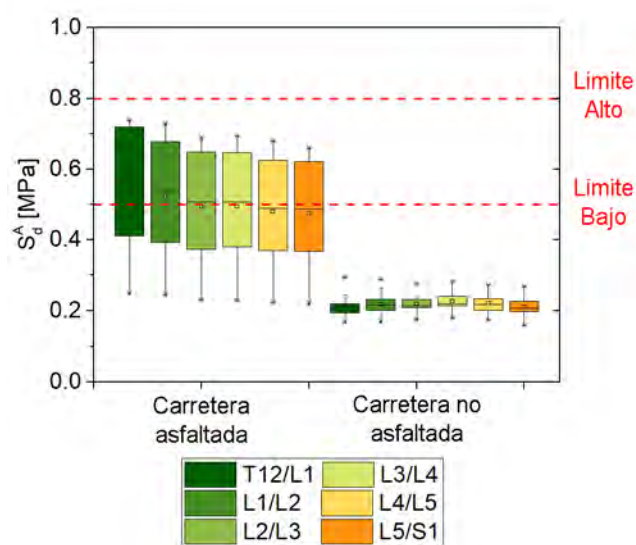


Figura 4-6. Resultados obtenidos tras aplicar el método definido en la ISO2631-5.

Al igual que en los métodos anteriores, la evaluación realizada según la norma ISO 2631-5:2018 también muestra valores más elevados en las operaciones de desplazamiento sobre asfalto que en desplazamientos sobre superficies no asfaltadas. El valor más desfavorable obtenido en las operaciones sobre carreteras asfaltadas es el nivel vertebral T12/L1. Si bien hay valores que superan el límite de baja probabilidad de un efecto adverso para la salud, ninguno de ellos presenta una alta probabilidad. En cuanto a las carreteras no asfaltadas, todos los valores obtenidos muestran una baja probabilidad de efecto adverso para la salud.

Dado que no se disponía del historial de exposición del conductor a VCE a lo largo de su vida, se han considerado las condiciones de exposición más desfavorables para realizar la evaluación de VCE a largo plazo: la exposición se produce desde los 20 a los 65 años durante 240 días al año. La media de S_d^A para cada nivel vertebral se utilizó para estimar el factor de riesgo R^A , el cual se calculó secuencialmente teniendo en cuenta el aumento de la edad. Como resultado, los valores más altos de R^A obtenidos fueron 0.71 y 0.32 para superficie asfaltada y superficie sin pavimentar respectivamente. Como ambos valores son inferiores a 0.8, la probabilidad de un efecto adverso sobre la salud es baja según los intervalos proporcionados por la norma ISO2631-5:2018.

Además, si comparamos los resultados de exposición asociados a ambas superficies, el promedio de los resultados obtenidos en todos los métodos de evaluación es menor en las carreteras sin asfaltar. Aunque esta superficie es más irregular que las superficies asfaltadas, las operaciones de desplazamiento en carreteras no asfaltadas se realizan a una velocidad de desplazamiento inferior (aproximadamente seis veces menor en comparación con la velocidad media de desplazamiento en superficies asfaltadas). Por lo tanto, el conductor está expuesto a un nivel de VCE más bajo en las operaciones en carreteras no asfaltadas que en las carreteras asfaltadas.

4.2.3. Resultados obtenidos de la campaña de medición de ruido

Con el objetivo de caracterizar la exposición a ruido en las instalaciones de la planta de hormigón, se ha medido el NPS en diferentes puntos con la planta en pleno funcionamiento. La distribución de las instalaciones se muestra en la Figura 4-7.

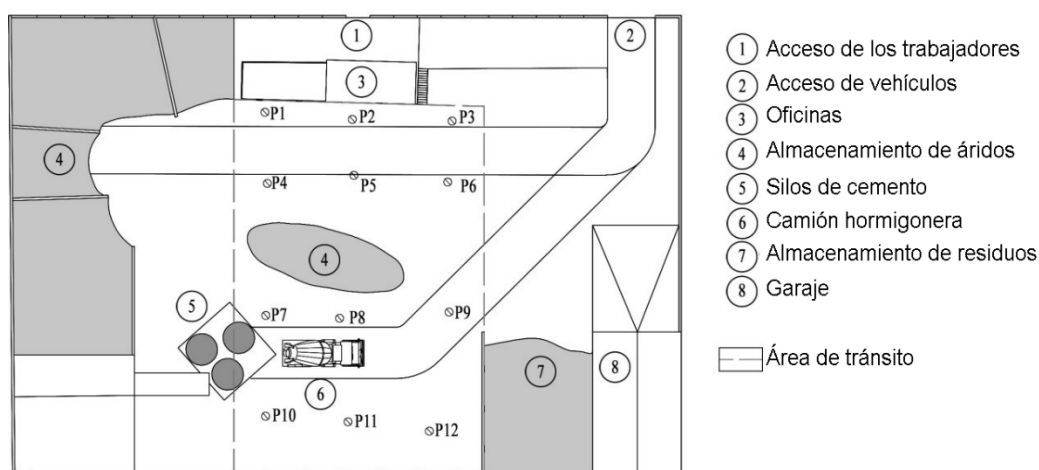


Figura 4-7. Distribución de las instalaciones en la planta de hormigón.

Para ello, se ha establecido una estrategia de medición en la que se ha seleccionado un total de 12 puntos y se ha utilizado el sonómetro para medir el NPS en cada ubicación. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-6. En varias ubicaciones cercanas al punto de carga de camiones existe un NPS elevado, el cual podría dar lugar a que se superasen los límites de exposición establecidos en la Directiva Europea 2003/10/EC en el caso de que un trabajador se encontrara en dicha zona.

Tabla 4-6. Resultados obtenidos.

Punto de medición	$L_{Aeq,d}$ (dB)
#1	67.7
#2	59.6
#3	58.5
#4	70.6
#5	61.5
#6	60.0

Punto de medición	$L_{Aeq,d}$ [dBA]
#7	89.8
#8	80.3
#9	73.8
#10	90.1
#11	82.5
#12	78.2

4.3. Discusión y Validación de la Hipótesis H1

Los resultados obtenidos a partir de las campañas de medición desarrolladas en ambas industrias han puesto de manifiesto que los trabajadores se encuentran expuestos a riesgos físicos en su lugar de trabajo. Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos es posible concluir que:

- Los datos obtenidos de la campaña de medición desarrollada en las instalaciones de ambas plantas muestran que los trabajadores pueden estar expuestos a niveles de ruido elevados que, en algunos casos, pueden sobrepasar los niveles de exposición establecidos en la Directiva Europea de Ruido. Sin embargo, los niveles de VCE a los que se encuentran expuestos los trabajadores que realizan tareas en las instalaciones de ambas empresas son muy inferiores a los límites establecidos en la Directiva Europea de vibraciones.
- Las actividades desarrolladas fuera de las instalaciones de la planta de hormigón muestran un elevado nivel de exposición a VCE durante la conducción de camiones. En el interior de los vehículos el nivel de ruido es bajo, sin embargo, la salud de los conductores puede sufrir efectos adversos como consecuencia de la exposición a VCE.

No obstante, con relación a la exposición a vibraciones *off-site* cabe destacar que el tiempo de exposición (4 h) utilizado para la normalización y comparación del conjunto de datos obtenidos se seleccionó porque el conductor del camión hormigonero afirmó que era el tiempo medio de conducción típico durante una jornada laboral. Sin embargo, el número de horas totales de conducción al día depende del volumen total de hormigón encargado por los clientes, la distancia a la obra desde la planta de producción de hormigón y la gestión logística. Estos factores condicionan el tiempo de exposición del trabajador, el cual en numerosas ocasiones puede superar las 4 h.

Además, cabe destacar que las empresas carecían del historial de exposición a VCE de los trabajadores. Considerando que estos datos son de vital importancia para poder evaluar el impacto a largo plazo de la exposición a VCE sobre la salud, es recomendable que las empresas elaboren una base de datos con los patrones de exposición a VCE (duración de las diversas exposiciones o los patrones de exposición por día y número de días de todas las exposiciones al año) para facilitar la evaluación.

A partir de los resultados obtenidos en los dos casos de estudios presentados, se corrobora la Hipótesis H1 planteada en el Capítulo 2: las actividades realizadas en las industrias afines al sector de la Construcción exponen a quienes las realizan a Agentes Físicos, concretamente:

- VCE en actividades desarrolladas fuera de las instalaciones, *off-site*; es decir, el transporte de materiales desde el emplazamiento de la planta a los puntos de entrega o recogida.
- Ruido en Actividades desarrolladas dentro de las instalaciones, *on-site*; es decir, actividades que tienen lugar dentro de la planta industrial

5. ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS METODOLOGÍAS Y LOS FACTORES QUE CONDICIONAN LA EXPOSICIÓN A VCE

Tras el Trabajo de campo descrito en el capítulo anterior y la validación de la Hipótesis H1, se aborda el cierre de la 1ª Etapa de la 4ª Fase de la investigación.

A la vista de que los resultados obtenidos en el Capítulo 4, los cuales mostraron que variables como el tipo de superficie y la velocidad eran factores que afectan a la aceleración transmitida al conductor a través del asiento, en el presente capítulo se realiza un análisis crítico de las metodologías para evaluar el riesgo de exposición a VCE definidas en las normas ISO 2631-1:2008, 2631-5:2004 y 2631-5:2018.

Para poder abordar este objetivo, se diseñó una experimentación, siguiendo la metodología definida en el Capítulo 3, para medir la vibración transmitida a conductores profesionales mientras conducían un vehículo pesado.

El trabajo realizado pone de manifiesto la necesidad de la definición de un nuevo Método de Gestión de la Evaluación de Riesgos que minimice el impacto sobre la salud de la exposición a VCE a largo plazo, lo que valida la Hipótesis H2.

5.1. Introducción

La conducción de vehículos durante operaciones como el transporte de materiales, movimiento de tierras o derribos, puede implicar que los trabajadores estén expuestos a VCE a lo largo de toda la jornada laboral (Tiemessen et al., 2007). De hecho, los resultados obtenidos en el Capítulo 4 mostraron que los conductores de camiones hormigonera están expuestos a altos niveles de VCE. Esta vibración es transmitida al conductor principalmente a través del asiento y el suelo de la cabina del vehículo (Adam & Jalil, 2017; Langer et al., 2015). Si además estas operaciones se realizan en superficies poco regulares, la exposición a VCE puede ser elevada y contener múltiples choques.

Diversos estudios epidemiológicos han puesto de manifiesto que existe una relación entre la exposición a largo plazo a VCE y la aparición de TME, tales como dolor de espalda y cambios degenerativos en la columna vertebral (Burström et al., 2015b; Fritz et al., 2005). Dado que los conductores de vehículos pesados están expuestos a VCE durante largos periodos en su jornada laboral, la evaluación del riesgo asociado a esta exposición es esencial para proteger su salud y seguridad. La Directiva 2002/44/CE establece que los métodos que deben emplearse para la evaluación de la exposición a VCE son el A(8) y VDV definidos en la norma ISO 2631-1:2008.

Sin embargo, dado que la conducción de este tipo de vehículos puede implicar la exposición a vibraciones que contengan múltiples choques, complementariamente puede considerarse el método definido en la norma ISO 2631-5:2004 para evaluar específicamente este tipo de exposición. No obstante, recientemente ha sido publicada una actualización de dicha norma (ISO 2631-5:2018) en la que se define un método de evaluación que incluye las variables antropométricas del conductor (ver Capítulo 3).

En este contexto, y a la vista de que los resultados obtenidos en el Capítulo 4 mostraron que variables como el tipo de superficie y la velocidad eran factores que afectaban a la aceleración transmitida al conductor a través del asiento, el presente capítulo persigue tres objetivos:

- (1) Evaluar el riesgo asociado a las operaciones típicas, desarrolladas con un vehículo pesado, en base a los métodos definidos en las normas ISO 2631-1:2008, 2631-5:2004 y 2631-5:2018.
- (2) Analizar los métodos definidos en las normas para determinar si los criterios predicen el mismo nivel de riesgo para la salud.
- (3) Comparar la exposición a VCE para dos tipos de conductores con medidas antropométricas distintas y diferentes condiciones de superficie de desplazamiento.

5.2. Diseño de campaña experimental

Con el objetivo de alcanzar con éxito los objetivos definidos en el presente capítulo, se ha diseñado una campaña experimental para medir la vibración transmitida a conductores profesionales mientras conducían un vehículo pesado, en este caso un tractor para acarrear material de movimiento tierras. Los datos obtenidos en la campaña de medición han sido utilizados para evaluar la exposición a VCE en base a los métodos y procedimientos definidos en el Capítulo 2 y 3.

Para el desarrollo de la campaña experimental se seleccionaron dos trabajadores con amplia experiencia en la conducción de este tipo de vehículos (ambos tienen más de 20 años de

experiencia profesional en este tipo de actividad). Los participantes proporcionaron información detallada sobre su experiencia laboral (tipo de vehículos conducidos, edad de la primera exposición a VCE, exposición diaria y años de exposición a VCE). Además, dado que el método definido en la ISO 2631-5:2018 tiene en cuenta las características antropométricas del conductor, los sujetos seleccionados tenían un IMC muy diferente a fin de comparar los efectos sobre la salud en dos escenarios distintos (ver Tabla 5-1).

Tabla 5-1. Características de los conductores

Conductor	1	2
Edad	48	59
Altura	1.85 m	1.73
Peso	120 kg	73 kg
IMC	35.1 kg/m ²	24.4 kg/m ²
Exposición diaria media a VCE	4 horas	4 horas
Exposición anual media a VCE	150 días/año	150 días/año
Edad primera exposición a VCE	20 años	20 años
Años acumulados de exposición a VCE	28 años	39 años

El vehículo seleccionado para la campaña fue un vehículo pesado (tractor), dado que ambos conductores participantes en el ensayo estaban familiarizados con el uso de este tipo de vehículo. Las características del vehículo se muestran en la Tabla 5-2. Según la Reglamento n° 167/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, este vehículo está clasificado como Clase II Categoría A.

Tabla 5-2. Características del vehículo.

Dimensiones		Características	
Peso	3800 Kg	Potencia	78 kW
Distancia entre ejes	226 cm	Cilindro	4
Longitud	419 cm	RPM trasera	540/1000
Anchura	205 cm	Neumático delantero	7.50-18
Altura (cabina)	226 cm	Neumático trasero	13.6R38

Una vez seleccionados el vehículo y los conductores, se definió el montaje experimental desarrollado en el estudio. La campaña de medición se desarrolló en la ciudad de Porcuna (37°52'11"N, 4°11'14"O). Para ello, se entrevistó a varios operadores de este tipo de vehículos que trabajan en la zona. Con la información obtenida se identificó y definió un ciclo de trabajo típico para este tipo de conductores. Con estos datos se estableció una ruta estándar para la prueba representativa del ciclo de trabajo completo. Esta ruta comprende diferentes tipos de superficie (ver Tabla 5-3). El trazado de la ruta y las diferentes superficies se muestran en la Figura 5-1 y 5-2. Estudios previos han demostrado que la magnitud de la VCE transmitida al conductor está influida por las características de la superficie de desplazamiento (Cann et al., 2003; De la Hoz Torres et al.; Kumar, 2004).

Tabla 5-3. Tipos de superficies incluidas en la ruta establecida.

Id. Superficie	Tipo de vía
S1	Campo a través
S2	Vía no asfaltada con superficie de alta rugosidad
S3	Vía no asfaltada con superficie de baja rugosidad
S4	Carretera asfaltada



Figura 5-1. Ruta seleccionada para la campaña experimental.



Figura 5-2. Tipos de superficie incluidas en la ruta.

Posteriormente y tras establecer la ruta, varios aspectos operativos han sido considerados previo al inicio de la prueba experimental. Los tractores se utilizan ampliamente en diferentes operaciones y estas actividades suelen requerir el uso de maquinaria remolcada intercambiable o de un remolque. Dado que es necesario establecer el rendimiento de una tarea representativa, el tractor utilizó un remolque mientras se desarrollaban las mediciones. Los tramos de cada tipo de superficie también se diseñaron de forma que sus duraciones permitieran obtener una muestra representativa de las vibraciones transmitidas en cada una de ellas. Otra variable importante considerada fue la velocidad de desplazamiento. Se estableció una velocidad de avance para cada tipo de superficie en función a varios factores: la velocidad de desplazamiento según las condiciones de la superficie y la velocidad máxima legal permitida para el vehículo en dicha vía.

Previo a la campaña experimental se realizó un ensayo para comprobar las velocidades medias de desplazamiento para cada tipo de superficie (Figura 5-3).

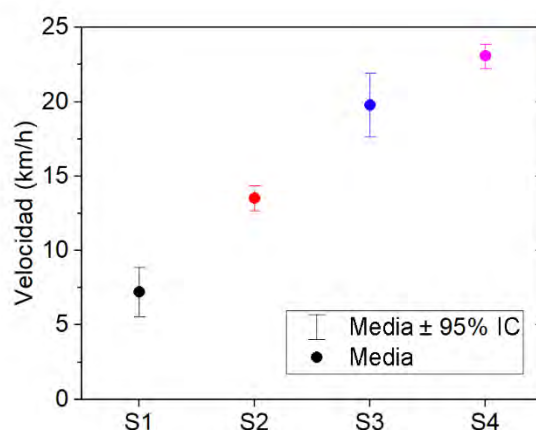


Figura 5-3. Velocidad media de desplazamiento según tipo de superficie.

A partir de los criterios expuestos, para el caso de desplazamientos en campo a través, la irregularidad de esta superficie requiere mantener la velocidad limitada a fin de garantizar la seguridad del conductor. En consecuencia, la velocidad de desplazamiento en este tipo de superficie oscila entre 5 y 10 km/h. Respecto a las vías no asfaltadas, el rango de velocidad de desplazamiento típico aumenta ya que la superficie es más regular que en el caso anterior. Sin embargo, dado que este tipo de vías pueden presentar una gran variedad de condiciones de rugosidad, esta categoría se dividió en dos: "vías no asfaltadas con superficie de alta rugosidad" (donde la velocidad de avance oscila entre 10 y 15 km/h) y "vías no asfaltada con superficie de baja rugosidad" (donde la velocidad de avance oscila entre 15 y 25 km/h). Por último, la velocidad media de avance del tractor en carretera asfaltada es mayor que en el resto de las superficies (de 20 a 25 km/h). No obstante, debe tenerse en cuenta que el límite legal de velocidad de los tractores es de 25 km/h cuando se utiliza un remolque o maquinaria remolcada intercambiable.

Una vez establecidas las condiciones de ensayo, cada conductor repitió la medición tres veces (proceso en el que se registró los datos de geoposicionamiento y la aceleración transmitida a través del asiento simultáneamente) para cada tipo de superficie, con el fin de reducir el riesgo de error en las mediciones. Todas las consideraciones anteriores han sido aplicadas durante la campaña experimental y los datos obtenidos han sido utilizados para evaluar la exposición a VCE.

5.3. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras evaluar la exposición de cada conductor en cada tipo de superficie de acuerdo con los métodos definidos en el Capítulo 3. Las señales se procesaron utilizando la biblioteca de recursos desarrollada en el software Matlab.

5.3.1. Análisis de acuerdo con la norma ISO 2631-1:2008 y la Directiva 2002/44/CE

Los resultados obtenidos tras evaluar la exposición del conductor 1 y 2 de acuerdo con los métodos definidos en la ISO 2631-1:2008 se muestran en la Tabla 5-4 y 5-5 respectivamente. Para el cálculo del A(8) y VDV se han considerado los datos proporcionados por los conductores (exposición diaria de 4 horas).

Tabla 5-4. Resultados obtenidos del conductor 1 de acuerdo a la ISO 2631-1:2008, método A(8).

Superficie	Nº test	rms _{wx} (ms ⁻²)	rms _{wy} (ms ⁻²)	rms _{wz} (ms ⁻²)	A(8)	$\overline{A(8)}$
S1	#1	0.51	0.39	0.49	0.50	0.43
	#2	0.41	0.33	0.47	0.41	
	#3	0.39	0.30	0.45	0.38	
S2	#1	0.37	0.38	0.59	0.42	0.44
	#2	0.37	0.38	0.61	0.43	
	#3	0.36	0.41	0.67	0.48	
S3	#1	0.36	0.39	0.66	0.47	0.43
	#2	0.35	0.40	0.62	0.44	
	#3	0.32	0.34	0.54	0.38	
S4	#1	0.18	0.21	0.38	0.27	0.26
	#2	0.14	0.19	0.36	0.25	
	#3	0.14	0.21	0.36	0.26	

Tabla 5-5. Resultados obtenidos del conductor 2 de acuerdo a la ISO 2631-1:2008, método A(8).

Superficie	Nº test	rms _{wx} (ms ⁻²)	rms _{wy} (ms ⁻²)	rms _{wz} (ms ⁻²)	A(8)	$\overline{A(8)}$
S1	#1	0.48	0.43	0.63	0.47	0.55
	#2	0.40	0.35	0.38	0.40	
	#3	0.79	0.65	0.56	0.78	
S2	#1	0.36	0.41	0.73	0.51	0.52
	#2	0.39	0.46	0.47	0.45	
	#3	0.42	0.59	0.52	0.58	
S3	#1	0.33	0.34	0.58	0.41	0.46
	#2	0.37	0.42	0.40	0.41	
	#3	0.47	0.55	0.52	0.54	
S4	#1	0.22	0.25	0.40	0.28	0.37
	#2	0.27	0.42	0.37	0.42	
	#3	0.20	0.41	0.29	0.40	

* Los números en negrita indican que el valor es superior al VLA.

Como puede observarse, la conducción en S1, S2 y S3 son las que proporcionan una mayor dosis de exposición en el caso de ambos conductores. Cabe destacar que en el caso del conductor 2 la dosis de exposición es más elevada, proporcionando la conducción en las superficies S1 y S2 un

nivel de exposición que supera el valor límite VLA definido en la Directiva 2002/44/CE ($A(8) = 0.5 \text{ m/s}^2$).

Respecto al método de VDV, las Tablas 5-6 y 5-7 muestran los resultados obtenidos en cada tipo de superficie para ambos conductores.

Tabla 5-6. Resultados obtenidos del conductor 1 de acuerdo con la ISO 2631-1:2008, método VDV.

Superficie	Nº test	$VDV_x (\text{ms}^{-1.75})$	$VDV_y (\text{ms}^{-1.75})$	$VDV_z (\text{ms}^{-1.75})$	VDV	$\overline{VDV}$
S1	#1	3.21	2.44	3.56	11.53	9.88
	#2	2.27	1.92	3.33	9.27	
	#3	2.36	1.83	2.90	8.82	
S2	#1	1.99	1.96	2.95	8.93	9.32
	#2	1.94	1.89	2.89	8.92	
	#3	1.89	1.88	3.12	10.11	
S3	#1	2.17	2.41	3.63	10.20	9.43
	#2	2.02	2.32	3.36	9.60	
	#3	1.81	1.99	2.97	8.48	
S4	#1	1.01	1.18	2.14	5.55	5.33
	#2	0.78	1.07	1.99	5.22	
	#3	0.79	1.16	2.00	5.23	

* Los números en negrita indican que el valor es superior al VLA.

Tabla 5-7. Resultados obtenidos del conductor 2 de acuerdo con la ISO 2631-1:2008, método VDV.

Superficie	Nº test	$VDV_x (\text{ms}^{-1.75})$	$VDV_y (\text{ms}^{-1.75})$	$VDV_z (\text{ms}^{-1.75})$	VDV	$\overline{VDV}$
S1	#1	3.00	2.68	3.92	11.16	12.78
	#2	2.69	2.23	3.63	9.32	
	#3	4.52	3.61	3.05	17.85	
S2	#1	2.61	3.21	5.74	12.90	12.01
	#2	1.94	2.46	2.43	10.40	
	#3	3.81	5.06	5.15	12.73	
S3	#1	2.44	2.60	4.30	9.33	10.45
	#2	2.42	2.86	2.41	10.20	
	#3	3.51	4.00	4.76	11.81	
S4	#1	2.02	2.10	3.82	8.20	9.01
	#2	2.00	3.00	2.48	9.54	
	#3	1.34	2.40	1.56	9.28	

* Los números en negrita indican que el valor es superior al VLA.

En el caso de ambos conductores, al igual que en el $A(8)$, el nivel de VCE transmitido es mayor en aquellas superficies que presentan mayor rugosidad. Los resultados obtenidos muestran que los dos conductores, para una actividad de 4 horas en las tres superficies más rugosas (S1, S2 y S3), superan el límite VLA establecido en la Directiva 2002/44/CE ($VDV = 9.1 \text{ m/s}^{1.75}$).

Si se realiza una comparación entre los valores obtenidos para cada conductor en cada superficie (ver Figura 5-4), es posible concluir que los resultados obtenidos a partir de ambos métodos proporcionan una dosis superior en el caso del conductor 2 que el conductor 1. De acuerdo a los

resultados obtenidos del método A(8), el conductor 1 no se encontraría expuesto a una dosis perjudicial para su salud, mientras que el conductor 2 si lo estaría en el caso de las superficies S1 y S2. Por otro lado, respecto al método VDV, ambos conductores superan el límite VLA en todas las superficies desplazamiento a excepción de la carretera asfaltada.

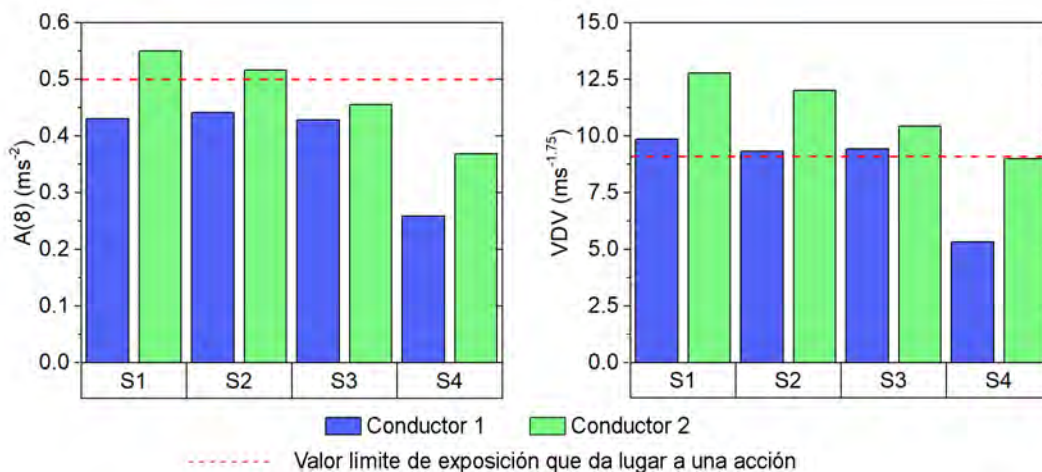


Figura 5-4. Comparación de los resultados obtenidos tras aplicar los métodos A(8) y VDV para cada conductor y tipo de superficie.

5.3.2. Análisis de acuerdo con la norma ISO 2631-5:2004.

En el procedimiento de cálculo de la evaluación de la exposición a VCE según la norma ISO 2631-5:2004, al igual que en el apartado anterior, la exposición diaria ha sido considerada de 4 horas. Además, se ha considerado que realizan esta actividad 150 días al año y que iniciaron este tipo de exposición cuando tenían 20 años. Los resultados obtenidos de la exposición diaria tras calcular la dosis de compresión estática equivalente (S_{ed}) se muestran en las Tablas 5-8 y 5-9 para el conductor 1 y 2 respectivamente.

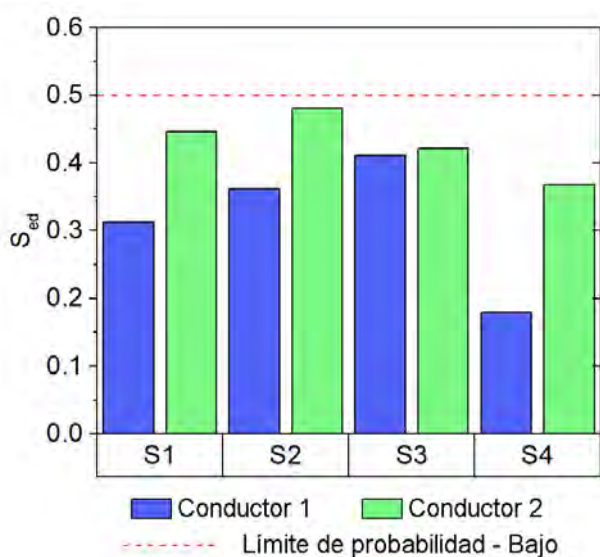
Tabla 5-8. Valores S_{ed} obtenidos de la exposición a VCE del conductor 1.

Superficie	Nº test	S_{ed}	$\overline{S_{ed}}$
S1	#1	0.37	0.31
	#2	0.30	
	#3	0.27	
S2	#1	0.36	0.36
	#2	0.36	
	#3	0.37	
S3	#1	0.47	0.41
	#2	0.43	
	#3	0.34	
S4	#1	0.19	0.18
	#2	0.17	
	#3	0.18	

Tabla 5-9. Valores S_{ed} obtenidos de la exposición a VCE del conductor 2.

Superficie	Nº test	S_{ed}	$\overline{S_{ed}}$
S1	#1	0.43	0.45
	#2	0.31	
	#3	0.60	
S2	#1	0.49	0.48
	#2	0.46	
	#3	0.49	
S3	#1	0.36	0.42
	#2	0.42	
	#3	0.48	
S4	#1	0.32	0.37
	#2	0.38	
	#3	0.41	

A diferencia de los resultados obtenidos con el método VDV, el valor $\overline{S_{ed}}$ no aumenta conforme más irregular es la superficie de desplazamiento. En este caso, la superficie que proporciona un $\overline{S_{ed}}$ más alto es S3 en el caso del conductor 1, y S2 en el caso del conductor 2. Además, si se tienen en cuenta los valores límite definidos en la norma para evaluar la probabilidad de efecto adverso sobre la salud de la exposición diaria a VCE, todas las exposiciones proporcionan una probabilidad baja dado que el $S_{ed} < 0.5$ MPa en todos los escenarios. Sin embargo, si comparamos la exposición entre ambos conductores (ver Figura 5-5), el valor S_{ed} obtenido es superior en todas las superficies para el conductor 2 que para el conductor 1.

Figura 5-5. Comparación resultados de S_{ed} obtenidos para cada superficie y conductor.

Por otro lado, respecto a la evaluación del efecto acumulativo de la exposición a VCE a largo plazo sobre la salud de los conductores, las Tablas 5-10 y 5-11 muestran el factor R obtenido en cada tipo superficie para cada conductor.

Tabla 5-10. Factor R obtenido en cada tipo superficie en el caso del conductor 1.

Superficie	Nº test	Factor R para la columna vertebral en 2017	$\bar{R}$
S1	#1	0.38	0.32
	#2	0.32	
	#3	0.28	
S2	#1	0.37	0.38
	#2	0.37	
	#3	0.39	
S3	#1	0.48	0.43
	#2	0.44	
	#3	0.36	
S4	#1	0.19	0.19
	#2	0.18	
	#3	0.19	

Tabla 5-11. Factor R obtenido en cada tipo superficie en el caso del conductor 2.

Superficie	Nº test	Factor R para la columna vertebral en 2017	$\bar{R}$
S1	#1	0.45	0.46
	#2	0.32	
	#3	0.62	
S2	#1	0.51	0.50
	#2	0.48	
	#3	0.51	
S3	#1	0.38	0.44
	#2	0.43	
	#3	0.50	
S4	#1	0.33	0.38
	#2	0.39	
	#3	0.42	

Al igual que en el caso del S_{ed} , los resultados obtenidos del Factor R muestran que en todos los escenarios la probabilidad de que se produzcan efectos adversos sobre la salud de los conductores es baja ($R < 0.8$).

Sin embargo, dado que se ha asumido en la simulación que ambos conductores han estado expuestos desde que tenían 20 años, y que el conductor 1 (nacido en 1970) es más joven que el conductor 2 (nacido en 1959), la exposición acumulada del conductor 2 es superior. Por lo tanto, para comparar los efectos acumulativos de la exposición a largo plazo entre ambos conductores en igualdad de condiciones, se ha estimado la probabilidad de riesgo (Factor R) al que estarían expuestos si continuaran con el mismo patrón de exposición hasta los 65 años de edad.

La Figura 5-6 muestra la evolución del Factor R de la exposición en cada tipo de superficie para cada conductor. Se puede observar que el Factor R obtenido en el caso del conductor 2 a la edad de 65 años es superior al obtenido para el conductor 1. No obstante, ninguno de los dos conductores supera límite bajo de probabilidad de sufrir efectos adversos para la salud.

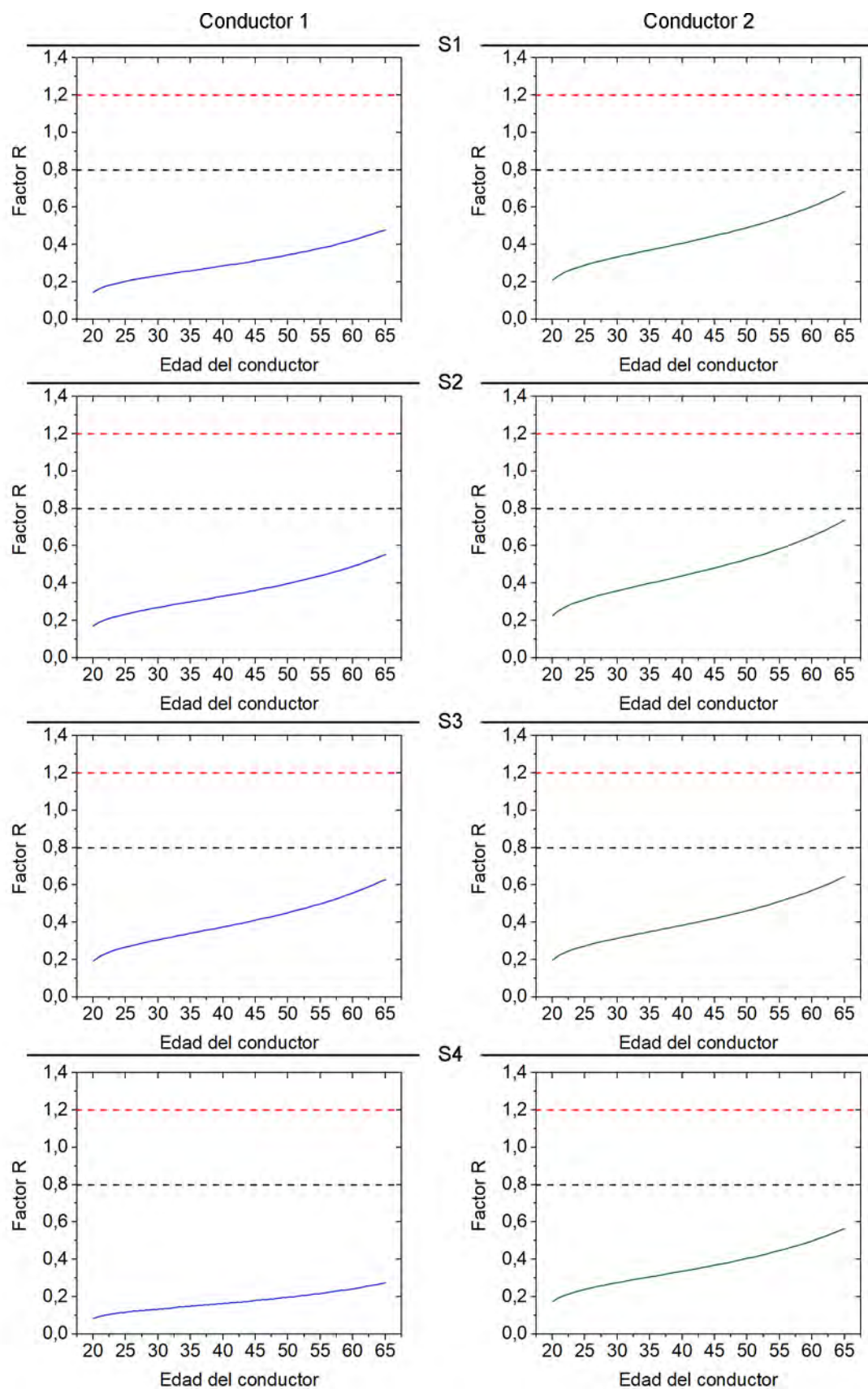


Figura 5-6. Factor R de la exposición en cada tipo de superficie, desde los 20 hasta los 65 años, del conductor 1 (a)) y conductor 2 (b)). Línea negra discontinua indica límite de probabilidad de riesgo bajo. Línea roja discontinua indica límite de probabilidad alto.

5.3.3. Análisis de acuerdo con la norma ISO 2631-5:2018

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el método menos severo definido en la norma ISO 2631-5:2018. Al igual que en el cálculo del método de la versión anterior de 2004, se ha considerado los mismos criterios de exposición. El tipo de postura que el trabajador tiene cuando realiza la actividad corresponde al Grupo 3 definido en la norma. Además, se ha considerado que la aceleración transmitida a través del asiento y de su respaldo era la misma. Estos criterios se han seleccionado con el objetivo de asumir las mismas condiciones que en los métodos previos y, en consecuencia, poder comparar si los resultados obtenidos predicen el mismo nivel de riesgo para la salud de los conductores.

Los resultados obtenidos de la exposición diaria tras calcular la dosis de compresión estática equivalente (S_D^A) para cada nivel vertebral se muestran en las Tablas 5-12 y 5-13 para el conductor 1 y 2 respectivamente.

Tabla 5-12. Valores S_D^A obtenidos para cada nivel vertebral en el caso del conductor 1.

Superficie	Nº test	S_D^A para la columna vertebral en 2017						S_D^A	$\overline{S_D^A}$
		T12/L1	L1/L2	L2/L3	L3/L4	L4/L5	L5/S1		
S1	#1	0.43	0.44	0.46	0.48	0.47	0.43	0.48	0.47
	#2	0.40	0.39	0.40	0.41	0.41	0.37	0.41	
	#3	0.46	0.48	0.50	0.52	0.50	0.45	0.52	
S2	#1	0.47	0.46	0.47	0.48	0.47	0.44	0.48	0.48
	#2	0.44	0.44	0.44	0.46	0.45	0.42	0.46	
	#3	0.51	0.49	0.48	0.49	0.48	0.45	0.51	
S3	#1	0.47	0.45	0.44	0.45	0.44	0.43	0.47	0.44
	#2	0.44	0.43	0.41	0.41	0.41	0.40	0.44	
	#3	0.41	0.41	0.40	0.41	0.40	0.37	0.41	
S4	#1	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.26	0.27	0.24
	#2	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.22	
	#3	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.22	

Tabla 5-13. Valores S_D^A obtenidos para cada nivel vertebral en el caso del conductor 2.

Superficie	Nº test	S_D^A para la columna vertebral en 2017						S_D^A	$\overline{S_D^A}$
		T12/L1	L1/L2	L2/L3	L3/L4	L4/L5	L5/S1		
S1	#1	0.30	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.30	0.24
	#2	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.17	
	#3	0.25	0.26	0.25	0.26	0.26	0.25	0.26	
S2	#1	0.37	0.36	0.34	0.33	0.33	0.32	0.37	0.28
	#2	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.23	
	#3	0.23	0.24	0.23	0.24	0.23	0.22	0.24	
S3	#1	0.27	0.26	0.24	0.24	0.23	0.23	0.27	0.24
	#2	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.20	
	#3	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24	
S4	#1	0.26	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.26	0.22
	#2	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.17	
	#3	0.20	0.20	0.22	0.22	0.22	0.20	0.22	

Al igual que con los resultados obtenidos de S_{ed} , los valores de S_D^A muestran que la condición de que una superficie de desplazamiento tenga mayor irregularidad no implica necesariamente que la exposición sea superior a otra superficie con menor irregularidad. En el caso de ambos conductores, la exposición en todas las superficies proporciona una probabilidad baja de sufrir efectos adversos asociados a dicha exposición. No obstante, como puede apreciarse en la Figura 5-7, los resultados de S_D^A obtenidos en el caso del conductor 1 son superiores en todas las superficies al conductor 2. Esta relación es la inversa a la que puede apreciarse en la evaluación realizada con la versión anterior de la norma (ver Figura 5-5).

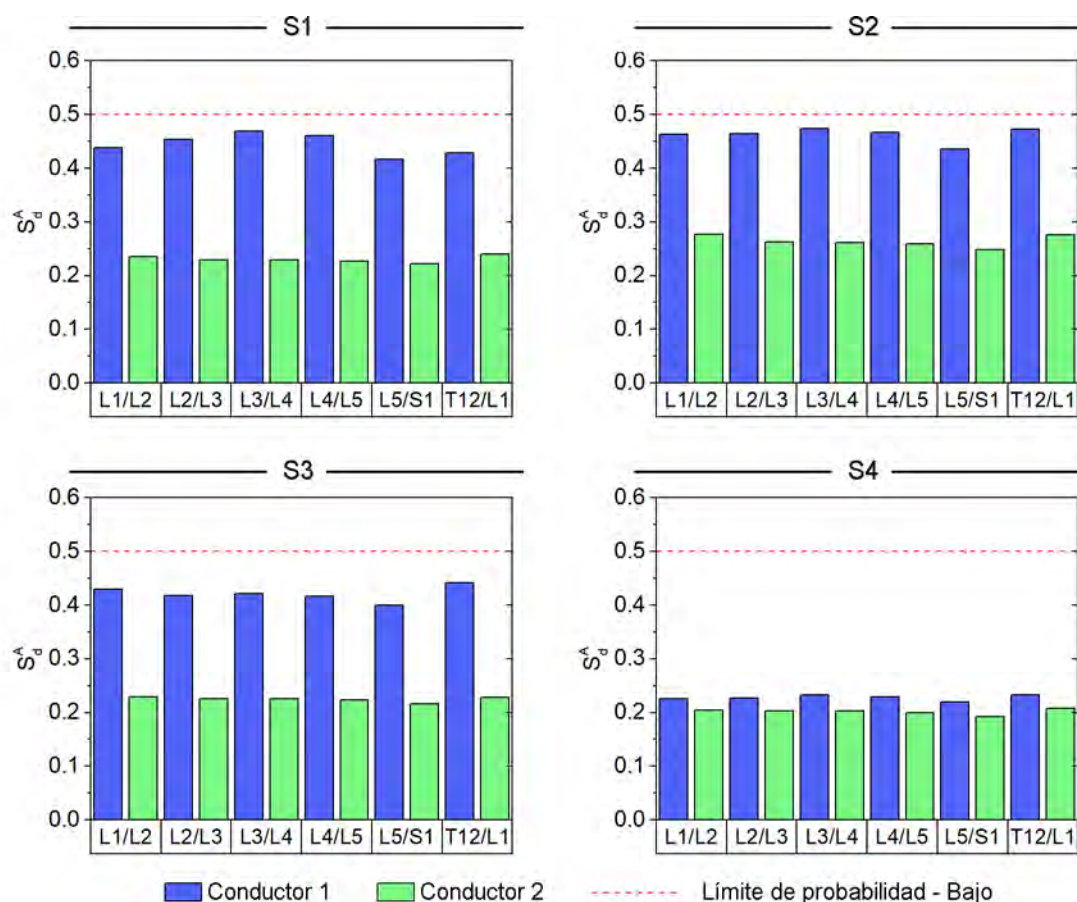


Figura 5-7. Comparación de los valores S_D^A obtenidos en cada superficie para cada conductor.

Respecto al efecto acumulado de la exposición a largo plazo sobre la salud de los conductores, se ha calculado el Factor R^A para cada nivel vertebral. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5-14 y 5-15 para el conductor 1 y 2 respectivamente.

Tabla 5-14. Factor R^A para cada nivel vertebral en cada tipo de superficie. Caso del conductor 1.

Superficie	Nº test	Factor R para la columna vertebral en 2017						R^A	$\overline{R^A}$
		T12/L1	L1/L2	L2/L3	L3/L4	L4/L5	L5/S1		
S1	#1	0.55	0.57	0.60	0.62	0.61	0.54	0.62	0.61
	#2	0.50	0.51	0.52	0.54	0.52	0.47	0.54	
	#3	0.58	0.62	0.65	0.67	0.65	0.57	0.67	
S2	#1	0.59	0.59	0.61	0.62	0.61	0.55	0.62	0.62
	#2	0.56	0.56	0.57	0.59	0.58	0.52	0.59	
	#3	0.65	0.63	0.62	0.63	0.62	0.57	0.65	
S3	#1	0.60	0.58	0.58	0.58	0.57	0.54	0.60	0.56
	#2	0.56	0.55	0.53	0.53	0.53	0.50	0.56	
	#3	0.53	0.53	0.52	0.53	0.51	0.47	0.53	
S4	#1	0.33	0.33	0.34	0.35	0.34	0.32	0.35	0.30
	#2	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.25	0.27	
	#3	0.28	0.28	0.27	0.28	0.27	0.26	0.28	

Tabla 5-15. Factor R^A para cada nivel vertebral en cada tipo de superficie. Caso del conductor 2.

Superficie	Nº test	Factor R para la columna vertebral en 2017						R^A	$\overline{R^A}$
		T12/L1	L1/L2	L2/L3	L3/L4	L4/L5	L5/S1		
S1	#1	0.34	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.34	0.28
	#2	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.19	
	#3	0.28	0.30	0.29	0.30	0.29	0.28	0.30	
S2	#1	0.42	0.41	0.38	0.38	0.37	0.36	0.42	0.32
	#2	0.26	0.27	0.25	0.25	0.25	0.23	0.27	
	#3	0.26	0.27	0.26	0.27	0.27	0.24	0.27	
S3	#1	0.30	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.30	0.27
	#2	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.22	
	#3	0.26	0.27	0.27	0.28	0.27	0.26	0.28	
S4	#1	0.29	0.27	0.26	0.25	0.25	0.25	0.29	0.25
	#2	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.17	0.19	
	#3	0.22	0.23	0.25	0.26	0.25	0.23	0.26	

Al igual que en el caso de S_D^A , los resultados obtenidos del factor R^A indican que todas superficies proporcionan una probabilidad baja de riesgo asociado a la exposición a VCE para ambos conductores ($R^A < 0.8$). No obstante, los resultados obtenidos tras aplicar este método muestran que el factor R^A es superior en el caso del conductor 1 que en el conductor 2 (incluso teniendo en cuenta que, asumiendo que ambos iniciaron la exposición con 20 años de edad, el conductor 2 lleva más años expuesto que el conductor 1). En este sentido, se ha realizado la evaluación de ambos conductores asumiendo una exposición continuada hasta los 65 años para valorar la exposición a largo plazo con las mismas condiciones. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5-8.

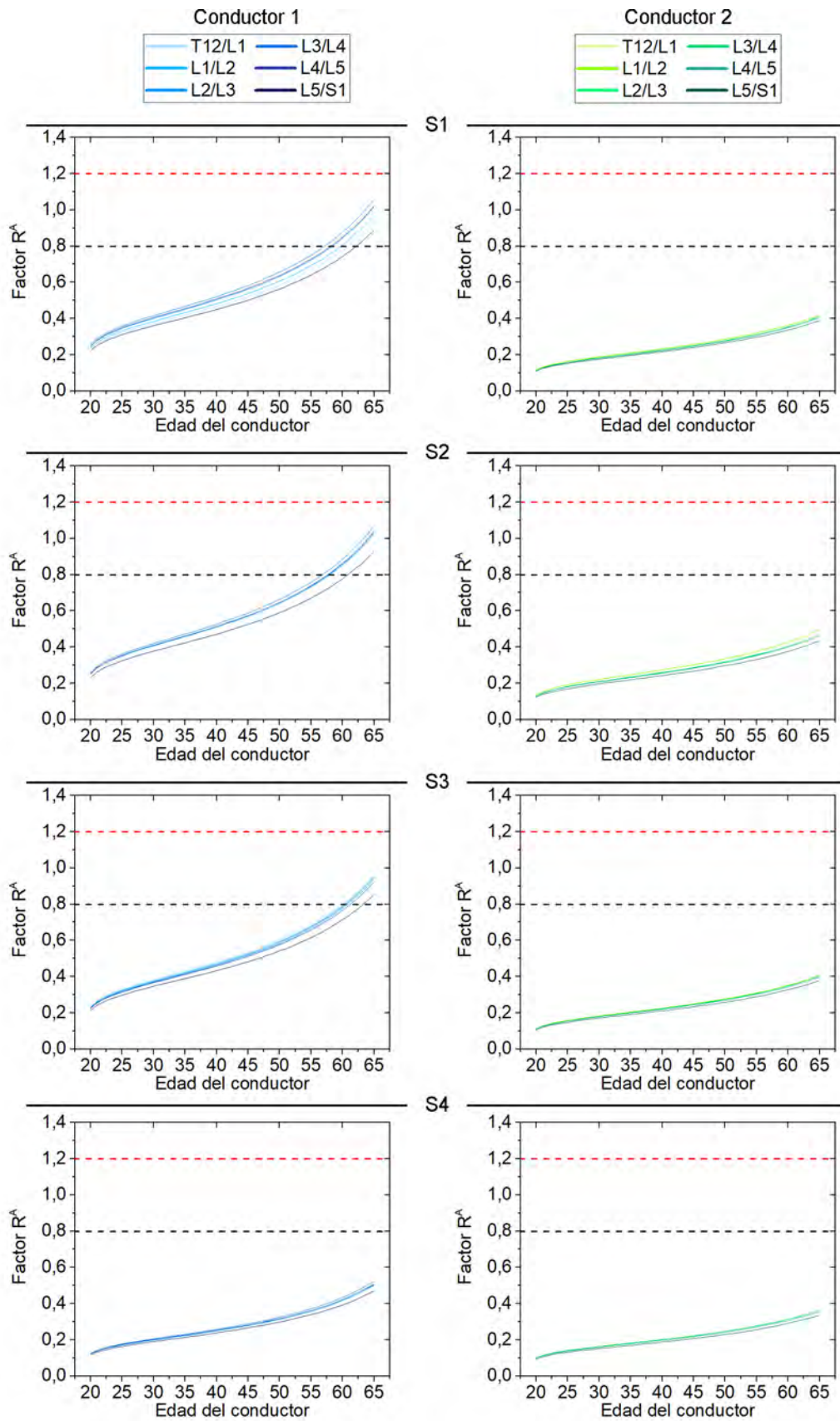


Figura 5-8. Evolución del factor R^A en cada nivel vertebral para cada tipo de superficie. Línea negra discontinua indica límite de probabilidad de riesgo bajo. Línea roja discontinua indica límite de probabilidad alto.

Los resultados muestran que el conductor 1 sobrepasaría el límite de riesgo bajo en las tres superficies más rugosas. Concretamente, el conductor 1 alcanza el límite a los 58, 57 y 60 años en las exposiciones asociadas a las superficies S1, S2 y S3 respectivamente. Por el contrario, el factor de riesgo del conductor 2 permanece bajo en todas las superficies.

5.4. Discusión

En este capítulo se ha analizado el nivel de exposición a VCE de los conductores en diferentes superficies utilizando métodos de evaluación diferentes y se han comparado con los límites de exposición establecidos en la Directiva 2002/44/CE y las normas ISO. En la Tabla 5-16 se muestra un resumen, para cada superficie y conductor, del nivel de riesgo para la salud a corto plazo que proporcionan los métodos definidos en la ISO2631-1:2008, ISO2631-5:2004 e ISO 2631-5:2018.

Tabla 5-16. Resumen de resultados obtenidos de riesgo para la salud.

Resultados Conductor 1				
Exp.	ISO 2631-1:2008 y Directiva 2002/44/CE		ISO 2631-5: 2004	ISO 2631-5: 2018
	A(8) [ms ⁻²]	VDV [ms ^{-1,75}]	S _{ed} [MPa]	S _D ^A [MPa]
S1	0.43	9.88	0.31	0.47
S2	0.44	9.32	0.36	0.48
S3	0.43	9.43	0.41	0.44
S4	0.26	5.33	0.18	0.24
Resultados Conductor 2				
Exp.	ISO 2631-1:2008 y Directiva 2002/44/CE		ISO 2631-5: 2004	ISO 2631-5: 2018
	A(8) [ms ⁻²]	VDV [ms ^{-1,75}]	S _{ed} [MPa]	S _D ^A [MPa]
S1	0.55	12.78	0.45	0.24
S2	0.52	12.01	0.48	0.28
S3	0.46	10.45	0.42	0.24
S4	0.37	9.01	0.37	0.22

El único método que indicó que existe riesgo para la salud del conductor 1 en las superficies S1, S2 y S3 es el VDV. El resto de métodos no indicaron que la exposición fuera tan perjudicial para la salud del conductor 1 ya que no se alcanza el límite establecido en la Directiva 2002/44/CE (en el caso del A(8)) ni los límites definidos en las normas ISO2631-5 (en el caso del S_{ed} y S_D^A). Cabe destacar que, si se comparan las versiones 2004 y 2018 de la norma ISO 2631-5, se produce un incremento en la evaluación de la dosis compresiva S_D^A respecto del S_{ed}. Concretamente, para la S1, S2 y S4 existe un incremento entre el 30 al 50%, mientras que para S3 supone una variación del 7%.

Por otro lado, si bien el método VDV ha proporcionado la misma evaluación en el caso del conductor 2 (superando el límite VLA en las mismas superficies), en este caso el método A(8) también sobrepasa el límite VLA en los desplazamientos sobre las superficies S1 y S2. No obstante, los resultados obtenidos de S_{ed} y S_D^A indican que la probabilidad de efectos adversos es baja en todos los casos evaluados para el conductor 2. En este caso, se produce una disminución del S_D^A frente al S_{ed} , siendo alrededor de un 40% en todas las superficies.

En consecuencia, a partir de estos resultados es posible concluir que el método VDV es más restrictivo al evaluar las mismas exposiciones que el método A(8). Este hecho se debe principalmente a que las exposiciones contienen choques a los que el método VDV es más sensible (se calcula en base al promedio de la cuarta potencia del histórico del tiempo de la aceleración, en lugar de la segunda potencia que es el método usado en el método básico A(8)). Respecto a los valores de S_{ed} y S_D^A obtenidos, las versiones de 2004 y 2018 de la norma ISO 2631-5 han proporcionado la misma evaluación del riesgo, es decir, la probabilidad es baja en todos los casos evaluados. Cabe señalar que aunque ambos métodos proporcionan una probabilidad baja de riesgo, para el conductor 1 el valor de S_D^A está cercano al límite de riesgo moderado para las superficies S1, S2 y S3 y para el conductor 2 es el valor de S_{ed} el que proporciona valores similares para las mismas superficies.

Sin embargo, a pesar de que tanto el VDV y el método S_D^A tienen como objetivo evaluar exposiciones a VCE con múltiples choques, las evaluaciones proporcionadas por ambos métodos proporcionan valoraciones diferentes. En consecuencia, esto puede causar confusión en el proceso de gestión de la seguridad de las actividades, ya que algunas operaciones pueden considerarse seguras cuando no lo son, y viceversa, según el método de evaluación elegido.

De hecho, resultados similares, pero con la versión anterior de la norma, fueron proporcionados por otros estudios previos de investigación sobre la versión ISO 2631-5:2004 e ISO 2631-1 para el uso de vehículos pesados en procesos de carga, transporte y descarga (Eger et al., 2008), locomotoras de ferrocarril (Cooperrider & Gordon, 2006; Johanning et al., 2006), y retroexcavadoras (Blood et al., 2012). Eger et al. (2008) ya sugirió que se debe realizar una investigación para revisar si los límites de probabilidad baja y alta de sufrir efectos adversos para la salud sugeridos en ISO 2631-5:2004 son adecuados. Sin embargo, aunque el método de cálculo de la dosis compresiva S_D^A es diferente en ISO 2631-5:2018, estos límites son los mismos que los publicados en la versión ISO 2631-5:2004 de la norma; por lo tanto, este resultado apoya dicho argumento en un contexto diferente.

En relación con la evaluación de los efectos acumulados de la exposición a VCE a largo plazo, la Figura 5-9 muestra una comparación de los resultados medios obtenidos en el cálculo del Factor R y R^A con las dos versiones de la norma ISO 2631-5. Dado que la versión de la norma 2018 proporciona el Factor R^A para cada nivel vertebral, se ha incluido en las gráficas el nivel más desfavorable con el objetivo de facilitar la comparación entre trabajadores y normas para cada tipo de superficie.

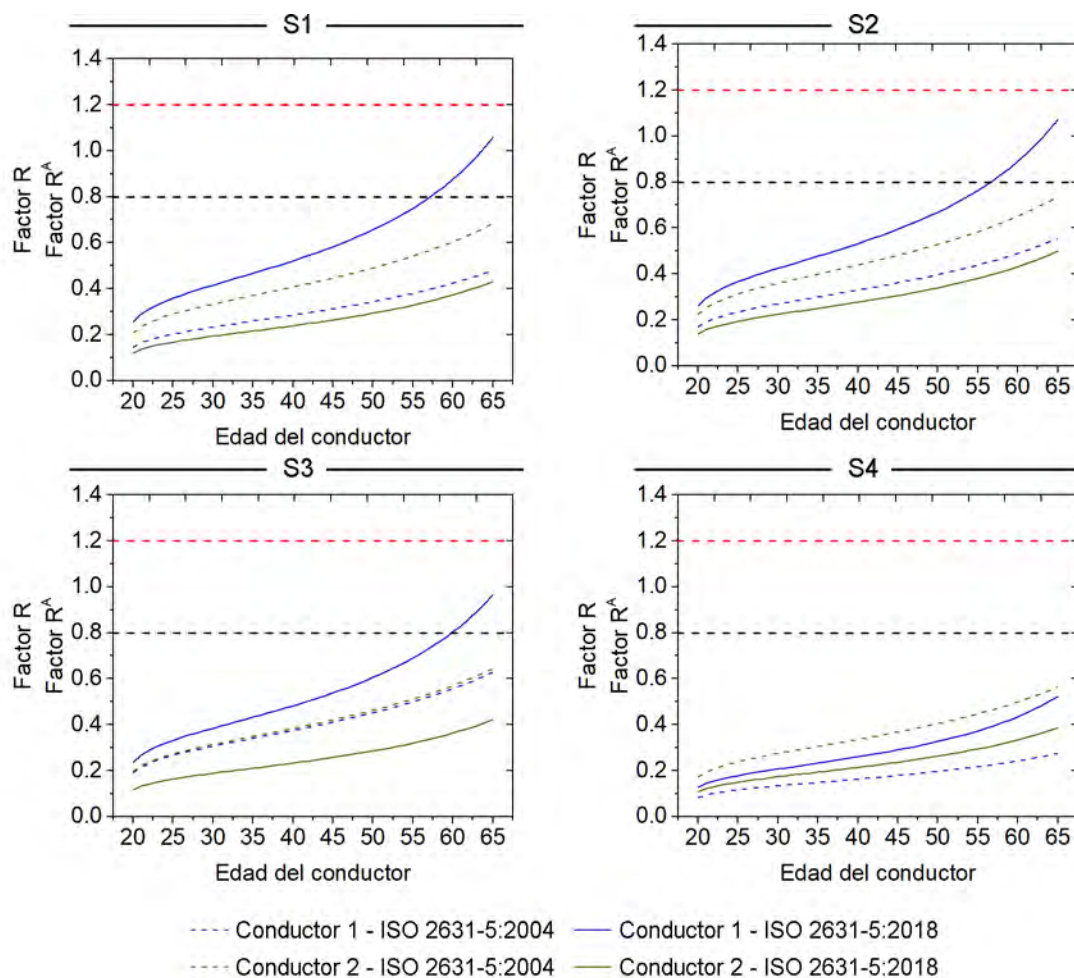


Figura 5-9. Comparación de la evolución del Factor R y R^A de los dos conductores para cada tipo de superficie. La evaluación del conductor 1 está indicada en color Azul. La evaluación del conductor 2 está indicada en color Verde. Factor R está indicado con línea continua. Factor R^A está indicado con línea discontinua. Línea negra discontinua indica límite de probabilidad de riesgo bajo. Línea roja discontinua indica límite de probabilidad alto.

Como puede apreciarse en la figura anterior, a partir de los resultados obtenidos en todos los tipos de superficies es posible concluir: (1) la versión de la norma de 2004 proporciona una evaluación más restrictiva al conductor 2 que al conductor 1 (Factor R), siendo la situación opuesta la obtenida tras aplicar la versión 2018 de la norma (Factor R^A). (2) El Factor R^A definido en la versión 2018 de la norma proporciona una evaluación más restrictiva al conductor 1 que el Factor R definido en la versión de 2004, siendo lo opuesto a los resultados obtenidos para el caso del conductor 2.

Estos resultados evidencian la importancia de incluir los factores antropométricos de los conductores en la evaluación de la exposición a largo plazo a VCE. Esto se ve reflejado en la evolución del factor R^A en el conductor 1 con un elevado IMC. En este sentido, la publicación de la norma ISO 2631-5:2018 ha supuesto un importante avance en la forma en que las variables antropométricas del conductor y el régimen de exposición se incluyen en la evaluación. El método definido en la ISO2631-5:2004, al no contemplar estas variables, podía estar subestimando el riesgo del conductor 1 de sufrir efectos adversos para la salud en la columna vertebral. En el caso del conductor 2, es el escenario opuesto, ya que la versión de la norma de 2004 puede sobrestimar

el riesgo en comparación de los resultados obtenidos con el método definido en la versión de la norma de 2018.

5.5. Conclusiones. Validación de la Hipótesis H2

Este capítulo se ha centrado en la evaluación del riesgo para la salud asociado a las operaciones con vehículos pesados, comparando los resultados obtenidos tras aplicar los diferentes métodos de evaluación de la exposición a VCE con los límites establecidos en las normas. En el diseño experimental se han considerado diferentes condiciones de superficie de desplazamiento y velocidad, permitiendo analizar y comparar los diferentes factores implicados.

Los resultados obtenidos de la campaña de medición han sido analizados en base a los diferentes modelos de evaluación de exposición a VCE a corto y largo plazo. De las diferentes pruebas realizadas en este estudio, se obtuvo que los niveles de VCE transmitidos a los conductores son elevados en los casos de desplazamiento sobre superficie no asfaltada. De hecho, en los casos de superficie S3, el nivel de exposición a VCE fue similar a los del caso de superficie S2 debido al aumento de la velocidad de avance. Cabe destacar que el conductor realmente ajustaba la velocidad y la conducción según a las condiciones de la carretera, y estos aspectos se tuvieron en cuenta a través de la consideración de la rugosidad de la superficie y la velocidad de avance en el estudio llevado a cabo. En el caso de la superficie S4, el nivel de exposición a VCE es bajo a pesar de ser la superficie con la mayor velocidad asociada.

Además, los resultados mostraron que el nivel de exposición a VCE en superficies irregulares es un factor importante que debe tenerse en cuenta en la evaluación de la exposición. En este sentido, los niveles de vibración transmitidos a los conductores pueden afectar tanto a su salud como a su rendimiento cognitivo. Por ejemplo, las operaciones a través de la superficie fuera de la carretera exigen concentración continua y requieren la toma de decisiones para elegir la velocidad correcta, la aceleración, la trayectoria, etc. Los resultados muestran la necesidad de incluir este tipo de variables en la evaluación de riesgos para esta categoría de trabajadores.

Por último, respecto a los modelos aplicados cabe destacar que si bien el modelo definido en la norma ISO2631-1:2008 es ampliamente utilizado, la evaluación se limita al análisis de la exposición diaria, para un ciclo de trabajo de 8 horas. Esta norma no tiene en cuenta los posibles efectos acumulativos de la exposición continua a VCE a lo largo de la vida laboral del conductor. No obstante, aunque muchos investigadores han analizado modelos de evaluación de VCE durante los últimos años, la publicación de la norma ISO 2631-5:2018 ha supuesto un importante avance en la forma en que las variables antropométricas del conductor y el diferente régimen de exposición se incluyen en la evaluación de la exposición a VCE.

En consecuencia, a partir de los resultados obtenidos en nuestra investigación que se ha centrado en abordar el problema de exposición a VCE, es posible concluir que es necesario la definición de un nuevo método de gestión de la Evaluación de riesgos que minimicen el impacto sobre la salud de la exposición a VCE a largo plazo. Con ello queda verificada la (H2).

6. DISEÑO DE UN MARCO DE TRABAJO PARA LA GESTIÓN DE LA EXPOSICIÓN A VCE

Este Capítulo presenta la 2ª Subfase de la 4ª Fase y ha sido estructurado en dos partes. En la primera, se presenta una nueva Metodología de Gestión de la Exposición a largo plazo a VCE que considera las diferentes condiciones de superficie de desplazamiento y velocidad, factores importantes identificados en el Capítulo 5 a considerar en el proceso de evaluación. Posteriormente, a modo de ejemplo, se muestra la aplicación de esta metodología a un caso de estudio.

En la segunda parte, dado que la exposición a VCE está asociada a la conducción de vehículos en rutas fuera de las instalaciones, la metodología se implementa en un sistema GIS con el objetivo de proporcionar una herramienta para la gestión y reducción de la exposición a VCE durante el diseño de dichas rutas. Siguiendo las pautas establecidas en la primera parte, se presenta un ejemplo ilustrativo de la metodología desarrollada.

Los resultados obtenidos tras estos estudios han validado la Hipótesis H3.

6.1. Propuesta de una nueva metodología de gestión de la exposición a VCE

Los resultados obtenidos en los capítulos previos han puesto de manifiesto la prevalencia de la exposición a VCE entre los conductores de maquinaria pesada, así como que los métodos actuales pueden proporcionar diferentes criterios sobre la evaluación del riesgo asociado a estas operaciones. Factores como el tipo de superficie, velocidad de desplazamiento, características del conductor y tipo de vehículo condicionan la magnitud de las vibraciones transmitidas al conductor. Considerando que los efectos sobre la salud del trabajador pueden aparecer años después de que se produzca la exposición, en el presente capítulo se propone una nueva metodología para la gestión de la exposición a VCE a largo plazo considerando las variables enumeradas.

6.1.1. Metodología propuesta para la gestión de VCE

La metodología propuesta está basada en el método de evaluación menos severo definido en la norma ISO 2631-5:2018 y evalúa el impacto de la exposición a largo plazo a VCE sobre la salud del trabajador. Este aspecto es una característica fundamental del modelo propuesto dado que los métodos establecidos en la Directiva 2002/44/EC para la evaluación de la exposición a vibraciones (basado en los parámetros $A(8)$ y VDV) solo permiten evaluar la exposición diaria asociada a una jornada laboral de 8 horas. La Figura 6-1 muestra los seis pasos necesarios que la confirman:

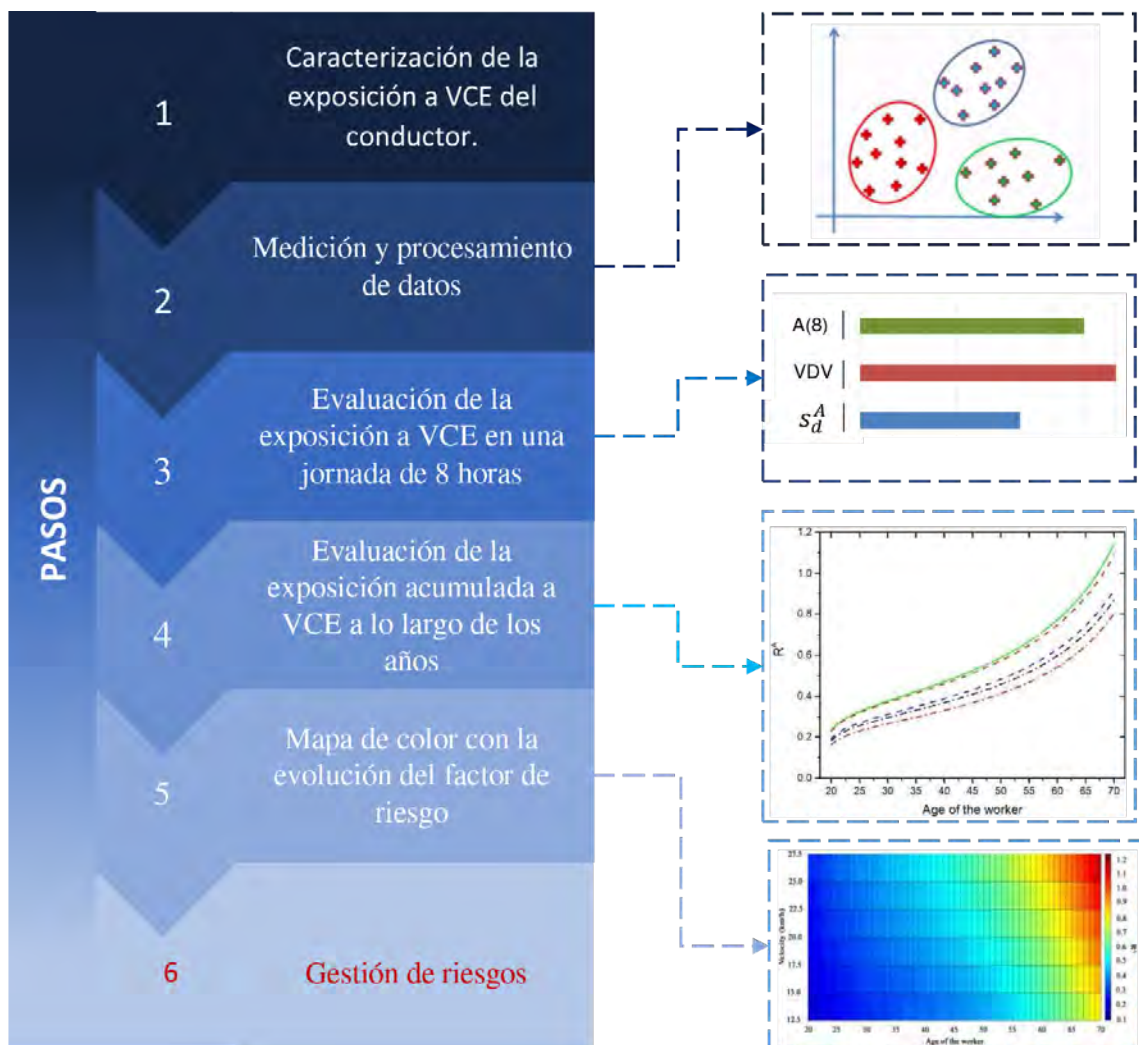


Figura 6-1. Diagrama de la metodología propuesta.

Este procedimiento es una generalización del proceso seguido en la investigación, desde la adquisición de datos hasta el modelado de la evolución del Factor R^A . La metodología ha sido diseñada y desarrollada mediante el software Matlab. Con este fin, se han elaborado funciones y librerías para la ejecución de los diferentes pasos.

El resultado obtenido al aplicar la metodología es la generación de un mapa de color con la evolución del Factor R^A para cada persona evaluada y actividad desarrollada. En este sentido, un aporte crucial de la metodología propuesta es que contribuye a garantizar que la exposición a VCE se gestione a lo largo de los años de la vida laboral del trabajador. De tal forma que la probabilidad de que ocurra un efecto adverso para la salud permanezca por debajo de los límites establecidos. En los siguientes apartados se describen los pasos seguidos en el desarrollo de la metodología propuesta.

Paso 1. Caracterización de la exposición a VCE del conductor

En el paso inicial de la metodología se debe realizar la identificación y recopilación de los datos relacionados con la exposición a VCE agrupándolos en tres categorías diferentes.

- Categoría I: las características de la actividad (vehículo utilizado, condiciones de la actividad/operación, naturaleza del terreno, velocidad y desempeño);
- Categoría II: las características de la exposición VCE (si la exposición contiene múltiples impactos, duración promedio de la actividad y número de veces que se realiza);
- Categoría III: características del conductor (edad, altura, peso y postura). Así como la exposición diaria media, exposición anual media, edad de primera exposición y años de exposición a VCE.

El análisis de estos datos es utilizado para definir un perfil de exposición (UNE-EN 14253:2004) que permita garantizar que los resultados obtenidos son representativos de la aceleración transmitida al conductor durante la exposición a VCE. Además, deben considerarse los requisitos establecidos en las normas ISO 2631-1:2008 e ISO 2631-5:2018 en el proceso de definición de la estrategia de adquisición de datos (definidos en el Capítulo 3).

Paso 2. Medición y procesamiento de datos

A partir de los datos obtenidos en el paso anterior se establece la estrategia de medición. Durante el procedimiento de adquisición de datos deben medirse simultáneamente los datos de geolocalización (mediante el uso de un GPS) y la aceleración en la interfaz entre el asiento y el conductor (utilizando un acelerómetro). El número y la duración de las mediciones deben ser suficientes para garantizar que los resultados medidos sean representativos de la exposición. La organización de las mediciones dependerá del perfil de exposición identificado en la Paso 1 (UNE-EN 14253:2004).

En base a los datos obtenidos en el proceso de medición, los parámetros definidos en la ISO 2631-5 (S_d^A) e ISO 2631-1 (A8 y VDV) son estimados. La dosis compresiva diaria equivalente (S_d^A) (del nivel vertebral más desfavorable) y la velocidad media del desplazamiento serán utilizados como variables de entrada en un proceso de agrupamiento de datos (también denominado clusterización). El objetivo de este proceso es obtener una agrupación, o clúster, de la dosis

compresiva diaria (S_d^A) en función de la velocidad media. En consecuencia, el análisis de los resultados obtenidos requiere de la utilización de métodos de agrupación no supervisada. Con este propósito, se ha implementado un proceso de “clusterización” como parte de la metodología propuesta de exposición a vibraciones. En el estudio llevado a cabo, se ha empleado el algoritmo k-means++ (una variante del algoritmo k-means original) (Arthur & Vassilvitskii, 2007). Este algoritmo de agrupación se ejecuta a partir de la minimización de la suma de la distancia entre los puntos y el centroide de su agrupación o clúster. El proceso ejecutado en el algoritmo sigue los siguientes pasos:

- (1) Selección de un centroide inicial utilizando una variable uniforme aleatoria. El primer centroide se denomina C_1 .
- (2) Cálculo de las distancias entre cada punto x y el centroide C_j , a la cual se denota como $D(X_m, C_1)/D(x)$.
- (3) Selección del siguiente centroide (a partir de una variable uniforme aleatoria) C_j con la probabilidad (Ecuación 6-1) (usando una probabilidad de distribución ponderada donde un punto x es elegido con la probabilidad proporcional a $D(x)^2$).

$$\frac{d^2(X_m, C_1)}{\sum_{j=1}^n d^2(X_j, C_1)} \quad (6-1)$$

- (4) Repetición de los pasos 2 y 3 hasta que los centroides k son elegidos.
- (5) En los siguientes pasos el algoritmo se ejecuta al igual que en el algoritmo original de k-means. Es decir, para cada $i \in (1, \dots, k)$, se establece de C_i clúster como el conjunto de puntos en X que son más cercanos a C_i que a C_j . Para todos los j diferentes a i .
- (6) Para cada $i \in (1, \dots, k)$, se establece c como el centro de masas de en el conjunto C_i . Siendo $c_i = 1/|C_i| \sum x \in C_i x$.
- (7) Finalmente, se repiten los pasos 5-6 hasta que no hay cambios en la asignación de agrupaciones o hasta que el máximo número de iteraciones es alcanzado.

La selección del número óptimo de agrupaciones se ha realizado en este trabajo a partir de los métodos de Elbow y GAP (Tibshirani et al., 2001). El método GAP se basa en la comparación de la dispersión intra-grupal con la esperada de una distribución uniforme de los puntos que participan como parte de la hipótesis nula. El número de los grupos que maximizan la diferencia es el número óptimo de agrupaciones.

Por otro lado, el método Elbow se basa en la minimización de la variación intra-grupal (la suma de los cuadrados dentro de la agrupación). Por lo tanto, se compara la suma de los cuadrados inter-agrupaciones con la esperada bajo la distribución nula de referencia. En este método, el valor del denominado índice Elbow decrece conforme el número de agrupaciones aumenta. En este caso, el punto del “codo” en el gráfico se convierte en el número óptimo de agrupaciones, conforme el valor de la pendiente en el gráfico se reduce.

Paso 3. Evaluación de la exposición a VCE en una jornada laboral de 8 horas

Los parámetros A_8 , VDV y S_d^A estimado en el Paso 2 son utilizados para evaluar la exposición diaria del conductor. En este paso, los valores son comparados con los límites proporcionados en la Directiva 2002/44/CE y la norma ISO 2631-5:2018 (Tabla 3-12).

Si la exposición excede el VLA, el VLE o la probabilidad de un efecto adverso para la salud es alta, la herramienta proporcionará una indicación de que los límites han sido sobrepasados.

Paso 4. Evaluación de la exposición acumulada a VCE a lo largo de los años

Para el conjunto de datos de cada agrupación (obtenido en la Paso 2), el valor promedio de S_d^A es calculado para cada nivel vertebral. A partir del nivel vertebral más desfavorable se estima la probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso para la salud (R^A). La evolución de este parámetro a lo largo de los años será calculada en función al perfil de exposición definido en la Paso 1. Cuando no se disponga de información adicional sobre el perfil histórico de exposición individual, los valores por defecto utilizados asumen una exposición diaria de 4 horas, y que el sujeto estuvo expuesto desde la edad de 20 hasta los 65 años con una exposición anual de 240 días/año.

Los valores obtenidos son comparados con los valores límite de la Tabla 3-12 para evaluar la exposición acumulada a lo largo de los años. Para modelar el efecto acumulativo de la exposición a VCE con el parámetro R^A , los datos obtenidos para cada agrupación o clúster son ajustados mediante una función polinomial. La parametrización de estos datos permite determinar la probabilidad de riesgo para la salud a la que está expuesto el trabajador en un año cualquiera, a partir del conjunto de datos medidos en condiciones específicas de velocidad y superficie.

Paso 5. Mapa de color con la evolución de los factores de riesgo

En base a los datos obtenidos en el paso previo, se realiza un ajuste de tipo superficie bidimensional utilizando un modelo de superficie polinomial, donde el eje x es la edad del trabajador y el eje y representa la velocidad media a la que se realiza la actividad. Como resultado de este proceso se obtiene un mapa donde el color representa el riesgo asociado al efecto acumulativo de la exposición a VCE (es decir, el parámetro R^A).

Paso 6. Gestión de riesgos

El mapa de color obtenido en la Paso 5 puede ser utilizado para gestionar la exposición a VCE. En función de las características y la velocidad a la que se realiza la actividad, el responsable de seguridad puede evaluar si el trabajador alcanzará una alta probabilidad de sufrir un efecto adverso para la salud a lo largo de su vida laboral. Además, el mapa de color puede ser utilizado por los conductores como herramienta de información y formación. Es decir, puede emplearse para crear conciencia sobre la importancia de las características de rendimiento de la actividad y el impacto de la exposición a VCE a largo plazo, así como fomentar la cultura preventiva en la empresa.

Esta metodología se puede aplicar a cualquier actividad realizada en condiciones de exposición a VCE menos severas, como las enumeradas en el artículo 4(b) de la norma ISO 2631-5:2018. Los Equipos de Maquinaria Pesada (EMP) son comúnmente utilizados para este tipo de actividades, como pueden ser la conducción de tractores, camiones, máquinas forestales y maquinaria móvil de movimiento de tierras sobre superficies irregulares (todoterreno, baches, cruce frecuente de vías férreas, etc.). Dado que aspectos como las características específicas de la conducción (es decir, la condición de la superficie y la velocidad de avance), el tipo de operación y el tipo de maquinaria afectan significativamente el valor S_d^A , la metodología propuesta debería aplicarse caso por caso. Además, como el tipo de actividad puede influir en el rendimiento de la operación y cada país ha establecido límites específicos para la exposición a VCE, todos estos aspectos también deben tenerse en cuenta al aplicar esta metodología y la gestión de riesgos resultantes.

6.1.2. Aplicación de la metodología propuesta a un caso de estudio de un conductor de EMP

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el proceso definido en la sección anterior para un caso de estudio concreto. La sección ha sido estructurada siguiendo el mismo orden secuencial de pasos propuesto en la metodología.

Paso 1. Caracterización de la exposición a VCE del conductor

En primer lugar, se diseñó la estrategia de medición para evaluar la exposición a VCE en el caso de estudio de un conductor de EMP (tractor). La medición incluyó una monitorización de la exposición a VCE en una ruta de prueba estandarizada que comprende una variedad de condiciones de superficie representativas para el desplazamiento de EMP del caso seleccionado. Estudios previos que analizan la transmisión de vibraciones a través del asiento en este tipo de vehículos han considerado diferentes tipos de superficies, como asfalto o carril no asfaltado (Adam & Jalil, 2017; Giordano et al., 2015). En este caso, la ruta y la longitud de cada tramo se establecieron para incluir la posibilidad de obtener conjuntos de datos de aceleración correspondientes a diferentes velocidades representativas de las condiciones típicas en cada tipo de superficie sobre la que suelen realizar desplazamientos los conductores. En consecuencia, la ruta incluía 1 km de desplazamiento en campo a través, 4 km en superficie no asfaltada, y 5 km de carretera asfaltada. La ruta fue seleccionada específicamente por dos razones principales: (1) poca perturbación del tráfico (para lograr un entorno estable durante la prueba y minimizar la interferencia debida a interrupciones externas) y (2) diversidad y representatividad de la muestra de superficies de carreteras.

También se utilizó la misma ruta para evaluar las vibraciones transmitidas por el vehículo al conductor en un amplio rango de velocidades. Con este propósito, la velocidad fue monitoreada por un GPS colocado en el vehículo. El valor de velocidad más bajo considerado en el estudio fue de 5 km/h para reproducir condiciones de viaje realistas con la velocidad más baja habitual. Por otro lado, el valor de velocidad más alto (25 km/h) fue seleccionado porque es el límite de velocidad máxima de desplazamiento (de acuerdo con el código de circulación). El vehículo utilizado a lo largo de todo el estudio fue un tractor clasificado como Clase II Categoría A según el

Reglamento n° 167/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo. Dado que existen grandes variaciones en la magnitud de la vibración dependiendo del tipo de vehículo (Paddan & Griffin, 2002), todas las mediciones se realizaron con el mismo tractor para eliminar esta variación, ya que el objetivo de este caso de estudio fue evaluar y validar la metodología propuesta.

La duración de las mediciones fue seleccionada con el fin de obtener datos que fueran representativos de la exposición a VCE en diferentes condiciones (según la superficie y velocidad de desplazamiento). Los desplazamientos por caminos no asfaltados y carreteras son tareas muy habituales; por lo tanto, se realizaron varias mediciones manteniendo una velocidad media de avance (con una dispersión de velocidad máxima de 5 km/h) en cada superficie para garantizar que el resultado es representativo de la exposición del conductor. No obstante, los desplazamientos realizados en zonas campo a través no pueden considerarse tareas repetitivas, ya que depende de diferentes factores (compactación, humedad, etc.). Por lo tanto, se estudió y caracterizó el terreno en una primera aproximación y se realizaron diferentes mediciones teniendo en cuenta estos factores.

Con respecto al conductor, se eligió a un hombre adulto sano para participar en este estudio. El participante tenía más de 20 años de experiencia de conducción (EMPs incluidos camiones y tractores agrícolas) sin dolor actual ni antecedentes de TME; tenía 48 años y su altura y peso eran de 1,85 m y 120 Kg, respectivamente, con un índice de masa corporal de 35.06 kg/m². Este alto índice de masa corporal (IMC > 35 Kg/m²) indica que esta persona sufre de obesidad, y debido a que el peso corporal está relacionado con la carga de la columna vertebral, este factor aumenta el riesgo de dolor lumbar y degeneración de los discos intervertebrales (Liuke et al., 2005). En consecuencia, debido a que el conductor pertenece a un grupo de alto riesgo para el desarrollo de TME, es de particular interés una comparación de los métodos de evaluación para valorar el riesgo asociado a la exposición. Además, debe tenerse en cuenta que un IMC alto dentro del rango de percentil de masa corporal más alto (IMC > 26,1 Kg/m² y percentil 95, es decir, una masa corporal superior a 109 kg) son los valores definidos en ISO 2631-5:2018 Anexo A.3 que maximizan la carga de la columna vertebral; por lo tanto, es un caso de estudio interesante por sus características específicas. Por otro lado, en cuanto a los grupos de postura clasificados en el Anexo A de la norma ISO 2631-5:2018, la postura del conductor fue la correspondiente al número 3.

Paso 2. Medición y procesamiento de datos

El procedimiento adoptado para las pruebas de campo constó de tres pasos. Primero se instalaron los sensores: se colocó el acelerómetro en la superficie del asiento y se ajustó su posición para asegurar el correcto posicionamiento de los ejes. Además, el acelerómetro fue fijado con una cinta adhesiva para evitar el desplazamiento relativo entre la superficie del asiento y el sensor. El GPS se colocó en la superficie del salpicadero del vehículo.

En segundo lugar, la medición con ambos sensores comenzó simultáneamente y en ese momento se inició el proceso de adquisición de datos para iniciar el ensayo. Durante las mediciones, el sujeto permaneció sentado y no perdió contacto con la superficie del asiento (se instruyó al conductor para que no se levantara del asiento y así asegurar que la exposición no incluyera datos de aceleración medidos durante la pérdida de contacto). Además, se supervisó al conductor mientras realizaba la actividad en condiciones normales de trabajo. La prueba se realizó varias veces para

cada sección de ruta (al menos tres veces) para reducir los errores aleatorios. De los datos obtenidos en cada medición, se seleccionaron aquellas con una duración superior a 90 s y una desviación máxima de velocidad de $\pm 2,5$ km/h. En esta selección de datos, se han seguido las recomendaciones establecidas en la ISO 2631-1, donde se especifica que se requiere una duración mínima de medición de 108 s para un límite de frecuencia inferior de 1 Hz para asegurar un error inferior a 3 dB con un nivel de confianza del 90 %. El pre-procesamiento de datos tenía como objetivo eliminar las mediciones de vibración en períodos de velocidad inestable y garantizar la duración mínima de las señales seleccionadas para así proporcionar resultados representativos de la exposición en las condiciones probadas.

Finalmente, en base a los datos adquiridos en la campaña experimental, la dosis de compresión diaria S_d^A fue calculada. La aceleración medida en la superficie del asiento fue utilizada como entrada en el modelo para el asiento y el respaldo. Para comparar las diferentes exposiciones se ha asumido el mismo conjunto de condiciones para todas las superficies estudiadas, con el fin de normalizar la exposición medida en una exposición diaria. En nuestra prueba, se asumió una duración de exposición de tal manera que se maximizara la carga espinal, tal y como se indica en los valores definidos en el Anexo A.3 de ISO2631-5: la duración de exposición diaria se normalizó a 4 h para comparar los resultados obtenidos en las diferentes condiciones de exposición. Se consideró como historial de exposición que el conductor tenía una exposición de 240 días/ año desde los 20 a los 70 años. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6-2.

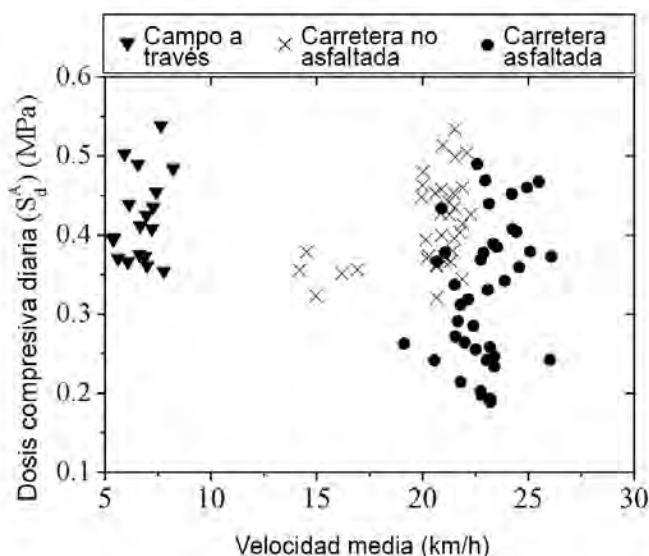


Figura 6-2. S_d^A frente la velocidad media.

A partir de los resultados obtenidos, tras calcular la dosis compresiva diaria S_d^A (para el nivel vertebral más desfavorable) y la velocidad media de desplazamiento, se realizó el proceso de agrupación o clusterización. Para ello, se utilizó el algoritmo *k-means++*. Como se describe en la sección anterior, previo a la aplicación del algoritmo es necesario establecer el número de clústers para iniciar este proceso. Para la selección del número óptimo de agrupaciones se utilizó los métodos Elbow y GAP. La Figura 6-3 muestra los resultados del análisis utilizando ambos métodos. En este estudio, el número óptimo de agrupaciones obtenidos es 4 de acuerdo con los criterios de selección dados en la sección 6.1.1 (Paso 2).

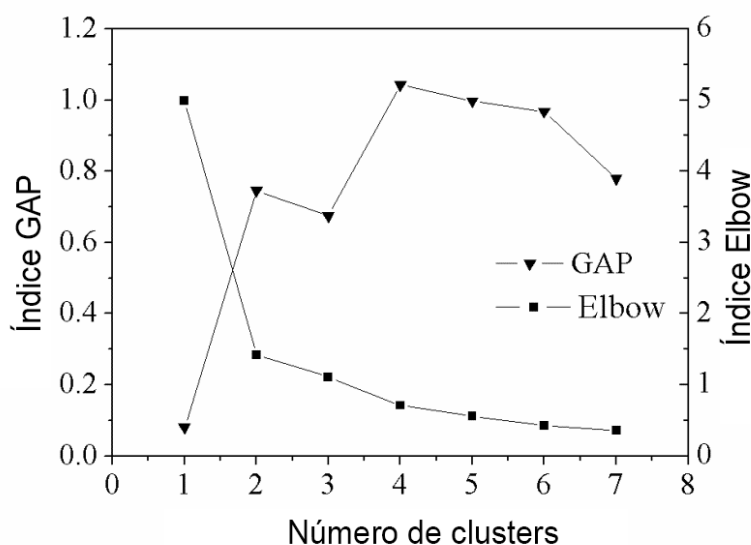


Figura 6-3. Método GAP y Elbow para la selección del número de agrupaciones.

Una vez establecido el número óptimo de agrupaciones, se aplicó posteriormente el proceso de clusterización. La Figura 6-4 muestra los resultados obtenidos. El conjunto de datos asignado al clúster 1 se registró en la superficie campo a través; el clúster 2 contiene datos registrados en vías sin asfaltar y el clúster 4 contiene datos registrados en carreteras asfaltadas. A diferencia de los otros grupos, el clúster 3 contiene datos registrados provenientes tanto de carreteras sin asfaltar como asfaltadas. También se calculó la velocidad media de viaje para cada clúster ($\bar{v}_{c1} = 6.7 \frac{km}{h}$; $\bar{v}_{c2} = 15.4 \frac{km}{h}$; $\bar{v}_{c3} = 21.1 \frac{km}{h}$; $\bar{v}_{c4} = 23.7 \frac{km}{h}$).

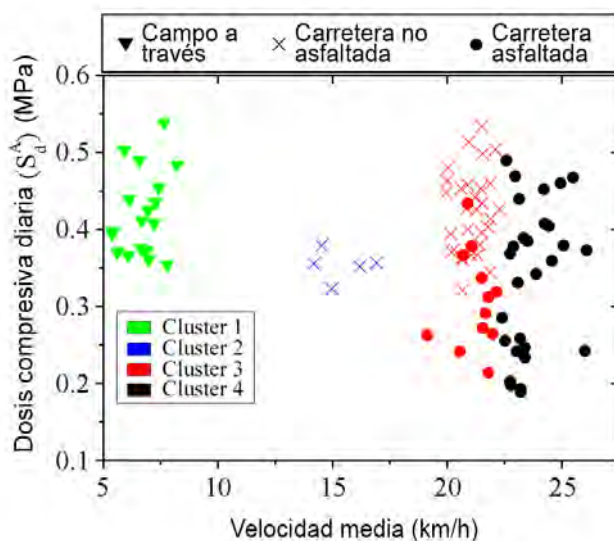


Figura 6-4. Agrupamiento tras aplicar el algoritmo k-means++ a S_d^A en base a la velocidad media de desplazamiento.

Paso 3. Evaluación de la exposición a VCE en una jornada laboral de 8 horas

A partir de los datos obtenidos en los pasos anteriores, se han aplicado los métodos de evaluación de la exposición a VCE definidos en la ISO 2631-1 (es decir, $A(8)$ y VDV). A partir de estos valores, la Figura 6-5 y 6-6 muestran los resultados obtenidos considerando las agrupaciones que se han definido como resultado del Paso 2. En primer lugar, la Figura 6-5 muestra la relación entre el $A(8)$ y el S_d^A . Los resultados muestran una relación aproximadamente lineal entre los dos parámetros, proporcionando una valoración del riesgo para la salud del conductor similar en las agrupaciones 2 y 4. No obstante, cabe destacar que dos de las mediciones obtenidas del $A(8)$ en la agrupación 1 están por encima del VLA definido en la normativa, mientras que solo uno de ellos excede el límite de baja probabilidad para el S_d^A . Además, respecto al agrupamiento 3, tres valores han excedido el límite bajo de probabilidad del S_d^A y solo dos proporcionan un valor $A(8)$ superior al VLA.

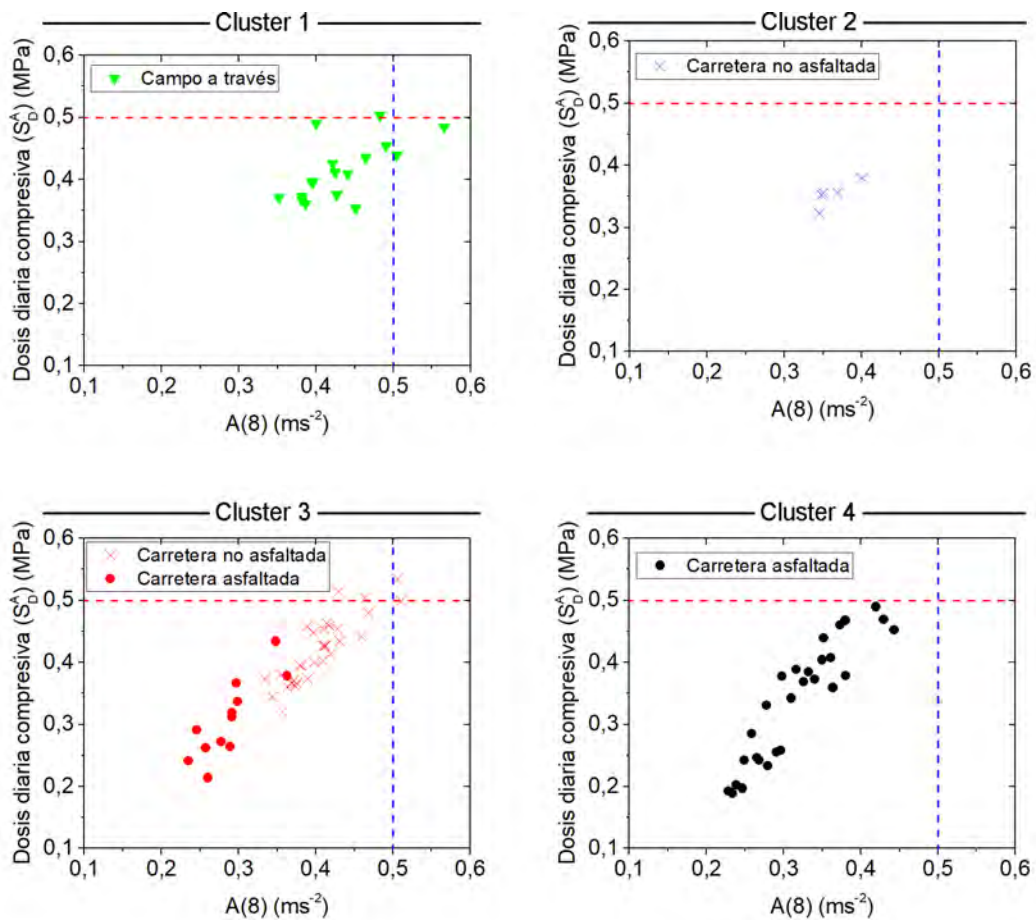


Figura 6-5. Relación entre $A(8)$ y S_d^A en las cuatro agrupaciones generadas. Línea azul discontinua indica VLA respecto al método $A(8)$. Línea roja discontinua indica el límite de probabilidad baja de sufrir efectos adversos para la salud respecto al método S_d^A .

En segundo lugar, la Figura 6-6 muestra la relación entre los parámetros VDV y S_d^A del nivel vertebral más desfavorable en cada una de las agrupaciones. La observación general es que ambos parámetros están correlacionados. Respecto al método VDV, esta metodología es más restrictiva

que el método de evaluación basada en S_d^A . Este aspecto puede apreciarse en el conjunto de datos pertenecientes a la agrupación 1, así como algunos datos de los grupos 3 y 4, donde se excede el límite VLA del VDV. Además, solo dos valores de la agrupación 1 y tres de la agrupación 3 exceden el límite definido en la norma ISO2631-5:2018 respecto al S_d^A .

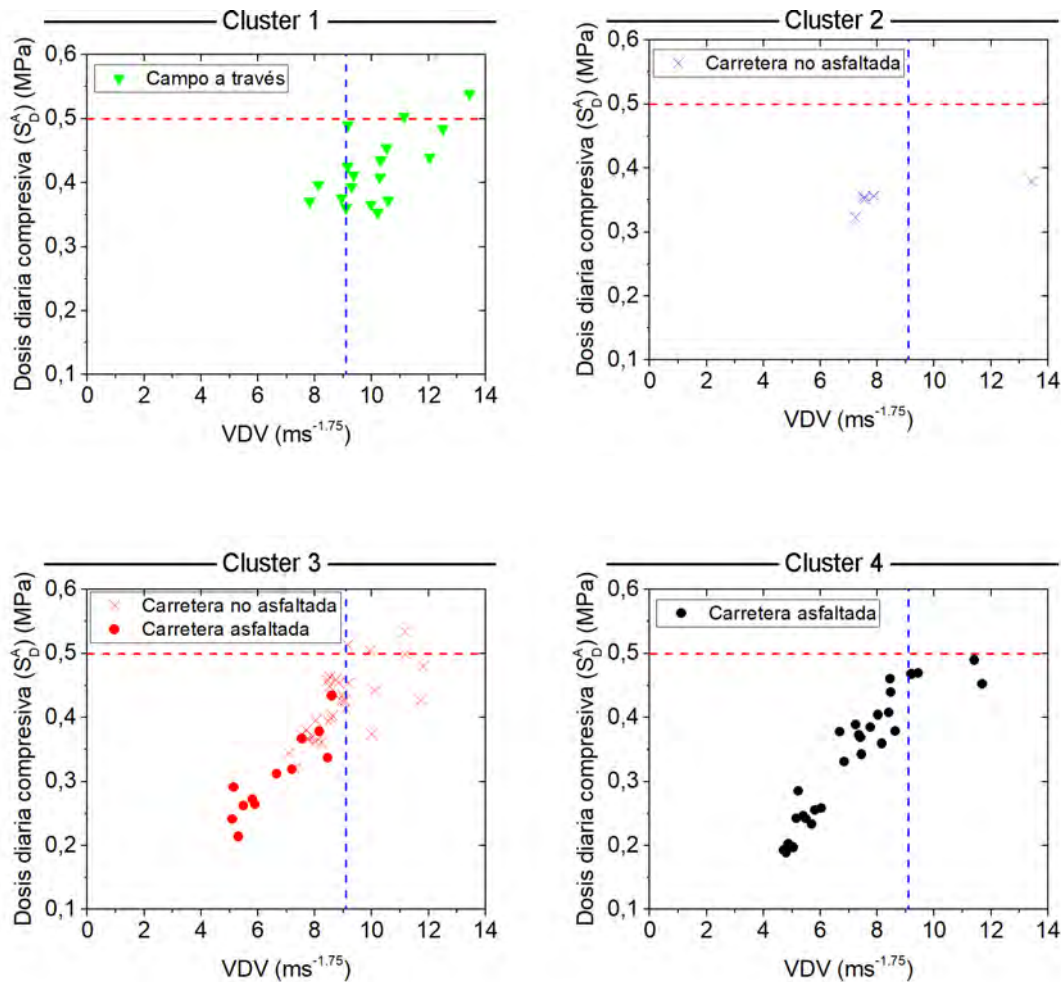


Figura 6-6. Relación entre relación entre el VDV y S_d^A de nivel vertebral más desfavorable en cada una de las agrupaciones. Línea azul discontinua indica VLA respecto al método VDV. Línea roja discontinua indica el límite de probabilidad baja de sufrir efectos adversos para la salud respecto al método S_d^A .

Por lo tanto, el riesgo para la salud obtenido como resultado de aplicar el VDV es más elevado que el obtenido tras aplicar los otros dos métodos ($A(8)$ y S_d^A). En este caso de estudio, en el cual la exposición a VCE del trabajador contiene múltiples choques, este resultado puede explicarse debido a que el método VDV es más sensible a los choques y por lo tanto resulta en una valoración más restrictiva.

Paso 4. Evaluación de la exposición acumulada a VCE a lo largo de los años

Finalizada el Paso 3, a partir de la agrupación de los datos obtenida en el paso 2, se ha calculado el promedio del parámetro S_d^A para los niveles vertebrales del T12/L1 al L5/S1, atendiendo a la superficie en la que se midieron. Los resultados se muestran en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Valores de S_d^A obtenidos para los niveles vertebrales de T12/L1 a L5/S1 para los grupos definidos según el tipo de superficie.

Superficie	Agrupación		T12/L1	L1/L2	L2/L3	L3/L4	L4/L5	L5/S1	máx.
Campo a través	1	S_d^A	0.385	0.393	0.406	0.421	0.414	0.382	0.421
		σ	0.048	0.049	0.052	0.055	0.054	0.045	
Carretera sin asfaltar	2	S_d^A	0.353	0.330	0.320	0.320	0.315	0.311	0.353
		σ	0.020	0.020	0.022	0.022	0.022	0.018	
	3	S_d^A	0.419	0.408	0.401	0.406	0.400	0.381	0.419
		σ	0.054	0.050	0.049	0.049	0.048	0.046	
Carretera asfaltada	3	S_d^A	0.301	0.291	0.291	0.296	0.292	0.283	0.301
		σ	0.063	0.059	0.061	0.064	0.063	0.060	
	4	S_d^A	0.335	0.318	0.310	0.313	0.305	0.296	0.335
		σ	0.099	0.091	0.085	0.085	0.082	0.081	

Si comparamos los valores máximos de S_d^A con los valores límites definidos en la norma, todos los valores indican una baja probabilidad de que ocurra un efecto adverso para la salud después de la exposición a VCE ($S_d^A < 0.5$ MPa). El valor máximo de S_d^A obtenido en cada escenario ha sido utilizado para calcular el Factor R^A como se definió en la Sección 6.1.1). La Figura 6-7 muestra la evolución del Factor R^A durante el tiempo considerado de exposición.

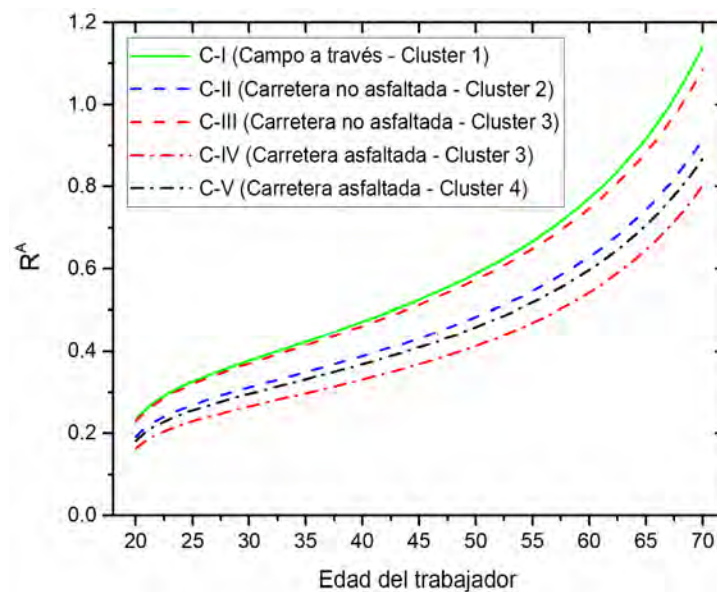


Figura 6-7. Evolución de R^A durante los años de exposición.

Al analizar la evolución del parámetro R^A sobre el tiempo de exposición, el patrón diario de exposición a VCE por año nos permite predecir cuándo el sujeto excederá los valores límite de R^A asociados con probabilidades bajas y altas de efectos adversos para la salud. En este caso, la curva C-I (campos a través – clúster 1) llega al límite cuando el conductor tiene 61 años, y la C-III (carretera no asfaltada – clúster 3) alcanza el límite cuando el conductor tiene 62 años. El límite no se excedió en ninguno de los otros casos, si tenemos en cuenta la edad de jubilación a los 65 años. No obstante, si consideramos que la edad de jubilación puede atrasarse, la CII (carretera no asfaltada - clúster 2) alcanza el límite a los 67 años.

Si se realiza un análisis y comparación entre las curvas, y en concreto las correspondientes al mismo tipo de superficie, nos permite también observar cómo aumenta la pendiente de la curva a medida que aumenta la velocidad. Esto implica una mayor probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso para la salud. Por lo tanto, la velocidad es un factor importante a considerar cuando se trata de reducir la gravedad de la exposición. Además, a medida que aumenta la irregularidad, también lo hace el riesgo. La naturaleza del terreno y las características de la actividad tienen un gran impacto en la magnitud de las vibraciones transmitidas, siendo ambos factores muy relevantes.

Aunque el terreno en campo a través es compresivo en la mayoría de los casos y, en consecuencia, el nivel de vibración transmitida sería menor, la gran irregularidad de la superficie y el desnivel del terreno dan como resultado una mayor severidad de la vibración transmitida en comparación con otras superficies, aunque la velocidad de avance es menor. Este hecho se constata comparando las curvas CI (campo a través), C-II/C-III (carretera sin asfaltar) y C-IV/CV (carretera asfaltada).

A partir de los datos obtenidos se realizó un ajuste polinomial en el software MATLAB (Tabla 6-2) para modelar el efecto acumulativo de VCE con el parámetro R^A . La Ecuación 6-1 muestra la expresión de la función de ajuste polinómico del modelo general aplicado a los datos indicados.

$$R^A(t) = p1 \cdot t^3 + p2 \cdot t^2 + p3 \cdot t + p4 \quad (6-1)$$

donde t es el tiempo de exposición. El ajuste polinomial utilizado es de grado tres; esto se debe a que emplear mayores grados no mejoran la bondad del ajuste, dando como resultado un problema de sobreajuste o mal condicionamiento.

Tabla 6-2. Coeficientes del modelo general obtenido del método de ajuste polinomial.

	Curva	$p1$	$p2$	$p3$	$p4$	Bondad de ajuste (R^2)
C-I	Campo a través Agrupación 1	1.034e-05	-0.001123	0.04978	-0.3877	0.99
C-II	Carretera no asfaltada Agrupación 2	8.094e-06	-0.00884	0.03966	-0.3043	0.99
C-III	Carretera no asfaltada Agrupación 3	9.607e-06	-0.001049	0.04708	-0.3612	0.99
C-IV	Carretera asfaltada Agrupación 3	6.901e-06	-0.0007538	0.03382	-0.2565	0.99
C-V	Carretera asfaltada Agrupación 4	7.681e-06	-0.000839	0.03764	-0.2888	0.99

Paso 5. Mapa de color con la evolución de los factores de riesgo

Las funciones polinómicas anteriores se pueden utilizar para predecir el factor de riesgo en términos del tiempo de exposición del trabajador dependiendo del tipo de vía. A partir de estos resultados, el método propuesto se basa en la generación de un mapa de color elaborado a partir de la parametrización de los resultados obtenidos en la Tabla 6-2.

A partir de los datos experimentales obtenidos en cada tipo de superficie y tiempo de exposición, se realizó un ajuste bidimensional de tipo superficie mediante un modelo de superficie polinomial, donde el eje x es el número de años de exposición y el eje y representa la velocidad promedio a la que se realiza la actividad. Los modelos polinómicos bidimensionales para superficies vienen dados por la Ecuación 6-2.

$$R^A = f(x, y) = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{30} \cdot x^3 + p_{21} \cdot x^2 \cdot y \quad (6-2)$$

La Tabla 6-3 muestra los coeficientes obtenidos tras aplicar el ajuste de superficie polinomial y la bondad estadística del mismo. El grado del ajuste polinomial obtenido es de tres en el eje x y uno en el eje y. La Figuras 6-8 y 6-9 muestran los resultados.

Tabla 6-3. Coeficientes (con nivel de confianza del 95%).

	p_{00}	p_{10}	p_{01}	p_{20}	p_{11}	p_{30}	p_{21}	Bondad del ajuste (R^2)
Carretera sin asfaltar	-0.4566	0.04434	0.006797	-0.001055	-5.324e-05	8.85e-06	4.834e-06	0.99
Carretera asfaltada	-0.4578	0.03717	0.008178	-0.000927	-6.406e-05	7.291e-06	5.816e-06	0.99

Cabe señalar que este proceso se realizó para desplazamientos realizados en vía no asfaltada y asfaltada. Dado que las operaciones realizadas campo a través se producen en un rango de velocidad muy reducido porque exigen una concentración continua y requieren una toma de decisiones consciente para elegir la aceleración, la trayectoria, etc., esta superficie no se ha incluido en el análisis.

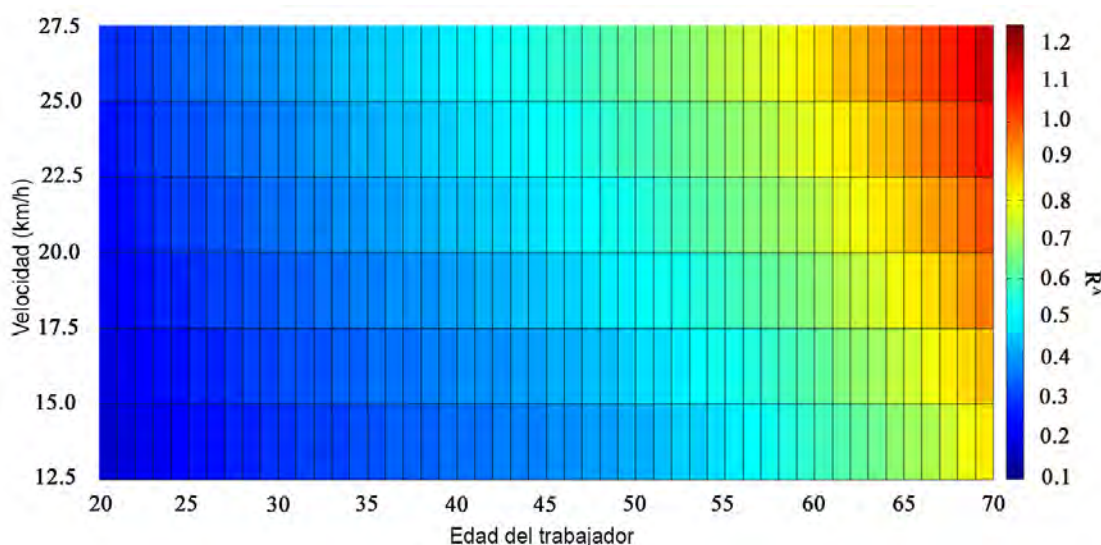


Figura 6-8. Mapa de color obtenido para carretera sin asfaltar.

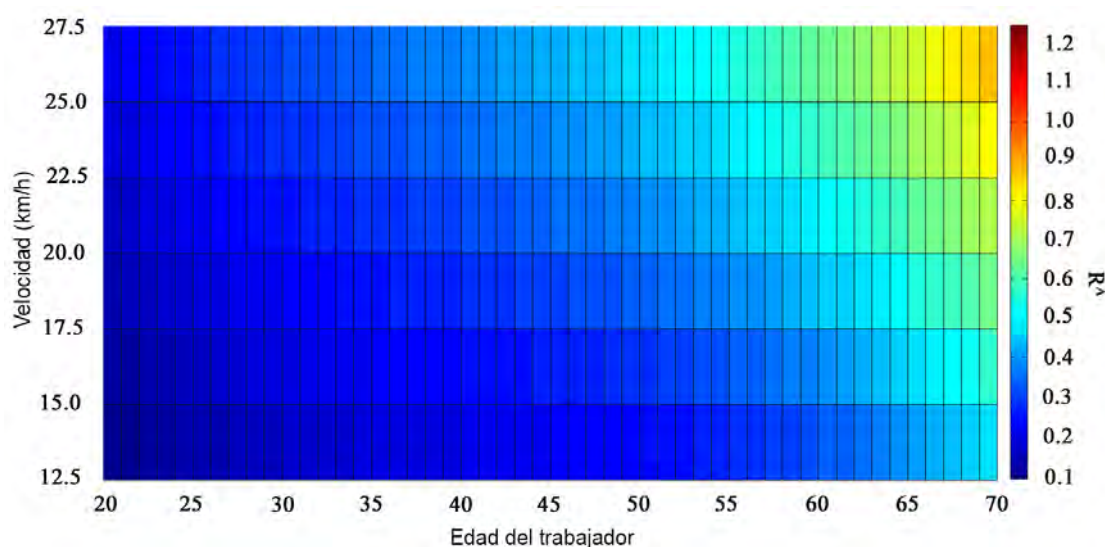


Figura 6-9. Mapa de color obtenido para carretera sin asfaltar.

Ambas Figuras 6-8 y 6-9 son el resultado de aplicar la metodología propuesta a este caso de estudio. En consecuencia, los resultados obtenidos en el caso ilustrativo no deben generalizarse simplemente a otras actividades diferentes.

Paso 6. Gestión de riesgos

La metodología propuesta se basa en el uso de la Figura 6-8 y 6-9 para estimar la probabilidad de riesgo para la salud (basada en el factor de riesgo R^A) a los que está expuesto el trabajador en función de los años de exposición y un rango diferente de velocidades, sin necesidad de calcular la dosis, lo que en ocasiones es una tarea difícil.

El responsable de gestionar la seguridad puede utilizar los mapas de color obtenidos para evaluar de forma rápida las actividades que realiza el trabajador según la velocidad media, teniendo en cuenta el efecto de la exposición acumulada a lo largo de su vida laboral. Así, la caracterización de las actividades del trabajador, junto con el uso de curvas y superficies basadas en el factor R^A , permite realizar un análisis rápido que garantiza la seguridad del trabajador.

Por último, el objetivo del procedimiento propuesto se alinea con el definido en la Directiva Marco 89/391/CEE, que establece que el empresario debe implementar medidas para garantizar una mejora en el nivel de protección de la salud de los trabajadores, así como el establecimiento de una organización y medios necesarios para ello. La aplicación de la metodología propuesta proporciona información vital para asegurar que la gestión del riesgo asociado a la exposición a VCE se realiza correctamente. Utilizando esta base metodológica, se facilita la tarea de realizar una adecuada organización del trabajo y el diseño de las operaciones de forma óptima desde el punto de vista de la seguridad y salud del trabajador a largo plazo. Además, los encargados de gestionar la seguridad cuentan con una herramienta simple que les permite definir medidas organizacionales preventivas que resultan en una reducción de la exposición al riesgo de VCE. De este modo, se garantiza que los trabajadores puedan realizar sus operaciones de forma segura en base a los resultados de este método, destacando que toda la vida laboral del conductor ha sido considerada en el desarrollo de este procedimiento.

6.1.3. Discusión e implicaciones prácticas

Los TME tienen una alta prevalencia entre los trabajadores, así como un elevado impacto económico y social. La exposición a VCE está relacionada con la aparición de TME y la degeneración de la columna vertebral. Por ello, a la vista de estos hechos, las normas internacionales se han centrado en su evaluación. En este sentido, las normas ISO 2631-1 e ISO 2631-5 definen modelos para evaluar la exposición a VCE. A partir de los resultados obtenidos y de la propuesta de modelización del factor de riesgo (R^A), se desarrolló una metodología para realizar una evaluación rápida de los riesgos debidos al efecto acumulativo de la exposición a VCE asociada a la conducción de EMP en función de la velocidad del mismo y el tipo de superficie.

La metodología propuesta en este capítulo proporciona información clave para apoyar la toma de decisiones durante el diseño de las actividades realizadas con este tipo de vehículos. Esta metodología asegura que la probabilidad de un efecto adverso para la salud se mantiene baja a lo largo de toda la vida laboral del conductor. Además, el uso de esta metodología reduce el tiempo computacional que requeriría recalcular los parámetros S_d^A y R^A para la ejecución de la actividad con otros valores de velocidad, ya que fueron calculados a partir de las curvas parametrizadas.

Además, puede contribuir a mejorar la calidad de vida de los conductores profesionales durante sus años de vida laboral y posterior jubilación, ya que este método puede aplicarse desde el inicio del primer trabajo en el que el conductor está expuesto a VCE. En el contexto actual, donde se ha producido un aumento de la esperanza de vida y se ha atrasado la edad de jubilación, el padecimiento de enfermedades relacionadas con la exposición a VCE es más probable bajo estas circunstancias. Por lo tanto, es muy importante considerar toda la vida laboral del trabajador. Por último, la metodología diseñada contribuye al desarrollo del Marco Estratégico de la Unión Europea sobre Salud y Seguridad en el Trabajo 2014-2020 en dos de sus tres grandes retos en materia de salud y seguridad en el trabajo (es decir, permite mejorar la prevención de las enfermedades relacionadas con el trabajo, a la vez que tiene en cuenta el envejecimiento de la población activa de la Unión Europea).

Por último, es importante destacar que la metodología propuesta está diseñada y configurada para ser una herramienta práctica que sirva de apoyo a los profesionales de la Seguridad y Salud en su objetivo de evaluar la exposición acumulada a la VCE.

6.2. Marco metodológico basado en GIS para la gestión de la exposición a VCE

Con el objetivo de proporcionar una herramienta para reducir y gestionar la exposición a VCE en el proceso de diseño de rutas, la nueva metodología presentada en la sección anterior ha sido implementada en GIS. El marco de trabajo propuesto pretende ofrecer un enfoque novedoso que proporcione una fácil visualización de las rutas, así como información fiable para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de la Seguridad y Salud. Además, la herramienta permite generar una base de datos para la supervisión y gestión de la exposición a VCE de los conductores.

6.2.1. Diseño del marco de trabajo propuesto

En esta sección se presenta el marco de trabajo basado en GIS para la implementación de la metodología propuesta en la sección 6.1, lo que permite identificar la ruta óptima minimizando la exposición a VCE y el tiempo de viaje. Además, el modelo propuesto tendrá como resultado la visualización de la ruta que optimiza ambos objetivos y el cálculo de la exposición asociada a la ruta obtenida. La Figura 6-10 muestra una visión general de la metodología, donde se puede observar la conexión entre los datos de entrada y las diferentes etapas del marco de trabajo implementados en el software ArcGIS.

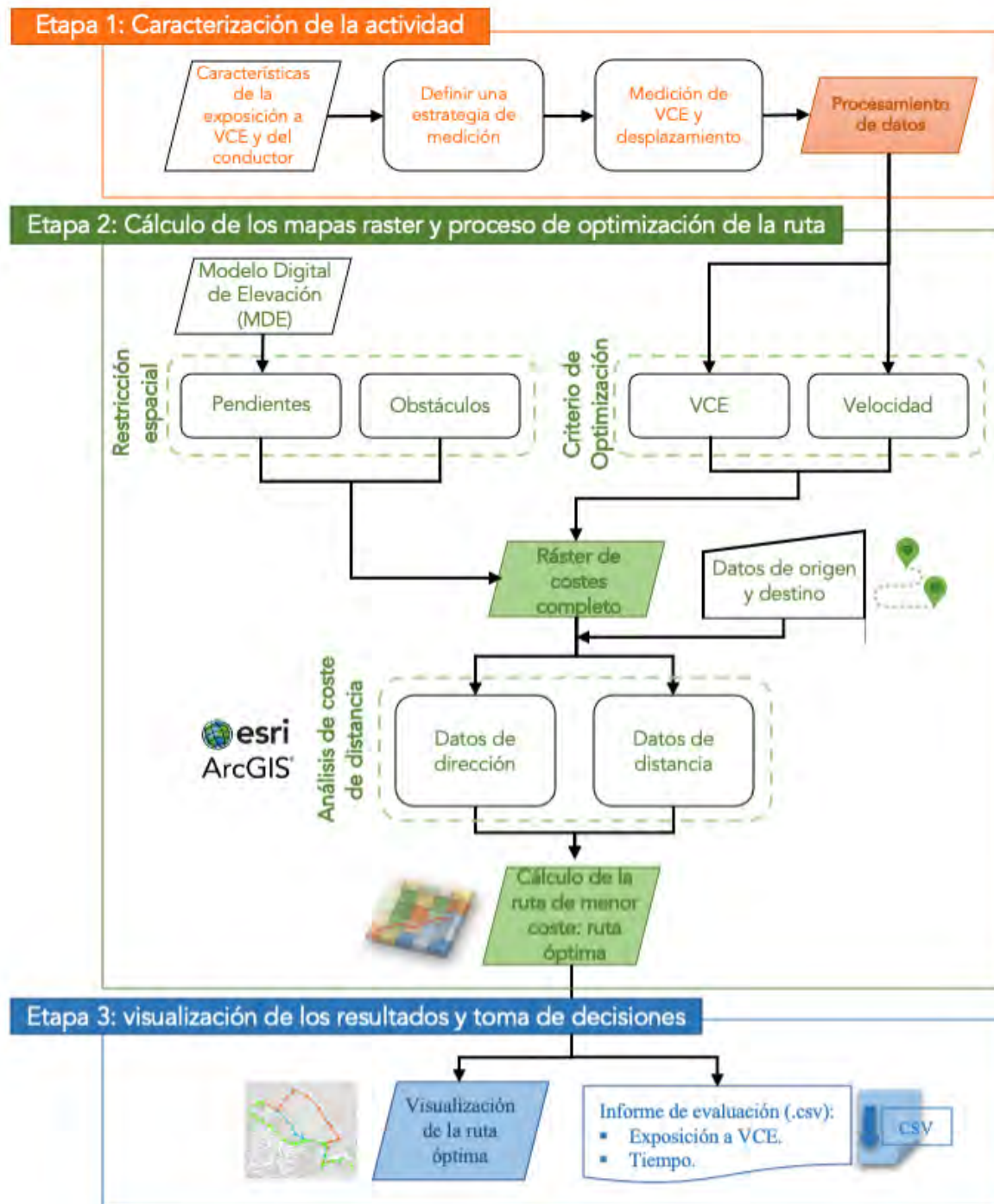


Figura 6-10. Marco de trabajo propuesto de la metodología desarrollada.

Como se muestra en la Figura 6-10, la implementación de la metodología se divide en tres etapas:

Etapas 1. Caracterización de la actividad. Durante esta primera fase se realiza el trabajo de campo, donde se analiza las características de la actividad y se miden la aceleración transmitida a través del asiento y la velocidad de desplazamiento. En esta etapa se utilizaría la metodología propuesta en la Sección 6.1. Estos datos permiten caracterizar la actividad en los diferentes tipos de superficies.

Etapas 2. Cálculo de los mapas ráster y proceso de optimización de la ruta. En esta segunda etapa se calcula la ruta óptima que conecta el punto de origen y el punto de destino a partir de los datos obtenidos en la Etapa 1 utilizando el algoritmo de la ruta de menor coste (en inglés Least-Cost Path, en adelante LCP). Este proceso se realiza utilizando la herramienta cost-distance in GIS. Con este propósito, se ha utilizado el software Arcmap de ArcGIS (ESRI) para implementar las herramientas *Spatial Analysis* que permiten medir el coste de distancia.

Etapas 3. Visualización y toma de decisiones. Finalmente, en esta etapa se muestra la ruta obtenida en la etapa anterior y los parámetros asociados a la misma.

La información proporcionada por el marco de trabajo puede ser utilizada por el responsable de la Seguridad y Salud para apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la logística y la gestión de la cadena de suministro, así como para el control de la exposición a VCE de los trabajadores. En las siguientes secciones se detalla la metodología y procesos desarrollados en cada una de las etapas.

6.2.1.1. Etapas 1: Caracterización de la actividad

Tal y como se concluyó en el Capítulo 5, la exposición a VCE depende de diferentes factores, por lo tanto, los desplazamientos y actividades que realiza el conductor con el vehículo deben ser analizados para determinar sus características. En consecuencia, los siguientes datos deben ser identificados en la fase inicial: características de la actividad (velocidad, tipo de superficie y características del desplazamiento), características del conductor (peso, altura, edad y postura) y características de las vibraciones a las que está expuesto el trabajador (duración de la exposición y si contiene múltiples choques). El análisis de estos datos se utiliza para definir una estrategia de medición que garantice que los datos obtenidos son representativos de las diferentes condiciones de exposición, tal como se establece en las normas ISO 2631-1:2008 e ISO 2631-5:2018.

Los datos obtenidos de la medición se utilizarán posteriormente como entrada del marco de trabajo definido. A partir de estos datos, se estima la exposición a VCE asociada a cada tipo de actividad realizada por el trabajador, considerando la velocidad de desplazamiento del vehículo y la naturaleza de la superficie. Los parámetros $A(8)$, VDV y S^A deben ser calculados tal y como se describió en el Capítulo 3.

Además, la velocidad media de desplazamiento ($\bar{v}_s$) debe calcularse para cada tipo de superficie. A partir de la velocidad media es posible determinar el tiempo empleado en desplazarse 1 km en cada tipo de superficie ($t_{1km,s}$). Este parámetro se debe utilizar para estimar los valores de exposición $A(8)$, VDV y S^A asociados al desplazamiento de 1 km en cada tipo s-ésimo de superficie ($A(8)_{1km,s}$, $VDV_{1km,s}$ y $S^A_{1km,j}$).

Dado que la dosis de exposición es una combinación de la magnitud de exposición y la duración, los datos obtenidos en la fase de caracterización se utilizarán como entrada para la estimación del

valor de la dosis de exposición diaria. Los valores de exposición normalizados a la duración de la exposición $t_{1km,s}$ se utilizan para estimar los valores parciales de exposición a VCE asociados a cada tipo de exposición recibida por el trabajador en un día. Posteriormente, estos valores parciales de exposición a VCE se combinan para obtener el valor global de exposición diaria establecido en las normas (Capítulo 3).

Esta etapa de caracterización permite generar una base de datos con las diferentes condiciones de las actividades, características de los conductores y los valores de exposición a VCE asociados. En consecuencia, estos valores permiten cuantificar la dosis de VCE a la que estará expuesto cada trabajador a lo largo de su vida laboral. La exposición medida en situaciones representativas y la dosis normalizada a $t_{1km,s}$ se extrapola a una duración de exposición en el pasado o/y a una duración de exposición prevista en el futuro. Las Ecuaciones 6-3 a 6-6 muestran el procedimiento de cálculo de los parámetros.

$$t_{1km,s} = \frac{1}{\bar{v}_s} \quad (6-3)$$

$$A(8)_{i\ 1km,s} = \sqrt{\left(k_i\ rms_{ws} \sqrt{\frac{t_{1km,s}}{T_0}}\right)^2} \quad (6-4)$$

$$VDV_{i\ 1km,s} = \sqrt[4]{\left(k_i\ vdv_{iws} \sqrt[4]{\frac{t_{1km,s}}{t_{m,s}}}\right)^4} \quad (6-5)$$

$$S_{1km,s}^A = \sqrt[6]{S_s^{A6} \frac{t_{1km,s}}{t_{m,s}}} \quad (6-6)$$

donde:

$t_{1km,s}$ es el tiempo requerido en realizar el desplazamiento de 1 km en el s-ésimo tipo de superficie,

$\bar{v}_s$ es la velocidad media [km/s] de desplazamiento sobre el s-ésimo tipo de superficie,

$A(8)_{i\ 1km,s}$ es el valor de exposición A(8) en el eje i debido a la exposición asociada al desplazamiento de 1 km en el s-ésimo tipo de superficie,

i denota los ejes x, y y z

k_i denota el factor de multiplicación definido para cada eje i ($k_{x,y} = 1.4$ y $k_z = 1$),

rms_{iws} es la raíz cuadrada de la aceleración media ponderada [m/s^2] en el eje i debida a la exposición a VCE en la superficie s-ésima,

T_0 es la duración de referencia de ocho horas [s],

$VDV_{i\ 1km,s}$ es el valor de la dosis de vibración en el eje i debido a la exposición asociada al desplazamiento de 1 km en el s-ésimo tipo de superficie,

vdv_{iws} es el valor de la dosis de vibración calculado como la cuarta potencia de la aceleración del histórico del tiempo en el eje i debida a la exposición a VCE en la superficie s-ésima,

$t_{m,s}$ es el tiempo de medición [s] en la superficie s-ésima,

$S_{1km,s}^A$ la tensión de compresión dinámica de la columna vertebral debida a la exposición a las vibraciones [MPa] asociada al desplazamiento de 1 km en la superficie s-ésima,

S_s^A es la tensión de compresión dinámica de la columna vertebral debida a la exposición a las vibraciones [MPa] en la superficie s-ésima.

6.2.1.2. Etapa 2: Cálculo de los mapas ráster y proceso de optimización de la ruta

En primer lugar, se debe que calcular el *ráster de costes*. Este proceso se basa en dos tipos de datos: (1) datos geoespaciales (gráficos vectoriales como polígonos, líneas, puntos, etc.) de la zona analizada; y (2) los datos obtenidos en la Etapa 1 que se utilizarán en el proceso de definición de los criterios de optimización.

En cuanto a los datos geoespaciales, se requiere disponer de los datos de la red de carreteras de la zona analizada, así como un ráster del Modelo Digital de Elevación (MDE), la ubicación de los obstáculos y las zonas de acceso restringido para vehículos. Actualmente, existen repositorios de Datos Abiertos que proporcionan información geoespacial de todo el mundo (Coetzee et al., 2020).

En el marco de trabajo propuesto, se han seleccionado dos criterios de optimización para el proceso de diseño de la ruta (ver Tabla 6-4). El primero es minimizar el tiempo de viaje, para lo cual se debe crear el atributo t_{1km} . En este atributo se asignará a cada tipo de superficie el tiempo que tarda el vehículo en recorrer 1 km. Este parámetro se ha seleccionado por el impacto que tiene tanto en la productividad de la empresa como en la del cliente. El segundo criterio consiste en minimizar la exposición del conductor a VCE. Para este segundo criterio, se ha seleccionado el método establecido en la norma ISO 2631-1 y se ha aplicado el parámetro A(8). Este parámetro se ha seleccionado porque la Directiva 2002/44/CE de la UE establece que A(8) es uno de los métodos en los que debe basarse la evaluación del nivel de exposición a las vibraciones. Para ello, debe crearse el atributo $A(8)_{1km}$. Este parámetro asigna a cada tipo de superficie el valor de la exposición diaria A(8) expresado como aceleración continua equivalente durante un período de ocho horas asociado al desplazamiento de 1 km.

Tabla 6-4. Criterios de elaboración del ráster de coste

Criterio	Parámetro	Unidad	Ecuación	Descripción
Tiempo	$t_{1km,s}$	[s]	6-3	Tiempo asociado al desplazamiento de 1km sobre la s-ésima superficie;
Exposición a VCE	$A(8)_{1km,s}$	[m/s ²]	6-4	Valor más alto de A(8) de las tres direcciones (x,y,z) asociado al desplazamiento de 1 km en la superficie s-ésima.

Una vez definidos los criterios de optimización, se debe realizar el pre-procesamiento de los datos geoespaciales para añadir un atributo para cada uno de los criterios de la Tabla 6-4. Por lo tanto, hay que crear los atributos $t_{1km,s}$ y $A(8)_{1km,s}$. Estos atributos se utilizan para convertir los datos espaciales vectoriales en datos ráster, de modo que se generen dos mapas ráster, uno para cada criterio del factor de optimización. Los dos archivos ráster resultantes deben combinarse para

obtener un mapa de costes. Para ello, ambos rásteres deben multiplicarse celda por celda como se indica en la Ecuación 6-7.

$$c = t_{1km,s} \cdot A(8)_{1km} \quad (6-7)$$

Además, deben aplicarse restricciones espaciales al mapa de costes resultante. Este proceso tiene como objetivo excluir del análisis las zonas que no son adecuadas para las rutas de los vehículos. En este sentido, deben aplicarse restricciones espaciales para evitar el trazado de rutas en zonas con obstáculos, acceso restringido de vehículos y masas de agua y edificios. Además, las zonas con pendientes pronunciadas (superiores al 15%) pueden afectar negativamente al rendimiento de los desplazamientos y no ser seguras para la circulación de vehículos. Las herramientas GIS de análisis espacial permiten analizar las propiedades tridimensionales del paisaje a partir de un ráster MDE. Por tanto, el uso de esta herramienta permite calcular la pendiente del terreno a partir de un MDE e identificar las zonas con un valor de pendiente superior al 15%. Para excluir del análisis las zonas que no son aptas para trazar una ruta se debe asignar un valor de coste elevado a dichas celdas (como por ejemplo 10.000) para excluirlas de las rutas potenciales. Como resultado del proceso de combinación de ambos mapas ráster de los criterios de la Tabla 6-4 y la posterior aplicación de restricciones espaciales, se obtiene el ráster de costes completo.

A partir de ahí, el siguiente paso es la identificación de los puntos origen y destino de la ruta que se quiere optimizar. Estos tres elementos se utilizan como entrada para el análisis de coste de distancia en ArcMap. Como resultado, se obtiene la ruta que ha proporcionado el menor coste acumulado sobre el ráster de costes (es decir, como resultado del cálculo de la ruta de menor coste se obtiene la ruta óptima).

Este proceso requiere utilizar el algoritmo LCP. Este algoritmo proporciona la ruta entre dos nodos integrados en una red. El análisis desarrollado a través de este algoritmo es una técnica que permite encontrar una secuencia de celdas (desde la celda de origen y la celda de destino) que proporciona el menor coste posible en un espacio ráster (Shirabe, 2016). Esta técnica proporciona la ruta de menor coste considerando una hipotética red en un ráster. En esta hipotética red, el centro de cada nodo se encuentra conectado con el nodo adyacente a través de múltiples enlaces (Abolhoseini & Alesheikh, 2020).

En este contexto, la metodología GIS ha probado ser de gran potencial para el procesamiento de datos e implementación de este tipo de técnicas. Este análisis se basa en la aplicación del algoritmo del "camino más corto" de Dijkstra (Dijkstra, 1959) y el mecanismo back-link de Xu y Lathrop (Xu & Lathrop Jr, 1995) aplicado a un ráster de coste. El algoritmo de Dijkstra es ejecutado siguiendo la secuencia de pasos definida a continuación: en primer lugar, se calcula la distancia ponderada más corta (o coste de viaje acumulado) para cada celda del ráster a la celda de origen dada sobre una superficie de coste. Este proceso difiere de la distancia euclidiana, la cual es una simple función de una recta entre dos puntos (Rodríguez-Puente & Lazo-Cortés, 2013). La herramienta de distancia de costes utiliza la representación de nodos/enlaces en las celdas aplicando la teoría de grafos. Cada enlace que conecta dos celdas tiene asignada una impedancia. El valor de la impedancia se deriva de los costes asociados a las celdas en cada extremo del enlace (a partir del conjunto de datos de la superficie de costes) y la dirección del movimiento a través de las celdas. El coste asignado a cada celda representa el coste por unidad de distancia para

moverse a través de la celda. Como resultado, esta herramienta devuelve como salida, un ráster en el que se asigna a cada celda el coste acumulado hasta la celda de origen.

En el segundo paso, el algoritmo utiliza la herramienta de distancia de trayecto para encontrar el camino de menor coste entre la celda de origen y la de destino. Se trata de una herramienta de análisis del coste de la distancia que tiene en cuenta tanto la distancia superficial, así como los criterios de los factores de coste horizontal y vertical.

Este mismo procedimiento puede repetirse para obtener rutas que establezcan otros criterios de optimización, como el criterio de optimización de la distancia (es decir, la ruta más corta) o el tiempo de viaje (es decir, la ruta más rápida). La visualización de los resultados en la misma interfaz del software GIS proporciona una fácil visión general de las rutas y de los resultados de exposición a VCE asociados a las rutas.

6.2.1.1. Etapa 3: visualización de los resultados y toma de decisiones

Tras ejecutar el proceso de optimización, la ruta resultante se muestra en la misma interfaz del software ArcMap. A partir de este resultado se estima la distancia recorrida por la ruta en cada tipo de superficie. La cuantificación de la distancia total en cada superficie es utilizada para calcular el tiempo empleado en recorrer la ruta. Para ello se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$t_{d,s} = l_{d,s} \frac{1}{\bar{v}_s} \quad (6-8)$$

$$t_r = \sum_{j=1}^p t_{d,j} \quad (6-9)$$

donde:

- $t_{d,s}$ es el tiempo de exposición [s] en el tipo de superficie s-ésimo,
- $l_{d,s}$ es la distancia total [km] de la ruta sobre el tipo de superficie s-ésimo,
- $\bar{v}_s$ es la velocidad media [km/s] de desplazamiento sobre el s-ésimo tipo de superficie,
- t_r es el tiempo total [s] que tarda el vehículo en realizar la ruta r,
- j es el contador de los tipos de superficie en la ruta r,
- p es el número total de tipos de superficies en la ruta r.

Los valores $A(8)_{ir}$, VDV_{ir} y S_r^A asociados a la exposición a VCE en el recorrido de la ruta se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$A(8)_{ir} = \sqrt{\sum_{s=1}^p \left(k_i rms_{iws} \sqrt{\frac{t_{d,s}}{T_0}} \right)^2} \quad (6-10)$$

$$VDV_{ir} = \sqrt[4]{\sum_{s=1}^p \left(k_i vdv_{iws} \sqrt{\frac{t_{d,s}}{t_{m,s}}} \right)^4} \quad (6-11)$$

$$S_r^A = \sqrt[6]{\sum_{s=1}^p S_{1km,s}^{A6} \frac{t_{d,s}}{t_{1km,s}}} \quad (6-12)$$

donde:

$A(8)_{ir}$ es el valor de la exposición diaria en el eje i en la ruta r ,

VDV_{ir} es el valor de la dosis de vibración en el eje i en la ruta r .

S_r^A es la tensión dinámica de compresión de la columna lumbar debido a la exposición a las vibraciones en el recorrido r ,

En los casos en los que el conductor sólo realiza esa ruta durante la jornada laboral, los valores S_r^A , $A(8)_{ir}$ y VDV_{ir} son iguales a los valores diarios S_d^A , $A(8)_i$ y VDV_i , respectivamente. En el caso de que el conductor realice más de una ruta, los valores S_d^A , $A(8)_i$ y VDV_i se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_d^A = \sqrt[6]{\sum_{r=1}^t S_r^{A6}} \quad (6-13)$$

$$A(8)_i = \sqrt{\sum_{r=1}^t A(8)_{ir}^2} \quad (6-14)$$

$$VDV_i = \sqrt[4]{\sum_{r=1}^t VDV_{ir}^4} \quad (6-15)$$

donde:

r es la ruta r -ésima,

t es el número total de trayectos realizados durante la jornada laboral.

Los datos de la exposición a VCE se exportan en formato de archivo .csv. A partir de los resultados obtenidos, el responsable de Seguridad y Salud puede evaluar si la exposición obtenida es segura para el conductor y si deben aplicarse medidas preventivas a corto plazo (por ejemplo, medidas organizativas, cambio de turnos, etc.) Este proceso puede realizarse comparando los valores de S_d^A , $A(8)$ y VDV obtenidos con los valores límites de exposición establecidos en Directiva y las norma ISO2631-5:2018 (véase el Tabla 3-12).

Además, el proceso de optimización de la ruta proporciona información para generar un perfil del historial de exposición a VCE a lo largo de la vida del conductor. Estos datos permiten calcular el parámetro R^A (sección 3.1.3.3) para evaluar el efecto de la exposición acumulada a VCE en la salud del trabajador. Este análisis contribuye a controlar la exposición del trabajador a VCE y a evaluar si sufrirá efectos adversos para la salud por la exposición a largo plazo con el fin de tomar medidas preventivas para minimizarlos.

6.2.2. Caso de estudio

En esta sección se muestra los resultados obtenidos del marco de trabajo propuesto al aplicarlo un caso de estudio. Para ello, se seleccionó una planta de hormigón ubicada en Porcuna (Jaén). La actividad analizada es la entrega de RMC desde la planta de hormigón a las obras. En esta actividad, el RMC se fabrica en la planta de dosificación para producir un hormigón con la resistencia requerida por las demandas del cliente (Kazaz et al., 2020). El hormigón se carga en camiones para su entrega en la obra (Olanrewaju et al., 2020). Esta actividad se seleccionó porque

en la campaña inicial se identificó que los conductores de este tipo de vehículos se encuentran expuestos a altos niveles de VCE al realizarla (Capítulo 4). La entrega de RMC requiere de una alta frecuencia de viajes entre la planta de fabricación y las obras. El número de viajes depende del volumen total de RMC encargado por el cliente.

En este caso de estudio se han calculado la *ruta óptima* (basada en los criterios de optimización indicados en la Tabla 6-4), la *ruta más rápida* (criterio de optimización del tiempo empleado en el recorrido) y la *ruta más corta* (criterio de optimización de la distancia). El marco de trabajo propuesto calcula automáticamente, para cada ruta, los parámetros utilizados en los criterios de optimización: la exposición diaria A(8), la distancia total recorrida y el tiempo total empleado en recorrer la ruta. Dado que no hay exposición a VCE durante las operaciones realizadas dentro de la planta de hormigón y durante la entrega del RMC en la obra, estos parámetros sólo se calculan durante el tránsito de la ruta hasta llegar a la obra.

6.2.2.1. Etapa 1: caracterización de la actividad

En cuanto a las características de la actividad, la entrega de RMC requiere la conducción de camiones hormigonera en diferentes tipos de superficies. Además, dado que algunos proyectos de construcción se realizan en lugares alejados de las zonas urbanas, la entrega de RMC puede requerir la conducción de camiones en tramos fuera de la carretera, campo a través o en caminos provisionales no pavimentados. Los conductores realizan varios repartos de RMC a lo largo de la jornada laboral y, ocasionalmente, realizan revisiones de los equipos y tareas de mantenimiento. Por lo general, los conductores tienen que recorrer repetidamente la misma ruta hasta entregar la cantidad total solicitada de RMC al cliente en obra.

Respecto a las características del conductor, se eligió a un varón adulto sano para participar en este caso de estudio. El sujeto tenía 49 años, y su altura y peso eran de 1.85 m y 120 Kg. Su índice de masa corporal era de 35,1 kg/m². El trabajador contaba con una experiencia como conductor de camiones en la planta de hormigón de 20 años y declaró que no tenía dolores actuales, ni antecedentes de TME. Con respecto a la postura que tiene el trabajador al conducir este tipo de vehículos, se puede clasificar como la postura 3 definida en el Anexo A de la norma ISO 2631-5:2018. Ambos datos, las características antropométricas del conductor y el grupo de postura 3 se utilizaron como entrada al modelo.

El vehículo utilizado en el estudio de caso fue un MAN TGS 35.420 cuyo asiento tiene una suspensión neumática pasiva. Este tipo de asiento es un estándar de fabricación para los vehículos utilizados en el sector de la construcción (Kim, Marin, et al., 2018). Cabe señalar que el tipo de asiento influye significativamente en la transmisión de VCE al conductor. De hecho, investigaciones anteriores han demostrado que los diseños de las suspensiones de los asientos tienen un efecto significativo en las vibraciones transmitidas a los conductores (Blood et al., 2015). Por lo tanto, las características del vehículo, el asiento y el operador deben tenerse en cuenta al realizar el análisis.

A partir de esta información, se definió una estrategia de medición para caracterizar la exposición a las vibraciones en la actividad analizada. Para ello, se midió la exposición a VCE en rutas reales de suministro de hormigón con el fin de proporcionar datos suficientes para ser representativos de la exposición en diferentes condiciones y superficies. Se utilizó el acelerómetro y el GPS descrito en el Capítulo 3 para realizar la medición y se incluyeron desplazamientos tanto en zonas urbanas como no urbanas.

A partir de los datos obtenidos en la campaña de medición se han calculado los parámetros descritos en la sección 6.3.1.1. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Resultados obtenidos en el proceso de caracterización de la actividad.

Tipo de superficie	$t_{1km.s}$ [s]	$A(8)_x$ [m/s ²]	$A(8)_y$ [m/s ²]	$A(8)_z$ [m/s ²]	VDV_x [m/s ^{1.75}]	VDV_y [m/s ^{1.75}]	VDV_z [m/s ^{1.75}]	Max $S_{1km.s}^A$ [MPa]
Carretera regional	48.10	0.022	0.024	0.038	2.066	2.392	4.021	0.246
Travesía urbana	69.65	0.025	0.018	0.025	2.026	1.658	2.612	0.187
Calle urbana	120.69	0.025	0.018	0.021	2.020	1.322	1.858	0.112
Vía no pavimentada	354.19	0.066	0.042	0.037	3.758	2.477	2.212	0.134
Campo a través	809.86	0.143	0.089	0.065	6.329	4.411	3.379	0.193

6.2.2.2. Etapa 2: Cálculo de los mapas ráster y proceso de optimización de la ruta

Para la creación de la base de datos GIS de la zona de estudio se han utilizado datos de código abierto del Geoportal de Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE, 2021). El trazado de vías de la zona se ha implementado en GIS, incluyendo información sobre el tipo de carreteras, los obstáculos y el tipo de áreas. Estos datos se han utilizado para crear el ráster de costes, tal como se indica en la Etapa 2 definida en la sección 6.3.1.2. La Figura 6-11 muestra el ráster resultante.

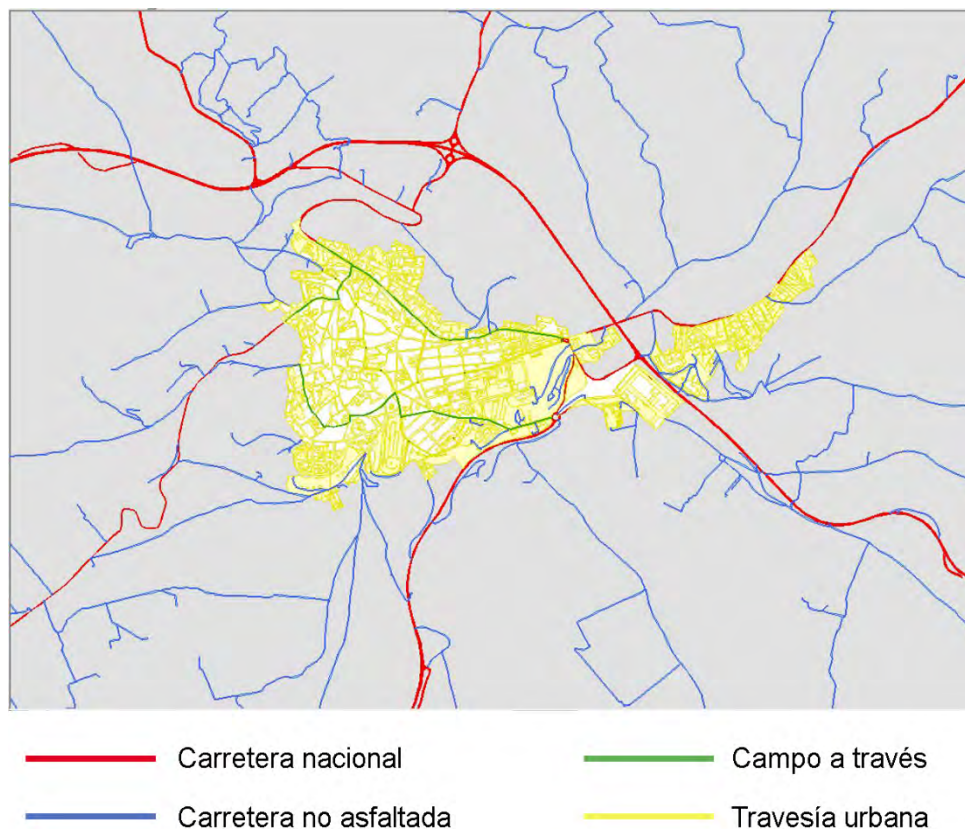


Figura 6-11. Red de vías en el área de estudio.

6.2.2.3. Etapa 3: visualización de los resultados y toma de decisiones

A partir de los puntos origen y destino definidos para la ruta (Figura 6-12), se puede calcular la ruta óptima. El resultado obtenido en este caso se muestra en la Figura 6-13.



Figura 6-12. Puntos de origen y destino de la ruta.



Figura 6-13. Ruta óptima (basado en los criterios de optimización mostrados en la Tabla 6-4).

A partir de la ruta obtenida en GIS, el marco de trabajo calcula automáticamente el valor de los parámetros utilizados en el proceso de optimización. En este caso, el tiempo estimado para completar la ruta es de 259.9 s, la longitud de la ruta es de 2.99 km y el $A(8)_x$ es de 0.056 ms^{-2} .

Como se ha mencionado anteriormente, además de la ruta obtenida con el criterio propuesto en la Etapa 2 de la metodología, se han calculado la ruta más rápida y la ruta más corta. La Figura 6-14 muestra la ruta óptima obtenida en la metodología propuesta (en verde), junto con la ruta más rápida (en rojo) y la ruta más corta (en azul) entre los puntos de origen y destino establecidos. La Tabla 6-6 muestra los parámetros asociados a cada una de las rutas.

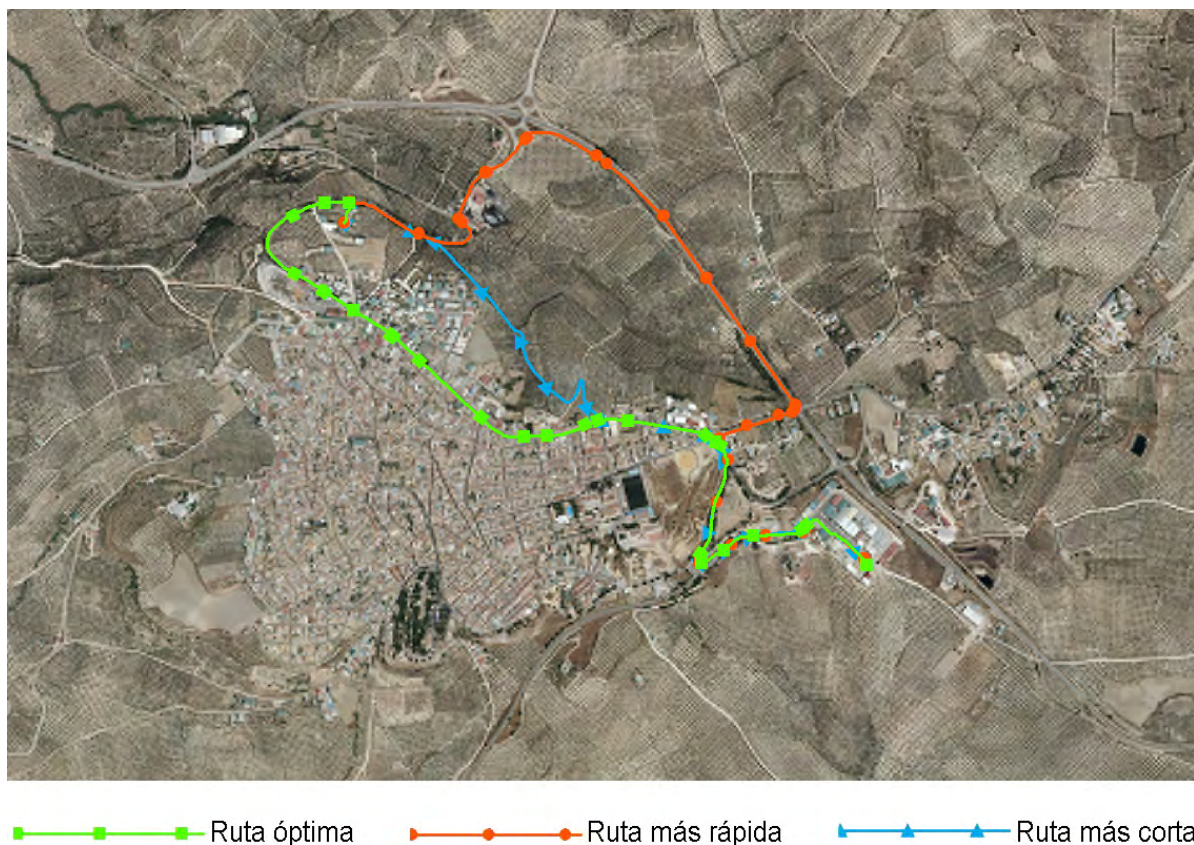


Figura 6-14. Resultados del caso de estudio.

Tabla 6-6. Parámetros obtenidos tras analizar el caso de estudio.

Ruta	Tiempo [s]	A(8) [m/s ²]	Longitud [km]
Ruta más rápida (red)	243.8	0.063	3.31
Ruta óptima (verde)	259.9	0.056	2.99
Ruta más corta (azul)	400.5	0.081	2.60

Como se muestra en la Figura 6-15, la ruta óptima minimiza el parámetro A(8) con una disminución del 10% con respecto a la ruta más rápida y una disminución del 31% con respecto a la ruta más corta, lo que tiene un gran impacto en la dosis de la exposición a VCE. Aunque la ruta más corta tiene la menor longitud, es la que más tiempo consume y proporciona el valor A(8) más alto de las tres rutas. En cuanto a la ruta más rápida, es la que menos tiempo requiere pero es la que más distancia recorre y proporciona un valor A(8) más alto que el proporcionado por la ruta obtenida

en la metodología propuesta. Por otra parte, los resultados obtenidos en el caso ilustrativo muestran que sólo minimizar el tiempo empleado en realizar el recorrido, o la distancia, no garantiza que se minimice la exposición a VCE.

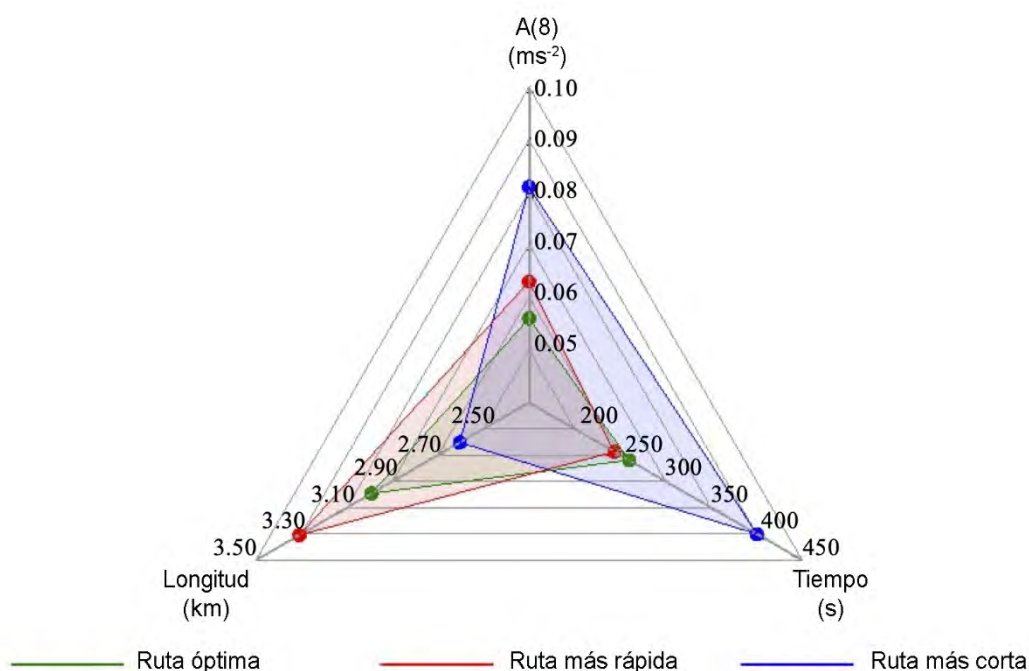


Figura 6-15. Resultados obtenidos tras aplicar el marco metodológico al caso de estudio.

Además, dado que se han estimado las distancias totales recorridas en cada tipo de superficie y se ha realizado la caracterización de la exposición en la etapa inicial del marco de trabajo, los valores de VDV_r y de S_r^A asociados a la *ruta óptima* se determinan automáticamente. En este caso, los valores son $3.9423 \text{ ms}^{-1.75}$ y 0.2419 MPa , respectivamente. En el caso de que el conductor tuviera que recorrer 8 veces la ruta en la jornada de trabajo para entregar el volumen total de RMC pedido por el cliente, los valores diarios de exposición $A(8)$, VDV y S_d^A son 0.159 ms^{-2} , $6.630 \text{ ms}^{-1.75}$ y 0.342 MPa , respectivamente. Los valores diarios obtenidos están por debajo de los valores límite de exposición diaria a VCE (Tabla 3-12).

Como se ha mencionado anteriormente, los valores de exposición diaria obtenidos pueden utilizarse para controlar el historial de exposición del trabajador a lo largo de su vida. En este sentido, los valores de S_d^A obtenidos pueden utilizarse para evaluar los efectos adversos para la salud relacionados con el factor de riesgo R^A .

6.2.3. Discusión e implicaciones prácticas

Hoy en día, un gran número de trabajadores están expuestos a VCE diariamente. Aunque en la literatura científica se han publicado numerosos estudios sobre la gestión de la seguridad, el marco de trabajo propuesto basado en GIS tiene como objetivo reducir la brecha que surge sobre los problemas relacionados con los VCE que afectan a los conductores de la industria de la construcción, como pueden ser los conductores de camiones hormigonera. Los resultados obtenidos de la aplicación del marco propuesto pueden contribuir a aumentar los conocimientos en materia de seguridad en la industria de la Construcción y a fomentar el uso de las mejores

prácticas para reducir la exposición a VCE. Este marco proporciona al responsable de Seguridad información clave para realizar una evaluación de la exposición acumulada a corto y largo plazo a VCE, así como para establecer una base para futuras investigaciones sobre la prevención a través del diseño de las rutas.

El marco de trabajo propuesto en esta sección muestra cómo es posible utilizar los sistemas GIS para el trazado de rutas con el fin de minimizar la exposición a VCE, así como otros criterios específicos de optimización, como por ejemplo el tiempo de viaje. En el cálculo se tiene en cuenta el nivel de exposición a VCE asociado al desempeño de la actividad por parte del trabajador y a los diferentes tipos de superficies, así como las características topográficas de la zona y de las carreteras. La metodología puede aplicarse a cualquier zona de la que se disponga la red de carreteras y del mapa MDE. Aunque la generación del ráster de costes supone un esfuerzo inicial en la Etapa 2 del marco de trabajo, a medio-largo plazo permitirá el cálculo de múltiples rutas entre diferentes orígenes y destinos según criterios específicos de optimización.

En el marco de trabajo se pueden distinguir tres fases metodológicas consecutivas. En la Etapa 1, se realiza un análisis de las características de la actividad y se define una estrategia de medición para garantizar que los datos obtenidos sean representativos de las diferentes exposiciones. A partir de esta información, se mide la exposición a VCE y la posición y velocidad del vehículo en situaciones representativas de cada tipo de actividad. Posteriormente, en la Etapa 2, se crea una base de datos GIS que contiene la morfología topográfica de la zona de estudio. En ella se incluye la red de carreteras disponible para los desplazamientos, enriquecida con los atributos procedentes de la Etapa 1 (la exposición a VCE y el tiempo de desplazamiento asociado al tipo de superficie). A partir de estos datos, se pueden obtener archivos ráster para la creación del ráster de costes. La presencia de obstáculos (masas de agua, edificios, etc.) o de zonas no aptas para la circulación de vehículos (zonas de acceso restringido o pendientes superiores al 15 %) se incluyen en el conjunto de datos ráster de costes asignando a estas celdas un valor mucho mayor que el de las celdas vecinas. El enfoque basado en el uso de ráster permite tener en cuenta los desplazamientos fuera de la carretera, que son muy frecuentes en el sector de la AIC. El ráster de costes obtenidos, junto con los datos de origen y destino, se utilizan para determinar la ruta óptima según los criterios de optimización. En la Etapa 3, la ruta obtenida se visualiza en la interfaz del software GIS y se estima la dosis de exposición a VCE, la longitud y el tiempo necesario para completar la ruta.

Además de los parámetros establecidos como criterios de optimización, el marco de trabajo desarrollado proporciona la dosis de exposición a VCE asociada a la ruta (es decir, $A(8)_r$, VDV_r y de S_r^A). Estos valores pueden utilizarse como entrada para estimar el factor de riesgo R^A según la norma ISO 2631-5:2018. Dado que las exposiciones a VCE pueden verse afectadas por factores como el tipo de vehículo, las condiciones de las superficies (carretera asfaltada, vía sin asfaltar, fuera de la carretera, etc.), las características antropométricas del conductor, el tipo de asiento y las tareas, estos factores deben tenerse en cuenta en el análisis. Aunque su implementación requiere un esfuerzo inicial, los resultados obtenidos contribuyen a garantizar la seguridad de los trabajadores a lo largo de su vida laboral.

En resumen, el marco de trabajo propuesto basado en GIS proporciona información clave para garantizar la seguridad de los trabajadores mediante el diseño de rutas. Los resultados obtenidos pueden utilizarse para estimar la exposición diaria y generar una base de datos con el historial de

exposición del trabajador a lo largo de su vida. La aplicación del marco metodológico propuesto contribuye a la evaluación del riesgo de VCE a corto y largo plazo, así como a la prevención de los TME.

6.3. Conclusiones y validación de la Hipótesis H3

Un tercio de la población mundial padece TME y los trabajadores de la industria de la construcción se encuentran entre la población más afectada. La exposición a VCE es uno de los factores relacionados con el desarrollo de TME. Con el fin de proteger la salud de los trabajadores, el Parlamento Europeo publicó la Directiva 2002/44/CE de la UE sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (vibraciones).

En este contexto, el objetivo de la investigación desarrollada en este capítulo ha sido desarrollar una nueva metodología para la evaluación de la exposición a VCE a largo plazo (sección 6.1) y su implementación en un marco de trabajo basado en GIS para la optimización del diseño de rutas (sección 6.2) que calcula automáticamente el valor de la dosis de exposición de los trabajadores a las vibraciones.

En resumen, de los resultados obtenidos se han extraído las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos de la metodología y el marco de trabajo proporcionan información clave al gestor de la Seguridad y Salud en el proceso de toma de decisiones durante el diseño de las actividades. Además, estos datos pueden utilizarse para generar una base de datos con el historial de exposición del trabajador a lo largo de su vida. Estos datos pueden utilizarse para aplicar los métodos de evaluación de la exposición a VCE a lo largo de los años, tal y como se define en la norma 2631-5:2018. Por lo tanto, el responsable de seguridad puede gestionar los puestos de trabajo no sólo evaluando la exposición diaria, sino también evaluando las consecuencias en el trabajador de la exposición a VCE de forma prolongada a lo largo de los años.
- La aplicación del marco de trabajo propuesto amplía las capacidades de gestión de la seguridad de la exposición a VCE en el proceso de diseño de rutas en un entorno GIS. El modelo estima el valor de exposición a VCE asociado a la ruta, así como el tiempo que tarda el vehículo en recorrer la ruta y la distancia recorrida.
- El modelo propuesto incluye los desplazamientos en zonas fuera de la carretera, lo que facilita el trazado de rutas en zonas no urbanas que requieren desplazamientos en áreas sin vías definidas. Este tipo de desplazamientos fuera de la carretera son muy comunes en el sector de la AIC durante la ejecución de proyectos.
- El marco de trabajo es flexible, es decir, puede aplicarse a cualquier zona siempre que se disponga de la red de carreteras y del archivo MDE de la zona de estudio. Aunque la generación del marco puede requerir cierto esfuerzo inicial, una vez desarrollado puede utilizarse para calcular múltiples rutas.

Cabe destacar que el marco metodológico propuesto es una herramienta para la gestión de la exposición a VCE cuya aplicación facilita la gestión y evaluación con el criterio principal de proteger la salud de los trabajadores. La minimización del impacto de la exposición a VCE en su

salud no sólo minimizará el coste de las enfermedades relacionadas con el trabajo, sino que también mejorará la vida de los trabajadores.

Por último, destacar que los resultados obtenidos en ambas secciones están alineados con dos de los tres principales retos en materia de seguridad y salud laboral definidos por el Marco Estratégico de la UE en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo 2014-2020, como son el tratamiento del reto del envejecimiento y la prevención de las enfermedades profesionales y relacionadas con el trabajo. Además, es un ejemplo de aplicación del concepto básico presente en todas las políticas europeas de salud y seguridad en el trabajo (Aires et al., 2010): la prevención a través del diseño (PtD), eliminando o minimizando los posibles efectos adversos para la salud de los trabajadores en las fases iniciales de gestión y organización de las actividades. Por último, es posible hacer que los puestos de trabajo sean más sostenibles mediante el proceso de gestión de la actividad utilizando el marco metodológico propuesto. Gestionar la exposición a VCE contribuye a prevenir los TME, ya que las etapas iniciales de la gestión garantizan que las personas puedan trabajar hasta la edad de jubilación y tener una buena calidad de vida después de la misma, que es uno de los retos comunes a los que se enfrenta la sociedad en la actualidad (Eurofound, 2017).

En consecuencia, a partir de los resultados obtenidos en nuestra investigación tras implementar el marco de trabajo propuesto, se valida la Hipótesis H3 planteada en el Capítulo 2, ya que los sistemas GIS han resultado una herramienta muy útil para el desarrollo de un Método para la Gestión de la Exposición a VCE a largo plazo.

7. DISEÑO DE UN MARCO DE TRABAJO PARA LA GESTIÓN DE LA EXPOSICIÓN A RUIDO

En este Capítulo se recoge la 3ª Subfase de la 4ª Fase y se presenta el marco de trabajo basado en BIM para la gestión de la exposición a ruido en emplazamiento de las industrias de la construcción. Para ello se propone un enfoque de simulación acústica a partir de la información contenida en el modelo BIM para evaluar el NPS al que están expuestos los trabajadores a lo largo de la jornada laboral. En la primera parte se definen las diferentes etapas del marco de trabajo. Para ello, se han definido los elementos necesarios en el modelo BIM para llevar a cabo los procesos de simulación, así como los métodos utilizados para estimar el NPS en las diferentes ubicaciones del modelo. Posteriormente, en la segunda parte se muestra su aplicación en un ejemplo ilustrativo de una planta de hormigón dispuesta en un sistema planta-torre.

Los resultados obtenidos tras estos estudios han validado la hipótesis H4.

7.1. Marco de trabajo basado en BIM para la para la gestión de la exposición a ruido

Como se puso de manifiesto en el Capítulo 2, la contaminación acústica generada por los equipamientos y grandes maquinarias tienen un gran impacto social y medioambiental (Lee et al., 2019). El ruido generado por estos equipos puede causar tanto molestias laborales a los trabajadores como alteraciones ambientales en las zonas circundantes (De Oliveira et al., 2019). Tal y como se identificó en el Capítulo 4, el ruido es un agente físico que está presente en las instalaciones de las industrias vinculadas al sector de la construcción. En este sentido, estas actividades exigen que se logre un equilibrio entre los impactos económicos, sociales y ambientales para lograr la sostenibilidad en estas industrias. Para ello, es fundamental gestionar el ruido a partir de un análisis de las fuentes y de los efectos sobre la salud de los trabajadores.

El uso de herramientas informáticas para la simulación, cálculo y predicción de la exposición al ruido presentan una serie de ventajas frente a las metodologías tradicionales. Un ejemplo es el uso de mapas de ruido, los cuales han sido utilizados eficazmente como una herramienta para cuantificar y visualizar los efectos del ruido en diferentes sectores. Con este fin los sistemas GIS y los programas informáticos especializados (por ejemplo, CadnaA, SoundPLAN, etc.) han sido utilizados para calcular la distribución del NPS en grandes áreas (Barber et al., 2011; de Kluiver & Stoter, 2003). Sin embargo, el uso de estas aplicaciones para áreas pequeñas tiene un alto coste de tiempo, ya que implica el modelado de diferentes instalaciones y edificios y la reintroducción de datos en diferentes softwares. En este contexto, la metodología BIM ofrece enormes oportunidades para la simulación de la exposición a ruido en entornos laborales (Wei & Wang, 2018; Wei et al., 2017). El modelo BIM generado puede proporcionar una gran cantidad de datos geométricos y no geométricos que pueden utilizarse de manera eficiente en los procesos de simulación, ahorrando tiempo en la reintroducción de datos. De hecho, estudios precedentes han puesto de manifiesto su utilidad en el campo de la Seguridad y Salud (Aguilar et al., 2019; Torrecilla-García et al., 2021).

El objetivo de este capítulo es proponer un marco de trabajo basado en BIM para ayudar a la gestión del ruido en los lugares de trabajo de la industria de la construcción. La meta es proporcionar un punto de vista global utilizando una única aplicación de software para la evaluación del ruido. El marco constituye un sistema que proporciona información de apoyo al gestor de la Seguridad y Salud para la toma de decisiones, de tal forma que se garantice que no existe un riesgo para la salud del trabajador derivado de la exposición a ruido en el lugar de trabajo. La Figura 7-1 muestra el diagrama de flujo del marco de trabajo desarrollado en BIM.

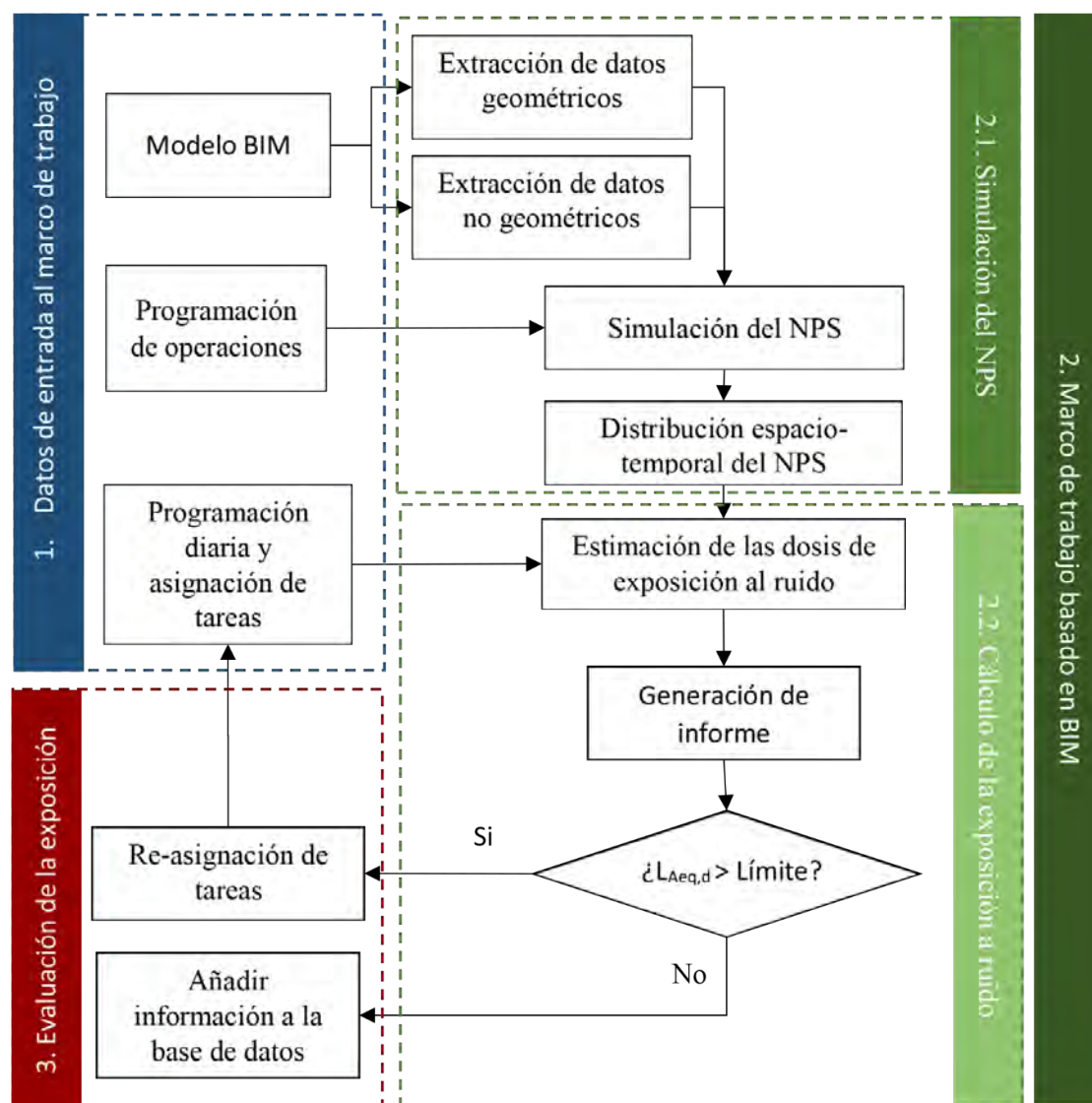


Figura 7-1. Diagrama de flujo del marco de trabajo desarrollado en BIM.

El marco de trabajo se compone de tres fases consecutivas. En la **Etapa 1** se definen los datos de entrada, los cuales incluyen el modelo BIM de las instalaciones de la industria (incluyendo la información acústica de los elementos que lo componen), la programación de las operaciones prevista (periodos de activación de las fuentes de ruido y logística de la industria) y la programación diaria de asignación de tareas a los trabajadores en las instalaciones. Además, también debe de indicarse el ruido de fondo en las instalaciones cuando ninguna de las fuentes está activas y las condiciones ambientales previstas. Esta información es utilizada en la **Etapa 2** para estimar el NPS (Paso 2.1) y posteriormente evaluar la dosis de exposición a ruido ($L_{Aeq,d}$) de los trabajadores (Paso 2.2). En la **Etapa 3**, en función de los resultados obtenidos, si la dosis de exposición de todos los trabajadores es inferior al límite máximo establecido en la normativa, se genera un informe de los datos de exposición y se añade a una base de datos con el histórico de exposición de cada trabajador. Si por el contrario, algún trabajador está expuesto a un nivel superior al límite establecido, aparece una alerta que indica al responsable de Seguridad que debe tomar medidas para reducir la exposición del trabajador. En las siguientes secciones se describe en detalle los procesos desarrollados en cada una de las etapas enumeradas.

7.1.1. Definición del marco de trabajo

7.1.1.1. Etapa 1. Datos de entrada al marco de trabajo

En esta etapa se desarrolla el principal enfoque del cual parte el marco de trabajo desarrollado: el enriquecimiento del modelo BIM con la información requerida para simular el NPS en cualquier punto de la instalación de la industria. Es decir, tanto la información geométrica de los propios elementos incluidos en el modelo BIM 3D y sus posiciones relativas dentro del mismo, así como la información no geométrica relativa a sus características acústicas. El NPS en un punto receptor donde se puede encontrar un trabajador depende de la distancia entre dicho punto, las fuentes de ruido y las condiciones de contorno. Para determinar el NPS es necesario considerar las características de las fuentes emisoras de ruido y los puntos receptores. Por lo tanto, se deben distinguir la tipología de cada elemento y atribuirle la información que será necesaria para la simulación. Para ello, se deben definir las siguientes categorías: fuentes de ruido y puntos receptores. Entendiéndose por fuente de ruido cualquier equipo o maquinaria susceptible de producir un NPS elevado durante su funcionamiento. Por otro lado, el punto receptor se considera a cualquier ubicación en la que puede encontrarse el trabajador y donde el NPS puede aumentar como consecuencia de la activación de las fuentes de ruido definidas.

Respecto a las *fuentes de ruido*, en primer lugar debe considerarse su nivel de potencia (L_W), el cual es una magnitud característica de las fuentes. El valor de este parámetro puede obtenerse de la información proporcionada por el fabricante del equipo o, tal y como define la norma ISO 3744, puede estimarse a partir de operaciones sucesivas de medición del NPS a distancias fijas desde la fuente de ruido (5 m, 10 m, 15 m, etc.) (Directiva 2002/49/EC; UNE-EN ISO 3744:2011).

Por otro lado, también debe considerarse la dimensión de la fuente de ruido. En este sentido, las características del patrón de radiación de la fuente están condicionadas por la forma de la fuente, lo que a su vez afecta al factor de directividad y divergencia geométrica. En consecuencia, la definición de las fuentes de ruido en el modelo BIM debe de considerar esta característica e identificar si el equipo se representa como una fuente puntual, lineal o superficial.

Además, debe considerarse el factor de directividad de la fuente (D), el cual describe la dispersión geométrica del patrón de emisión de la fuente de ruido (UNE-EN ISO 3744:2011). En un espacio abierto como un emplazamiento de una obra de construcción o las instalaciones de campo abierto de una industria de actividad afín a este sector, el tipo de patrón de emisión puede distinguirse entre: (1) la fuente acústica transmite ruido aéreo que se propaga con un frente de onda esférico (en ninguna de las direcciones existen obstáculos y, por lo tanto, el factor de directividad es igual a la unidad) y (2) la fuente acústica transmite el ruido aéreo que se propaga con un frente de onda semi-esférico (la fuente está ubicada sobre una superficie como suelo, fachada, etc. y su factor de directividad es igual a 2). Por lo tanto, es esencial la correcta identificación de la ubicación de la fuente sonora (es decir, su ubicación tridimensional en el modelo BIM).

Respecto a los *puntos receptores*, debe identificarse su posición dentro del modelo BIM. Dado que el NPS en estos puntos depende de su posición relativa respecto de las fuentes de ruido, así como su posición relativa respecto de otras superficies susceptibles de generar reflexiones/difracciones, deben identificarse sus coordenadas tridimensionales en el modelo BIM (ver Figura 7-2).

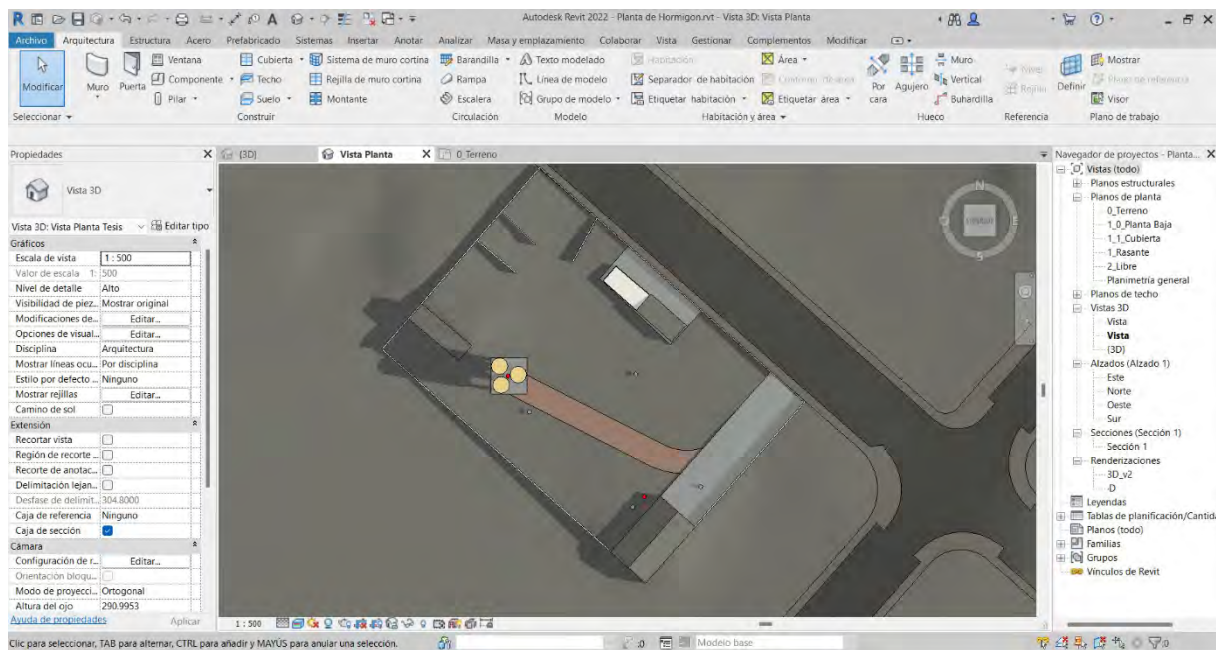


Figura 7-2. Ejemplo de elementos del BIM con coordenadas tridimensionales.

Por lo tanto, en función de la tipología de los elementos, en el modelo BIM se le deben añadir los atributos identificados en la Tabla 7.1. La creación de estos atributos es esencial para el desarrollo de la simulación.

Tabla 7-1. Atributos asignados a los elementos emisores (fuentes de ruido) y puntos receptores (puestos que ocupan los trabajadores).

Tipo de elemento	Atributo	Tipología	Concepto
Fuente	Id	Cadena de texto	Código de identificación de la fuente.
	Type	Entero (puntual =1; longitudinal = 2; superficial = 3)	Indica la tipología de la fuente.
	L _w	Decimal	Contiene el nivel de potencia, para banda de octava, de la fuente de ruido.
	H	Decimal.	Altura, respecto de la cota de rasante, a la que se encuentra ubicada la fuente de ruido.
	Q	(Frente de onda esférico == 1; Frente de onda semi-esférico ==2).	Factor de directividad.
Receptor	Id	Cadena de texto.	Código identificador del punto receptor.
	H	Decimal.	Altura a la que se ubica el punto receptor respecto de la rasante.

Los materiales que constituyen los elementos de las instalaciones susceptibles de ser barreras deben de incluir el atributo de masa superficial.

Además, el cálculo del nivel de ruido en las instalaciones requiere conocer información relativa a la activación de las fuentes de ruido, la cual puede ser constante (si la fuente está activa durante toda la jornada laboral) o se limita a determinados periodos de tiempo (si la fuente está activa solo a determinadas horas de la jornada laboral). En este último caso, la activación de las fuentes dependerá de la planificación de los trabajos para cada día objeto de estudio. Incluir esta información en el marco de trabajo requiere que se elabore un archivo .csv con la programación de operaciones en la que se indica la activación de las fuentes de ruido (es decir, cuando los equipos y máquinas que generan ruido se están utilizando), indicando para cada una de ellas (identificadas con el código Id.) los periodos horarios que están activas.

Además, no solo la activación de las fuentes de ruido puede variar a lo largo del tiempo, sino que la ubicación de los trabajadores también lo hará en función de las tareas que tengan asignadas. En consecuencia, debe proporcionarse como entrada al marco de trabajo un archivo .csv en el que se identifique a cada uno de los trabajadores (asignando un código de identificación) y cuáles son las tareas que realizan a lo largo de la jornada laboral (indicando su posición dentro de las instalaciones de la industria, para lo que se debe indicar el código Id. del punto receptor).

La información contenida en el modelo junto con la programación de la activación de las fuentes y la asignación de tareas a los trabajadores proporciona información suficiente para estimar el NPS y el nivel de exposición a ruido considerando las condiciones específicas temporales.

7.1.1.2. Etapa 2. Procesamiento de datos en el marco de trabajo basado en BIM

Paso 2.1. Estimación del nivel de ruido en las instalaciones de la industria

En primer lugar, el marco de trabajo procede inicialmente a simular el NPS empleando teorías existentes de propagación del ruido (BS 5228-1:2009; ISO 9613-2:1996). Para ello, a partir de los datos extraídos del modelo BIM y de la programación de trabajo prevista para el día objeto de estudio, el NPS (L_{ft}) es estimado para las ocho bandas de octava con frecuencia nominal entre 63Hz y 8 kHz, tal y como establece la norma ISO 9613-2:1996. Para ello, se calcula el NPS continuo equivalente en cada banda de octava para cada ubicación identificada como punto de receptor y cada fuente de ruido (Ecuación 7-1).

$$NPS_{ft} = L_{W,f} - A_f \quad (7-1)$$

donde L_W es el nivel de potencia sonora en la banda de octava f producido por la fuente sonora en relación con una potencia sonora referente de un picovatio (pW); A es la atenuación total en la banda de octava que se produce durante la propagación desde la fuente sonora hasta el receptor. A se calcula como la suma de la atenuación por divergencia geométrica (A_{div}), la absorción atmosférica (A_{atm}), la atenuación debido al efecto del suelo (A_{gr}) y la atenuación debida a las barreras (A_{bar}) (Ecuación 7-2).

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} \quad (7-2)$$

A continuación, se define el procedimiento de cálculo de cada una de las atenuaciones consideradas en el proceso.

La **Atenuación geométrica** (A_{div}) es calculada utilizando las siguientes ecuaciones. Este factor de atenuación considera la disminución del NPS como resultado de la dispersión geométrica en el proceso de propagación de la energía desde la fuente de ruido hasta el punto receptor. Características de la fuente como su forma y directividad condicionan este fenómeno. De acuerdo con la norma ISO 9613-2, en este estudio se ha considerado el cálculo de la divergencia geométrica en función de las características de la fuente emisora. Dependiendo de si la fuente emisora se considera una fuente de tipo puntual o superficial se utilizarán las ecuaciones Ecuación 7-3 o Ecuación 7-4 respectivamente.

$$A_{div} = 20 \log_{10} d + 11 - 3 \log_2 Q \quad (7-3)$$

$$A_{div} = 20 \log_{10} \left(\frac{2d}{l} \right) + 3 \quad (7-4)$$

donde d es la distancia entre la fuente de ruido y el punto receptor; Q es el factor de directividad de la fuente de ruido y l es la longitud lateral máxima de la fuente de tipo superficial.

La **Atenuación atmosférica** (A_{atm}) se estima utilizando la Ecuación 7-5 de acuerdo a la ISO 9613-1:1993. Este factor representa la atenuación debida a la absorción atmosférica durante la propagación desde la fuente acústica al punto receptor. El cálculo de la atenuación que sufre el sonido al atravesar la atmósfera considera la absorción debida a la viscosidad, el efecto de relajación de las moléculas del gas y la pérdida térmica. En consecuencia, se produce una disminución de la energía que llega al punto receptor como resultado de que parte de esta energía se convierte en energía térmica o energía interna de las moléculas de gas.

$$A_{atm} = C + R + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (7-5)$$

donde cada parámetro se calcula con a partir de las siguientes ecuaciones (7-6 a 7-8).

$$C + R = 8.686 \cdot (1.60 \cdot 10^7) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{f^2 \cdot P_0}{P} \right) \quad (7-6)$$

$$V_{N_2} = 8.686 \cdot 0.1068 e^{\left(\frac{-3352.0}{T} \right)} \cdot \left(\frac{f_{N_2} \cdot f^2}{(f_{N_2}^2 + f^2)} \right) \quad (7-7)$$

$$V_{O_2} = 8.686 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \cdot 0.01275 e^{\left(\frac{-2239.1}{T} \right)} \cdot \left(\frac{f_{O_2} \cdot f^2}{(f_{O_2}^2 + f^2)} \right) \quad (7-8)$$

donde C representa las clásicas pérdidas de energía dinámica debidas a la viscosidad y los efectos térmicos; R , representa la absorción molecular debida a la relajación rotacional de la atmósfera; T , es la temperatura de la atmósfera (K); T_0 , es la temperatura de referencia (es decir, 293,15 K); f , es la frecuencia; P_0 , es la presión atmosférica de referencia (es decir, 101,325 kPa); P , es la presión atmosférica del aire; V_{N_2} representa las pérdidas de absorción molecular por la relajación vibratoria de las moléculas de gas nitrógeno; f_{N_2} , es la frecuencia de relajación vibratoria de la molécula de nitrógeno; V_{O_2} , representa las pérdidas por absorción molecular por la relajación vibratoria de las

moléculas de oxígeno gaseoso y f_{02} , es la frecuencia de relajación vibratoria de la molécula de oxígeno. El cálculo de f_{N2} y f_{02} se realiza a partir de las Ecuaciones 7-9 y 7-10 respectivamente.

$$f_{N2} = \left(\frac{P}{P_0}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} \cdot (9 + 280h_A) e^{\left(-4.170\left(\left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1}{3}} - 1\right)\right)} \quad (7-9)$$

$$f_{02} = \left(\frac{P}{P_0}\right) \cdot \left(24 + \left((4.04 \cdot 10^4 \cdot h_A) \cdot \left(\frac{0.02 + h_A}{0.391 + h_A}\right)\right)\right) \quad (7-10)$$

donde h_A es la humedad absoluta del vapor de agua en la atmósfera y se estima a partir de la Ecuación 7-11, donde h es la humedad relativa en el emplazamiento.

$$h_A = h \cdot \left(\frac{p \cdot 10^{\left(\frac{-6.8346 \cdot \left(\frac{273.16}{t}\right)^{1.261} + 4.6151\right)}{P_0}}\right) \quad (7-11)$$

Respecto a la **Atenuación debido al efecto del suelo (A_{gr})**, esta se calcula a partir de la Ecuación 7-12. Este parámetro tiene en cuenta la atenuación debida a la absorción causada por la superficie entre la fuente de ruido y el punto receptor. Dado que se cumplen las consideraciones específicas establecidas por la norma (es decir, solo se aplica al cálculo de los NPS ponderados A en los puntos receptores de interés, la propagación del ruido ocurre sobre un suelo poroso o una mezcla de tipos de suelos porosos y el sonido no es un tono puro), se ha utilizado el método alternativo de cálculo definido en la norma ISO 9613-2 para los niveles de presión sonora ponderado A. La naturaleza del tipo de suelo se tiene en cuenta en este cálculo, siendo el tipo duro el que normalmente se encuentra en los emplazamientos de construcción y en las instalaciones de las industrias afines.

$$A_{gr} = 4.8 - \left(\frac{2h_m}{d}\right) \cdot \left[17 + \left(\frac{300}{d}\right)\right] \quad (7-12)$$

donde h_m es la altura media del trayecto de propagación sobre el suelo (metros); d es la distancia entre la fuente al receptor (metros). La h_m puede evaluarse a partir de la Ecuación 7-13, considerando el esquema mostrado en la Figura 7-3. En caso de que el valor obtenido en el cálculo de A_{gr} sea negativo, se considerará nulo en el cálculo de la atenuación total.

$$h_m = \frac{F}{d} \quad (7-13)$$

donde F es el área comprendida entre la línea que une la fuente y el punto receptor, y el perfil del terreno entre ambos; d es la distancia entre la fuente y el punto receptor; h_s es la altura de la fuente y h_r es la altura del punto receptor.

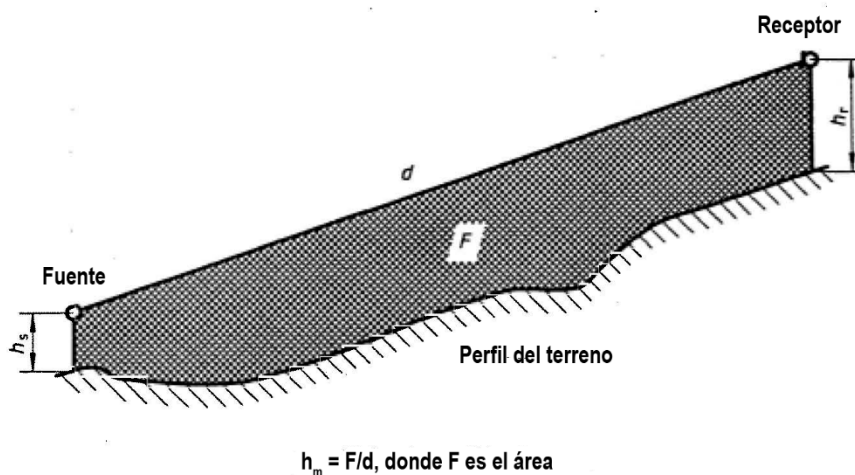


Figura 7-3. Método de cálculo de la altura media h_m .

En cuanto a la **Atenuación debida a las barreras** (A_{bar}), este parámetro cuantifica la atenuación debida a la presencia de elementos en las inmediaciones cercanas entre el punto emisor y receptor susceptibles de generar difracciones o reflexiones. Estos elementos generan una divergencia geométrica y causan una disminución o aumento de la energía que llega al punto receptor. De acuerdo a la norma ISO 9613-2, un objeto debe considerarse como un obstáculo que genera apantallamiento si cumple las siguientes condiciones: (1) la masa superficial del elemento es de al menos 10 kg/m^2 , (2) el elemento tiene una superficie cerrada sin grandes grietas o huecos y (3) la dimensión horizontal del elemento perpendicular a la línea que une la fuente y receptor es mayor que la longitud de onda acústica (λ) de la frecuencia nominal de la banda de octava de interés; es decir, $l_l + l_r > \lambda$. La Figura 7-4 muestra un esquema de la tercera condición indicada.

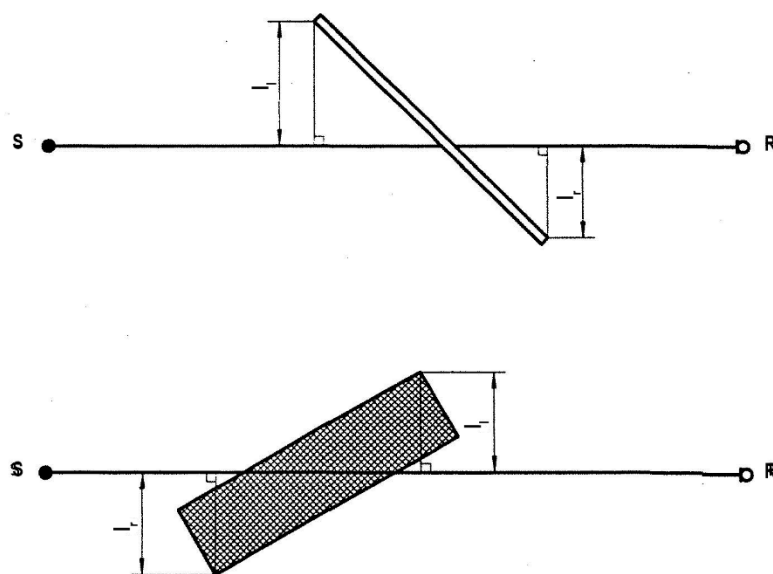


Figura 7-4. Esquema del análisis de las dimensiones de los elementos para considerarlos barreras acústicas.

Por lo tanto, el marco de trabajo considera las características y dimensiones de los elementos para el cálculo de A_{bar} y calcula la atenuación como la suma de la atenuación por difracción (A_{dif}) y la atenuación por reflexión (A_{ref}).

En cuanto al cálculo de la **Atenuación por difracción** (A_{diff}), si el obstáculo de apantallamiento cumple los requisitos establecidos, A_{dif} se calcula mediante la Ecuación 7-14.

$$A_{diff} = 10 \log_{10} \left[3 + \left(\frac{20}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{1 + (5\lambda/e)^2}{(1/3) + (5\lambda/e)^2} \right) \cdot z \cdot k_{met} \right] - A_{gr} \quad (7-14)$$

donde λ es la longitud de onda en la frecuencia nominal de la banda de octava (metros); e es la distancia entre los dos bordes de difracción en el caso de la doble difracción; z es la diferencia entre las longitudes de recorrido del sonido difractado y del directo (distancia entre el receptor y la fuente de ruido); k_{met} es el factor de corrección para los efectos meteorológicos. La Figura 7-5 muestra un esquema de la atenuación analizada con este efecto.

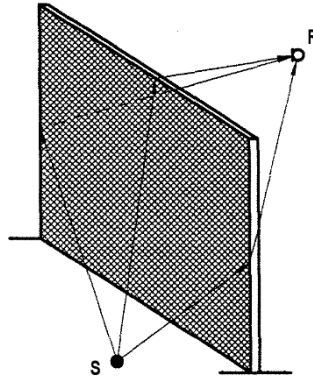


Figura 7-5. Diferentes vías de propagación entre la fuente y el punto receptor con una barrera intermedia.

En cuanto a la **Atenuación por reflexión** (A_{ref}), esta se considera en términos de fuente de imagen si se cumplen los siguientes requisitos: (1) la magnitud del coeficiente de reflexión para la superficie del obstáculo es superior a 0.2; (2) se puede construir una reflexión especular y (3) la superficie es lo suficientemente grande para que la longitud de onda nominal de la banda media para la banda de octava considerada obedezca a la relación mostrada en la Ecuación 7-15.

$$1/\lambda > \left[\frac{2}{(l_{min} \cos \beta)^2} \right] \left[\frac{d_{s,o} d_{o,r}}{(d_{s,o} + d_{o,r})} \right] \quad (7-15)$$

donde l_{min} es la dimensión mínima (longitud o altura) de la superficie de reflexión, β es el ángulo de incidencia, $d_{s,o}$ es la distancia entre el punto de reflexión en el obstáculo y la fuente y $d_{o,r}$ es la distancia entre el receptor y el punto de reflexión en el obstáculo. La fuente real y la fuente imagen se tratan por separado. El nivel de potencia sonora de la fuente imagen ($L_{W,im}$) se calcula a partir de la Ecuación 7-16.

$$L_{W,im} = L_W + 10 \log(\rho) + D_{ir} \quad (7-16)$$

donde ρ es el coeficiente de reflexión en el ángulo β sobre la superficie del obstáculo (≥ 0.2) y D_{ir} es el índice de directividad de la fuente en la dirección de la imagen del receptor. La Figura 7-6 muestra un esquema de este efecto.

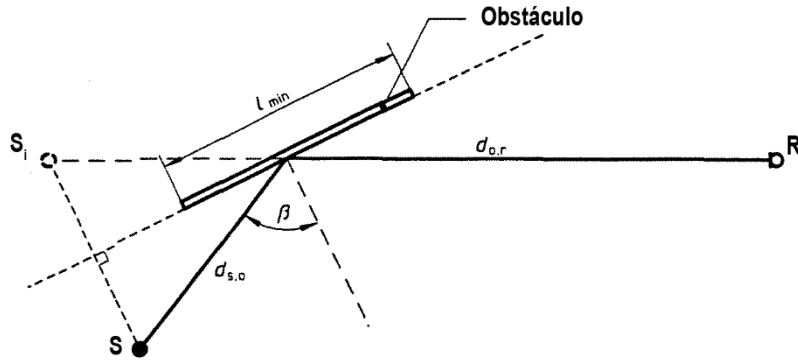


Figura 7-6. Efecto de reflexión especular desde una barrera.

Una vez estimadas todas las atenuaciones, se calcula el NPS en cada punto receptor respecto a cada fuente emisora.

Paso 2.2. Evaluación de la exposición a ruido

Finalizada el paso 2.1, el marco de trabajo importa la programación diaria y asignación de tareas previstas para el día analizado. En este proceso se incorporan los datos relativos a los periodos de tiempo en los que están activas las fuentes ruidosas y los puntos receptores en los que se encontraran los trabajadores a lo largo de la jornada laboral.

A partir de estos datos y los resultados obtenidos en el paso 2.1, se calcula el NPS total en cada punto receptor r ($NPS_{Total,r}$) como la suma equivalente de todas las fuentes que están activas en ese momento, como se indica en la Ecuación 7-17.

$$NPS_{Total,r} = 10 \log_{10} \left(\sum_{s=1}^n 10^{\frac{NPS_s}{10}} \right) \quad (7-17)$$

donde r denota el r -ésimo punto receptor, s denota la s -ésima fuente, n es el número total de fuentes y NPS_s es el NPS en el punto receptor debido a la fuente s .

Por lo tanto, conocido el $NPS_{Total,r}$ es posible determinar el nivel de exposición diario equivalente a partir de la información sobre donde se encuentra cada trabajador y qué actividades realiza. Para calcular el nivel de exposición se utiliza la Ecuación 7-18.

$$L_{Aeq,d} = 10 \sum_{t=1}^8 10^{0.1(NPS_{Total,r})_t} \quad (7-18)$$

donde t es el contador que denota cada una de las horas de la jornada laboral del trabajador y $NPS_{Total,r}$ es el NPS resultante de todas las fuentes activas en el punto receptor r en la hora t .

Este cálculo se realiza para todos los trabajadores de la industria. Si en alguna franja horaria el trabajador está fuera de las instalaciones (ej. realizando el suministro de un pedido al cliente), el marco de trabajo reconoce que no está en ninguno de los puntos receptores r de las instalaciones

identificados en el modelo BIM e incluye en el cálculo de esas franjas horarias la exposición estimada de esa actividad (este valor está identificado en la base de datos).

7.1.1.1. Etapa 3. Evaluación y toma de decisiones

Finalizado el cálculo del nivel de exposición de los trabajadores, se evalúa si los valores de exposición están por encima de los límites máximos establecidos en la normativa para la exposición al ruido. De esta forma, si el nivel de exposición del trabajador es inferior a 80 dBA el marco de trabajo genera un informe donde muestra los resultados obtenidos para cada trabajador e incorpora estos valores a una base de datos sobre el histórico de exposición a agentes físicos.

Por el contrario, si el nivel de exposición a ruido es igual o superior a 80 dBA, el marco de trabajo genera una alerta en la que informa de esta situación. El encargado de la Seguridad en la empresa puede utilizar esta información para tomar decisiones que reduzcan el nivel de exposición de aquellos trabajadores que superen el límite establecido. Para ello, puede tomar medidas organizativas (ej.: reformular la asignación de tareas de la jornada laboral) y volver a ejecutar el Paso 2.2. del marco de trabajo para reevaluar el nuevo escenario diseñado.

7.2. Aplicación a un caso ilustrativo

En esta sección, la aplicación del marco de trabajo propuesto es ilustrada mediante un ejemplo. El objetivo de esta sección es mostrar el potencial de la herramienta aplicada a una instalación de una industria afín al sector de la construcción. En concreto, se utiliza el caso de una planta de hormigón dispuesta en un sistema planta-torre. Esta planta está basada en una industria real ubicada en Porcuna (Jaén) y cuenta con cuatro trabajadores. Dado que la empresa no disponía del modelo digital de las instalaciones modeladas en BIM, se realizó su levantamiento digital utilizando el software Autodesk Revit para aplicar el marco de trabajo. En la Figura 7-7 se muestra la imagen del modelo.

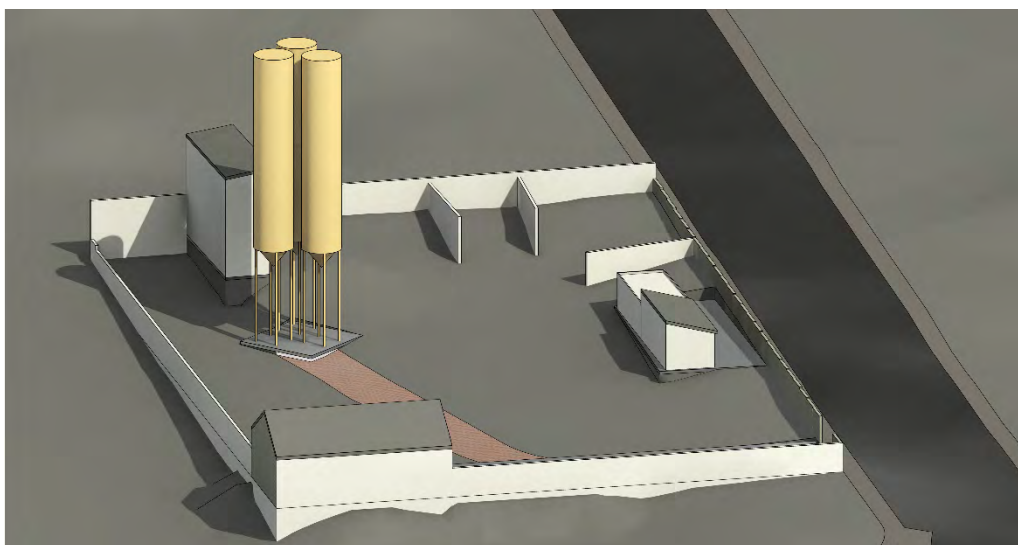


Figura 7-7. Imagen del Modelo digital de las instalaciones en Revit

Las dos principales fuentes de ruido en las instalaciones a campo a abierto de la fábrica son el proceso de carga de camiones hormigonera y un compresor de aire utilizado para tareas de mantenimiento. Los valores de emisión de ambas fuentes utilizados han sido seleccionados de la norma BS 5228-1:2009 (ver Tabla 7-2).

Tabla 7- 2. Valores de emisión de ambas fuentes utilizados han sido seleccionados de la norma BS.

Equipo	Id.	Niveles de presión sonora por banda de octava a 10 m, Hz.								NPS ponderado A, $L_{Aeq,T}$ dB a 10 m
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Camión hormigonera	F1	83	74	69	69	70	78	60	55	80
Compresor de aire manual	F2	84	73	64	59	57	55	58	47	65

A partir de la estructura típica de la programación de operaciones realizadas en la planta de hormigón, se han definido los periodos de activación de ambas fuentes durante la jornada laboral (ver Figura 7-8). Para ello, se ha tenido en cuenta una resolución temporal de 30 minutos en la jornada de 8 horas. La codificación de la matriz se indica 1 si la fuente está activa y 0 si la fuente está inactiva.

$$\begin{pmatrix} F1 \\ F2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 7-8. Ejemplo de codificación de periodo de activación de las fuentes.

Por otro lado, se han definido los puntos receptores en el modelo. Estos puntos son aquellos en los que se ubican los trabajadores para realizar tareas durante la jornada laboral. En este caso de estudio se han identificado un total de 4 puntos receptores (R_1, R_2, R_3, R_4).

Tras la identificación de dichos puntos, se ha generado una matriz en la que se identifican las posiciones en las que están cada uno de los cuatro trabajadores a lo largo de la jornada laboral. A cada trabajador se le ha asignado un código identificador (t_1, t_2, t_3, t_4).

Si durante parte de la jornada laboral el trabajador está fuera de las instalaciones realizando el suministro de hormigón con el camión hormigonera, se ha indicado el código de la actividad (V_H) para considerarlo en el cálculo de la dosis de la exposición (Figura 7-9).

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & R_2 & R_2 \\ R_3 & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H \\ R_3 & R_3 & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H & V_H & V_H & R_1 & V_H \\ R_4 & V_H & V_H & R_4 & V_H & V_H & R_4 & V_H & V_H & V_H & V_H & V_H & V_H & V_H & V_H & V_H \end{pmatrix}$$

Figura 7-9. Ejemplo de atributos asignados a los elementos del modelo.

Para el proceso de simulación se ha seguido el flujo de trabajo descrito en la sección 7.1.1. En primer lugar se definieron la tipología de elementos y se asignaron los atributos identificados en la Tabla 7-1. En la Figura 7-10 se muestra un ejemplo de una de las fuentes con los parámetros definidos en el entorno del software BIM Autodesk Revit.

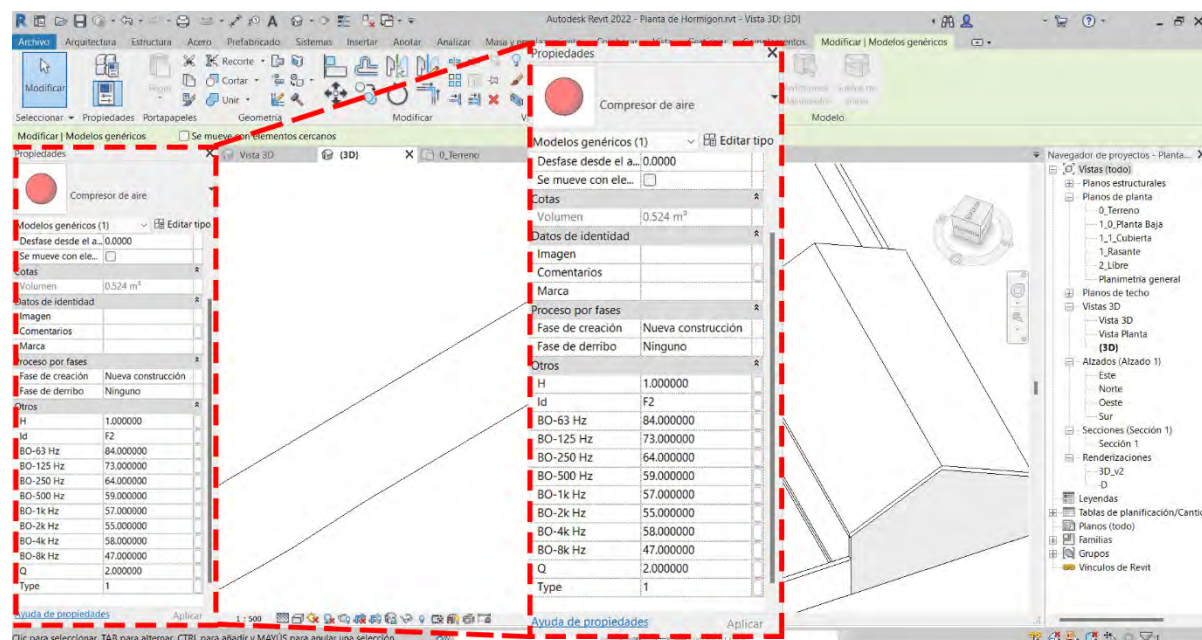


Figura 7-10. Ejemplo de atributos asignados a los elementos del modelo.

En un paso posterior, se definieron la programación de operaciones y la programación diaria y asignación de tareas. La Figura 7-9 muestra un esquema de los datos utilizados como entrada en el marco de trabajo.

Una vez definidos los datos de entrada de la Etapa 1 del marco de trabajo, se procedió a su ejecución y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3. Resultados obtenidos tras ejecutar el marco de trabajo.

Trabajador	$L_{Aeq,d}$ [dBA]	Valores límite de exposición	VLA	VLE
Trabajador (t_1)	89.1	Supera	Supera	Supera
Trabajador (t_2)	80.3	Supera	No supera	No supera
Trabajador (t_3)	80.3	Supera	No supera	No supera
Trabajador (t_4)	72.0	No supera	No supera	No supera

La información proporcionada por el caso de estudio puede ser utilizado por el gestor de la Seguridad y Salud de la empresa para tomar decisiones fundamentadas en datos objetivos y asegurar que los trabajadores no se encuentran expuestos a niveles de ruido que puedan ser perjudiciales para su salud.

7.3. Discusión e implicaciones prácticas

El marco de trabajo propuesto basado en BIM constituye una herramienta para el apoyo en la toma de decisiones en el proceso de gestión de la exposición a ruido de los trabajadores. La metodología BIM ha sido seleccionada porque el modelo paramétrico digital generado con esta metodología proporciona un nuevo paradigma de trabajo a partir de su utilización como base de datos centralizada. Este factor es una de las causas que ha impulsado el uso de la metodología

BIM en el sector de la AIC. No obstante, la metodología BIM está siendo utilizada principalmente durante la fase de diseño de los proyectos y en menor medida en las fases posteriores (construcción, explotación y demolición). En este sentido, el trabajo desarrollado en este capítulo ha explorado el potencial uso de la metodología BIM en una fase de funcionamiento y explotación de las instalaciones, proporcionando una herramienta para gestionar la exposición a ruido en industrias afines al sector de la construcción.

El marco de trabajo calcula el NPS empleando un enfoque basado en la información contenida en el modelo BIM y los datos logísticos (periodos de activación de fuentes de ruido y ubicación de los trabajadores a lo largo de la jornada laboral). Después de obtener el valor de NPS en cada uno de los puntos receptores, el marco de trabajo determina el nivel de exposición diario a ruido ($L_{Aeq,d}$) de cada trabajador. Los resultados se proporcionan al gestor de la Seguridad de la empresa en un informe, el cual sirve de apoyo a la toma de decisiones en el proceso de la planificación de actividades y gestión de la exposición a ruido. La comparación de estos valores con los niveles máximos de exposición a ruido establecidos en la Directiva 2003/10/CE y el RD 286/2006 permite así asegurar que se cumple con la normativa vigente. Con este proceso el marco de trabajo facilita la cuantificación y evaluación del impacto del ruido generado en las instalaciones de la industria sobre la salud de los trabajadores. En consecuencia, el responsable de Seguridad en la empresa puede tomar decisiones fundamentadas en datos objetivos para mitigar el impacto del ruido en los trabajadores.

Además, el marco de trabajo permite identificar si algún punto receptor es un punto crítico debido a un elevado NPS. Esta información se puede utilizar para tomar medidas que mitiguen el impacto del ruido, como por ejemplo desplazar la ejecución dicha tarea a otra ubicación (en caso de que la actividad pudiera realizarse en un punto diferente de las instalaciones), desplazar temporalmente la actividad para que no coincida con los periodos temporales en los que el NPS es elevado o, en caso de que ninguna de las anteriores medidas puedan ser implementadas, utilizar equipos de protección individual para reducir la exposición del trabajador.

Una de las ventajas que presenta el marco de trabajo es que centraliza toda la información necesaria en el propio modelo paramétrico y todo el proceso está integrado en el mismo entorno BIM. Investigaciones previas han planteado el uso de BIM para gestionar la seguridad en la fase de gestión de las instalaciones, pero su planteamiento requiere utilizar software comerciales diferentes al software BIM (ej.: Comsol), los cuales no son de código abierto y limitan la integración de las simulaciones en el entorno BIM (Tan et al., 2019).

No obstante, cabe destacar que el uso del marco de trabajo no se limita a la fase de explotación de la industria, sino que puede también emplearse en la fase de diseño de las instalaciones. Este proceso permite aplicar PtD de las instalaciones para gestionar la exposición a ruido en las mismas. Para ello, durante la fase de diseño pueden incluirse en el modelo las características acústicas de los equipos que se van a adquirir en la industria y utilizar el marco de trabajo para simular cual sería la exposición a ruido que tendrían los trabajadores en dicho escenario. De esta forma, si se detecta que los equipos seleccionados son susceptibles de exponer a los trabajadores a niveles de ruido elevados, puede plantearse su sustitución por otros o cambiar la configuración de las instalaciones y su distribución. Tras realizar los cambios, la distribución espacial y temporal del NPS puede volver a simularse en los puntos donde se encontrarían los trabajadores con ese nuevo diseño de instalaciones.

7.4. Conclusiones y validación de la Hipótesis H4

En resumen, a partir de los resultados mostrados en este capítulo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El marco de trabajo propuesto facilita el cálculo de la exposición a ruido y la evaluación de cada trabajador durante la fase de explotación de la industria. Los resultados proporcionados por el marco de trabajo pueden compararse con los límites establecidos en la normativa vigente y valorar su cumplimiento. En consecuencia, se facilita el proceso de evaluación de la exposición y se proporciona información clave en el proceso de toma de decisiones para proteger la salud del trabajador frente a este agente físico.
- Las tres etapas que componen el marco de trabajo se ejecutan en el mismo entorno BIM. Esta característica facilita la concentración de toda la información del proyecto (incluida la relativa a las características acústicas y la exposición de los trabajadores) en una única base de datos. Además, la información relativa a cada trabajador sobre la exposición diaria a niveles de ruido se incluye en una base de datos que permite realizar un seguimiento de su exposición a lo largo del tiempo. Esto permite no solamente realizar la evaluación de la exposición a nivel diario, sino disponer de datos que permiten evaluar la exposición semanal y a largo plazo.
- El marco metodológico puede adaptarse a cualquier industria cuyos trabajadores realicen actividades en sus instalaciones en campo abierto. En este sentido, su aplicación no se limita únicamente a la industria analizada en el caso ilustrativo, sino que podría aplicarse a otras industrias que realizan actividades vinculadas al sector de la construcción (ej.: tratamiento de residuos, extracción de materias primas en canteras, etc.) De hecho, el requisito necesario para su implementación es disponer de las características de las fuentes de ruido en la industria y el modelo digital BIM de la misma.

Cabe destacar que el marco de trabajo puede aplicarse tanto en la fase de explotación y funcionamiento de la industria, como en la fase de diseño de la misma. Es decir, aplicar durante la fase de diseño la metodología BIM y el marco de trabajo propuesto permite simular los valores espacio-temporal del NPS cuando la industria esté en funcionamiento. En este sentido, este procedimiento permite valorar cual será el impacto del ruido en los trabajadores y tomar medidas desde la fase de diseño de las instalaciones. Este enfoque contribuye a aplicar un proceso de PtD (Gambatese, 2000; Gambatese et al., 1997) mediante la consideración explícita de la seguridad de los trabajadores frente a la exposición a ruido cuando se diseñan las actividades e instalaciones. En consecuencia, este enfoque contribuye a incluir la Seguridad frente a la exposición a ruido como otro aspecto más en el diseño de las instalaciones, al mismo nivel que los costes o la funcionalidad.

Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos en nuestra investigación, se valida la Hipótesis H4 planteada en el Capítulo 2, ya que la metodología BIM ha sido utilizada como base para el desarrollo de un Marco de Trabajo para la Gestión de la Exposición a Ruido.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN • CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES

En este Capítulo se presentan las **Conclusiones** obtenidas.

Se resumen los resultados alcanzados en la investigación que se ha llevado a cabo, comprobando que se han conseguido los objetivos planteados al comienzo de la investigación, tanto el General como los Específicos.

Siguiendo el esquema planteado en el Capítulo 1 (Figura 1.2), los resultados obtenidos tras la investigación realizada, y que figuran en los distintos capítulos de esta Memoria de Tesis Doctoral, se relacionan con el objetivo al que dan respuesta.

El capítulo finaliza con la presentación de nuevas ideas o propuestas que pueden llevarse a cabo partiendo de la investigación realizada. Figuran bajo el epígrafe **Futuras líneas de investigación**.

8.1. Versión castellano

8.1.1. Conclusiones

El Objetivo General de la investigación que se presenta en esta Memoria de Tesis Doctoral ha sido: Desarrollar Nuevas Metodologías para la Gestión de la Exposición a Agentes Físicos en Industrias del sector de la Construcción, que suponen un cambio de enfoque en el modelo actual como resultado de la implementación de Nuevas Tecnologías basadas en la Gestión de la Información. Para ello, por un lado, se ha propuesto una Metodología para la Gestión de la Exposición a largo plazo a VCE en conductores de maquinaria pesada. A partir de esta propuesta se ha diseñado un Marco de Trabajo, implementado en GIS, para la Optimización del Diseño de Rutas basado en la minimización de la exposición a VCE y el rendimiento del trabajo. Por otro lado, se ha propuesto una Metodología, diseñada en un entorno BIM, para la Gestión de la Exposición al Ruido producido en las propias instalaciones de la industria, basado en la modelización de las fuentes y la simulación de la propagación del ruido en las instalaciones, que permite evaluar el nivel de exposición a ruido de los trabajadores a lo largo de la jornada laboral.

En este contexto, el trabajo de investigación desarrollado para la consecución del Objetivo General ha resultado en las siguientes aportaciones:

Para dar respuesta al **O1**, en el **Capítulo 2**, se ha desarrollado un análisis de los Agentes Físicos a los que están expuestos quienes trabajan en las industrias afines al sector de la Construcción, así como los riesgos para su salud teniendo en cuenta los límites de exposición permitidos legalmente. Para llevar a cabo este análisis se ha realizado una revisión del estado del conocimiento. Esta revisión ha permitido identificar que: (1) las actividades económicas con mayor riesgo de exposición a ruido y vibraciones pertenecen al sector de la construcción y al industrial; y, (2), que en la actualidad existen deficiencias en los métodos empleados para gestionar la exposición a ruido y el nivel de cumplimiento de la directiva 2002/44/CE de vibraciones es muy pobre en España. De hecho, en este análisis se ha identificado que estos riesgos físicos no se encuentran únicamente en los emplazamientos de obras del sector de la Construcción, sino que existe un amplio número de trabajadores de industrias vinculadas a este sector que también se encuentran expuestos a estos agentes (por ejemplo, el caso de la conducción de maquinaria y vehículos pesados, así como las actividades realizadas en las instalaciones de estas industrias).

Además, se han analizado las herramientas y metodologías empleadas para la gestión de dichos riesgos en el sector de la Construcción a partir de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones actuales. En este proceso se ha revisado la literatura científica existente, valorando el potencial uso de las metodologías BIM y GIS para mejorar los sistemas de gestión de exposición a Agentes Físicos.

Para alcanzar el **O2**, en el **Capítulo 4** se describe la realización del trabajo de campo necesario para identificar la presencia de Agentes Físicos en industrias cuya actividad está vinculada al sector de la Construcción (una planta de producción de hormigón y una planta de gestión de residuos de la construcción). Ninguna de las dos empresas disponía de un historial de exposición a VCE y ruido

de los trabajadores. Los resultados obtenidos a partir de las campañas de medición desarrolladas en ambas industrias han puesto de manifiesto que los trabajadores se encuentran expuestos a riesgos físicos en su lugar de trabajo. Por lo tanto, a la vista de los resultados, concluimos que:

- Los datos obtenidos de la campaña de medición desarrollada en las instalaciones de ambas plantas muestran que los trabajadores pueden estar expuestos a niveles de ruido elevados que, en algunos casos, pueden sobrepasar los niveles de exposición establecidos en la Directiva Europea de Ruido. Sin embargo, los niveles de VCE a los que se encuentran expuestos los trabajadores que realizan tareas en las instalaciones de ambas empresas son muy inferiores a los límites establecidos en la Directiva Europea de vibraciones.
- Las actividades desarrolladas fuera de las instalaciones de la planta de hormigón muestran un elevado nivel de exposición a VCE a los conductores de camiones. En el interior de los vehículos el nivel de ruido es bajo, sin embargo, la salud de los conductores puede sufrir efectos adversos como consecuencia de la exposición a VCE.

Estos resultados han permitido identificar la presencia de ambos Agentes Físicos en dos escenarios claramente diferenciados:

- VCE en actividades desarrolladas fuera de las instalaciones, *off-site*; es decir, el transporte de materiales desde el emplazamiento de la planta a los puntos de entrega o recogida.
- Ruido en Actividades desarrolladas dentro de las instalaciones, *on-site*; es decir, actividades que tienen lugar dentro de la planta industrial

A partir de este análisis se han identificado los retos a explorar en el proceso de desarrollo de metodologías y marcos de trabajo para la gestión de la exposición en ambos escenarios, considerando las metodologías empleadas para la evaluación y los sistemas de gestión de información a implementar.

El análisis de las herramientas y las metodologías existentes para la gestión de la exposición a VCE presentes en conductores profesionales de vehículos pesados (O3) se muestran en el **Capítulo 5**. Para ello se analizaron los métodos definidos en las normas ISO2631-1 y 2631-5 (ambas versiones de esta última, la de 2004, y la recién publicada en 2018). En el diseño experimental se consideraron diferentes condiciones de superficie de desplazamiento y velocidad, así como diferentes características antropométricas de dos conductores (uno con IMC normal y el otro con IMC alto), permitiendo así analizar y comparar los diferentes factores implicados.

Los resultados obtenidos mostraron que el tipo de superficie de desplazamiento y la velocidad de avance son factores importantes dado que condicionan la magnitud de la exposición transmitida al trabajador y se deben tener en cuenta en el proceso de evaluación.

Por otro lado, respecto a la comparación de los modelos aplicados de evaluación de exposición a VCE, a corto y largo plazo, los métodos proporcionaron valoraciones diferentes:

En relación a los modelos de evaluación a corto plazo:

- El método VDV proporciona evaluaciones más restrictivas a las exposiciones que contienen múltiples choques al evaluar la exposición diaria para ambos conductores frente al resto de métodos.

- La evaluación proporcionada por la dosis compresiva equivalente, tanto S_d^A (ISO2631-5:2018) como S_{ed} (ISO2631-5:2004), indican que la probabilidad de sufrir efectos adversos sobre la salud es baja para ambos conductores considerando la misma exposición a corto plazo.
- Si se compara el método S_d^A , que considera las características antropométricas y la postura del conductor, con el S_{ed} , se observa que la inclusión de este tipo de características influye en la evaluación a la exposición. Del análisis realizado se extrae que, en el caso del conductor 1 (IMC alto) se subestimaba la dosis de exposición con el modelo de 2004, en comparación del conductor 2 (IMC normal), al cual se sobreestimaba su dosis.

En lo referente a los métodos de evaluación de los efectos acumulativos de la exposición a VCE a largo plazo:

- La evaluación proporcionada por el Factor R (ISO2631-5:2004) valora que ninguno de los dos conductores sobrepasa el límite de probabilidad de sufrir efectos adversos sobre su salud antes de finalizar su vida laboral. Por el contrario, la evaluación proporcionada por el Factor R^A (ISO2631-5:2018) muestra que si bien el conductor 2 (IMC normal) no sobrepasaría dicho límite, si lo hiciera el conductor 1 (IMC alto) el cual lo sobrepasaría antes de los 65 años de edad en las operaciones realizadas en las tres superficies más irregulares.
- El Factor R proporciona un valor superior para el conductor 2 (IMC normal) que para el conductor 1 (IMC alto). Al contrario que el modelo que considera las características antropométricas, siendo el Factor R^A más restrictivo para el conductor 1 que para el conductor 2.

Cabe destacar que la posibilidad de evaluar el efecto acumulativo de la exposición a VCE a largo plazo permite prever si la salud del trabajador se verá comprometida, lo cual es esencial para garantizar que las actividades son seguras. Sin embargo, la Directiva 2002/44/CE solo considera la evaluación diaria de la exposición, lo que puede causar que una exposición sea considerada segura cuando a largo plazo los efectos acumulativos pueden causar efectos adversos para la salud del trabajador.

La propuesta de una Metodología y Desarrollo de un Marco de Trabajo basado en GIS para la Gestión de la Exposición a VCE que constituye el **O4**, se recoge en el **Capítulo 6**. Se presenta una nueva metodología de gestión de la exposición a largo plazo a VCE que considera las diferentes condiciones de superficie de desplazamiento y velocidad, factores importantes identificados en el Capítulo 5 a considerar en el proceso de evaluación. Posteriormente, dado que la exposición a VCE está asociada a la conducción de vehículos en rutas fuera de las instalaciones, la metodología se implementa en un sistema GIS con el objetivo de proporcionar una herramienta para la gestión y reducción de la exposición a VCE durante el diseño de dichas rutas. En relación a la nueva metodología de gestión cabe destacar que:

- La metodología propuesta considera las diferentes condiciones de superficie de desplazamiento y velocidad en el proceso de gestión de la exposición a VCE a largo plazo. Bajo estas consideraciones, se realiza la parametrización de la evolución del Factor R^A a lo largo del tiempo para cada perfil de exposición. Este proceso permite calcular, para cualquier año, cual es la probabilidad de que el trabajador sufra efectos adversos sobre su salud en cada escenario.

- La generación de superficies mediante el modelo de ajuste bidimensional de la parametrización del Factor R^A proporciona un mapa de color donde se muestra la probabilidad de riesgo, para cada superficie, en función de la velocidad a la que se realiza la operación y los años que el trabajador está expuesto de forma acumulada a VCE.
- La información proporcionada por la metodología propuesta es esencial para asegurar que la gestión de la exposición a VCE a largo plazo se realiza correctamente. Además, facilita la tarea de diseñar operaciones de forma óptima y establecer medidas organizacionales adecuadas.
- Además, se ha generado una biblioteca de funciones en el software Matlab que permite la aplicación directa de la metodología propuesta. Complementariamente, también se han incluido en la biblioteca los métodos definidos en la ISO2631-1 para incorporar la evaluación de acuerdo con los límites legales establecidos en la Directiva 2002/44/CE.

Por otro lado, en cuanto a la implementación de la metodología propuesta en el marco de trabajo basado en GIS, entre las principales contribuciones destacan:

- Este marco de trabajo contribuye a aumentar el conocimiento sobre la Seguridad y Salud de los trabajadores de industrias vinculadas al sector de la Construcción, teniendo en cuenta que reduce la brecha de investigación surgida en la literatura sobre los problemas relacionados con las VCE transmitidas a los conductores de vehículos pesados en este ámbito.
- El marco de trabajo contribuye a mitigar los efectos de las VCE sobre los trabajadores dado que proporciona la ruta que minimiza tanto la exposición del conductor a VCE como el tiempo invertido en realizarla.
- El marco de trabajo es flexible, es decir, los requisitos para su aplicación son: disponer de la red de carreteras y del modelo MDE del área objeto de estudio. Además, los resultados obtenidos tras su aplicación pueden incorporarse a una base de datos y generar un histórico de exposición a VCE de cada trabajador. Este proceso facilita evaluar la exposición a VCE a largo plazo y realizar un seguimiento de la probabilidad de riesgo derivada de los efectos acumulativos de la exposición a VCE.

Al último objetivo, **O5**, se da respuesta en el **Capítulo 7**, en el que se presentando un Marco de trabajo basado en BIM para la Gestión de la Exposición al Ruido durante los trabajos realizados en las instalaciones de la industria. Entre las principales ventajas derivadas de la contribución presentada en este capítulo destacan:

- El marco de trabajo propuesto en BIM permite incluir la información relativa a la exposición de los trabajadores a ruido en el modelo, así como las características acústicas de las fuentes de ruido presentes en las instalaciones. La inclusión de esta información en una única base de datos proporciona una mejora significativa en la integridad de los datos, dado que no es necesario importar o exportar información para evaluar la exposición. Además, se reduce el esfuerzo de los gestores de Seguridad y Salud en el proceso de consulta, análisis y toma de decisiones.
- EL marco de trabajo calcula automáticamente el nivel de ruido al que está expuesto cada trabajador a partir de la planificación de las operaciones y las actividades asignadas a cada uno de ellos. La visualización de estos resultados en el mismo entorno de BIM facilita la

toma de decisiones para minimizar el impacto del ruido sobre los trabajadores. Los gestores de Seguridad y Salud pueden tomar medidas que modifiquen la disposición de las instalaciones y equipamientos, medidas organizativas y preventivas para así reducir el nivel de exposición a ruido cuando sea superior a los límites legales establecidos.

- El marco de trabajo es flexible, pues en caso de que se incluyan nuevas fuentes generadoras de ruido como, por ejemplo, la adquisición de nuevos equipos, la renovación de los existentes, etc., se pueden incluir fácilmente en el modelo BIM para considerar su impacto en el nivel de ruido al que se encuentran expuestos los trabajadores.

Cabe destacar que las aportaciones realizadas para dar respuestas a los O4 y O5, constituyen nuevas herramientas que contribuyen a mejorar la calidad de vida de los trabajadores durante sus años de vida laboral y posterior jubilación, ya que ambas proporcionan una evaluación a partir del diseño de actividades y generan una base de datos que permite realizar una evaluación a largo plazo de la exposición a estos agentes físicos. En el contexto actual, donde se ha producido un aumento de la esperanza de vida y se ha atrasado la edad de jubilación, el padecimiento de enfermedades causadas por los efectos acumulativos de la exposición a estos Agentes Físicos es más probable bajo estas circunstancias. Por lo tanto, es de vital importancia implementar metodologías y herramientas de gestión que evalúen la exposición considerando toda la vida laboral del trabajador.

Además, su aplicación contribuye a aumentar los conocimientos en materia de Seguridad en el sector de la Construcción y a fomentar el uso de las mejores prácticas para reducir la exposición a VCE y ruido. Estas herramientas proporcionan al gestor de la Seguridad y Salud información clave para realizar una Evaluación de los riesgos, así como para establecer una base para posteriores investigaciones sobre la PtD de operaciones en el sector de la Construcción. Ambas propuestas contribuyen al desarrollo del Marco Estratégico de la UE sobre Salud y Seguridad en el Trabajo 2014-2020 (Bruselas, 6.6.2014COM 2014) en dos de sus tres grandes retos en materia de Seguridad y Salud en el trabajo: permiten mejorar la prevención de las enfermedades relacionadas con el trabajo, a la vez que tiene en cuenta el envejecimiento de la población activa de la Unión Europea. Además, favorece la consecución de uno de los objetivos del Nuevo marco estratégico de la UE sobre Salud y Seguridad en el trabajo 2021 - 2027, consistente en la mejora de la prevención de los accidentes y las enfermedades en el lugar de trabajo.

Finalmente, cabe decir que las aportaciones generadas han permitido alcanzar con éxito el Objetivo General, y principal, definido en la etapa inicial de la presente Memoria de Tesis Doctoral. Las aportaciones suponen una contribución a los Sistemas de Gestión de Agentes Físicos en el sector de la Construcción y, al mismo tiempo, han generado perspectivas de trabajo futuro que suponen el inicio de una nueva línea de investigación la cual se describe en la siguiente sección.

8.1.2. Futuras Líneas de Investigación

Entre las futuras líneas de trabajo derivadas de la investigación que se presenta en esta Memoria de Tesis Doctoral se encuentran:

- La integración de ambos marcos de trabajo en un único sistema interconectando BIM y GIS. El sistema resultante puede facilitar la gestión, evaluación, toma de decisiones y visualización de la información en una única plataforma. Al compartir e intercambiar información entre BIM y GIS, se posibilita la evaluación conjunta de la exposición a ambos Agentes Físicos, facilitando la realización de un proceso de gestión que minimice la exposición a ruido y VCE a la vez que se maximice el rendimiento.
- Una extensión natural del trabajo actual implica la interconexión de los marcos de trabajo con dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) y la monitorización a tiempo real. En el caso del marco de trabajo desarrollado en GIS, también podría combinarse con otros criterios para lograr una optimización integral basada en la planificación de rutas en tiempo real que se apoye en el flujo de tráfico combinado con el índice de evaluación de VCE, lo que, además, podría ser de interés en otras aplicaciones. En el caso del marco de trabajo implementado en metodología BIM, incluir una monitorización a tiempo real permitiría considerar situaciones no previstas y proporcionar información para la gestión de estos escenarios.
- Ambos marcos de trabajo se podrían adaptar para ser aplicados a los propios emplazamientos de ejecución de obras. En los dos casos, esta propuesta implica vincular las condiciones cambiantes de la obra de forma automática. El siguiente paso será seguir desarrollando los marcos de trabajo para minimizar la exposición de los trabajadores de la construcción a la VCE y ruido, al tiempo que se maximiza la productividad en un proceso de optimización en tiempo real.

8.2. English Version

8.2.1. Conclusions

The main objective of this thesis has been the Development of New Methodologies for the management of exposure to Physical Agents in Industries of the Construction Sector, which represent a change of approach as a result of the implementation of New Technologies based on Information Management. For this purpose, a Methodology for the Management of Long-Term Exposure to WBV in Heavy Equipment Drivers has been first proposed. Based on this proposal, a GIS-based Framework has been developed for the optimising criteria of minimizing travel time and whole-body vibration (WBV) exposure. Secondly, a BIM-based methodology has been proposed for the Management of Noise Exposure in the industry's own facilities. This approach is based on the modelling of the noise sources and the simulation of the noise propagation in the facilities, which allows the level of noise exposure of workers to be evaluated.

In this context, the research work developed in this doctoral dissertation to achieve the Main Objective has resulted in the following contributions:

In order to address **O1**, in **Chapter 2**, an analysis of the Physical Agents to which workers in industries related to the construction sector are exposed, as well as the risks to their health, has been developed. This process has taken into account the legally permitted exposure limits. For the purpose of this analysis, a review of the state of knowledge has been carried out. This review has revealed that: (1) vibration belong to the Construction and Industrial sectors; and, (2) that there are currently deficiencies in the methods used to manage noise exposure and the level of compliance with the 2002/44/EC vibration directive is very poor in Spain. In fact, this analysis has identified that these physical risks are not only found at construction sites, but that there are a large number of workers in industries related to the Construction sector who are also exposed to these agents (e.g., the case of driving HEV, as well as the activities carried out in the facilities of these industries).

In addition, the tools and methodologies used for the management of these risks in the construction sector have been analyzed based on current Information and Communication Technologies. In this process, the scientific literature has been reviewed and the potential use of BIM and GIS methodologies to improve the management systems of exposure to physical agents has been assessed.

Subsequently, in order to address **O2**, **Chapter 4** describes the field work developed to identify exposure to Physical Agents in industries whose activity is linked to the Construction sector (a concrete production plant and a construction waste management plant). None of the two companies had a history of exposure to WBV and noise of the workers. The results obtained from the field measurement campaigns carried out in both industries have shown that workers are exposed to physical hazards in their workplace. Therefore, in view of the results, we conclude that:

- The data obtained from the measurement campaign carried out at the facilities of both plants show that workers may be exposed to high noise levels that, in some cases, may exceed the exposure limits established in the European Noise Directive. However, the WBV exposure of workers performing tasks at the facilities of both companies are well below the limits established in the European Vibration Directive.

- Regarding the activities carried out outside the concrete plant facilities, the results showed that concrete mixer truck drivers are exposed to high levels of WBV. Inside the vehicles, the noise level is low; however, drivers' health may suffer adverse effects as a result of exposure to WBV

These results have identified exposure to both physical agents in two clearly differentiated scenarios:

- Exposure to WBV in activities performed outside the facilities, off-site; i.e., the transport of materials from the plant site to the delivery or collection points.
- Noise exposure during on-site activities, i.e., activities that take place within the industrial plant.

On the basis of this analysis, we have identified challenges to be explored in the process of developing methodologies and frameworks for exposure management in both scenarios. Furthermore, the assessment methodologies and the information management systems have been considered in this process.

The analysis of existing tools and methodologies for the management of exposure to VCE present in professional drivers of heavy vehicles (O3) are shown in **Chapter 5**. For this purpose, the methods defined in the ISO2631-1 and 2631-5 standards (both versions of the latter, the one from 2004, and the recently published one in 2018) were analyzed. The experimental design considered different travel surface and speed conditions, as well as different anthropometric characteristics of two drivers (one with normal BMI and the other with high BMI). Therefore, it has been possible to analyze and compare the different factors involved.

The obtained results showed that the type of travel surface and travel speed are important factors, as they influence the magnitude of WBV exposure. Therefore, both factors should be taken into account in the WBV assessment process. Moreover, with respect to the comparison of short- and long-term WBV exposure assessment models, both methods provided different assessments.

Regarding the short-term assessment models:

- The VDV method provides more restrictive assessments to exposures containing multiple shocks for both drivers compared to the other methods.
- The assessment provided by the equivalent compressive dose, both S_d^A (ISO2631-5:2018) and S_{ed} (ISO2631-5:2004), indicated that the probability of adverse health effects is low for both drivers considering the same short-term exposure.
- The comparison of the S_d^A method, which considers the anthropometric characteristics and posture of the driver, with the S_{ed} method, showed that the incorporation of the driver's characteristics influences the exposure assessment. From the analysis carried out it can be seen that, in the case of driver 1 (high BMI), the exposure dose was underestimated with the 2004 model, compared to driver 2 (normal BMI), whose dose was overestimated.

Regarding methods for assessing the cumulative effects of long-term WBV exposure:

- The assessment provided by the R Factor (ISO2631-5:2004) estimates that none of the drivers exceeds the limit of probability of suffering adverse health effects before the end of his working life. On the contrary, the assessment provided by the R^A Factor (ISO2631-5:2018) shows that while driver 2 (normal BMI) would not exceed this limit, driver 1 (high

BMI) would exceed it before the age of 65 for the operations performed on the three most uneven surfaces.

- The R Factor provides a higher value for driver 2 (normal BMI) than for driver 1 (high BMI). Contrary to the model that considers anthropometric characteristics, the R^A Factor is more restrictive for driver 1 than for driver 2.

It should be noted that the possibility of assessing the cumulative effect of WBV exposure over the years is essential to ensure that activities are safe, since it is possible to predict whether the worker's health will be compromised. Nevertheless, Directive 2002/44/EC only considers the daily assessment of WBV exposure, which may cause an exposure to be considered safe when in the long term the cumulative effects may cause adverse effects on the worker's health.

The proposal of a new Methodology and the Development of a GIS-based Framework to manage WBV Exposure, which constitutes **O4**, is presented in **Chapter 6**. A new methodology to manage long-term WBV exposure is presented. This methodology considers the different travel surface conditions and travel speed, which are important factors identified in Chapter 5 to be considered in the assessment process. Afterwards, since WBV exposure is related with driving vehicles on off-site routes, the methodology is implemented in a GIS-based framework with the objective of providing a tool for the management and reduction of WBV exposure during the design of such routes. On the one hand, in relation to the new management methodology it should be noted that:

- The proposed methodology considers the different travel surface conditions and velocity in the process of managing long-term WBV exposure. Under these considerations, the parameterization of the evolution of the R^A Factor over time for each exposure profile is performed. This process provides, which is the worker's probability of suffering adverse health effects in each scenario for each year.
- The surface generated by the two-dimensional adjustment model of the R^A Factor parameterization provides a color map. These diagrams show the probability of risk, for each surface, as a function of the speed at which the operation is performed and the years that the worker is cumulatively exposed to WBV.
- The information provided by the proposed methodology is essential to ensure that the management of long-term WBV exposure is carried out properly. In addition, it also supports the optimal design of tasks and organizational measures.
- Additionally, a library of functions has been generated in Matlab software in order to facilitate a direct application of the proposed methodology. Complementarily, the methods defined in ISO2631-1 have also been included in the library to include the evaluation in accordance with the legal limits established in Directive 2002/44/EC.

On the other hand, regarding the implementation of the proposed methodology in the GIS-based framework, the main contributions include:

- This framework contributes to increase the knowledge about the Safety and Health of workers in industries linked to the Construction sector. It contributes to reduce the research gap that has emerged in the literature on the problems related to WBV transmitted to heavy vehicle drivers in this field.
- This framework contributes to mitigating the effects of WBV on workers by providing the route that minimizes both the driver's WBV exposure and the time spent performing it.

- The framework is flexible, i.e., the only requirements for its application are the availability of the road network and the digital elevation model of the area under study. In addition, the results obtained after its application can be incorporated into a database and they can generate a history of WBV exposure of each worker. This process facilitates the evaluation of long-term exposure to WBV and the monitoring of the probability of risk derived from the cumulative effects of them.

As for the last objective, **O5**, it is addressed in **Chapter 7**, in which a BIM-based Framework to manage Noise Exposure during tasks performed in industrial facilities is presented. The main advantages derived from the contribution presented in this chapter are outlined below:

- The proposed BIM-based framework enables the inclusion of information regarding worker noise exposure in the BIM model, as well as the acoustic characteristics of the noise sources from the industrial facility. The integration of this information into a single database provides a significant improvement in data integrity, since it is not necessary to import or export information to assess exposure. In addition, it reduces the effort of Safety managers in the process of consultation, analysis and decision making.
- The framework automatically calculates the noise level to which each worker is exposed based on the planning of the operations and activities assigned to each worker. The visualization of these results in the BIM environment facilitates the decision making to minimize the impact of noise on workers. Safety managers can take measures to modify the layout of installations and equipment, take organizational and preventive measures to reduce the level of noise exposure when it exceeds the established legal limits.
- The framework is flexible, since in case of new noise sources were included (such as the acquisition of new equipment, renovation of existing equipment, etc.), they can be easily comprised in the BIM model in order to consider their impact on the noise level to which workers are exposed.

It should be noted that the contributions made to address O4 and O5 constitute new tools that contribute to improving the quality of life of workers during their working life and subsequent retirement. Both frameworks provide a design-based assessment of activities and generate a database of worker exposure history. In the current context, the development of diseases caused by the cumulative effects of exposure to these physical agents is more likely given that life expectancy has increased and retirement age has been delayed. Therefore, it is essential to implement methodologies and management tools that assess exposure considering the entire working life of the worker.

In addition, their application contributes to increasing Safety knowledge in the Construction sector and encouraging the use of best practices to reduce exposure to WBV and noise. These tools provide key information to perform a Risk Assessment to the Safety manager, as well as to establish a basis for further research on the PtD of operations in the Construction sector. Both proposals contribute to the development of the EU Strategic Framework on Health and Safety at Work 2014-2020 (Brussels, 6.6.2014COM (2014)) in two of its three major challenges in the field of Safety and Health at Work, i.e., they allow to improve the prevention of work-related diseases, the improvement of the prevention of work-related diseases, considering the aging of the EU workforce. In addition, it supports the achievement of one of the objectives of the new EU strategic

framework on occupational health and safety at work 2021 - 2027, which is to improve the prevention of accidents and illnesses in the workplace.

Finally, it should be highlighted that the contributions generated have successfully achieved the General and main Objective defined in the initial stage of this thesis dissertation. The findings represent a contribution to the Management Systems of Exposure to Physical Agents in the Construction sector and, at the same time, have generated future work perspectives that represent the beginning of a new line of research which is described in the following section.

8.2.2. Future research lines

Future lines derived from the research presented in this thesis dissertation include:

- The integration of both frameworks into a single system interconnecting BIM and GIS. The resulting system will enhance the management, evaluation, decision making and visualization of information on a single platform. The combined assessment of exposure to both Physical Agents is enabled by sharing and exchanging information between BIM and GIS. As a result, a management process that minimizes noise and VCE exposure while maximizing performance will be facilitated.
- A natural extension of the current work would involve the interlock with Internet of Things (IoT) devices and real time monitoring. In the case of the GIS-based framework, it could also be combined with other criteria to achieve a comprehensive optimization based on real-time route planning that relies on traffic flow combined with the WBV index, which could also be of interest in other applications. A natural extension of the current work would involve the interlock with Internet of Things (IoT) devices and real time monitoring. In the case of the GIS-based framework, it could also be combined with other criteria to achieve a comprehensive optimization based on real-time route planning that relies on traffic flow combined with the WBV index, which could also be of interest in other applications. Regarding the BIM-based framework, including real-time monitoring would allow considering unforeseen situations and provide information for the management of these scenarios.
- Both frameworks could be adapted to be applied to construction sites. In both cases, this proposal would involve that the changing construction site conditions should be linked automatically. The next step will be to further develop the frameworks to minimize the exposure of construction workers to WBV and noise, while maximizing productivity in a real-time optimization process.

REFERENCIAS

- Abolhoseini, S., & Alesheikh, A. A. (2020). A new algorithm to consider critical length of grades in raster-based least-cost path analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06018-x>
- Adam, S. A., & Jalil, N. A. A. (2017). Vertical Suspension Seat Transmissibility and SEAT Values for Seated Person Exposed to Whole-body Vibration in Agricultural Tractor Preliminary Study. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.070>
- Aguilar, A. J., de la Hoz-Torres, M. L., Martínez-Aires, M. D., & Ruíz, D. P. (2019). Review of health and safety management based on BIM methodology= Revisión de la gestión de seguridad y salud basada en la metodología BIM. *Building & Management*, 3(2), 16-22. <https://doi.org/10.20868/bma.2019.2.3919>
- Aires, M. D. M., Gámez, M. C. R., & Gibb, A. (2010). Prevention through design: The effect of European Directives on construction workplace accidents. *Safety science*, 48(2), 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.09.004>
- Arthur, D., & Vassilvitskii, S. (2007). *k-means++: The advantages of careful seeding* In SODA '07: Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms. <https://doi.org/10.1145/1283383.1283494>
- Baffoe, P. E., Duker, A. A., & Senkyire-Kwarteng, E. V. (2022). Assessment of health impacts of noise pollution in the Tarkwa Mining Community of Ghana using noise mapping techniques. *Global Health Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2022.01.005>
- Bakusic, J., Lenderink, A., Lambreghts, C., Vandenbroeck, S., Verbeek, J., Curti, S., . . . Godderis, L. (2018). *Alert and sentinel approaches for the identification of work-related diseases in the EU*. European Risk Observatory Report. European Agency for Safety and Health at Work. Luxembourg. Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/publications/summary-alert-and-sentinel-approaches-identification-work-related-diseases-eu>. Fecha de acceso: 12 de Enero, 2022.
- Ballesteros, M. J., Fernández, M. D., Quintana, S., Ballesteros, J. A., & González, I. (2010). Noise emission evolution on construction sites. Measurement for controlling and assessing its impact on the people and on the environment. *Building and Environment*, 45(3), 711-717. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.011>
- Banbury, S. P., & Berry, D. C. (2005). Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvements. *Ergonomics*, 48(1), 25-37. <https://doi.org/10.1080/00140130412331311390>
- Barber, J. R., Burdett, C. L., Reed, S. E., Warner, K. A., Formichella, C., Crooks, K. R., . . . Fristrup, K. M. (2011). Anthropogenic noise exposure in protected natural areas: Estimating the scale of ecological consequences. *Landscape Ecology*, 26(9), 1281-1295. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9646-7>
- Belle, I. (2017). The architecture, engineering and construction industry and blockchain technology. *Digital Culture*, 2017, 279-284.
- Blood, R. P., Rynell, P. W., & Johnson, P. W. (2012). Whole-body vibration in heavy equipment operators of a front-end loader: Role of task exposure and tire configuration with and without traction chains. *Journal of safety research*, 43(5-6), 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2012.10.006>
- Blood, R. P., Yost, M. G., Camp, J. E., & Ching, R. P. (2015). Whole-body vibration exposure intervention among professional bus and truck drivers: a laboratory evaluation of seat-suspension designs. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 12(6), 351-362. <https://doi.org/10.1080/15459624.2014.989357>
- Bodini, I., Lancini, M., Magalini, A., & Vetturi, D. (2007). *Evaluation of the felt comfort on a bus: A preliminary study* Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84896267226&partnerID=40&md5=8701eb7cade1f8b5ef145100132ed833>
- Bovenzi, M., & Betta, A. (1994). Low-back disorders in agricultural tractor drivers exposed to whole-body vibration and postural stress. *Applied Ergonomics*, 25(4), 231-241. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0003-6870(94)90004-3)

- Bovenzi, M., Schust, M., & Mauro, M. (2017). An overview of low back pain and occupational exposures to whole-body vibration and mechanical shocks. *Medicina Del Lavoro*, 108(6), 419-433. <https://doi.org/10.23749/mdl.v108i6.6639>
- BS 5228-1:2009+A1:2014. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Part 1: Noise. https://www.warrington.gov.uk/sites/default/files/2020-08/cf53_bs_5228_pt1-2009a1-2014.pdf
- BuHamdan, S., Duncheva, T., & Alwisy, A. (2021). Developing a BIM and Simulation-Based Hazard Assessment and Visualization Framework for CLT Construction Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(3), 04021003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002000](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002000)
- Burström, L., Nilsson, T., & Wahlström, J. (2015a). Whole-body vibration and the risk of low back pain and sciatica: a systematic review and meta-analysis. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88(4), 403-418. <https://doi.org/10.1007/s00420-014-0971-4>
- Burström, L., Nilsson, T., & Wahlström, J. (2015b). Whole-body vibration and the risk of low back pain and sciatica: a systematic review and meta-analysis. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 88(4), 403-418. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00420-014-0971-4>
- Butorina, M., Drozdova, L., & Kuklin, D. (2019). Implementation of noise data into building information model for transport and industrial noise reduction. *Akustika*, 34, 9-14. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079505179&partnerID=40&md5=64ab729a189677f508384293e2100add>
- Butorina, M., Drozdova, L., Kuklin, D., Sharkov, A., Aref'Ev, K., Sopozhnikov, S., . . . Muhametova, L. (2019). Implementation of noise data into building information model (BIM) to reduce noise in the environment and at workplace IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076155534&doi=10.1088%2f1755-1315%2f337%2f1%2f012083&partnerID=40&md5=cc065a88db147ddea71f08d372b0b723>
- Cann, A. P., Salmoni, A. W., Vi, P., & Eger, T. R. (2003). An exploratory study of whole-body vibration exposure and dose while operating heavy equipment in the construction industry. *Applied occupational and environmental hygiene*, 18(12), 999-1005. <https://doi.org/10.1080/715717338>
- Carpio de los Pinos, A. J., González García, M. L. N., Soriano, J. A., & Yáñez Araque, B. (2021). Development of the level of preventive action method by observation of the characteristic value for the assessment of occupational risks on construction sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), Article 8387. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168387>
- Coetzee, S., Ivánová, I., Mitsova, H., & Brovelli, M. A. (2020). Open geospatial software and data: A review of the current state and a perspective into the future. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 90. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020090>
- Comisión Europea. Bruselas, 6.6.2014 COM(2014) 332 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, relativa a un marco estratégico de la UE en materia de salud y seguridad en el trabajo 2014-2020. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0332>. Fecha de acceso: 13 de Enero, 2022.
- Cooperrider, N., & Gordon, J. (2006). *Shock and impact on North American locomotives evaluated with ISO 2631 parts 1 and 5* Proceedings of the First American Conference on Human Vibration.
- Cortés-Pérez, J. P., Cortés-Pérez, A., & Prieto-Muriel, P. (2020). BIM-integrated management of occupational hazards in building construction and maintenance. *Automation in Construction*, 113, Article 103115. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103115>
- Costa, N., Arezes, P., & Melo, R. (2014). Effects of occupational vibration exposure on cognitive/motor performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(5), 654-661. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.07.005>
- Dabirian, S., Han, S. H., & Lee, J. (2020). Stochastic-based noise exposure assessment in modular and off-site construction. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118758. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118758>

- de 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. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00038-2)
- De la Hoz Torres, M. L., Aguilar, A. J., Ruiz, D. P., & Martínez-Aires, M. D. *Análisis de la exposición a vibraciones transmitidas al cuerpo entero en tractores agrícolas* XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica - TECNIACUSTICA'18-24 al 26 de octubre, Cádiz.
- De Oliveira, R. S., Da Cruz, F. M., Zlatar, T., Arezes, P., Barkokébas, B., & Lago, E. M. G. (2019). Case study: Analysis of the propagation of noise generated by construction equipment. *Noise Control Engineering Journal*, 67(6), 447-455. <https://doi.org/10.3397/1/376741>
- Dement, J., Welch, L. S., Ringen, K., Cranford, K., & Quinn, P. (2018). Hearing loss among older construction workers: Updated analyses. *American Journal of Industrial Medicine*, 61(4), 326-335. <https://doi.org/10.1002/ajim.22827>
- Deng, Y., Cheng, J. C. P., & Anumba, C. (2016). A framework for 3D traffic noise mapping using data from BIM and GIS integration. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(10), 1267-1280. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1110603>
- Díez, F. M. (2009). *Higiene industrial: manual para la formación del especialista*. Lex Nova.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Directiva 89/391/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A31989L0391>. Fecha de acceso: 10 de Enero, 2022.
- Directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (vibraciones). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32002L0044>. Fecha de acceso: 16 de Enero, 2022.
- Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental - Declaración de la Comisión ante el Comité de Conciliación de la Directiva sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32002L0049>. Fecha de acceso: 25 de Enero, 2021.
- 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). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32003L0010>. Fecha de acceso: 25 de Enero, 2021.
- Eger, T., Stevenson, J., Boileau, P.-É., & Salmoni, A. (2008). Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 1—Analysis of whole-body vibration exposure using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 standards. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(9-10), 726-738. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.08.012>
- ESRI. (1995). Environmental Systems Research Institute (Redlands). (1995). Disponible en: <https://www.esri.com/en-us/home>. Fecha de acceso: 15 de Enero, 2022.
- EU-OSHA. (2005). *Factsheet 57 - The impact of noise at work*. Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/publications/factsheet-57-impact-noise-work>. Fecha de acceso: 10 de Enero, 2022.
- EU-OSHA. (2019). *Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU*. Disponible en: <https://osha.europa.eu/es/publications/work-related-musculoskeletal-disorders-prevalence-costs-and-demographics-eu/view>. Fecha de acceso: 1 de Enero, 2022.
- EU-OSHA. (2020a). *ESENER 2019 revela que las mayores preocupaciones que tienen las empresas europeas son los trastornos musculoesqueléticos y los riesgos psicosociales*. Disponible en:

- <https://osha.europa.eu/es/about-eu-osha/press-room/esener-2019-reveals-biggest-concerns-european-workplaces-musculoskeletal>. Fecha de acceso: 16 de Enero, 2022.
- EU-OSHA. (2020b). Preventing musculoskeletal disorders in the construction sector: examples from INAIL incentive schemes . Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/publications/preventing-musculoskeletal-disorders-construction-sector-examples-inail-incentive-schemes/view>. Fecha de acceso: 1 de Enero, 2022.
- EU-OSHA. (2022). Prevention of musculoskeletal disorders and psychosocial risks in the workplace: EU strategies and future challenges. Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/publications/prevention-musculoskeletal-disorders-and-psychosocial-risks-workplace-eu-strategies-and-future-challenges>. Fecha de acceso: 1 de Enero 2022.
- Eurofound (2017), Sixth European Working Conditions Survey – Overview report (2017 update), Publications Office of the European Union, Luxembourg. Disponible en: https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/ef1634_en.pdf. Fecha de acceso: 20 de Enero, 2022.
- Eurostat, Oficina Estadística de la Unión Europea. Estadísticas europeas. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>. Fecha de acceso: 18 de Enero, 2022.
- Fallon, K., Fallon, K., & Palmer, M. E. (2007). *General Buildings Information Handover Guide: Principles, Methodology and Case Studies-an Industry Sector Guide of the Information Handover Guide Series*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. Disponible en: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-4ce5d559476ef8e27301b920352c21a2/pdf/GOVPUB-C13-4ce5d559476ef8e27301b920352c21a2.pdf> Fecha de acceso: 15 Enero, 2022.
- Fernández, M. D., Quintana, S., Chavarría, N., & Ballesteros, J. A. (2009). Noise exposure of workers of the construction sector. *Applied Acoustics*, 70(5), 753-760. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.07.014>
- Fundación Laboral de la Construcción. Guía de medición de ruido en obras de construcción. Medidas preventivas. Disponible en: <https://www.lineaprevencion.com/recursos/el-ruido-en-obras-de-construccion-medidas-preventivas> Fecha de acceso: 22 de Enero de 2022
- Fritz, M., Fischer, S., & Bröde, P. (2005). Vibration induced low back disorders - Comparison of the vibration evaluation according to ISO 2631 with a force-related evaluation. *Applied Ergonomics*, 36(4 SPEC. ISS.), 481-488. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.01.008>
- Gambatese, J. A. (2000). Safety in a Designer's Hands. *Civil Engineering*, 70(6), 56-59.
- Gambatese, J. A., Hinze, J. W., & Haas, C. T. (1997). Tool to design for construction worker safety. *Journal of Architectural Engineering*, 3(1), 32-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(1997\)3:1\(32\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(1997)3:1(32))
- García Callejo, F. J., García Callejo, F., Velert Vila, M., De Paula Vernetta, C., Morant Ventura, A., & Marco Algarra, J. (2004). Hipoacusia inducida por ruido laboral en diabéticos insulínodpendientes. *Medicina y seguridad del trabajo*, 50-195, 15-23.
- Giordano, D., Facchinetti, D., & Pessina, D. (2015). Comfort efficiency of the front axle suspension in off-road operations of a medium-powered agricultural tractor.
- Griffin, M. J. (1998). Vibraciones de cuerpo completo. In *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (Vol. II, pp. 50.53-50.57).
- Guerlain, C., Renault, S., & Ferrero, F. (2019). Understanding Construction Logistics in Urban Areas and Lowering Its Environmental Impact: A Focus on Construction Consolidation Centres. *Sustainability*, 11(21), 6118. <https://doi.org/10.3390/su11216118>
- Hagberg, M., Violante, F. S., Bonfiglioli, R., Descatha, A., Gold, J., Evanoff, B., & Sluiter, J. K. (2012). Prevention of musculoskeletal disorders in workers: classification and health surveillance—statements of the Scientific Committee on Musculoskeletal Disorders of the International

- Commission on Occupational Health. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 13(1), 1-6. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-109>
- Harris, C. M. (1991). Handbook of acoustical measurements and noise control. McGraw-Hill, New York, 1991. <https://doi.org/10.1121/1.405398>.
- Health and safety Executive (2018). Health and safety at work. Summary statistics for Great Britain 2017. Disponible en: <https://www.hse.gov.uk/statistics/overall/hssh1617.pdf> Fecha de acceso: 15 de Enero, 2022.
- Hong, J., Kang, H., Hong, T., Park, H. S., & Lee, D.-E. (2021). Development of a prediction model for the proportion of buildings exposed to construction noise in excess of the construction noise regulation at urban construction sites. *Automation in Construction*, 125, 103656. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103656>
- Hong, J., Kang, H., Jung, S., Sung, S., Hong, T., Park, H. S., & Lee, D.-E. (2020). An empirical analysis of environmental pollutants on building construction sites for determining the real-time monitoring indices. *Building and environment*, 170, 106636. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106636>
- IDEARA. (2014). Vibraciones mecánicas. Factores relacionados con la fuente y medidas de control. Confederación de Empresarios de Pontevedra (CEP). Disponible en: https://idearainvestigacion.es/wp-content/uploads/2014/10/GUIA_vibraciones-mecanicas_final_baixa-calidade.pdf Fecha de acceso 24 de Enero, 2022.
- IDEE. (2021). Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE). Consejo Superior Geográfico. Portal de Acceso a la información Geográfica en España. Available <https://www.idee.es/> (accessed March 31, 2021).
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2008). Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición de los trabajadores al ruido. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/203536/Gu%C3%ADa+t%C3%A9cnica+para+la+evaluaci%C3%B3n+y+prevenci%C3%B3n+de+los+riesgos+relacionados+con+la+exposici%C3%B3n+al+ruido/96a86542-1ac3-42c1-9df2-8c385c67db60.Fecha> de acceso: 14 de Enero, 2022.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2014. Aspectos ergonómicos de las vibraciones. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/96076/Aspectos+ergonomicos+de+las+vibraciones.pdf/97befb6a-7ca4-4fee-bf01-58104c1aed1b>. Fecha de acceso: 24 de Enero, 2022.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Directrices básicas para la evaluación de riesgos laborales. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/2927460/Directrices+evaluaci%C3%B3n+de+riesgos.pdf/61c4ce0a-f418-669c-48e0-2e26ae360d9e?version=2.0&t=1644411940403>. Fecha de acceso: 31 de Enero, 2022.
- Instituto. (1984). Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (1984). NTP 94. Evaluación de las vibraciones de cuerpo completo sobre el confort, percepción y mareo producido por el movimiento. Madrid. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_094.pdf/ce8b1c87-1482-4d02-8418-dcdf25f68c57?version=1.0&t=1528459938608. Fecha de acceso: 12 de Enero, 2022.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2007). NTP 784. Evaluación de las vibraciones de cuerpo completo sobre el confort, percepción y mareo producido por el movimiento. Madrid. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/327740/784+.pdf/858e2c0f-07a9-49ec-895f-5fd82fcd3449>. Fecha de acceso: 12 de Enero, 2022.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2013). NTP 963. Vibraciones: vigilancia de la salud en trabajadores expuestos. Madrid. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp-963w.pdf/8437f251-05d3-49c5-8a0a-242cb709c905?version=1.0&t=1617978011187>. Fecha de acceso: 15 de Enero, 2022.
- Irastorza, X., Milczarek, M., & Cockburn, W. (2016). *Second European Survey of Enterprises on New and Emerging Risks (ESENER-2): overview report: managing safety and health at work*. Publications

- Office of the European Union. Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/publications/second-european-survey-enterprises-new-and-emerging-risks-esener-2-overview-report-managing-safety-and-health-work/view>. Fecha de acceso: 16 de Enero, 2022.
- ISO 8041-1:2017. (2017). ISO 8041-1:2017. Human response to vibration - Measuring instrumentation - Part 1: General purpose vibration meters. <https://www.iso.org/standard/70648.html>.
- ISO 2631-5:2004. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. <https://www.iso.org/standard/35595.html>
- ISO 2631-5:2018. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. <https://www.iso.org/standard/50905.html>
- ISO 9613-2:1996. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation. <https://www.iso.org/standard/20649.html>
- ISO 9613-1:1993. Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. <https://www.iso.org/standard/17426.html>
- Johanning, E., Fischer, S., Christ, E., Gores, B., & Lührman, R. (2006). Railroad Locomotive Whole-Body Vibration Study: Vibration, Shocks And Seat Ergonomics Proceedings Of The First American Conference On Human Vibration.
- Jung, S., Kang, H., Choi, J., Hong, T., Park, H. S., & Lee, D.-E. (2020). Quantitative health impact assessment of construction noise exposure on the nearby region for noise barrier optimization. *Building and Environment*, 176, 106869. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106869>
- Kang, T. H., & Kaizu, Y. (2011). Vibration analysis during grass harvesting according to ISO vibration standards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2), 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.10.003>
- Kazaz, A., Ulubeyli, S., & Arslan, A. (2020). Quantification of fresh ready-mix concrete waste: order and truck-mixer based planning coefficients. *International Journal of Construction Management*, 20(1), 53-64. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1462444>
- Kim, J. H., Dennerlein, J. T., & Johnson, P. W. (2018). The effect of a multi-axis suspension on whole body vibration exposures and physical stress in the neck and low back in agricultural tractor applications. *Applied Ergonomics*, 68, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.021>
- Kim, J. H., Marin, L. S., & Dennerlein, J. T. (2018). Evaluation of commercially available seat suspensions to reduce whole body vibration exposures in mining heavy equipment vehicle operators. *Applied Ergonomics*, 71, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.003>
- Krajnak, K. (2018). Health effects associated with occupational exposure to hand-arm or whole body vibration. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 21(5), 320-334. <https://doi.org/10.1080/10937404.2018.1557576>
- Kumar, S. (2004). Vibration in operating heavy haul trucks in overburden mining. *Applied Ergonomics*, 35(6), 509-520. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.06.009>
- Kwon, N., Park, M., Lee, H. S., Ahn, J., & Shin, M. (2016). Construction Noise Management Using Active Noise Control Techniques. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(7), Article 4016014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001121](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001121)
- Langer, T. H., Ebbesen, M. K., & Kordestani, A. (2015). Experimental analysis of occupational whole-body vibration exposure of agricultural tractor with large square baler. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 47, 79-83. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.02.009>
- Lee, S. C., Kim, J. H., & Hong, J. Y. (2019). Characterizing perceived aspects of adverse impact of noise on construction managers on construction sites. *Building and Environment*, 152, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.005>
- Ley. (2003). Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales. Boletín Oficial del Estado, 298, de 13 de Diciembre de 2003. <https://www.boe.es/boe/dias/2003/12/13/pdfs/A44408-44415.pdf>.
- Li, B., Tao, S., Dawson, R. W., Cao, J., & Lam, K. (2002). A GIS based road traffic noise prediction model. *Applied Acoustics*, 63(6), 679-691. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00066-4)

- Liang, H., & Shi, X. (2021). Exploring the structure and emerging trends of construction health management: a bibliometric review and content analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2021-0080>
- Liu, A. H., Ellul, C., & Swiderska, M. (2021). Decision making in the 4th dimension-exploring use cases and technical options for the integration of 4D BIM and GIS during construction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), Article 203. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040203>
- Liuke, M., Solovieva, S., Lamminen, A., Luoma, K., Leino-Arjas, P., Luukkonen, R., & Riihimäki, H. (2005). Disc degeneration of the lumbar spine in relation to overweight. *Int. J. Obes.*, 29(8), 903. <https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0802974>
- Livshits, G., Popham, M., Malkin, I., Sambrook, P. N., MacGregor, A. J., Spector, T., & Williams, F. M. (2011). Lumbar disc degeneration and genetic factors are the main risk factors for low back pain in women: the UK Twin Spine Study. *Ann. Rheum. Dis.*, 70(10), 1740-1745. <http://dx.doi.org/10.1136/ard.2010.137836>
- Los Pinos, A. J. C., González-García, M. N., Pentelhão, L. C., & Baptista, J. S. (2021). Zero-risk interpretation in the level of preventive action method implementation for health and safety in construction sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), Article 3534. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073534>
- Manzoor, B., Othman, I., Pomares, J. C., & Chong, H. Y. (2021). A research framework of mitigating construction accidents in high-rise building projects via integrating building information modeling with emerging digital technologies. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(18), Article 8359. <https://doi.org/10.3390/app11188359>
- Martínez-Aires, M. D., López-Alonso, M., & Martínez-Rojas, M. (2018). Building information modeling and safety management: A systematic review. *Safety Science*, 101, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.015>
- Martínez-Rojas, M., Martín Antolín, R., Salguero-Caparrós, F., & Rubio-Romero, J. C. (2020). Management of construction Safety and Health Plans based on automated content analysis. *Automation in Construction*, 120, Article 103362. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103362>
- MATLAB. (2013). version 8.2.0.701 (R2013b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Meucci, R. D., Fassa, A. G., & Faria, N. M. X. (2015). Prevalence of chronic low back pain: systematic review. *Rev. Saude Publica*, 49, 73. <https://doi.org/10.1590/S0034-8910.2015049005874>
- Milosavljevic, S., Bagheri, N., Vasiljev, R. M., McBride, D. I., & Rehn, B. (2011). Does daily exposure to whole-body vibration and mechanical shock relate to the prevalence of low back and neck pain in a rural workforce? *Annals of Occupational Hygiene*, 56(1), 10-17. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer068>
- Ministerio. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2005, Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2005-18262>. Fecha de acceso: 17 de Enero, 2022.
- Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 1995, Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-24292>. Fecha de acceso: 15 de Enero, 2022.
- Miyamoto, M., Shirai, Y., Nakayama, Y., Gembun, Y., & Kaneda, K. (2000). An epidemiologic study of occupational low back pain in truck drivers. *Journal of Nippon Medical School*, 67(3), 186-190. <https://doi.org/10.1272/jnms.67.186>
- Münzel, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A., & Sørensen, M. (2018). Environmental Noise and the Cardiovascular System. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688-697. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.12.015>
- Neitzel, R., Seixas, N. S., Camp, J., & Yost, M. (1999). An assessment of occupational noise exposures in four construction trades. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 60(6), 807-817. <https://doi.org/10.1080/00028899908984506>

- Ng, C. F. (2000). Effects of building construction noise on residents: A quasi-experiment. *Journal of environmental psychology*, 20(4), 375-385. <https://doi.org/10.1006/jevp.2000.0177>
- Nielsen, K., Jørgensen, M. B., Milczarek, M., & Munar, L. (2018). Healthy workers, thriving companies—a practical guide to wellbeing at work Tackling psychosocial risks and musculoskeletal disorders in small businesses. Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISSN 978-92-9496-935-4 102. <https://doi.org/10.2802/237140>
- Organización Internacional del Trabajo. Ruido. Disponible en: <https://www.ilo.org/global/topics/labour-administration-inspection/resources-library/publications/guide-for-labour-inspectors/noise/lang-es/index.htm>. Fecha de acceso: 15 de Enero, 2022.
- Olanrewaju, O. I., Edwards, D. J., & Chileshe, N. (2020). Estimating on-site emissions during ready mixed concrete (RMC) delivery: A methodology. *Case Studies in Construction Materials*, e00439. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00439>
- Oppenheim, A. V. (1999). *Discrete-time signal processing*. Pearson Education India.
- Paddan, G., & Griffin, M. (2002). Evaluation of whole-body vibration in vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), 195-213. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4256>
- Peulić, A., Peulić, M., Jovanović, Ž., Joković, M., Stojković, S., & Vagić, N. (2021). Locating and categorizing causes of discomfort during transport of patients to medical facilities. *Transactions in GIS*, 25(6), 2963-2981. <https://doi.org/10.1111/tgis.12797>
- Pinilla García, J., Almodóvar Molina, A., Galiana Blanco, M. L., Hervás Rivero, P., & Zimmermann Verdejo, M. (2017). Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo. 2015 6ª EWCS - España. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/96082/Encuesta+Nacional+de+Condiciones+de+Trabajo+6%C2%AA+EWCS.pdf/abd69b73-23ed-4c7f-bf8f-6b46f1998b45?t=1529925974398> Fecha de acceso: 17 de Enero, 2022.
- Punnett, L., & Wegman, D. H. (2004). Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(1), 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2003.09.015>
- Puyana-Romero, V., Cueto, J. L., & Gey, R. (2020). A 3D GIS tool for the detection of noise hot-spots from major roads. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 84, Article 102376. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102376>
- Raffler, N., Rissler, J., Ellegast, R., Schikowsky, C., Kraus, T., & Ochsmann, E. (2017). Combined exposures of whole-body vibration and awkward posture: a cross sectional investigation among occupational drivers by means of simultaneous field measurements. *Ergonomics*, 60(11), 1564-1575. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1314554>
- Raman, B., Shukla, D., & Anish, S. (2004). Effect of impact noise on humans-a case study for drop forge hammers. International Symposium, Transport Noise and Vibration,
- 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, 60, de marzo de 2006. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2006-4414>.
- Reglamento (UE) n° 167/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de febrero de 2013, relativo a la homologación de los vehículos agrícolas o forestales, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos Texto pertinente a efectos del EEE. Diario Oficial de la Unión Europea, L60/1, de 2 de marzo de 2013. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0167>
- Rehn, B., Nilsson, T., Lundström, R., Hagberg, M., & Burström, L. (2009). Neck pain combined with arm pain among professional drivers of forest machines and the association with whole-body vibration exposure. *Ergonomics*, 52(10), 1240-1247. <https://doi.org/10.1080/00140130902939889>
- Experimental Study of the Effect of Vehicle Velocity on the Ride Comfort of a Car on a Road with Different Types of Roughness

- Rodríguez-Puente, R., & Lazo-Cortés, M. S. (2013). Algorithm for shortest path search in Geographic Information Systems by using reduced graphs. *SpringerPlus*, 2(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-291>
- Russo, F., Di Tecco, C., Fontana, L., Adamo, G., Papale, A., Denaro, V., & Iavicoli, S. (2020). Prevalence of work related musculoskeletal disorders in Italian workers: is there an underestimation of the related occupational risk factors? *BMC Musculoskeletal Disorders*, 21(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03742-z>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons.
- Saleh, S., Woskie, S., & Bello, A. (2017). The Use of Noise Dampening Mats to Reduce Heavy-Equipment Noise Exposures in Construction. *Safety and Health at Work*, 8(2), 226-230. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.09.006>
- Sánchez-Guardamino Elorriaga, R., & García Tomás, M. J. (2021). How well does Spain manage occupational noise and vibration risks? INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2733>
- Santos, R., Costa, A. A., & Grilo, A. (2017). Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015. *Automation in Construction*, 80, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005>
- Seidman, M. D., & Standing, R. T. (2010). Noise and quality of life. *International journal of environmental research and public health*, 7(10), 3730-3738. <https://doi.org/10.3390/ijerph7103730>
- Shirabe, T. (2016). A method for finding a least-cost wide path in raster space. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(8), 1469-1485. <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1124435>
- Shiri, R., Karppinen, J., Leino-Arjas, P., Solovieva, S., & Viikari-Juntura, E. (2009). The association between obesity and low back pain: a meta-analysis. *Am. J. Epidemiol.*, 171(2), 135-154. <https://doi.org/10.1093/aje/kwp356>
- Smith, P. (2014). BIM implementation - Global strategies. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.575>
- Suter, A. H. (2002). Construction noise: exposure, effects, and the potential for remediation; a review and analysis. *Aiha Journal*, 63(6), 768-789. <https://doi.org/10.1080/15428110208984768>
- Tan, Y., Fang, Y., Zhou, T., Gan, V. J. L., & Cheng, J. C. P. (2019). BIM-supported 4D acoustics simulation approach to mitigating noise impact on maintenance workers on offshore oil and gas platforms. *Automation in Construction*, 100, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.019>
- Tender, M., Couto, J. P., & Fuller, P. (2022). Improving Occupational Health and Safety Data Integration Using Building Information Modelling: An Initial Literature Review [Book Chapter]. *Studies in Systems, Decision and Control*, https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85119134833&doi=10.1007%2f978-3-030-89617-1_7&partnerID=40&md5=3f8812968d4b9721213708aaad92fe09
- Improving Occupational Health and Safety Data Integration Using Building Information Modelling: An Initial Literature Review
- Tibshirani, R., Walther, G., & Hastie, T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *J. R. Stat. Soc. Ser. B-Stat. Methodol.*, 63(2), 411-423. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293>
- Tiemessen, I. J., Hulshof, C. T. J., & Frings-Dresen, M. H. W. (2007). An overview of strategies to reduce whole-body vibration exposure on drivers: A systematic review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(3), 245-256. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.10.021>
- Torrecilla-García, J. A., Pardo-Ferreira, M. C., & Rubio-Romero, J. C. (2021). Overall introduction to the framework of BIM-based digital twinning in decision-making in safety management in building construction industry. *Dirección y Organización*(74), 31-38. <https://doi.org/10.37610/DYO.V0I74.600>

- Trillo Cabello, A., Martínez-Rojas, M., Carrillo-Castrillo, J. A., & Rubio-Romero, J. C. (2021). Occupational accident analysis according to professionals of different construction phases using association rules. *Safety Science*, 144, Article 105457. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105457>
- Tripodi, A., Persia, L., Di Mascio, P., Corazza, M. V., & Musso, A. (2012). A decision support system for analysis of vulnerable road users safety issues: results of the Saferbrain project. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 841-850. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.933>
- UNE-EN ISO 3744:2011. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido utilizando presión acústica. Métodos de ingeniería para un campo esencialmente libre sobre un plano reflectante. (ISO 3744:2010). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047781>
- UNE-EN 14253:2004+A1:2004 Vibraciones mecánicas. Medidas y cálculos de la exposición laboral a las vibraciones de cuerpo completo con referencia a la salud. Guía práctica. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0041573>
- UNE-ISO 2631-1:2008. Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Parte 1: Requisitos generales. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0041539>
- Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: a summary. *International journal of environmental research and public health*, 15(2), 379. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020379>
- Vitharana, V. H. P., & Chinda, T. (2021). Development of a lower back pain prevention index for heavy equipment operators in the construction industry: system dynamics modelling. *International Journal of Construction Management*, 21(7), 677-693. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1579969>
- Wei, W., & Wang, C. (2018). BIM-enhanced noise hazard training: A pilot study. Construction Research Congress 2018: Safety and Disaster Management - Selected Papers from the Construction Research Congress 2018. <https://doi.org/10.1061/9780784481288.015>
- Wei, W., Wang, C., & Lee, Y. (2017). BIM-based construction noise hazard prediction and visualization for occupational safety and health awareness improvement. Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings. <https://doi.org/10.1061/9780784480823.032>
- Wilder, D. G., Pope, M. H., & Frymoyer, J. W. (1988). The biomechanics of lumbar disc herniation and the effect of overload and instability. *Journal of spinal disorders*, 1(1), 16-32.
- Woolf, A. D., & Pfleger, B. (2003). Burden of major musculoskeletal conditions. *Bull. World Health Organ.*, 81, 646-656.
- Xiao, J., Li, X., & Zhang, Z. (2016). Daly-based health risk assessment of construction noise in Beijing, China. *International journal of environmental research and public health*, 13(11), 1045. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111045>
- Xu, J., & Lathrop Jr, R. G. (1995). Improving simulation accuracy of spread phenomena in a raster-based geographic information system. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(2), 153-168. <https://doi.org/10.1080/02693799508902031>
- Yao, F., Liu, G., Ji, Y., Tong, W., Du, X., Li, K., . . . Martek, I. (2020). Evaluating the environmental impact of construction within the industrialized building process: A monetization and building information modelling approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 1-22, Article 8396. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228396>
- Zoccali, P., Loprencipe, G., & Lupascu, R. C. (2018). Acceleration measurements inside vehicles: Passengers' comfort mapping on railways. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 129, 489-498. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.079>



UNIVERSIDAD
DE GRANADA