



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis ambiental del taller de motores del CUD-ENM
mediante sensores multiparamétricos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Raquel Calvo López

DIRECTORES: Alicia Vázquez Carpentier

Pedro Jesús Carrasco Pena

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis ambiental del taller de motores del CUD-ENM
mediante sensores multiparamétricos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado analiza el comportamiento ambiental del taller de motores del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar mediante un sistema de monitorización continua basado en sensores multiparamétricos. Se registraron variables como PM2.5, PM10, nivel sonoro, temperatura y humedad durante quince semanas en distintos escenarios operativos, lo que ha permitido analizar la influencia de las fuentes emisoras internas frente a factores externos.

El análisis de los datos ha combinado técnicas estadísticas, estudio de la evolución temporal, análisis de correlaciones y aplicación de técnicas de control estadístico de procesos. Asimismo, se han empleado modelos de regresión y algoritmos de aprendizaje automático (*Random Forest*) con el objetivo de identificar patrones y evaluar la capacidad predictiva del sistema.

El trabajo demuestra que la monitorización continua, junto con técnicas avanzadas de análisis, constituye una herramienta eficaz para la evaluación de la calidad ambiental en entornos docente-técnicos, permitiendo avanzar hacia modelos de gestión proactiva orientados a la mejora de la seguridad, el confort y la eficiencia energética.

PALABRAS CLAVE

Monitorización ambiental, sensores multiparamétricos, análisis estadístico, condiciones interiores.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores por su orientación, disponibilidad y apoyo durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado. Su experiencia, criterio y dedicación han sido fundamentales para enfocar adecuadamente el trabajo y superar las dificultades encontradas a lo largo del proceso.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra forma, han contribuido al desarrollo de este proyecto. En particular, quiero agradecer al departamento de informática de la Escuela Naval Militar por su disposición para resolver las cuestiones técnicas surgidas durante el estudio. Del mismo modo, deseo reconocer la labor del equipo responsable de la iniciativa GTNode, cuya colaboración ha resultado clave al facilitar el acceso a la base de datos empleada en este trabajo, así como el soporte necesario para su tratamiento.

Por último, me gustaría agradecer a mi familia y a Dios su apoyo constante a lo largo de estos años de formación, que ha sido fundamental para superar y culminar esta larga etapa.

A todos ellos, gracias.

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANOVA: Análisis de Varianza

CUD: Centro Universitario de la Defensa

ENM: Escuela Naval Militar

GTNode: Nodo sensor multiparamétrico

IA: Inteligencia Artificial

IEQ: Indoor Environmental Quality (Calidad Ambiental Interior)

IoT: Internet of Things

ISO: International Organization for Standardization

OMS: Organización Mundial de la Salud

PM: Partículas en suspensión

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

PRL: Prevención de Riesgos Laborales

SPC: Statistical Process Control (Control Estadístico de Procesos)

TFG: Trabajo Fin de Grado

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Motivación y objetivos	7
1.1 Motivación	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Metodología	8
1.4 Estructura del trabajo	9
2 Estado del arte	11
2.1 Marco teórico relativo a la calidad ambiental	11
2.1.1 Calidad ambiental interior en talleres de motores docentes	11
2.1.2 Impacto de las condiciones ambientales en la salud y el rendimiento formativo.....	12
2.2 Parámetros ambientales evaluados.....	13
2.2.1 Partículas en suspensión (PM2.5 y PM10).....	13
2.2.2 Nivel sonoro.....	14
2.2.3 Confort térmico: temperatura y humedad relativa.....	15
2.3 Normativa y valores de referencia	15
2.4 Tecnologías de monitorización ambiental y sensores multiparamétricos.....	17
2.4.1 Sensores multiparamétricos para monitorización ambiental	17
2.4.2 Justificación de la selección del sistema GTNode.....	18
2.5 Herramientas matemáticas para el análisis de los datos	20
2.6 Aplicación de IoT e IA en la monitorización ambiental	28
2.6.1 Técnicas de IA para la detección de patrones y situaciones de riesgo	29
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Caracterización del entorno de estudio	31
3.1.1 Descripción física del taller	32
3.1.2 Actividad desarrollada y fuentes emisoras	33
3.1.3 Condiciones operativas habituales.....	33
3.2 Sistema de monitorización implementado	34
3.2.1 Instrumentación empleada, ubicación y gestión de datos.....	34
3.3 Diseño del plan de medida	36
3.3.1 Periodo de monitorización y frecuencia de muestreo	36
3.3.2 Tratamiento previo y estructuración de datos.....	37

3.4 Análisis de datos	37
4 Resultados	43
4.1 Validación de datos y selección de semanas de estudio	44
4.2 Análisis descriptivo.....	44
4.3 Evolución temporal de las variables ambientales	49
4.4 Comparación estadística entre escenarios operativos	53
4.5 Análisis de correlaciones	55
4.6 Modelos de regresión	56
4.7 Estabilidad del sistema y detección de eventos	57
4.8 Predicción del comportamiento del sistema ambiental (<i>Random Forest</i>)	59
4.9 Síntesis y discusión de resultados	60
5 Conclusiones y líneas futuras	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Líneas futuras	64
6 Bibliografía.....	65
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	69
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	70
Anexo III: Declaración de uso de inteligencia artificial.....	71
Anexo IV: Gráficas y representaciones analizadas	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Propagación sonora en recintos cerrados.....	14
Figura 2-2 Sensores multiparamétricos, de izq. a der.: Airthings, Sensiron y Netatmo.	17
Figura 2-3 Sensor GTNode del taller de motores CUD-ENM.	18
Figura 2-4 Interfaz aplicación sensor GTNode.	19
Figura 2-5 Diagramas de dispersión.....	23
Figura 2-6 Interpretación del coeficiente r.	25
Figura 2-7 Ejemplo del gráfico de control de Shewart.....	27
Figura 2-8 Ejemplo del diagrama de caja y bigotes.	28
Figura 2-9 Esquema capas IoT.	29
Figura 3-1 Entrada del edificio Isaac Peral de la ENM.....	31
Figura 3-2 Vista alzada del muelle Almirante Vierna y plano de la ENM.	32
Figura 3-3 Plano de la planta baja del edificio Isaac Peral.	33
Figura 3-4 Horario semanal alumnos ENM.	34
Figura 3-5 Disposición de los sensores.	35
Figura 3-6 Ubicación del sensor dentro del taller.	35
Figura 3-7 Ejemplo de datos brutos del sensor.	36
Figura 3-8 Horarios de las prácticas.....	36
Figura 3-9 Ejemplo de picos de ruido en horas de uso del taller (semana 8B).	37
Figura 3-10 Ejemplo de diagrama de barras.	38
Figura 3-11 Ejemplo de matriz de correlación.	39
Figura 3-12 Ejemplo de un diagrama de dispersión.....	40
Figura 3-13 Código creado e implementado para el análisis avanzado de los datos.	42
Figura 4-1 Periodos monitorizados.	44
Figura 4-2 Gráficas temporales de T ^a y humedad con límites normativos (semana 8B).	48
Figura 4-3 Evolución temporal de las PM2.5 y PM10 (semana 8B).	49
Figura 4-4 Comparación series temporales del ruido y las PM10 (semana 8B).	50
Figura 4-5 Comparación series temporales del ruido y las PM10 (semana 9A).	50
Figura 4-6 Evolución temporal de la T ^a y humedad relativa (semana 8B).	51
Figura 4-7 Gráficas de T ^{as} mínima, media y máxima (semana 8B: 20-25OCT).....	52
Figura 4-8 Precipitaciones, puntual y acumulada, registradas en la ENM en OCT25.....	52
Figura 4-9 Medias del número de PM2.5 y ruido para las tres semanas.....	53
Figura 4-10 Número de partículas para las tres semanas.	54
Figura 4-11 Matrices de correlaciones semanas 8B (superior) y 14A (inferior).....	55
Figura 4-12 Gráficos de dispersión nivel sonoro-PM2.5.	56

Figura 4-13 Gráficos de dispersión temperatura-humedad relativa.	57
Figura 4-14 SPC de la masa de PM2.5 (semana 8B).	58
Figura 4-15 SPC del ruido (semana 8B).	58
Figura 4-16 Resultados obtenidos con Random Forest.	59
Figura 4-17 Gráfica de predicción (izq.) y de importancia (der.) de <i>Random Forest</i>	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Relación entre parámetros ambientales y percepción de confort de los usuarios.	13
Tabla 2-2 Normativa y valores de referencia aplicados.	16
Tabla 2-3 Comparación de los sistemas multiparamétricos de monitorización ambiental.	19
Tabla 2-4 Términos del análisis de regresión.	26
Tabla 4-1 Propósito de cada estudio.	43
Tabla 4-2 Estadísticos descriptivos de las PM2.5 y PM10.	45
Tabla 4-3 Estadísticos descriptivos del nivel sonoro.	46
Tabla 4-4 Estadísticos descriptivos de la temperatura y humedad relativa.	47
Tabla 4-5 Comparativa valores obtenidos con normativos.	48
Tabla 4-6 Medias de cada variable en función de la semana.	53
Tabla 4-7 Resultados/Interpretación de los resultados del ANOVA.	54
Tabla 4-8 Principales resultados y su importancia.	60
Tabla 4-9 Relevancia de las variables en el sistema ambiental.	61

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El presente capítulo introduce el contexto en el que se desarrolla este Trabajo de Fin de Grado, estableciendo la problemática que motiva el estudio, los objetivos que se persiguen y el enfoque metodológico adoptado para su consecución. Asimismo, se describe la estructura del documento con el fin de guiar al lector a lo largo del desarrollo del trabajo y facilitar la comprensión de los contenidos descritos en él.

1.1 Motivación

El taller de motores del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM) constituye un entorno formativo de carácter técnico-industrial en el que se desarrollan actividades prácticas fundamentales para la formación técnica de los futuros oficiales de la Armada. Dichas actividades implican la presencia de factores ambientales potencialmente críticos, como elevados niveles de ruido, generación de partículas en suspensión [1] y variaciones térmicas, que pueden afectar de forma directa a la salud laboral, confort térmico y rendimiento de los usuarios.

La evaluación de estas condiciones ambientales suele realizarse mediante mediciones puntuales o inspecciones periódicas, lo que limita la capacidad de analizar tendencias temporales y detectar situaciones de riesgo. Por lo tanto, la ausencia de sistemas de monitorización continua dificulta una gestión del entorno de trabajo que permita adoptar medidas preventivas.

En este contexto, la incorporación de sensores multiparamétricos y tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) permite registrar de forma continua los principales parámetros ambientales y generar bases de datos que facilitan su análisis. Este enfoque contribuye a mejorar la seguridad y bienestar de los usuarios y la eficiencia energética de las instalaciones.

El presente Trabajo de Fin de Grado se enmarca dentro de los objetivos estratégicos de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID)¹, que promueve la modernización tecnológica de infraestructuras, el uso de redes de sensores y el análisis inteligente de datos en el ámbito de la Defensa. La aplicación de este sistema de monitorización en el taller de motores del CUD-ENM no solo permitirá mejorar las condiciones del entorno formativo, sino que constituirá un caso práctico replicable en otras instalaciones de la Armada.

¹ La ETID es un documento del Ministerio de Defensa (España) que define prioridades tecnológicas, líneas de innovación y capacidades estratégicas para fortalecer la seguridad y defensa nacional mediante I+D+i [2].

1.2 Objetivos

Este TFG pretende implementar un sistema de monitorización ambiental basado en sensores multiparamétricos en el taller de motores del CUD-ENM, con el fin de evaluar las condiciones ambientales del espacio y determinar su impacto. Para ello se establecen los siguientes objetivos específicos:

- i. Revisión bibliográfica más reciente y del marco normativo (referencias) a aplicar.
- ii. Elección, integración y configuración del sistema de monitorización más adecuado para la generación y almacenamiento de una base de datos estructurada. Evaluar su viabilidad.
- iii. Análisis estadístico de los datos obtenidos para identificar tendencias, relaciones entre variables y posibles desviaciones respecto a valores de referencia.
- iv. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la detección de patrones de uso.
- v. Evaluación de las condiciones de calidad ambiental del taller que permita la extracción de conclusiones para la propuesta de mejoras y posibles líneas de investigación futuras.

1.3 Metodología

Con el fin de alcanzar los objetivos trazados, el presente estudio se desarrolla siguiendo las siguientes etapas:

- i. Selección de sensores capaces de detectar los principales factores que afectan la calidad ambiental del taller.

Parámetros considerados y motivo por el que se consideran:

- **Nivel sonoro (dB):** para evaluar la exposición al ruido.
- **Partículas en suspensión PM2.5 y PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$):** dada su relación con riesgos respiratorios y cardiovasculares, y como indicador de ventilación y ocupación.
- **Temperatura y humedad relativa (% y °C):** fundamentales para el confort térmico y eficiencia energética.
- **Ocupación:** permite correlacionar la carga de usuarios con las condiciones ambientales.

Además, se valoran criterios de precisión, fiabilidad, estabilidad de medida, bajo mantenimiento y capacidad de adquirir de manera continua y simultánea los valores.

- ii. Recopilación y gestión de datos:

Tras la instalación del sensor, éste se integrará en una red de monitorización que permitirá el almacenamiento de los datos en una base estructurada con marcas temporales, facilitando así el análisis evolutivo, de tendencias y de eventos críticos, que se detalla a continuación.

- iii. Análisis estadístico de los datos recopilados:

Orientado a caracterizar el comportamiento ambiental del taller, incluirá:

- El estudio de la distribución de las variables y la detección de valores extremos.
- El análisis de tendencias asociadas a distintos niveles de ocupación.
- La identificación de relaciones y correlaciones entre parámetros ambientales.

Este análisis permitirá cuantificar las condiciones actuales y determinar desviaciones respecto a los estándares de seguridad y confort laboral.

- iv. De forma complementaria al análisis estadístico clásico, se aplican técnicas de inteligencia artificial enfocadas al aprendizaje automático para:
- Detectar patrones de uso y con ellos:
 - Predecir posibles riesgos, picos de contaminación o situaciones de incomodidad térmica.

Dicho enfoque permite una interpretación avanzada de los datos, facilitando la toma de decisiones preventivas y la propuesta de medidas correctivas basadas en evidencia.

- v. Evaluación, conclusiones y propuestas:

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se realizará una evaluación final de las condiciones ambientales del taller y, a partir de las conclusiones alcanzadas, se propondrá una serie de estrategias orientadas a la optimización del espacio, alineadas con la normativa vigente.

1.4 Estructura del trabajo

El presente trabajo se organiza de forma secuencial en cinco capítulos con el objetivo de facilitar la comprensión del estudio realizado y de los resultados obtenidos. A continuación, se detalla esta división:

En el primer capítulo se introduce el contexto del trabajo, se justifica la motivación del estudio y se establecen los objetivos, así como la metodología adoptada para su ejecución. Este bloque inicial permite situar el alcance del proyecto y definir el marco de actuación del mismo.

A continuación, el segundo capítulo presenta el estado del arte, donde se revisan los principales conceptos relacionados con la calidad ambiental interior en talleres mecánicos y entornos formativos. En este apartado:

- Se describen los parámetros ambientales objeto de estudio: partículas en suspensión PM2.5 y PM10, condiciones térmicas y niveles de ruido.
- Se analizan los valores de referencia y el marco normativo aplicable.
- Se describen los sensores multiparamétricos GTNode empleados en el trabajo, detallando características técnicas, funcionamiento e idoneidad.

El tercer capítulo se centra en el desarrollo experimental del estudio. En él se describe el taller de motores del CUD-ENM, la instrumentación utilizada y el diseño del plan de medida, así como el procedimiento seguido para la adquisición, almacenamiento, tratamiento y análisis de los datos registrados.

Posteriormente, en el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros analizados. Se comparan con los valores normativos y recomendaciones técnicas vigentes y se analizan de forma conjunta con el objetivo de interpretar su significado, identificar posibles situaciones desfavorables y analizar las principales fuentes de riesgo y limitaciones del estudio.

Finalmente, el último capítulo recoge las conclusiones más relevantes derivadas del trabajo y propone líneas futuras de actuación orientadas a mejorar la monitorización ambiental del taller. El documento se completa con la bibliografía utilizada y los anexos, que incluyen información técnica y experimental complementaria que respalda y amplía los contenidos presentados en el trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo recoge el marco teórico y normativo necesario para contextualizar el desarrollo experimental del trabajo. En primer lugar, se introducen los conceptos fundamentales relacionados con la calidad ambiental interior en entornos industriales y docentes, así como los parámetros ambientales más relevantes en éstos. A continuación, se analizan los efectos de estos factores sobre la salud y el confort térmico, y se revisan los valores de referencia y requisitos normativos aplicables [3, 4]. Finalmente, se presentan las tecnologías de monitorización ambiental basadas en sensores multiparamétricos, prestando especial atención al sistema GTNode empleado en este estudio y a su aplicación en entornos reales de monitorización continua [5]. De este modo, se establece la base teórica que justifica la metodología escogida y facilita la interpretación de los resultados obtenidos en los capítulos posteriores.

2.1 Marco teórico relativo a la calidad ambiental

El estudio de la calidad ambiental interior en entornos técnicos requiere un marco teórico que permita comprender los factores que influyen en el comportamiento ambiental de los espacios cerrados, así como sus implicaciones sobre la salud, el confort y el rendimiento de los usuarios. En el caso concreto de los talleres de motores docentes, esta base teórica resulta especialmente relevante debido a la coexistencia de actividades formativas con procesos de carácter mecánico.

En este apartado, se presentan los conceptos fundamentales asociados a la calidad ambiental interior, se analizan las particularidades de este tipo de espacios y se revisa el impacto de las condiciones ambientales sobre la salud laboral y el rendimiento en estos entornos.

2.1.1 Calidad ambiental interior en talleres de motores docentes

En el ámbito de los talleres de motores docentes, el concepto de calidad ambiental interior² (*Indoor Environmental Quality*, IEQ) alcanza una relevancia particular debido a la naturaleza de las actividades que en ellos se desarrollan. Desde un punto de vista técnico, su evaluación se basa en el análisis simultáneo de diferentes parámetros, entre los que destacan la concentración de partículas en suspensión, los niveles de ruido, las condiciones térmicas y de humedad relativa, y el rendimiento de los sistemas de ventilación y climatización [3]. La interacción entre estos factores, además de las dimensiones y componentes del espacio estudiado, determina tanto la calidad del aire respirado como el nivel de confort térmico y acústico percibido por los usuarios.

² Conjunto de condiciones físicas, químicas y térmicas del ambiente interior que influyen directamente en el bienestar, la salud y el rendimiento de los ocupantes de un espacio cerrado.

En los talleres de motores docentes, el funcionamiento de motores de combustión interna, el uso de herramientas neumáticas y eléctricas, y los procesos de mantenimiento, generan emisiones de partículas, vapores y gases; además de niveles elevados de ruido y calor. A ello se suma la variabilidad de ocupación propia de las sesiones prácticas, lo que da lugar a un entorno con fluctuaciones significativas en las condiciones ambientales.

Diversos estudios recientes indican que este tipo de espacios presentan una mayor variabilidad ambiental que las aulas convencionales, lo que hace necesario adoptar estrategias de monitorización continua capaces de detectar cambios en los parámetros y representar el comportamiento real del taller [5]. En este contexto, el uso de sensores multiparamétricos y sistemas IoT se ha adoptado como solución eficaz para la adquisición de datos en tiempo real y el seguimiento continuo del estado ambiental.

2.1.2 Impacto de las condiciones ambientales en la salud y el rendimiento formativo.

Investigaciones científicas recientes ponen de manifiesto la relación directa entre la calidad ambiental interior y la salud laboral en estos entornos [6]. La exposición prolongada a partículas finas y contaminantes gaseosos generados en procesos mecánicos y de combustión se asocia con un aumento del riesgo de afecciones respiratorias, irritación ocular y fatiga general [7]. En talleres de motores, donde pueden coexistir múltiples fuentes emisoras, este riesgo incrementa si no se dispone de sistemas de ventilación adecuados.

Desde el punto de vista de la acústica, los elevados niveles de ruido producidos por motores y herramientas mecánicas pueden provocar pérdida auditiva progresiva y disminución de la capacidad de concentración, especialmente en tareas que requieren precisión. De igual modo, condiciones térmicas inadecuadas, derivadas del calor generado por los equipos y de una ventilación deficiente, pueden generar situaciones de estrés térmico que afectan negativamente al desempeño de los usuarios [3].

En el contexto docente, estos efectos adquieren una relevancia adicional; ya que unas condiciones ambientales deficientes en talleres no solo afectan a la seguridad, sino también a la calidad del proceso de aprendizaje, debido al incremento del nivel de fatiga, reduciendo la capacidad de concentración y afectando al rendimiento académico de los estudiantes [5].

Por ello, la evaluación continua de la calidad ambiental interior se ha convertido en un elemento clave dentro de las estrategias de PRL³ y de gestión de infraestructuras formativas. La integración de sistemas de monitorización en tiempo real permite la detección temprana de situaciones desfavorables, la optimización del funcionamiento de los sistemas de ventilación y climatización, y la mejora continua de las condiciones ambientales del taller [4, 7]. En el caso del taller de motores del CUD-ENM, disponer de estos sistemas contribuye a garantizar condiciones seguras, confortables y adecuadas.

Adecuación y confort ambiental

La adecuación ambiental es el grado en que las condiciones físicas y químicas de un espacio interior (calidad del aire, parámetros térmicos y nivel de ruido) cumplen los criterios técnicos, normativos y preventivos requeridos para garantizar la salud, seguridad y rendimiento de sus ocupantes; además, implica la adaptación del entorno a la actividad desarrollada y al perfil de los usuarios [9, 10]. En un entorno docente, no depende únicamente del cumplimiento de valores límite normativos, sino de la interacción entre parámetros físicos medibles y la percepción subjetiva de los usuarios, también conocida como confort ambiental.

Un entorno docente puede considerarse adecuado cuando garantiza simultáneamente:

- Seguridad frente a riesgos físicos y ambientales.
- Condiciones de calidad del aire compatibles con la salud respiratoria.

³ Conforme a lo establecido en la legislación vigente [8], la PRL se define como el sistema de gestión de carácter técnico orientado a la identificación, evaluación y control de los factores de riesgo presentes en el entorno laboral, mediante la aplicación de medidas preventivas basadas en criterios normativos, metodológicos y de mejora continua.

- Niveles acústicos que permitan comunicación y concentración.
- Condiciones térmicas que no generen estrés fisiológico.
- Estabilidad ambiental suficiente para evitar fatiga.

La percepción de confort en entornos educativos está directamente relacionada con la calidad del aire interior, el nivel de ruido y el equilibrio térmico, influyendo de manera significativa en la capacidad de atención, el rendimiento cognitivo y el confort de los usuarios [11, 12]. Realizada a partir de las fuentes mencionadas en los subapartados 2.1.1 y 2.1.2, la Tabla 2-1 muestra la relación entre los parámetros físicos y la sensación que estos causan, evidenciando así la utilidad del confort como indicador de calidad docente.

Parámetro ambiental	Efecto fisiológico principal	Percepción subjetiva habitual	Impacto en el rendimiento
↑PM2.5	Inflamación respiratoria profunda	Sensación de polvo fino, ambiente cargado	↓ Bienestar general
↑PM10	Irritación de vías respiratorias superiores	Presencia visible de partículas, incomodidad respiratoria	Distracción y malestar físico
↑Ruido (dB + reverberación)	Estrés fisiológico	Molestia acústica, dificultad de comunicación	↑ Carga cognitiva
↑ o ↓ Temperatura	Estrés térmico	Sensación térmica desagradable	↓ Rendimiento físico y mental
↑ o ↓ Humedad relativa	Alteración del equilibrio higrotérmico	Ambiente seco o pesado	↓ Confort global

Tabla 2-1 Relación entre parámetros ambientales y percepción de confort de los usuarios.
(Elaboración propia)

A partir de este marco teórico general, es necesario analizar de forma específica los principales parámetros ambientales implicados en el estudio del taller de motores, así como los valores de referencia utilizados para su evaluación. Estos aspectos se desarrollan en los siguientes apartados.

2.2 Parámetros ambientales evaluados

La caracterización ambiental de un taller de motores requiere la selección de parámetros que permitan representar las condiciones reales del espacio y su impacto. En este estudio se han seleccionado aquellos parámetros relacionados directamente con las actividades desarrolladas en el taller y que habitualmente son indicadores de calidad ambiental interior.

2.2.1 Partículas en suspensión (PM2.5 y PM10)

Las partículas en suspensión constituyen uno de los contaminantes más relevantes en talleres mecánicos y de motores. Su origen está asociado a procesos de combustión, desgaste de componentes, fricción de materiales, resuspensión de polvo y emisiones procedentes del funcionamiento de equipos y maquinaria. Se clasifican en función de su tamaño aerodinámico, lo que determina su comportamiento en el aire y su capacidad de penetración en el sistema respiratorio:

- **PM10** (diámetro igual o inferior a 10 μm): capaces de acceder principalmente a las vías respiratorias superiores.
- **PM2.5** (diámetro igual o inferior a 2,5 μm): pueden alcanzar las zonas más profundas del aparato respiratorio, como los alveolos pulmonares.

El comportamiento de los aerosoles atmosféricos depende en gran medida de las condiciones higrométricas del aire, ya que la humedad relativa influye en su tamaño aerodinámico y en su capacidad de permanencia en suspensión. En condiciones de elevada humedad, las partículas pueden absorber vapor de agua, aumentando su diámetro y favoreciendo su deposición. Por el contrario, en ambientes más secos, tienden a permanecer más pequeñas, lo que incrementa su tiempo de permanencia en el aire [13].

En entornos como los talleres de motores, donde coexisten múltiples fuentes emisoras, la monitorización de este parámetro resulta especialmente crítica, considerándose un indicador clave de la calidad del aire interior [13].

2.2.2 Nivel sonoro

La importancia del ruido en este estudio se debe a la naturaleza de las actividades que en el taller se llevan a cabo y que están directamente relacionadas con las principales fuentes de ruido: funcionamiento simultáneo de motores, bancos de ensayo, compresores y herramientas eléctricas.

Además del nivel de presión sonora generado por las fuentes emisoras, la percepción y la exposición real al ruido en un taller de motores están fuertemente condicionadas por la geometría del espacio y sus características acústicas. En espacios con paredes y techos rígidos y sin tratamiento acústico, como es el caso del taller estudiado, las ondas sonoras que inciden sobre las superficies reflejan gran parte de su energía, generando fenómenos de eco y reverberación, representados en la Figura 2-1. Este efecto prolonga la presencia del sonido en el ambiente y eleva el nivel sonoro percibido por los ocupantes, aun cuando las fuentes emisoras individuales no superen un umbral acústico significativo.

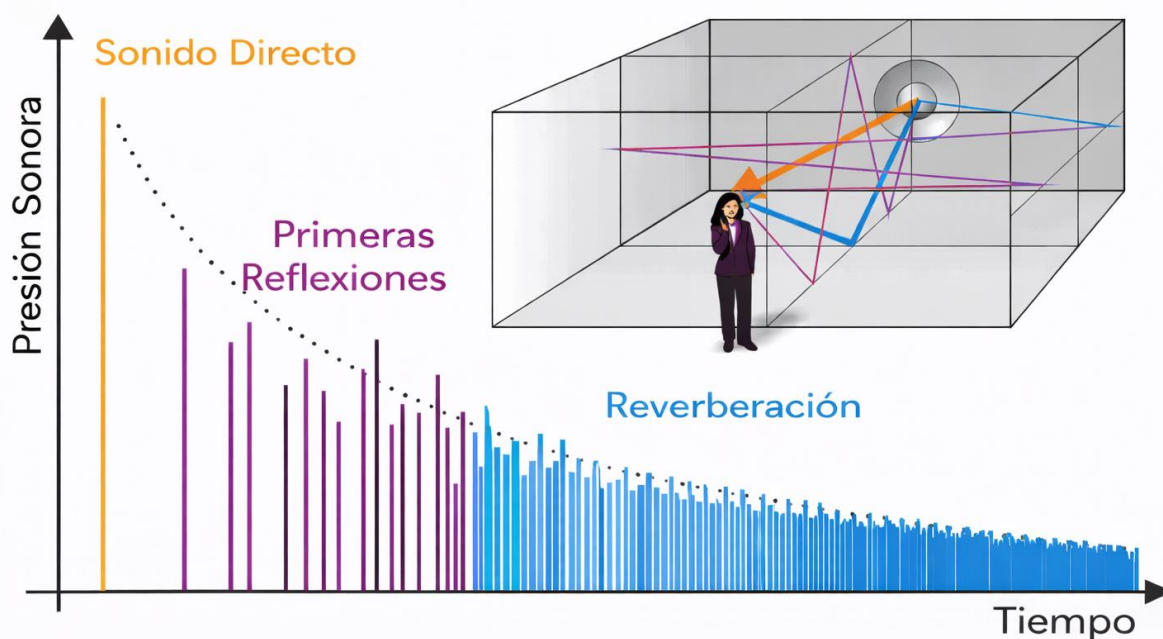


Figura 2-1 Propagación sonora en recintos cerrados.
(Representación generada con IA)

Asimismo, el ruido excesivo y persistente afecta a la capacidad de comunicación, aumenta el esfuerzo para escuchar instrucciones y dificulta la concentración durante la realización de tareas técnicas. Además, la exposición prolongada a niveles elevados de ruido puede provocar efectos fisiológicos como mareo o sensación de inestabilidad, debido a la interacción entre el sistema auditivo y el sistema

vestibular⁴, responsables del equilibrio, lo que contribuye a incrementar la fatiga y el malestar general en los ocupantes [14]. Estas condiciones pueden comprometer la seguridad, la precisión en la ejecución de trabajos y el rendimiento formativo de los estudiantes en el taller [11].

2.2.3 Confort térmico: temperatura y humedad relativa

Las condiciones térmicas interiores influyen directamente en el confort, el bienestar y el rendimiento físico y cognitivo de los usuarios [12]. En talleres de motores, la temperatura puede verse alterada por el calor generado por los equipos y el funcionamiento prolongado de motores, así como por las condiciones ambientales.

Directamente ligada a la temperatura por su relación psicrométrica⁵, la humedad relativa supone otro elemento complementario esencial para garantizar el confort térmico y la salubridad del ambiente interior [15]. Valores de la humedad relativa excesivamente bajos pueden provocar sequedad en las vías respiratorias y molestias oculares, mientras que niveles elevados favorecen la aparición de condensaciones, la proliferación microbiológica y el deterioro de materiales. En el caso concreto del taller de motores, la humedad puede verse influenciada por el régimen de ventilación y las condiciones exteriores.

Además de las incomodidades provocadas por desviaciones térmicas significativas, una gestión inadecuada de la climatización puede incrementar el consumo energético del edificio. Por lo que analizar la temperatura interior resulta relevante tanto desde el punto de vista del confort, como de la eficiencia energética.

2.3 Normativa y valores de referencia

La correcta interpretación de los parámetros ambientales medidos en un taller de motores requiere el establecimiento de un marco normativo que permita comparar los resultados obtenidos con valores de referencia reconocidos. Este marco se apoya en normativas internacionales, directivas europeas y guías técnicas que establecen límites de exposición y rangos recomendados para garantizar condiciones adecuadas de seguridad, salud y confort en entornos interiores.

En el contexto de edificios docentes con actividad técnica, resulta especialmente importante combinar criterios de calidad ambiental interior con normativas específicas de prevención de riesgos laborales.

- Normativa aplicable a partículas en suspensión

La **OMS** publicó en 2021 la actualización de sus directrices sobre calidad del aire, estableciendo valores guía más restrictivos para las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ debido a la evidencia científica acumulada sobre sus efectos adversos [7]. Dichos valores se han convertido en una referencia fundamental para la evaluación de ambientes interiores.

A nivel europeo, la **Directiva (UE) 2024/2881** relativa a la calidad del aire refuerza los objetivos de reducción de la exposición a partículas finas, alineando progresivamente los límites legales con las recomendaciones de la OMS [16].

- Límites normativos para exposición al **ruido**

⁴ El sistema vestibular, localizado en el oído interno, es el encargado de regular el equilibrio y la orientación espacial. Este sistema percibe los movimientos de la cabeza, así como las aceleraciones lineales y angulares, permitiendo mantener la estabilidad visual y postural.

⁵ Existe una relación psicrométrica entre la temperatura y la humedad relativa, de modo que, al aumentar la temperatura del aire, su capacidad para contener vapor de agua se incrementa, lo que provoca una disminución de la humedad relativa si el contenido absoluto de humedad se mantiene constante.

La exposición al ruido en entornos laborales está regulada por directivas europeas y normativas nacionales que establecen valores límite y niveles de acción para la protección de la salud auditiva de los trabajadores. La **Directiva 2003/10/CE**, actualizada mediante documentos técnicos recientes, fija un valor límite de exposición diaria equivalente de 87 dB(A), así como niveles de acción para la adopción de medidas preventivas [17].

- Recomendaciones para **condiciones térmicas y humedad relativa**

Las condiciones térmicas interiores se evalúan habitualmente mediante normas internacionales orientadas al confort térmico. La norma **ISO 7730** establece criterios para la evaluación del confort térmico basados en índices como el Porcentaje Previsible de Insatisfechos (*Predicted Percentage of Dissatisfied*, PPD), proporcionando rangos recomendados de temperatura y humedad relativa en función del tipo de actividad desarrollada [18].

Asimismo, la norma **UNE-EN 16798-1** define rangos de temperatura operativa y humedad adecuados para diferentes categorías de calidad ambiental interior en edificios no residenciales, incluyendo espacios docentes y técnicos [19].

El mantenimiento de estos rangos no solo contribuye al confort de los usuarios, sino que también favorece la eficiencia energética del edificio y el correcto funcionamiento de los equipos instalados en el taller.

A modo de síntesis, en la Tabla 2-2 se recogen las principales normativas y valores de referencia empleados en el presente trabajo para la evaluación de los parámetros ambientales monitorizados en el taller de motores del CUD-ENM.

Parámetro ambiental	Norma/Directiva/Guía	Valor de referencia principal	Aplicación en el estudio
PM2.5	OMS - Global Air Quality Guidelines (2021)	15 µg/m ³ (media diaria)	Evaluación de la calidad del aire interior y comparación con valores guía sanitarios
PM10	OMS - Global Air Quality Guidelines (2021)	45 µg/m ³ (media diaria)	Identificación de episodios de elevada carga particulada en el taller
Ruido	Directiva 2003/10/CE (actualizada 2021)	87 dB(A) límite diario 80-85 dB(A) niveles de acción	Evaluación del riesgo acústico
Temperatura	ISO 7730 (2021)	20-24°C (invierno) 23-26 °C (verano)	Evaluación de confort térmico
Humedad relativa	ISO 7730 UNE-EN 16798-1	30 % -70 %	Control higrotérmico y salubridad interior

Tabla 2-2 Normativa y valores de referencia aplicados.
(Elaboración propia con datos de [7 y 16-19])

La revisión del marco normativo y de los valores de referencia aplicables proporciona el criterio técnico necesario para interpretar los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio. A partir de este punto, resulta necesario analizar las tecnologías de monitorización ambiental disponibles y los sistemas de sensores empleados para la adquisición de datos, aspectos que se desarrollan en el siguiente apartado.

2.4 Tecnologías de monitorización ambiental y sensores multiparamétricos

El desarrollo de sistemas de monitorización ambiental en tiempo real ha experimentado un notable avance en los últimos años gracias a la integración de sensores multiparamétricos, tecnologías IoT y plataformas de comunicación inalámbrica. Estos sistemas permiten adquirir de forma simultánea múltiples variables ambientales, transmitir los datos a servidores remotos y visualizar la información en tiempo real mediante aplicaciones web o móviles.

En entornos industriales y docentes, como los talleres de motores, este tipo de tecnologías resulta especialmente útil debido a la elevada variabilidad temporal de las condiciones ambientales y a la necesidad de disponer de información continua para la toma de decisiones orientadas a la prevención de riesgos y la optimización del entorno de trabajo [4].

Con el objetivo de justificar la selección del sistema empleado en el presente estudio, se analizarán las soluciones multiparamétricas actualmente disponibles y sus prestaciones técnicas.

2.4.1 Sensores multiparamétricos para monitorización ambiental

Los sensores multiparamétricos integran en un único dispositivo la capacidad de medir distintos aspectos ambientales. Esta integración permite reducir costes de instalación, simplificar el despliegue del sistema y facilitar la sincronización temporal de los datos registrados [6].

Actualmente existen diversos sensores comerciales orientados a la monitorización ambiental interior. Entre los más empleados en entornos académicos e industriales se contemplaron las siguientes alternativas, Figura 2-2, al finalmente escogido (GTNode):

- **Airthings for Business:** sensores multiparamétricos con medición de CO₂, PM2.5, temperatura y humedad, orientados principalmente a oficinas y edificios administrativos. Presentan buena precisión, pero requieren suscripción de servicios en la nube y ofrecen opciones limitadas de personalización [20].
- **Sensirion Environmental Nodes:** plataformas modulares basadas en sensores de alta precisión, ampliamente utilizadas en investigación. Ofrecen elevada calidad de medida, aunque su coste y complejidad de integración pueden resultar elevados para despliegues extensos [21].
- **Netatmo Smart Indoor Air Quality Monitor:** orientado a entornos domésticos y educativos, limitado en robustez industrial y opciones de integración avanzada [22].



Figura 2-2 Sensores multiparamétricos, de izq. a der.: Airthings, Sensirion y Netatmo.
(Imágenes tomadas de [20-22])

Estos sensores presentan diferentes ventajas y limitaciones en términos de precisión, coste, facilidad de integración, robustez y escalabilidad, por lo que la elección del dispositivo más idóneo se ha basado en función del contexto de aplicación.

2.4.2 Justificación de la selección del sistema GTNode

La instrumentación empleada en este trabajo se basa en el sistema de sensores multiparamétricos GTNode, Figura 2-3, proporcionada por Energesis, una empresa española de ingeniería avanzada y tecnologías IoT con origen en la Universidad Politécnica de Valencia. Se especializa en el diseño e implementación de soluciones IoT para monitorización, control y análisis de variables medioambientales y energéticas, combinando hardware de sensorización con plataformas de gestión de datos inteligentes que facilitan la toma de decisiones fundamentadas. Su enfoque integra capacidades de IoT, modelado de datos y visualización avanzada, permitiendo capturar variables ambientales críticas en tiempo real y procesarlas mediante infraestructura conectada en red. El empleo de estos dispositivos dentro de este marco tecnológico no solo responde a criterios de precisión y fiabilidad, sino que también se enmarca en la estrategia de Energesis de contribuir a la monitorización ambiental inteligente y a la gestión eficiente de datos en entornos técnicos e industriales. Por todo ello, el sensor GTNode ha sido considerado la solución de monitorización ambiental que mejor se adecua a los requisitos técnicos y operativos del taller de motores del CUD-ENM.



Figura 2-3 Sensor GTNode del taller de motores CUD-ENM.
(Autoría propia)

Entre las principales ventajas técnicas del sistema GTNode destacan:

- **Conectividad WiFi integrada** que permite la transmisión remota de datos en tiempo real sin necesidad de infraestructuras adicionales cableadas [23].
- **Geolocalización y gestión remota mediante aplicación.** Lo que permite identificar la ubicación exacta de cada nodo sensor, gestionar múltiples dispositivos simultáneamente y visualizar los datos desde plataformas web o móviles, Figura 2-4. Característica especialmente útil en instalaciones con múltiples zonas de monitorización.

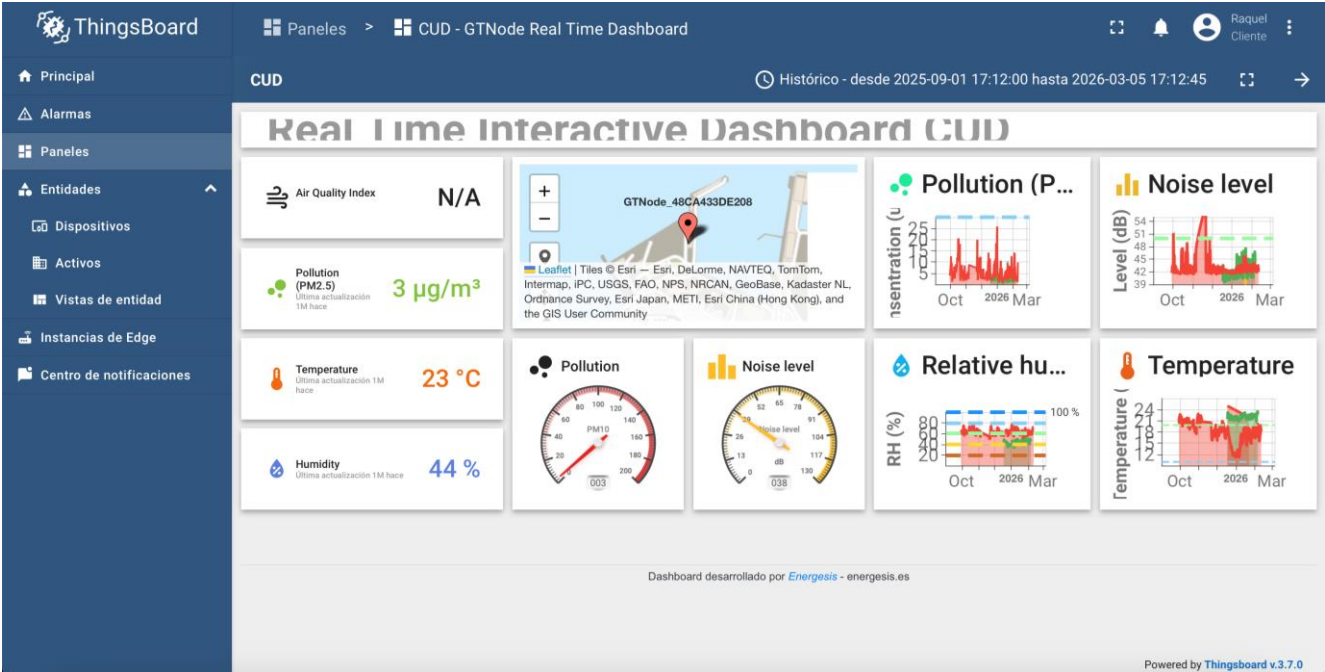


Figura 2-4 Interfaz aplicación sensor GTNode.
(Imagen de [24])

- **Medición simultánea de múltiples parámetros ambientales**, obteniendo una caracterización integral del entorno con un único dispositivo.
- **Arquitectura modular y escalable**, que facilita la ampliación futura del sistema a otras zonas del CUD-ENM o a instalaciones similares de la Armada, alineándose con los objetivos de digitalización y modernización tecnológica.
- **Facilidad de integración con plataformas de análisis de datos**, permitiendo el almacenamiento estructurado de la información y su posterior tratamiento.

Comparado con otras soluciones comerciales, el sistema GTNode ofrece un equilibrio adecuado entre precisión de medida, facilidad de instalación, conectividad remota y capacidad de gestión centralizada, aspectos clave para su aplicación en un entorno docente con un nivel de actividad considerable.

En la Tabla 2-3 se presenta la comparación entre las diferentes soluciones de monitorización ambiental multiparamétrica anteriormente detalladas, destacando las principales características técnicas de cada una y justificando la selección del sistema GTNode para su uso en el presente estudio.

Sistema	Parámetros medidos	Conectividad	Ventajas	Limitaciones
GTNode	PM2.5, PM10, Tª, HR, Ruido	WiFi + Cloud	Monitorización remota, geolocalización, escalable, apto entorno industrial-docente	Dependencia de red WiFi
Airthings	CO ₂ , PM, Tª, HR	WiFi + Cloud propietario	Interfaz intuitiva, buena precisión	Suscripción de servicio
Sensirion nodes	CO ₂ , PM, Tª, HR	Cableado/IoT	Alta precisión científica	Coste elevado
Netatmo	CO ₂ , Tª, HR, Ruido	WiFi + App	Fácil instalación	No orientado a uso industrial

Tabla 2-3 Comparación de los sistemas multiparamétricos de monitorización ambiental.
(Elaboración propia).

2.5 Herramientas matemáticas para el análisis de los datos

El análisis de las variables ambientales monitorizadas en el taller de motores requiere la aplicación de herramientas matemáticas y estadísticas que permitan transformar los datos brutos en información interpretable, cuantificar las relaciones entre variables y evaluar la estabilidad del entorno monitorizado de manera subjetiva.

Siguiendo un enfoque estructurado, el tratamiento matemático desarrollado en este trabajo se articula en tres bloques: tratamiento inicial de datos y modelización, análisis de correlación y Control Estadístico de Procesos (*Statistical Process Control*, SPC), enmarcado dentro del Control Estadístico de Calidad (*Statistical Quality Control*, SQC).

1. Tratamiento inicial de los datos. Estadística descriptiva y modelización.

La estadística descriptiva constituye el primer nivel de análisis en estudios de calidad ambiental [25]. Permite resumir grandes volúmenes de datos temporales mediante indicadores de tendencia y dispersión. En entornos industriales y docentes con monitorización continua, se emplean cuatro indicadores fundamentales que permiten caracterizar el comportamiento del parámetro, evaluar la estabilidad del entorno y detectar variaciones asociadas a cambios operativos [26]]. Esos cuatro son:

- **Media ($\bar{x}$):** representa el comportamiento promedio del sistema durante el periodo analizado y es calculada con (1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- **Desviación típica (s):** mide la variabilidad de la variable, indicando el grado de estabilidad del sistema. Es la raíz cuadrada de la varianza (s^2) y se calcula con (2):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Donde

x_i es cada observación y

n el número de observaciones.

- **Mínimo:** el menor valor observado de una variable durante el periodo de estudio. Indica las condiciones de fondo o niveles base del ambiente interior.
- **Máximo:** el mayor valor registrado. Permite identificar episodios de perturbación ambiental o eventos puntuales.

Percentiles

Los percentiles permiten describir la distribución de los datos más allá de la media, proporcionando información sobre su estructura interna. El percentil P_k es el valor por debajo del cual se encuentra el $k\%$ de las observaciones. Por ejemplo:

$P_{50} \rightarrow$ mediana.

$P_{90} \rightarrow$ valor que solo supera el 10 % de las mediciones.

A través del percentil 90 se identifican los episodios de mayor intensidad o carga del parámetro sometido a análisis, mientras que el percentil 50 permite caracterizar el comportamiento típico del éste.

Comparar percentiles con límites normativos facilita evaluar el nivel de cumplimiento de los últimos, especialmente cuando la distribución no es perfectamente normal, como suele ocurrir en entornos con picos puntuales. Como consecuencia, las herramientas de SPC no solo permiten describir el comportamiento ambiental, sino también evaluar su estabilidad estructural.

Diagramas de dispersión

El diagrama de dispersión es una herramienta gráfica fundamental en el análisis exploratorio de datos, que permite representar la relación entre dos variables cuantitativas [27]. Matemáticamente, consiste en representar pares ordenados en el plano cartesiano, donde cada punto corresponde a una observación registrada.

$$(x_i, y_i)$$

Donde x_i es la variable independiente o explicativa (eje horizontal) e y_i la variable dependiente o respuesta (eje vertical), en la observación i .

En el contexto del presente estudio, se emplean diagramas de dispersión del tipo:

$$(t_i, y_i)$$

donde t_i representa el instante temporal de la medición e y_i el valor de la variable ambiental medida (PM2.5, PM10, ruido, temperatura o humedad relativa). En este caso, el eje horizontal corresponde al tiempo y el eje vertical al valor del parámetro ambiental analizado.

En el sistema de monitorización implementado en el taller de motores del CUD-ENM, las variables ambientales son registradas de forma continua a lo largo del tiempo. Por ello, el análisis temporal mediante diagramas de dispersión permite:

- Visualizar la evolución dinámica de cada variable.
- Detectar episodios puntuales de actividad intensa.
- Identificar patrones recurrentes.
- Observar tendencias crecientes o decrecientes.
- Detectar posibles valores atípicos.

En este estudio se han generado diagramas de dispersión individuales para cada parámetro que permiten analizar el comportamiento independiente de cada variable dentro del entorno del taller. Desde un punto de vista matemático, cada diagrama representa una función discreta (3):

$$y = f(t) \tag{3}$$

donde la variable ambiental depende del tiempo de forma no necesariamente lineal.

El análisis visual permite identificar distintos comportamientos, representados en las gráficas de la Figura 2-5:

- a. **Tendencia:** si los puntos muestran una dirección predominante creciente o decreciente, puede inferirse la existencia de una tendencia temporal. Matemáticamente, esta tendencia puede aproximarse mediante una regresión lineal como (4):

$$y = \beta_0 + \beta_1 t \tag{4}$$

Donde:

y es la variable que se está analizando;

β_1 indica la pendiente de la recta (cómo cambia la variable con el tiempo):

Si $\beta_1 > 0$: evolución creciente, la variable aumenta con el tiempo, y

Si $\beta_1 < 0$: evolución decreciente, la variable disminuye con el tiempo;

β_0 el valor inicial o intercepto;

t el tiempo.

- b. Variabilidad:** la dispersión vertical de los puntos alrededor de un valor medio refleja la variabilidad del sistema, que puede cuantificarse mediante la desviación estándar (2).
- c. Picos o eventos extremos:** los valores alejados del conjunto principal indican eventos puntuales. En el taller de motores, estos pueden deberse al arranque de maquinaria, a sesiones prácticas intensivas o a cambios en la ventilación. Desde el punto de vista estadístico, estos puntos pueden analizarse como valores atípicos (*outliers*).
- d. Comportamiento estacionario:** si los valores oscilan alrededor de una media constante sin tendencia clara, el sistema puede considerarse aproximadamente estacionario en ese intervalo temporal.

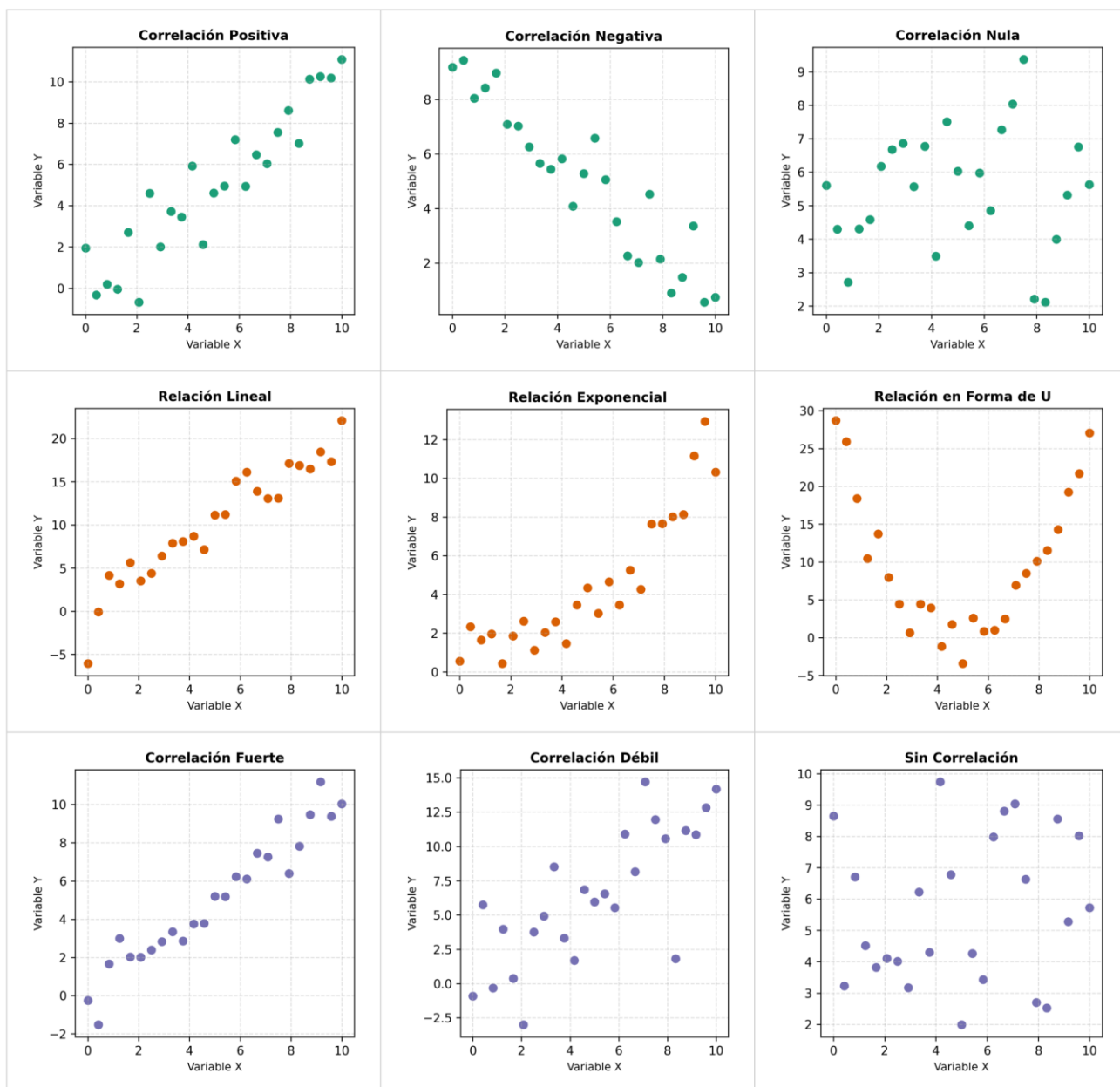


Figura 2-5 Diagramas de dispersión.
(Elaboración propia)

La comparación visual de los diagramas temporales permite además inferir posibles relaciones causales preliminares antes de aplicar modelos de regresión. Por ejemplo, si un incremento en el ruido coincide temporalmente con un incremento en PM10, puede plantearse una hipótesis de relación que posteriormente se verificará estadísticamente. En consecuencia, los diagramas de dispersión proporcionan una primera aproximación visual a posibles relaciones, sirviendo como base para el análisis inferencial posterior.

Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza constituye una herramienta estadística destinada a cuantificar la dispersión de una variable respecto a su valor medio; su raíz cuadrada corresponde a la desviación típica (3). En el contexto del presente estudio, permite evaluar el grado de estabilidad o fluctuación de los parámetros ambientales monitorizados en el taller de motores. Una varianza elevada indica inestabilidad ambiental, reflejando episodios discontinuos de actividad, mientras que una varianza baja sugiere

estabilidad. En definitiva, la varianza permite distinguir entre sistemas ambientalmente estables y sistemas con comportamiento dinámico o episódico [25].

2. Análisis multivariante: matriz de correlaciones.

Para analizar simultáneamente las múltiples variables ambientales del taller de motores (PM2.5, PM10, temperatura, humedad relativa y nivel sonoro), resulta necesario cuantificar la intensidad y dirección de su relación lineal. La herramienta matemática empleada para realizar dicho análisis en este estudio será la matriz de correlaciones, cuyos elementos se obtienen a partir del coeficiente de correlación de Pearson (5), que mide la intensidad de la relación lineal, o interdependencia, entre dos variables cuantitativas continuas [25].

Fundamento matemático

El coeficiente de correlación de Pearson se define como (5):

$$r_{xy} = \frac{Cov(X, Y)}{(s_x \cdot s_y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\Sigma[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{[(n - 1)s_x s_y]} \quad (5)$$

donde la covarianza muestral, que mide la variación conjunta entre x e y , se expresa como (6):

$$Cov(X, Y) = s_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (6)$$

En la que:

x_i, y_i = observaciones individuales

$\bar{x}, \bar{y}$ = medias muestrales

s_x, s_y = desviaciones estándar de x e y

n = número total de observaciones

La normalización por s_x, s_y elimina las unidades físicas, permitiendo comparar directamente relaciones entre variables heterogéneas. Esto es fundamental para el presente estudio ya que:

- Masa de PM se mide el $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Temperatura en $^{\circ}\text{C}$
- Ruido en dB
- Humedad relativa en %

Por otro lado, el coeficiente r_{xy} toma valores en el intervalo $[-1, 1]$, donde los próximos a los extremos indican correlación fuerte y los cercanos a 0 ausencia de relación lineal, como vemos en la representación de la Figura 2-6:

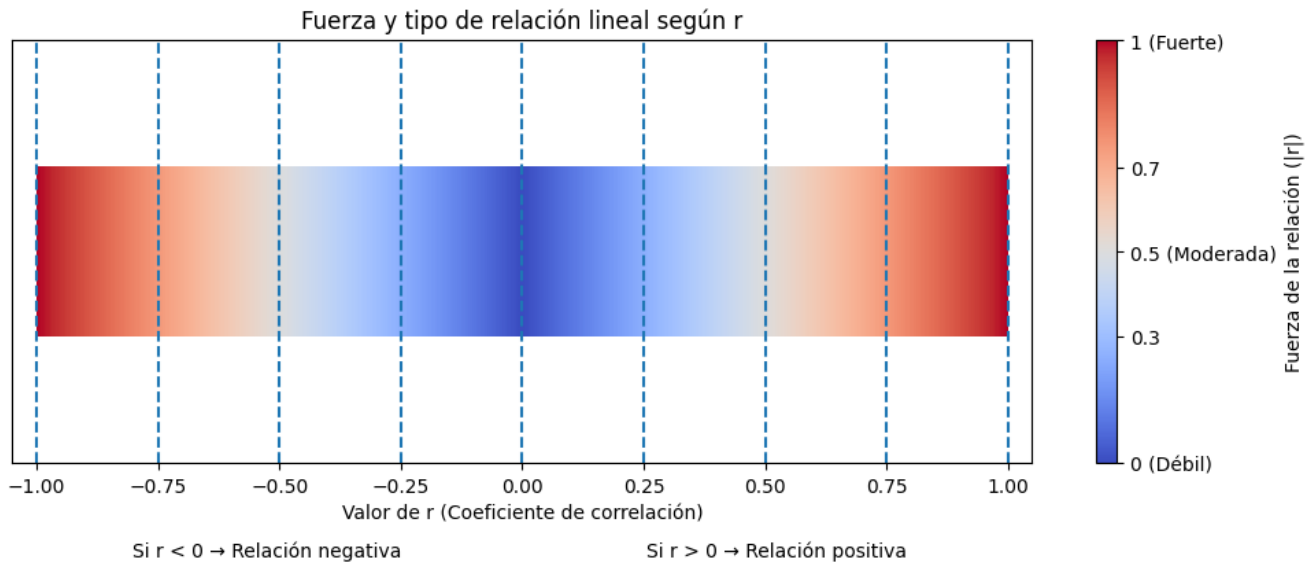


Figura 2-6 Interpretación del coeficiente r.
(Elaboración propia).

Construcción de la matriz

Si se consideran p variables ambientales, la matriz de correlaciones R (7) es una matriz cuadrada simétrica de dimensión $p \times p$, tal que:

$$R = [r_{ij}] = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \cdots \\ r_{21} & 1 & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (7)$$

Cada elemento r_{ij} representa la correlación entre la variable i y la variable j . La diagonal principal contiene la autocorrelación de cada variable, que es siempre igual a 1. En el caso concreto del taller de motores, las variables consideradas son 7: masa y número de PM2.5 y PM10, temperatura, humedad y ruido; por tanto, se obtiene una matriz 7×7 .

Interpretación y relevancia en el contexto del taller

En un entorno como el taller de motores, donde coexisten variables de distinta naturaleza física, esta herramienta permite identificar las interdependencias estructurales entre los parámetros ambientales monitorizados, diferenciando qué variables están asociadas entre sí y permitiendo estudiar el comportamiento conjunto del sistema ambiental como un todo integrado y no como parámetros aislados. Resumiendo, la matriz obtenida cumple las siguientes funciones clave:

- Identificar relaciones y representarlas en mapas de calor.
- Sirve de base matemática para el análisis llevado a cabo en el apartado 3.4.
- Justificar medidas correctivas basadas en evidencia.

Análisis de regresión

Mientras que la estadística descriptiva permite caracterizar el comportamiento individual de cada variable y el análisis de correlación cuantifica la intensidad de su relación lineal, la regresión lineal permite dar un paso adicional: modelizar matemáticamente la influencia de una variable sobre otra y cuantificar dicha relación en términos predictivos.

En un entorno como el taller de motores, donde las variables ambientales están influenciadas por la actividad mecánica, la ocupación y el régimen de ventilación, resulta de especial interés determinar si el incremento del nivel sonoro se traduce en un aumento de partículas, si la ocupación influye sobre la temperatura y si determinadas combinaciones de variables permiten anticipar episodios de mayor carga ambiental.

Por tanto, la regresión constituye una herramienta de apoyo clave para transformar los datos en un modelo explicativo del comportamiento ambiental del sistema.

El **modelo lineal simple** permite analizar la influencia de una variable ambiental sobre otra y se expresa como muestra (8):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (8)$$

Donde:

y = variable dependiente (variable a explicar)

x = variable independiente (variable explicativa)

ε = término de error aleatorio

β_1 es la pendiente y se calcula según (9):

$$\beta_1 = \frac{Cov(x, y)}{Var(x)} \quad (9)$$

y β_0 la ordenada en el origen (10):

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (10)$$

En entornos complejos como el taller, una variable puede depender simultáneamente de varias. El **modelo múltiple**, utilizado en análisis de edificios inteligentes y monitorización IoT [28], se expresa como (11):

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_j + \varepsilon \quad (11)$$

Este modelo permite evaluar la influencia conjunta de unos parámetros sobre otros, determinar qué variable tiene mayor peso explicativo y reducir errores asociados a análisis univariantes.

El ajuste global del modelo se evalúa mediante el **coeficiente de determinación** R^2 , definido como (12):

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \right) \quad (12)$$

Donde SS_{res} es la suma de cuadrados de los residuos y SS_{tot} es la suma total de cuadrados [25].

$R^2 \approx 1$ indica que el modelo explica gran parte de la variabilidad.

$R^2 \approx 0$ indica escasa capacidad explicativa.

En el contexto del taller, un R^2 elevado indicaría fuerte asociación entre variables y un R^2 bajo indicaría que existen otros factores no considerados.

La Tabla 2-4 resume los términos descritos en el estudio de la regresión (izquierda) y lo que indican (derecha):

Pendiente (β_1)	Magnitud y dirección de la relación.
Intercepto (β_0)	Valor estimado cuando $x = 0$.
R^2	Porcentaje de variabilidad explicada.
Error estándar (ε)	Precisión de la estimación.

Tabla 2-4 Términos del análisis de regresión.
(Elaboración propia con datos de [28])

Analizar la regresión posibilita cuantificar relaciones ambientales, identificar variables dominantes, aportar capacidad predictiva y fundamentar propuestas de mejora. En definitiva, convierte una descripción pasiva del entorno en un análisis activo orientado a la toma de decisiones final.

3. Técnicas de Control Estadístico de Procesos (SPC) para analizar la variabilidad.

La monitorización ambiental continua implementada en el taller de motores genera un conjunto de datos de naturaleza temporal que permite analizar no solo valores medios, sino también la estabilidad del sistema ambiental a lo largo del tiempo. En este contexto, resulta pertinente aplicar herramientas propias del SPC, empleadas en entornos industriales para la supervisión y detección de desviaciones [25].

El objetivo fundamental del SPC en el presente estudio no es únicamente identificar superaciones puntuales de valores normativos, sino también evaluar si el comportamiento ambiental del taller puede considerarse estable o si presenta variabilidades. Por lo tanto, se incorporan las siguientes herramientas de control estadístico para detectar dichas desviaciones:

Gráficos de Control (Shewhart)

El gráfico de control de Shewhart (Figura 2-7) para variables continuas, utilizado en estudios recientes sobre la calidad del aire interior en entornos educativos [28], se construye a partir de la media muestral $\bar{x}$ (2) y la desviación típica s (3), estableciendo límites de control superior (LCS) e inferior (LCI) definidos como muestra (13):

$$\begin{aligned} LCS &= \bar{X} + 3s \\ LCI &= \bar{X} - 3s \end{aligned} \quad (13)$$

Bajo la hipótesis de que los datos siguen una distribución aproximadamente normal, supuesto razonable en series temporales de gran tamaño muestral, el 99,73 % de las observaciones deberían situarse dentro de dichos límites si el proceso se encuentra bajo control estadístico. Por tanto, los límites de control representan umbrales estadísticos que permiten evaluar la estabilidad del sistema y detectar desviaciones significativas respecto a su comportamiento habitual.

Los valores que se sitúan fuera de los límites de control se consideran puntos fuera de control y evidencian la presencia de causas especiales no atribuibles a la variabilidad natural del sistema. Estos puntos indican anomalías o eventos puntuales que alteran el comportamiento esperado del proceso.

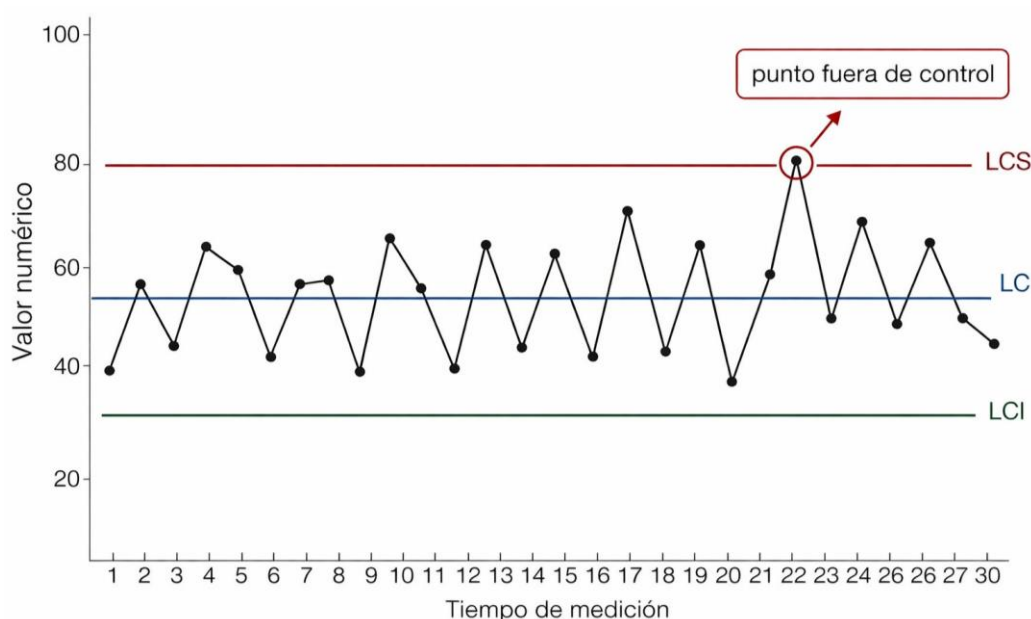


Figura 2-7 Ejemplo del gráfico de control de Shewart.
(Elaborado con IA)

Diagramas de caja (*boxplots*)

Los diagramas de caja y bigotes son una herramienta de estadística descriptiva utilizada para representar de forma simplificada la distribución de una variable cuantitativa a partir de sus cuartiles [29]. Se construyen mediante el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2) y el tercer cuartil (Q3), definiendo el rango intercuartílico como muestra (14):

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (14)$$

La representación gráfica (Figura 2-8) incluye una caja entre Q1 y Q3, la mediana en su interior y unos bigotes que se extienden hasta los valores extremos no atípicos. Los valores fuera del intervalo $[Q1 - 1.5 \cdot IQR, Q3 + 1.5 \cdot IQR]$ se consideran valores atípicos. Aplicar esta información al presente estudio permite reforzar mediante una representación más visual la comparación de los distintos escenarios. De los diagramas sacamos la siguiente información:

- El valor típico de cada parámetro (mediana).
- La variabilidad del sistema (IQR).
- Asimetrías en la distribución y episodios extremos.

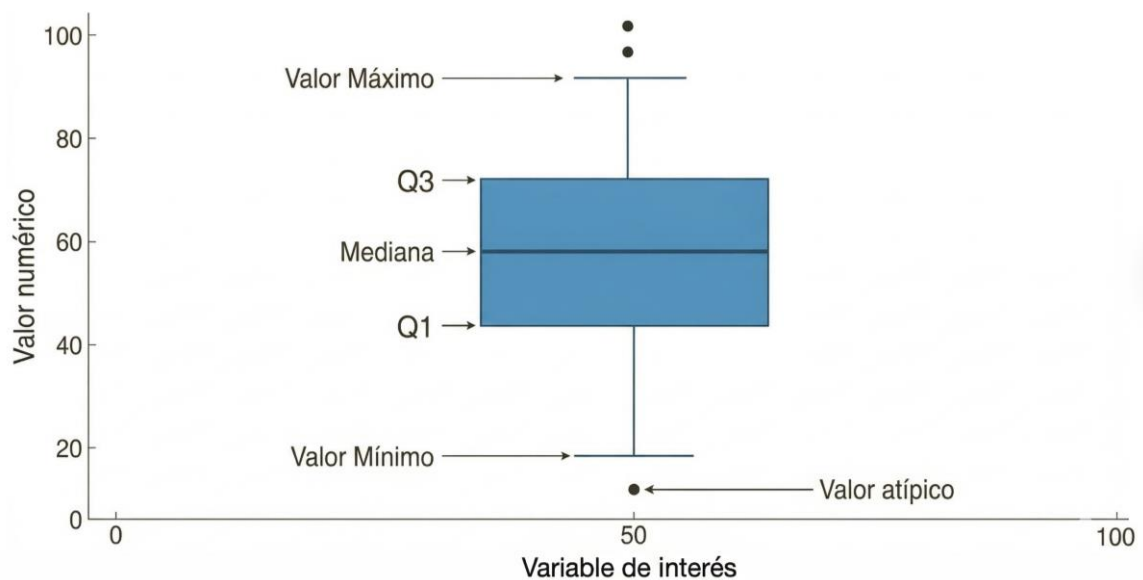


Figura 2-8 Ejemplo del diagrama de caja y bigotes.
(Elaboración propia)

2.6 Aplicación de IoT e IA en la monitorización ambiental

La creciente digitalización de entornos industriales y académicos ha transformado los sistemas tradicionales de monitorización ambiental en infraestructuras inteligentes capaces de generar, transmitir y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real. En este contexto, la convergencia entre tecnologías IoT y técnicas avanzadas de Inteligencia Artificial (IA) permite evolucionar de la medición descriptiva al análisis predictivo del comportamiento ambiental [30 y 31].

Mientras que las herramientas estadísticas clásicas desarrolladas en el apartado 2.5 permiten caracterizar la estabilidad y el cumplimiento normativo de las variables monitorizadas, la integración de la IA amplía el alcance analítico del sistema. Este enfoque no se limita a evaluar si determinados parámetros superan umbrales establecidos, sino que posibilita:

- Identificar patrones operativos recurrentes asociados al uso del taller.
- Inferir el comportamiento dinámico del sistema de ventilación.
- Anticipar situaciones de riesgo mediante modelos predictivos.

Desde una perspectiva técnica, el IoT aplicado a la monitorización ambiental puede estructurarse en cuatro capas funcionales interdependientes [32], ilustradas en la Figura 2-9:

1. **Capa de sensorización:** encargada de la captación física de magnitudes ambientales.
2. **Capa de adquisición y transmisión:** responsable de la digitalización, sincronización temporal y envío de datos mediante protocolos de comunicación eficientes.
3. **Capa de almacenamiento y gestión de datos:** garantiza la persistencia estructurada de series temporales y su integridad.
4. **Capa de procesamiento inteligente:** donde se aplican modelos matemáticos y algoritmos de aprendizaje automático para extraer conocimiento a partir de los datos recopilados.

Es precisamente en esta última capa donde interviene la Inteligencia Artificial. La disponibilidad de datos multiparamétricos con resolución temporal convierte el taller de motores en un sistema dinámico susceptible de modelización matemática avanzada. De este modo, la combinación de IoT e IA supone un cambio en la metodología, convirtiendo un análisis basado en indicadores individuales en una modelización orientada a la predicción, optimización y toma de decisiones fundamentada.



Figura 2-9 Esquema capas IoT.
(Generada con IA)

A partir de este marco conceptual, esquematizado en la Figura 2-9, se desarrollan las principales técnicas de Inteligencia Artificial aplicables al sistema de monitorización del taller.

2.6.1 Técnicas de IA para la detección de patrones y situaciones de riesgo

El presente estudio no tiene por objetivo principal evaluar cada variable de forma aislada mediante un control por umbrales, sino analizar conjuntamente todas las mediciones y detectar patrones complejos que puedan preceder a situaciones críticas. Abordar este análisis ambiental desde una perspectiva más avanzada permite anticipar las condiciones de riesgo antes de que se materialicen, posibilitando la adopción de medidas correctivas como aumentar la ventilación, reorganizar la actividad práctica o reducir la ocupación. Para ello se hace uso de los siguientes modelos de IA:

Modelos de predicción para anticipar valores críticos

Una de las estrategias más relevantes consiste en instalar sistemas capaces de predecir la evolución futura de variables ambientales clave. Modelos como *Random Forest* o *XGBoost* permiten estimar cómo evolucionará una variable en función de otras, prediciendo la superación de valores límite y activando alarmas preventivas [33] que transforman el sistema en un mecanismo de alerta temprana, donde las

decisiones no se toman cuando el problema ya ha ocurrido, sino cuando existen indicios estadísticos de que va a producirse. En concreto, el modelo *Random Forest* pertenece a la familia de métodos de aprendizaje supervisado⁶ basados en árboles de decisión y se caracteriza por su capacidad para modelizar relaciones no lineales entre variables y evaluar la importancia relativa de cada predictor dentro del sistema analizado [34].

En el taller esto permitiría activar ventilación adicional antes de que las partículas superen niveles recomendados, ajustar la planificación de prácticas si se detecta acumulación progresiva de contaminantes, e identificar momentos del día con mayor probabilidad de riesgo ambiental.

Detección de anomalías

En muchos casos, las situaciones problemáticas no se caracterizan por superar un valor, sino por comportamientos inusuales respecto al funcionamiento habitual del taller. Para este tipo de análisis pueden emplearse técnicas de detección de anomalías como:

- Algoritmos de agrupamiento (*clustering*) que identifican estados normales de funcionamiento y permiten detectar observaciones que no encajan en dichos patrones.
- Redes neuronales tipo *autoencoder*, que aprenden cómo es el comportamiento habitual del sistema y detectan desviaciones significativas [32].

En la práctica, estos modelos pueden detectar incrementos anómalos de partículas que no coinciden con el nivel de ocupación habitual, patrones de ruido incompatibles con la actividad prevista, o combinaciones inusuales de temperatura y concentración de contaminantes. Este tipo de análisis es especialmente útil cuando no existe una única variable crítica, sino un conjunto de factores que indican una condición potencialmente desfavorable.

Aplicación a la toma de decisiones

La implementación de estas técnicas en el sistema de monitorización permitirá transformar el taller en un entorno inteligente capaz de:

- Detectar automáticamente situaciones anómalas.
- Anticipar episodios de riesgo ambiental.
- Evaluar la eficacia de la ventilación.
- Optimizar la planificación de actividades prácticas.
- Reducir la probabilidad de exposición a condiciones no deseables.

En definitiva, la Inteligencia Artificial complementa el análisis estadístico clásico desarrollado en el apartado 2.5, aportando información a la capacidad predictiva que mejora la gestión ambiental del taller [32].

Una vez establecida esta base teórica en la que se desarrollan la metodología y técnicas que se implementarán en el apartado 3.4 y se evaluarán en el Capítulo 4 de esta memoria, se procede a describir el proceso experimental seguido para el diseño del sistema de adquisición, el plan de medida y la interpretación de los datos registrados.

⁶ El aprendizaje no supervisado es una rama del *machine learning* en la que los algoritmos analizan datos sin etiquetas previas, es decir, sin respuestas correctas conocidas.

3 DESARROLLO DEL TFG

El presente capítulo describe de manera detallada el desarrollo experimental llevado a cabo para la monitorización ambiental del taller de motores. Se exponen las características del entorno de estudio, la instrumentación empleada, el diseño del plan de medida y el procedimiento seguido para el tratamiento y análisis de los datos obtenidos. La descripción del procedimiento permite garantizar la reproducibilidad del estudio y justificar técnicamente las decisiones adoptadas durante su ejecución.

3.1 Caracterización del entorno de estudio

El presente estudio se desarrolla en el taller de motores del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM). Ubicado en el edificio “Isaac Peral”, Figura 3-1, el taller forma parte del conjunto de infraestructuras docentes del centro, descritas en la documentación institucional [35].



Figura 3-1 Entrada del edificio Isaac Peral de la ENM.
(Fuente: [36])

Geográfica y funcionalmente, la ubicación del taller resulta especialmente relevante para el análisis ambiental desarrollado en este trabajo. El edificio, Figura 3-2, se encuentra próximo al muelle Almirante Vierna y a las zonas de atraque de embarcaciones utilizadas en la formación naval, lo que implica la posible influencia de fuentes externas como maniobras de lanchas de instrucción, actividad de embarcaciones de la Guardia Civil, del Servicio de Aduanas o del patrullero “Tabarca” de la Armada Española, entre otras. Esta proximidad introduce un contexto acústico y ambiental particular que diferencia este espacio de un laboratorio convencional situado en un entorno académico aislado.

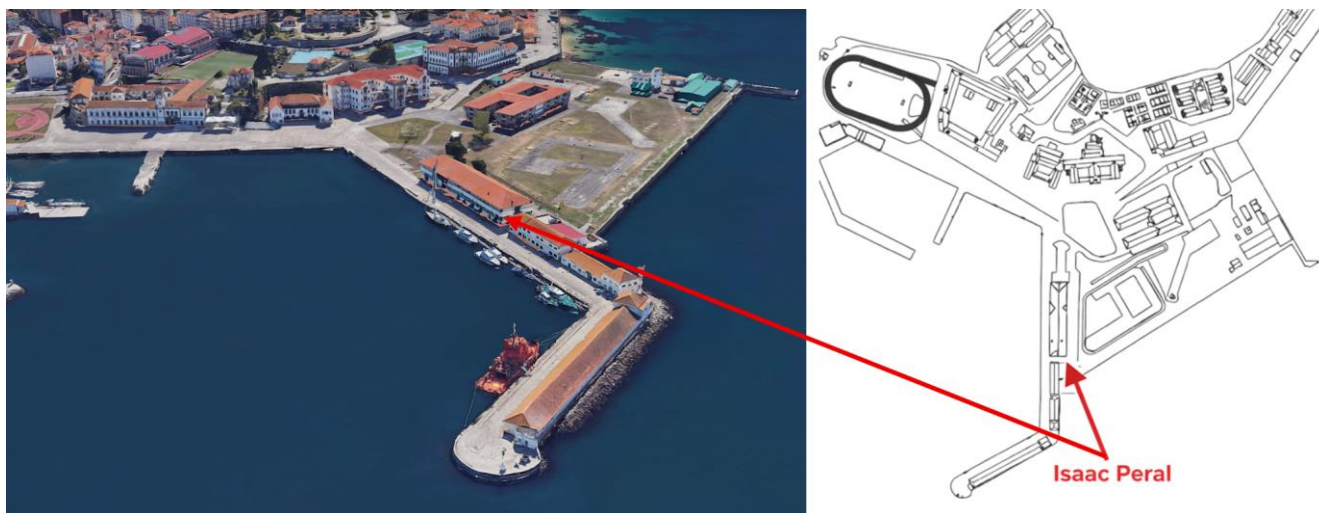


Figura 3-2 Vista alzada del muelle Almirante Vierna y plano de la ENM.
(Google Earth)

El taller de motores es un espacio docente de carácter técnico-industrial destinado a la formación práctica en sistemas de propulsión y motores térmicos. En él, se desarrollan actividades relacionadas con el desmontaje, montaje, diagnóstico y ensayo de motores de combustión interna y sus sistemas auxiliares, lo que implica la generación de emisiones térmicas, partículas en suspensión y niveles sonoros elevados durante determinados periodos de uso.

Desde el punto de vista experimental, el taller constituye un entorno semicerrado en el que confluyen influencias internas y externas. Internamente, la actividad mecánica y la ocupación variable asociada a las prácticas docentes generan alteraciones ambientales directas. Externamente, la actividad portuaria y las condiciones meteorológicas pueden introducir perturbaciones adicionales detectables por el sistema de monitorización.

Esta caracterización del entorno permite interpretar adecuadamente los datos obtenidos y diferenciar la contribución específica de la actividad interna del taller respecto a las posibles perturbaciones externas.

3.1.1 Descripción física del taller

El taller de motores se localiza en la planta baja del edificio “Isaac Peral”, Figura 3-3, al igual que la mayoría de los laboratorios técnicos del centro, lo que conforma un área dedicada a prácticas experimentales de carácter ingenieril. El espacio de 133 metros cuadrados y planta rectangular está diseñado para el trabajo con motores térmicos, bancos de ensayo y de trabajo, y equipos auxiliares. La disposición interna combina 24 puestos de trabajo, con áreas de circulación y espacios de almacenamiento de herramientas.



Figura 3-3 Plano de la planta baja del edificio Isaac Peral.
(Archivo ENM)

Desde un punto de vista constructivo, el espacio se presenta como un recinto cerrado al que se accede a través de una única puerta. Delimitado por cerramientos rígidos, cuenta con una altura aproximada de 4 metros y un sistema de ventilación natural que consta de ventanales dispuestos perimetralmente dando al exterior del edificio. Por otro lado, las condiciones ambientales del taller son propias de entornos docentes ligeramente industriales: emisión de calor y generación de partículas en suspensión durante el funcionamiento de motores, incremento significativo del nivel sonoro durante las prácticas, y variaciones de humedad asociadas a condiciones meteorológicas exteriores y de ventilación.

3.1.2 Actividad desarrollada y fuentes emisoras

El taller se emplea para la realización de prácticas docentes vinculadas a las asignaturas de Termodinámica y Transmisión del Calor, Ingeniería Térmica I y Máquinas y Motores Navales. Las actividades desarrolladas en él incluyen la puesta en marcha, análisis, mantenimiento básico y desmontaje de los componentes de motores, el estudio de ciclos termodinámicos reales, ensayos de funcionamiento bajo distintas condiciones de carga y la medición de parámetros mecánicos y térmicos. Identificando así algunos de los principales generadores de perturbación ambiental interior. La interacción simultánea de estas fuentes convierte el taller en un sistema en el que las variables ambientales evolucionan en función de la intensidad de la actividad práctica.

3.1.3 Condiciones operativas habituales

El uso del taller se estructura en sesiones prácticas programadas dentro del calendario académico. Habitualmente la ocupación oscila entre 24-26 alumnos por sesión, cuya duración no supera las 3 horas, siendo lo normal 2. La Figura 3-4 muestra un ejemplo del horario del alumnado de la ENM. Las prácticas suelen implicar fases alternas de operación y parada de los motores, por ello, en el presente estudio se distinguen tres escenarios operativos principales:

- Periodos de actividad.
- Periodos de transición entre prácticas.
- Ausencia de actividad.

Cada uno de estos escenarios genera un comportamiento ambiental diferenciado en términos de nivel sonoro equivalente, concentración de partículas, evolución térmica, y dinámica de disipación tras la actividad. Estas condiciones variables constituyen el marco experimental sobre el que se implementa el sistema de monitorización descrito en el apartado siguiente.

(Fuente: aplicación Minerva-ENM).

3.2 Sistema de monitorización implementado

Con el fin de caracterizar cuantitativamente el comportamiento ambiental del taller de motores, se ha implementado un sistema de monitorización multiparamétrica basado en tecnología IoT, con el objetivo de obtener series temporales continuas que permitan analizar la dinámica del entorno bajo distintas condiciones operativas.

El sistema instalado responde a los principios descritos en el apartado 2.4, estructurándose en torno a un nodo de adquisición capaz de medir simultáneamente distintas magnitudes ambientales y transmitir los datos para su almacenamiento y posterior análisis.

3.2.1 Instrumentación empleada, ubicación y gestión de datos

El dispositivo empleado, seleccionado tras el análisis comparativo realizado en el subapartado 2.4.1, es el sensor multiparamétrico GTNode; con él, se realiza la adquisición automática de datos que envía a la plataforma de almacenamiento, donde quedan registrados con marca temporal para su posterior tratamiento estadístico y aplicación de modelos predictivos. El sistema, Figura 3-5, integra múltiples variables en un único nodo, lo que permite asegurar la sincronización temporal de los registros y evitar desalineaciones entre parámetros.



Figura 3-5 Disposición de los sensores.
(Autoría propia)

El sistema presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados. En primer lugar, la monitorización se ha realizado mediante un único sensor, por lo que los valores registrados representan las condiciones ambientales en el punto de medida, pero pueden no reflejar completamente la variabilidad espacial del taller.

La ubicación del nodo de medida dentro del taller, Figura 3-6, se seleccionó atendiendo a criterios de representatividad y fiabilidad de los datos, permitiendo obtener una medida representativa del ambiente general del taller y evitar sesgos derivados de mediciones excesivamente localizadas. Por ello, se encuentra en una posición alejada de corrientes directas de ventilación, cuya altura es aproximadamente equivalente a la zona de respiración, y en una zona central del espacio para capturar el comportamiento medio.



Figura 3-6 Ubicación del sensor dentro del taller.
(Fuente archivo ENM)

Operar bajo un esquema de monitorización continua en el que cada registro incluye una marca temporal que precede a los valores simultáneos de todas las variables medidas, Figura 3-7, permite almacenar los datos de manera estructurada para poder graficarlos y analizarlos a continuación.

```
device,timestamp_ms,key,value
GTNode_48CA433DE208,1759406337351,temperature,22.77
GTNode_48CA433DE208,1759406273627,temperature,22.77
GTNode_48CA433DE208,1759406209635,temperature,22.8
GTNode_48CA433DE208,1759406146917,temperature,22.78
GTNode_48CA433DE208,1759406083162,temperature,22.81
GTNode_48CA433DE208,1759406019428,temperature,22.81
GTNode_48CA433DE208,1759405955434,temperature,22.8
GTNode_48CA433DE208,1759405892676,temperature,22.8
GTNode_48CA433DE208,1759405828975,temperature,22.83
GTNode_48CA433DE208,1759405764992,temperature,22.84
GTNode_48CA433DE208,1759405702280,temperature,22.81
```

Figura 3-7 Ejemplo de datos brutos del sensor.

(Base de datos propia)

3.3 Diseño del plan de medida

El diseño experimental del presente trabajo se estructuró con el objetivo de caracterizar el comportamiento ambiental del taller bajo condiciones reales de uso académico, incorporando además un periodo de referencia que permitiera aislar la influencia específica de la actividad mecánica desarrollada en el interior del laboratorio. Para ello, se estableció un periodo total de monitorización de seis semanas con un registro de datos continuo.

3.3.1 Periodo de monitorización y frecuencia de muestreo

El estudio comprende cinco semanas con prácticas docentes (8B, 10B, 13B, 14A y 19A) programadas en el taller y diez semanas sin prácticas de laboratorio (se escoge la semana 9A de referencia o control). El horario sigue como muestra la Figura 3-8:

SEMANA	L	M	X	J	V
8B	20-10-25	21-10-25	22-10-25	23-10-25	24-10-25
10B	03-11-25	04-11-25	05-11-25	06-11-25	07-11-25
13B	17-11-25	18-11-25	19-11-25	20-11-25	21-11-25
14A	12-01-25	13-01-25	14-01-25	15-01-25	16-01-25
19A	19-01-26	20-01-26	21-01-26	22-01-26	23-01-26

BRIGADA	CUATRIMESTRE	ASIGNATURAS
2ª	1er	Termodinámica
2ª	2º	Teoría de Máquinas y Motores
4ª	1er	Ingeniería Térmica I

1er cuatrimestre	HORAS	SEMANA 8B				
		L	M	X	J	V
	1ª 0815-0905					0815-1000
	2ª 0910-1000				0815-1205	
	3ª 1020-1110					
	4ª 1115-1205		1115-1300			
	5ª A 1210-1300					
	5ª B 1430-1520					
	6ª 1530-1620					
	7ª 1625-1715					

HORAS		SEMANA 10B				
		L	M	X	J	V
1ª	0815-0905					0815-1000
2ª	0910-1000				0815-1000	0815-1000
3ª	1020-1110					
4ª	1115-1205		1115-1300		1115-1300	
5ª A	1210-1300					
5ª B	1430-1520					
6ª	1530-1620					
7ª	1625-1715					

HORAS		SEMANA 13B				
		L	M	X	J	V
1ª	0815-0905				0815-1000	0815-1000
2ª	0910-1000					
3ª	1020-1110					
4ª	1115-1205		1115-1300		1115-1300	
5ª A	1210-1300					
5ª B	1430-1520					
6ª	1530-1620					
7ª	1625-1715					

HORAS		SEMANA 14A				
		L	M	X	J	V
1ª	0815-0905					
2ª	0910-1000				0815-1205	
3ª	1020-1110					
4ª	1115-1205					
5ª A	1210-1300					
5ª B	1430-1520					
6ª	1530-1620		1530-1715		1530-1715	
7ª	1625-1715					

2º cuatrimestre	HORAS	SEMANA 19A				
		L	M	X	J	V
	1ª 0815-0905					
	2ª 0910-1000					
	3ª 1020-1110				1020-1205	
	4ª 1115-1205		1115-1300			
	5ª A 1210-1300					
	5ª B 1430-1520					
	6ª 1530-1620	1530-1715	1530-1715			
	7ª 1625-1715					

Figura 3-8 Horarios de las prácticas.

(Elaboración propia con información de archivos de la ENM)

La semana sin prácticas no implica ausencia total de actividad en el entorno, sino ausencia de funcionamiento de motores o manipulación de herramientas y semejantes en el interior del taller. Esta distinción resulta relevante, ya que, como se dijo al principio del capítulo, el taller se encuentra en un área portuaria con actividad marítima frecuente, por lo que variaciones que podamos apreciar esa semana pueden deberse a dicha actividad. Por tanto, la semana sin motores no se considera una semana “sin influencia”, sino una semana sin fuente emisora interna principal, estableciendo una base que permite evaluar la influencia relativa de la actividad interior frente a factores externos, validando la interpretación de los resultados obtenidos en semanas activas.

El sistema de monitorización operó de forma continua durante las seis semanas, con una frecuencia de adquisición de un registro por minuto. Esta resolución temporal permite obtener las gráficas con las que se analizan los ciclos diarios, destacando los picos en horario lectivo, Figura 3-9, así como la influencia de condiciones externas fuera del horario de uso del taller.

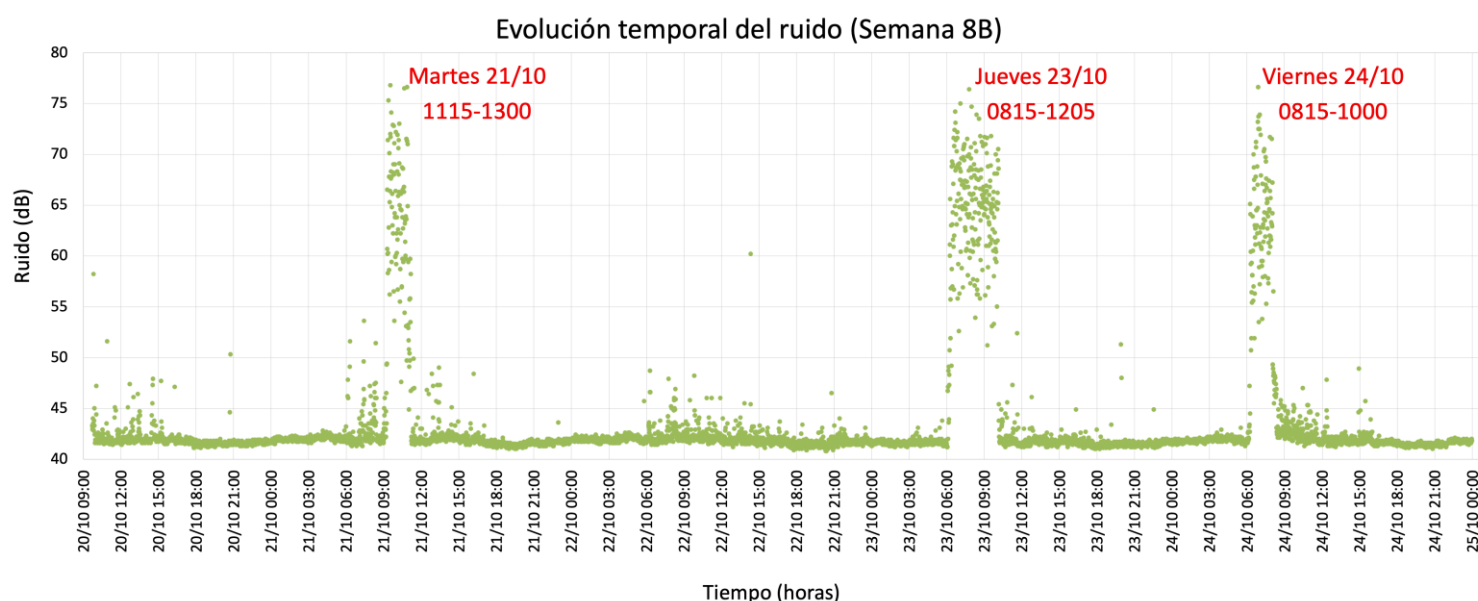


Figura 3-9 Ejemplo de picos de ruido en horas de uso del taller (semana 8B).
(Elaboración propia)

3.3.2 Tratamiento previo y estructuración de datos

El sistema generó inicialmente un archivo continuo de datos en bruto que incluye la totalidad de los registros temporales. Posteriormente, se realizó una criba y estructuración de los datos con los siguientes objetivos:

- Separación por semanas de monitorización.
- Clasificación por parámetros ambientales.

Esta estructuración permite generar los conjuntos de datos diferenciados para el análisis descriptivo, evaluación normativa, aplicación de técnicas de control estadístico, e implementación de modelos de Inteligencia Artificial que a continuación se desarrollan.

3.4 Análisis de datos

Una vez completado el proceso de adquisición y segmentación de los datos, se establece el siguiente protocolo de tratamiento y análisis estructurado con el objetivo de garantizar la coherencia metodológica y la reproducibilidad del estudio.

El análisis se desarrolla en cinco niveles:

1. Depuración y validación de datos

El conjunto de datos original generado por el nodo de monitorización incluía registros continuos con frecuencia de un minuto durante todo el periodo de estudio. Antes de proceder al análisis estadístico, se realiza un proceso de validación en el que se verifica la integridad temporal de los registros, se identifican posibles valores atípicos extremos asociados a errores instrumentales y se revisa la coherencia entre variables simultáneas.

Los datos fueron estructurados en archivos diferenciados, lo que permitió su análisis individual y comparativo. No se eliminaron picos asociados a la actividad real del entorno, ya que forman parte del comportamiento natural del sistema bajo estudio. Únicamente se contemplaría la exclusión de registros claramente erróneos desde el punto de vista instrumental.

2. Comparación entre escenarios: análisis descriptivo y de evolución temporal

En este primer nivel de análisis, obtenemos los estadísticos descriptivos básicos que permiten caracterizar no solo el valor medio de los parámetros monitorizados, sino también su variabilidad, estabilidad temporal y presencia de episodios extremos, fundamentales para interpretar el comportamiento del sistema monitorizado. Para ello se calcula la media, la desviación estándar, los valores máximos y mínimos, y los percentiles representativos P50, P90. Los resultados obtenidos serán contrastados con los valores guía establecidos en el marco normativo desarrollado en el apartado 2.3, analizando el cumplimiento de valores medios diarios y la superación de percentiles. Esta evaluación permitirá determinar si el entorno cumple con los criterios de seguridad y confort exigidos.

El segundo nivel de análisis consiste en el estudio de la evolución temporal de los datos registrados, profundizando en el comportamiento dinámico del sistema ambiental del taller y relacionando los cambios observados con las actividades desarrolladas en él. Para visualizar dicha influencia, se grafican las series temporales correspondientes a cada uno de los parámetros monitorizados a lo largo de las diferentes semanas de estudio, recogidas en el Anexo IV. Esta representación permite identificar episodios relevantes y comparar la respuesta de cada variable ante éstos.

Esta fase finaliza comparando las semanas con y sin actividad docente. La comparación se realizará por medio de diagramas de barras como los de la Figura 3-10, y *boxplots*⁷ (Figura 2-8), determinando la magnitud del incremento ambiental atribuible a la actividad y a la contribución de factores externos. Este enfoque proporciona una base cuantitativa para interpretar el impacto real de la actividad docente sobre la calidad ambiental del taller.

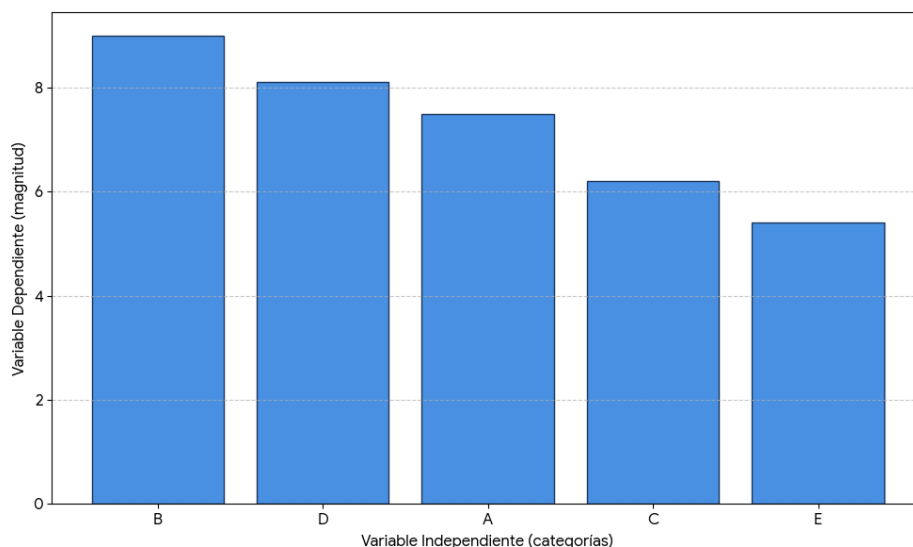


Figura 3-10 Ejemplo de diagrama de barras.
(Elaboración propia)

⁷ Los diagramas de cajas (*boxplots*) permiten visualizar la distribución de los valores de cada variable en las semanas analizadas y facilitan la comparación entre escenarios.

Los datos comparados con aquellos obtenidos durante las tres semanas representativas de las diferentes condiciones operativas del taller:

- **Semanas 8B y 14A:** asociadas a periodos de prácticas.
- **Semana 9A:** escenario de referencia sin actividad docente.

Con el objetivo de evaluar si las diferencias observadas entre los distintos escenarios operativos del taller son estadísticamente significativas, se aplica un análisis de varianza de un factor (ANOVA) a las variables ambientales monitorizadas. Este método permite comparar las medias de varios conjuntos de datos y determinar si las diferencias observadas entre ellos se deben a la influencia del régimen de funcionamiento del taller o únicamente a la variabilidad natural de las mediciones. Para ello se evalúan dos valores:

- **Estadístico F:** razón entre la varianza dentro de los grupos y la varianza entre grupos (15); valores $F > 1$ indican que la variabilidad entre grupos es mayor que la interna.

$$F = \frac{\sigma_{entre}^2}{\sigma_{dentro}^2} \quad (15)$$

- **Valor p:** probabilidad asociada al estadístico F bajo la hipótesis nula; si $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula⁸ y se consideran estadísticamente significativas las diferencias entre medias.

3. Análisis de relaciones entre variables: correlaciones y modelos de regresión

Para estudiar la relación entre los diferentes parámetros ambientales monitorizados, se calculan matrices de correlación (Figura 3-11) para las dos semanas con actividad docente analizadas. Este análisis permite cuantificar la intensidad y dirección de las relaciones lineales entre variables y proporciona información sobre la posible existencia de fuentes emisoras comunes o interdependencias entre parámetros. Este paso es fundamental para la aplicación de modelos predictivos.

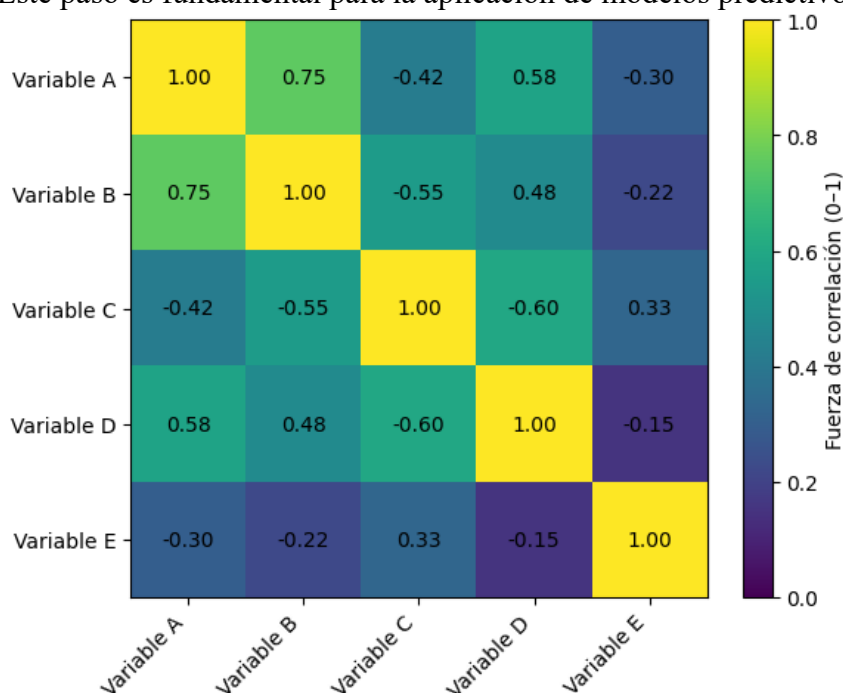


Figura 3-11 Ejemplo de matriz de correlación.
(Elaboración propia)

⁸ La probabilidad de que dichas diferencias se deban únicamente al azar es extremadamente reducida, por lo que se rechaza la hipótesis de igualdad de medias entre los escenarios analizados.

Posteriormente, y de manera complementaria al estudio de las correlaciones, el análisis de regresión lineal evalúa de forma cuantitativa aquellas variables ambientales cuyas relaciones requieran un análisis más profundo. El modelo de regresión de Excel genera una gráfica (Figura 3-12) de la que extraemos la ecuación (16) para interpretar los datos que esta arroja. Al expresarla en forma de modelo estadístico, la ecuación queda representada como se muestra (17).

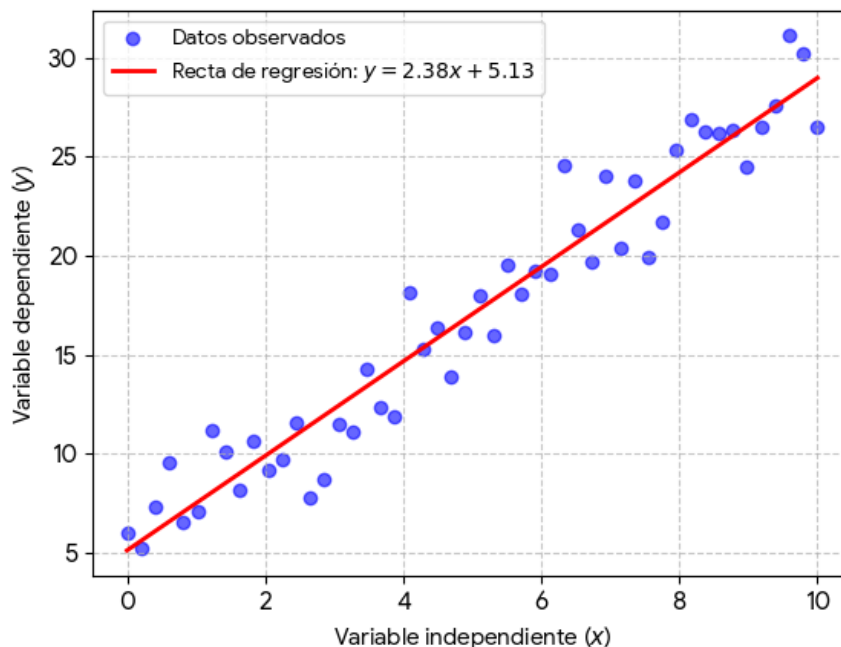


Figura 3-12 Ejemplo de un diagrama de dispersión.
(Elaboración propia)

$$y = mx + b \quad (16)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (17)$$

4. Estabilidad del sistema y detección de eventos

Para analizar la estabilidad del sistema ambiental se aplican herramientas propias del SPC, mediante la construcción de gráficos de control (Figura 2-7) basados en la media, la desviación estándar y los límites superiores e inferiores de control de las variables monitorizadas. Estos gráficos permiten identificar episodios en los que los valores registrados se alejan significativamente del comportamiento habitual del sistema.

En los gráficos la línea central (LC) representa la media del sistema, mientras que los límites superior (LCS) e inferior (LCI) de control se establecen en ± 3 desviaciones estándar respectivamente. Durante su interpretación, se identifican puntos fuera de control (eventos anómalos) y se evalúa la estabilidad del sistema, situación que se da cuando ya la mayoría de los puntos se mantienen dentro de los límites de control.

5. Aplicación de modelos predictivos y detección de patrones

En esta última fase del análisis, se aplica un modelo de aprendizaje automático basado en el algoritmo *Random Forest*, descrito en el apartado 2.6.1. El objetivo es evaluar la capacidad de las variables ambientales monitorizadas para predecir el comportamiento del sistema ambiental del taller y analizar la viabilidad de integrar modelos predictivos como herramienta complementaria para su gestión.

La elección del algoritmo Random Forest se debe a su elevada capacidad para modelizar relaciones no lineales entre variables ambientales y su robustez frente a datos con alta variabilidad y posibles valores atípicos, características propias de entornos reales monitorizados. Además, este método permite trabajar con múltiples variables de forma simultánea, ofrece buenos resultados con conjuntos de datos de tamaño medio y proporciona información sobre la importancia relativa de cada variable en la predicción. Estas características lo convierten en una herramienta adecuada para la detección de patrones y la predicción en función de las condiciones ambientales del taller.

Para este estudio se selecciona como variable objetivo la concentración de partículas PM2.5, mientras que las variables ambientales disponibles, nivel sonoro (Noise), temperatura (Temp) y humedad relativa (RH), se emplean como variables predictoras. La elección de PM2.5 como variable dependiente responde a su relevancia desde el punto de vista de la calidad del aire interior y la exposición inhalatoria, ya que esta fracción de partículas finas posee una elevada capacidad de penetración en el sistema respiratorio y constituye uno de los indicadores más utilizados en estudios de contaminación ambiental y salud ocupacional.

El modelo fue entrenado utilizando una división del conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento y validación, lo que permitió evaluar su capacidad predictiva mediante la comparación entre los valores reales observados y los valores estimados por el algoritmo. El código creado e implementado aparece en la Figura 3-13.

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error

# 1 Cargar dataset
data = pd.read_excel("dataset_air_quality.xlsx")

print(data.head())
print(data.columns)

# 2 Variables predictoras y variable objetivo
X = data[["Noise", "Temp", "RH"]]
y = data["PM2.5"]

# 3 Separar datos en entrenamiento y test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.2, random_state=42
)

# 4 Crear modelo Random Forest
model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)

# 5 Entrenar modelo
model.fit(X_train, y_train)

# 6 Hacer predicciones
y_pred = model.predict(X_test)

# 7 Evaluar modelo
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred))

print("R2:", r2)
print("RMSE:", rmse)

# 8 Importancia de variables
importance = model.feature_importances_
features = X.columns

plt.figure()
plt.bar(features, importance)
plt.title("Variable importance")
plt.xlabel("Variables")
plt.ylabel("Importance")

# 9 Predicción vs valores reales
plt.figure()
plt.scatter(y_test, y_pred)
plt.xlabel("PM2.5 real")
plt.ylabel("PM2.5 predicted")
plt.title("Random Forest prediction")

plt.show()

```

Figura 3-13 Código creado e implementado para el análisis avanzado de los datos.
(Elaboración propia)

4 RESULTADOS

Una vez completado el proceso de adquisición y procesamiento de datos descrito en el capítulo anterior, se procede a evaluar los resultados de los análisis descritos en el apartado 3.4. El objetivo de esta sección es caracterizar el comportamiento ambiental del taller mediante el análisis de la influencia de su actividad en las condiciones ambientales. Asimismo, se busca identificar posibles relaciones entre las distintas variables estudiadas y predecir su comportamiento, con el fin de establecer las medidas correctivas necesarias.

Este análisis se organiza según el esquema mostrado en la Tabla 4-1, en la que se resume el propósito de cada estudio.

Estudio	¿Qué demuestra?
ANOVA	Demuestra que las semanas son diferentes
Correlaciones	Identifica relaciones entre variables
Regresión	Cuantifica relaciones clave
SPC	Analiza estabilidad y cuándo ocurren los eventos
IA (<i>Random Forest</i>)	Muestra capacidad predictiva

Tabla 4-1 Propósito de cada estudio.
(Elaboración propia)

Durante el periodo de estudio se registraron de forma continua diversas variables ambientales con una frecuencia de muestreo de un dato por minuto, lo que permitió construir una base de datos temporal detallada. Las variables analizadas aparecen en los estudios que este capítulo contiene bajo los siguientes nombres:

- **NumPM2.5:** número de partículas PM2.5
- **MassPM2.5:** masa de partículas PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **NumPM10:** número de partículas PM10
- **MassPM10:** masa de partículas PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **Ruido:** nivel sonoro (dB)
- **Temperatura** ($^{\circ}\text{C}$)
- **Humedad relativa** (%)

4.1 Validación de datos y selección de semanas de estudio

Durante el periodo total de monitorización se registraron datos correspondientes a diversas semanas académicas con distintas condiciones operativas del taller. No obstante, tras el proceso de validación y depuración de los datos descrito en el capítulo anterior, se comprobó que, de las semanas con prácticas, sólo dos (8B y 14A) presentaban un registro completo y continuo de mediciones a lo largo de todo el intervalo temporal analizado. En el resto de las semanas monitorizadas (10B, 13B y 19A) se identificaron intervalos sin registros, asociados a interrupciones puntuales en el funcionamiento del sistema de adquisición o a incidencias en la transmisión de datos del sensor. Estas discontinuidades generan lagunas en las series temporales que impiden garantizar la representatividad de los estadísticos calculados y dificultan la aplicación de determinadas técnicas de análisis empleadas en este estudio, como el análisis de correlación, los modelos de regresión o las herramientas de control estadístico de procesos. Por tanto, con el fin de asegurar la consistencia metodológica del estudio y evitar posibles sesgos derivados de series incompletas, dichas semanas han sido excluidas del análisis presentado en este capítulo, utilizando únicamente aquellas con registro completo.

Así pues, serán tres las semanas cuyos datos conformen la base para el análisis del comportamiento ambiental del taller: 8B, 9A (como ejemplo de semana sin intervención de carácter docente) y 14A. Mencionar también que al pertenecer las semanas 8B y 14A a cuatrimestres distintos y, por tanto, a asignaturas diferentes con actividades prácticas distintas, aportan un mayor interés comparativo al análisis. La Figura 4-1 recoge las fechas de los periodos considerados en el análisis final del estudio.

SEMANA	L	M	X	J	V
8B	20-10-25	21-10-25	22-10-25	23-10-25	24-10-25
10B	03-11-25	04-11-25	05-11-25	06-11-25	07-11-25
13B	17-11-25	18-11-25	19-11-25	20-11-25	21-11-25
14A	12-01-25	13-01-25	14-01-25	15-01-25	16-01-25
19A	19-01-26	20-01-26	21-01-26	22-01-26	23-01-26

BRIGADA	CUATRIMESTRE	ASIGNATURAS
2ª	1er	Termodinámica
2ª	2º	Teoría de Máquinas y Motores
4ª	1er	Ingeniería Térmica I

Semanas con prácticas y registro completo de datos
Días sin registro de datos

Figura 4-1 Periodos monitorizados.
(Elaboración propia)

4.2 Análisis descriptivo

A continuación, se analizan los indicadores estadísticos agrupando las variables según su naturaleza física. Los valores medios, aunque incluidos en los resultados de este análisis, se interpretarán en la comparación estadística entre escenarios (4.4).

Comportamiento de las partículas en suspensión

Las variables relacionadas con partículas en suspensión incluyen el número y la masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas PM_{2.5} y PM₁₀, indicadores clave de la calidad del aire en interiores. La Tabla 4-2 muestra los valores de los principales estadísticos descriptivos (media, mínimo, máximo, desviación típica y percentiles) calculados para estas variables en función de la semana.

			Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica	P50	P90
Semana 8B	PM2.5	Num	24.791	4.830	70.920	11.429	23.030	40.240
		Mass	3.811	0.690	11.350	2.004	3.270	6.830
	PM10	Num	24.905	4.840	71.030	11.510	23.110	40.560
		Mass	4.454	0.720	16.150	2.756	3.400	8.580
Semana 9A	PM2.5	Num	29.396	8.380	75.870	16.067	22.450	57.790
		Mass	3.908	1.110	10.050	2.122	2.990	7.660
	PM10	Num	29.409	8.390	75.900	16.071	22.460	57.810
		Mass	3.925	1.110	10.050	2.116	3.030	7.670
Semana 14A	PM2.5	Num	17.012	1.370	66.160	11.225	15.350	30.817
		Mass	2.291	0.180	8.770	1.484	2.090	4.100
	PM10	Num	17.026	1.370	66.190	11.227	15.350	30.845
		Mass	2.337	0.180	8.840	1.491	2.150	4.130

Tabla 4-2 Estadísticos descriptivos de las PM2.5 y PM10.
(Elaboración propia)

Los valores **mínimos** representan los niveles de fondo del ambiente interior, es decir, las condiciones registradas durante periodos en los que la actividad del taller es prácticamente nula. Estos valores reflejan la presencia de partículas residuales procedentes del ambiente exterior o de la resuspensión de polvo en el espacio.

Por otro lado, los valores **máximos** y los **percentiles superiores (P90)** permiten identificar episodios asociados a incrementos puntuales de partículas. Estos picos aparecen principalmente en las semanas con actividad, como se observa en el máximo de 16.15 en MassPM10 durante la semana 8B, lo que sugiere la influencia directa de las operaciones desarrolladas en el taller. En cambio, durante la semana sin actividad docente, los valores máximos son menores, respondiendo principalmente a fluctuaciones ambientales externas.

La **desviación típica** refuerza esta interpretación, ya que en la semana 9A se observa una mayor dispersión en el número de partículas (≈ 16), lo que indica que las variaciones registradas no se deben a emisiones internas, sino a factores ambientales externos, como variaciones en la ventilación del edificio o en la calidad del aire exterior, favoreciendo la entrada intermitente de partículas. Sin embargo, en las semanas con actividad la variabilidad está asociada a la alternancia entre periodos de emisión y periodos de estabilización ambiental en los que las concentraciones disminuyen progresivamente debido a los procesos de ventilación y deposición de partículas. En consecuencia, la variabilidad observada responde directamente a la dinámica operativa del taller. Por este motivo, en el siguiente apartado (4.3) se analiza con mayor detalle la evolución temporal de las variables, con el objetivo de identificar los momentos en los que se producen estos incrementos y relacionarlos con las actividades desarrolladas en el taller.

Finalmente, el **percentil 50 (P50)** representa el valor típico de las concentraciones durante la semana; indicando, al situarse generalmente por debajo de la media, que la distribución de los datos está ligeramente sesgada hacia valores elevados, debido a la presencia de episodios puntuales de emisión. Este patrón confirma que, aunque se registran incrementos ocasionales de partículas asociados

a determinadas operaciones del taller, la mayor parte del tiempo las concentraciones se mantienen en niveles moderados.

Recapitulando, el análisis de estos indicadores sugiere que el sistema ambiental del taller está influido por dos tipos principales de procesos: por un lado, emisiones internas asociadas a la actividad mecánica del taller, responsables de los picos de concentración observados; y por otro, variaciones ambientales externas, que explican parte de la variabilidad registrada incluso en ausencia de actividad docente.

Comportamiento del nivel sonoro

El nivel sonoro (dB) constituye un indicador directo de la actividad mecánica en el taller. En la Tabla 4-3 se reúnen los datos que permiten caracterizar su comportamiento acústico y comparar la variabilidad entre escenarios.

Semanas	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica	P50	P90
8B	42.951	40.800	76.800	4.825	41.800	42.800
9A	42.606	40.900	56.400	1.283	42.200	44.100
14A	42.495	40.900	68.400	1.243	42.200	43.590

Tabla 4-3 Estadísticos descriptivos del nivel sonoro.
(Elaboración propia)

Los **valores mínimos**, situados en torno a 40–41 dB, representan el nivel acústico de fondo del espacio, asociado principalmente al ruido ambiental del edificio. Por el contrario, los valores máximos evidencian la influencia de la actividad del taller, siendo el mayor de éstos (76.8 dB en la semana 8B) significativamente superior al registrado en la semana sin prácticas.

La desviación típica en la semana 8B refleja una mayor variabilidad acústica, mientras que en las semanas 14A y 9A es menor, indicando un ambiente acústico más estable.

Al evaluar la distribución de los valores acústicos mediante los percentiles, el P50, situado en torno a 42 dB, confirma que la mayor parte del tiempo el ambiente acústico se mantiene en niveles moderados.

Estos resultados muestran que el comportamiento acústico del taller está determinado principalmente por la dinámica de la actividad docente, registrándose incrementos puntuales durante el uso de éste, mientras que en ausencia de actividad el nivel sonoro se aproxima a las condiciones de fondo del entorno interior.

Comportamiento de las variables térmicas

Las variables térmicas analizadas incluyen la temperatura (°C) y la humedad relativa (%). Los valores que describen cada una de ellas se incluyen en la Tabla 4-4, respectivamente.

		Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica	P50	P90
8B	<i>Temperatura</i>	19.627	16.470	24.430	1.268	19.990	21.010
	<i>Humedad relativa</i>	69.217	42.000	81.630	7.899	68.210	79.950
9A	<i>Temperatura</i>	20.621	17.060	23.970	1.856	20.710	22.970
	<i>Humedad relativa</i>	65.370	55.530	70.480	3.242	66.060	69.230
14A	<i>Temperatura</i>	18.100	14.800	20.440	1.306	18.120	19.860
	<i>Humedad relativa</i>	64.408	56.930	72.350	3.694	64.480	68.430

Tabla 4-4 Estadísticos descriptivos de la temperatura y humedad relativa.
(Elaboración propia)

Los valores mínimos y máximos de temperatura reflejan la variabilidad térmica del espacio, condicionada principalmente por factores externos como la meteorología y el régimen de ventilación del edificio. En el caso de la humedad relativa, los valores mínimos se sitúan entre 42–55%, mientras que los máximos alcanzan valores cercanos al 80 %, especialmente durante la semana 8B.

En cuanto a la desviación típica de estas variables, valores relativamente bajos indican que el sistema térmico presenta una gran estabilidad temporal en comparación con otras variables analizadas.

Los percentiles de temperatura y humedad muestran variaciones suaves y graduales, sin picos como los observados en las concentraciones de partículas o en el nivel sonoro. Este comportamiento confirma que las variables térmicas están especialmente condicionadas por factores ambientales externos, mostrando una menor dependencia directa de la actividad desarrollada en el taller.

En conclusión, los resultados indican que el comportamiento térmico del espacio es relativamente estable a lo largo del periodo analizado, con variaciones moderadas asociadas principalmente a las condiciones ambientales exteriores más que a la dinámica operativa del taller.

Así pues, a partir de las conclusiones anteriores, se infiere que la actividad del taller se manifiesta principalmente en forma de episodios puntuales de incremento en las concentraciones de partículas y en el nivel sonoro, mientras que las variables térmicas presentan un comportamiento más estable y menos dependiente de la actividad, manteniéndose próximas a las condiciones ambientales del entorno del edificio. Con el fin de evaluar si las condiciones ambientales registradas se sitúan dentro de los límites recomendados para espacios interiores, resulta necesario comparar los valores obtenidos en este análisis con los de referencia establecidos por la normativa descrita en el apartado 2.3.

Comparación con valores de referencia normativos

Para facilitar la identificación de posibles desviaciones respecto a los valores de referencia, la Tabla 4-5 sintetiza la comparación entre los resultados obtenidos en el análisis descriptivo anterior y los límites establecidos en las principales directrices y estándares normativos aplicados. Las gráficas de la Figura 4-2 representan el comportamiento de la temperatura y humedad durante la semana 8B y muestran los límites normativos de ambos parámetros. Sirven de apoyo visual para identificar los periodos en los que se han superado los valores de referencia de estos parámetros.

Parámetro ambiental	Semana	Media	Mínimo	Máximo	Valor de referencia	Norma	Evaluación
Masa PM2.5 (µg/m³)	8B	3.81	0.69	11.35	15 µg/m³ (media diaria)	OMS (2021)	Muy por debajo del límite, indicando buena calidad del aire interior
	9A	3.91	1.11	10.05			
	14A	2.29	0.18	8.77			
Masa PM10 (µg/m³)	8B	4.45	0.72	16.15	45 µg/m³ (media diaria)		
	9A	3.93	1.11	10.05			
	14A	2.34	0.18	8.84			
Nivel sonoro (dB)	8B	42.95	40.8	76.8	87 dB(A) (exposición diaria)	Directiva 2003/10/CE	Dentro del límite
	9A	42.61	40.9	56.4			
	14A	42.50	40.9	68.4			
Temperatura (°C)	8B	19.63	16.47	24.43	20–24 °C	ISO 7730	Ligeramente inferiores al rango óptimo
	9A	20.62	17.06	23.97			
	14A	18.10	14.80	20.44			
Humedad relativa (%)	8B	69.22	42.0	81.63	30–70 %	UNE-EN 16798-1	Media dentro del rango (picos puntuales asociados a condiciones meteorológicas exteriores)
	9A	65.37	55.53	70.48			
	14A	64.41	56.93	72.35			

Tabla 4-5 Comparativa valores obtenidos con normativos.
(Elaboración propia)

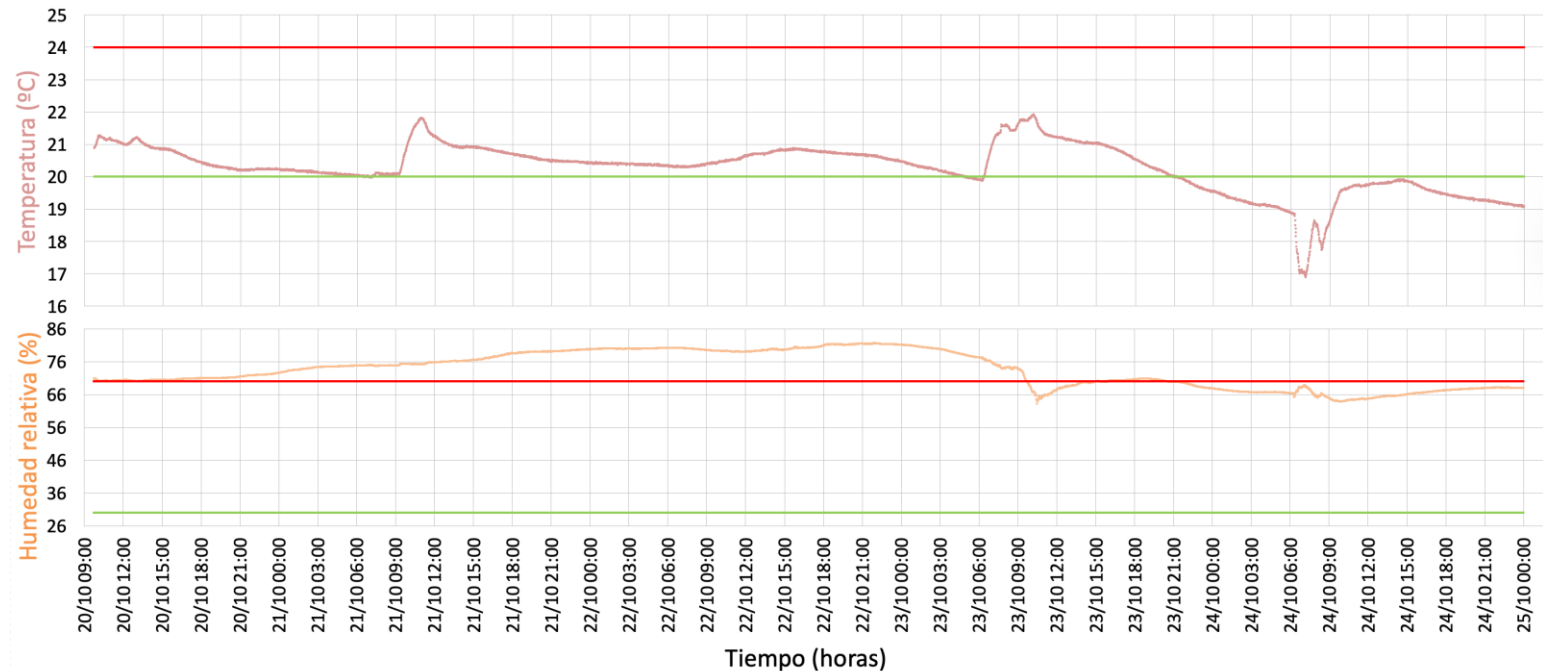


Figura 4-2 Gráficas temporales de Tª y humedad con límites normativos (semana 8B).
(Elaboración propia)

A partir del análisis de los datos y su comparación con los valores de referencia normativos, se verifica que las condiciones ambientales del taller se mantienen, en general, dentro de los límites recomendados para espacios interiores, tanto en términos de calidad del aire como de niveles acústicos y condiciones térmicas. Este primer diagnóstico sugiere que el entorno del taller presenta condiciones

ambientales compatibles con su uso docente. Sin embargo, algunos parámetros registran episodios puntuales de incremento, lo que justifica la necesidad de un análisis más detallado de su evolución temporal con el fin de identificar los periodos en los que se producen dichos aumentos.

4.3 Evolución temporal de las variables ambientales

Evolución de las partículas PM10 y PM2.5

La evolución temporal de las concentraciones de partículas en suspensión muestra incrementos claramente asociados a los periodos de actividad del taller. Tanto las fracciones PM10 como PM2.5 presentan picos de concentración durante las horas de uso del laboratorio, seguidos de descensos graduales atribuibles a los procesos de ventilación natural y deposición de partículas en las superficies. Este patrón sugiere que las principales emisiones de material particulado están vinculadas a las actividades desarrolladas en el taller.

Aunque el análisis incluye las fracciones PM10 y PM2.5, ambas muestran una evolución temporal muy similar. Esto se debe a que las PM2.5 constituyen una subfracción de las PM10, al incluir estas últimas todas las partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 μm , por lo que ambas responden de manera comparable a las fuentes emisoras presentes en el entorno estudiado, Figura 4-3.

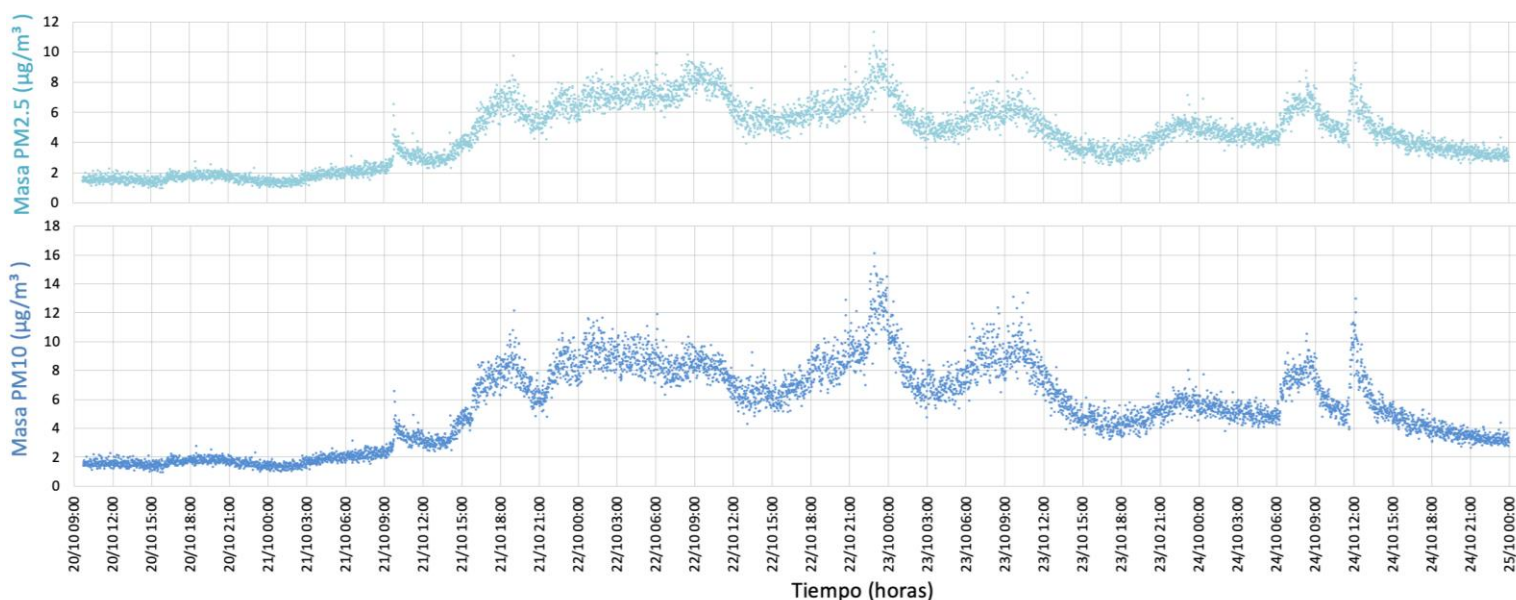


Figura 4-3 Evolución temporal de las PM2.5 y PM10 (semana 8B⁹).
(Elaboración propia)

Evolución del nivel sonoro

El análisis del nivel sonoro presenta un patrón similar al observado en las concentraciones de partículas, observando en algunos casos coincidencia temporal entre picos de ruido y picos de partículas, Figura 4-4, lo que sugiere la existencia de fuentes emisoras comunes.

⁹ En la figura se muestran únicamente los registros correspondientes a la semana 8B, ya que las semanas restantes presentan un comportamiento temporal análogo. Esta selección permite sintetizar la información, evitando redundancias en la interpretación y optimizando el espacio expositivo.

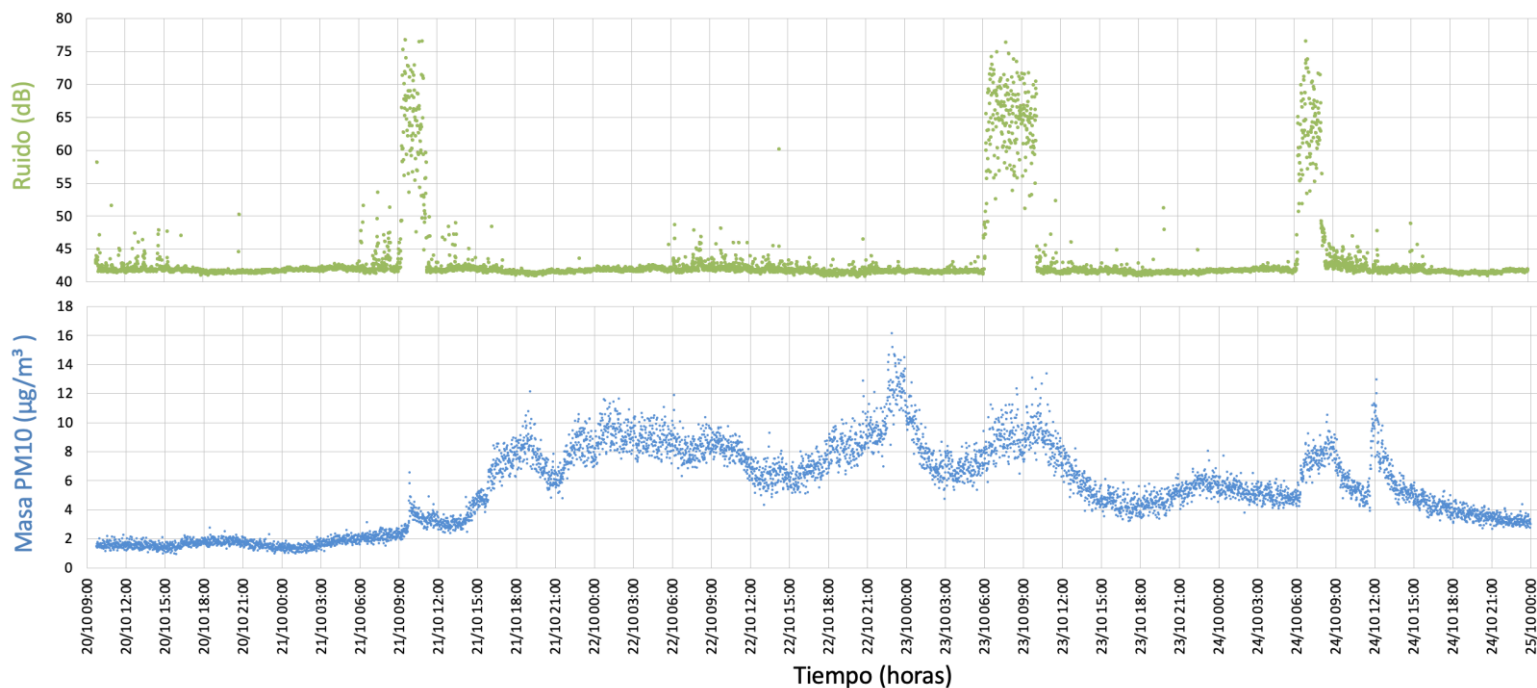


Figura 4-4 Comparación series temporales del ruido y las PM10¹⁰ (semana 8B).
(Elaboración propia)

Se incluyen también las gráficas correspondientes a la semana 9A (Figura 4-5), sin actividad docente en el taller, como referencia del comportamiento de estas variables en ausencia de prácticas. En comparación con la semana 8B, se observa una menor presencia de picos y variaciones de menor magnitud.

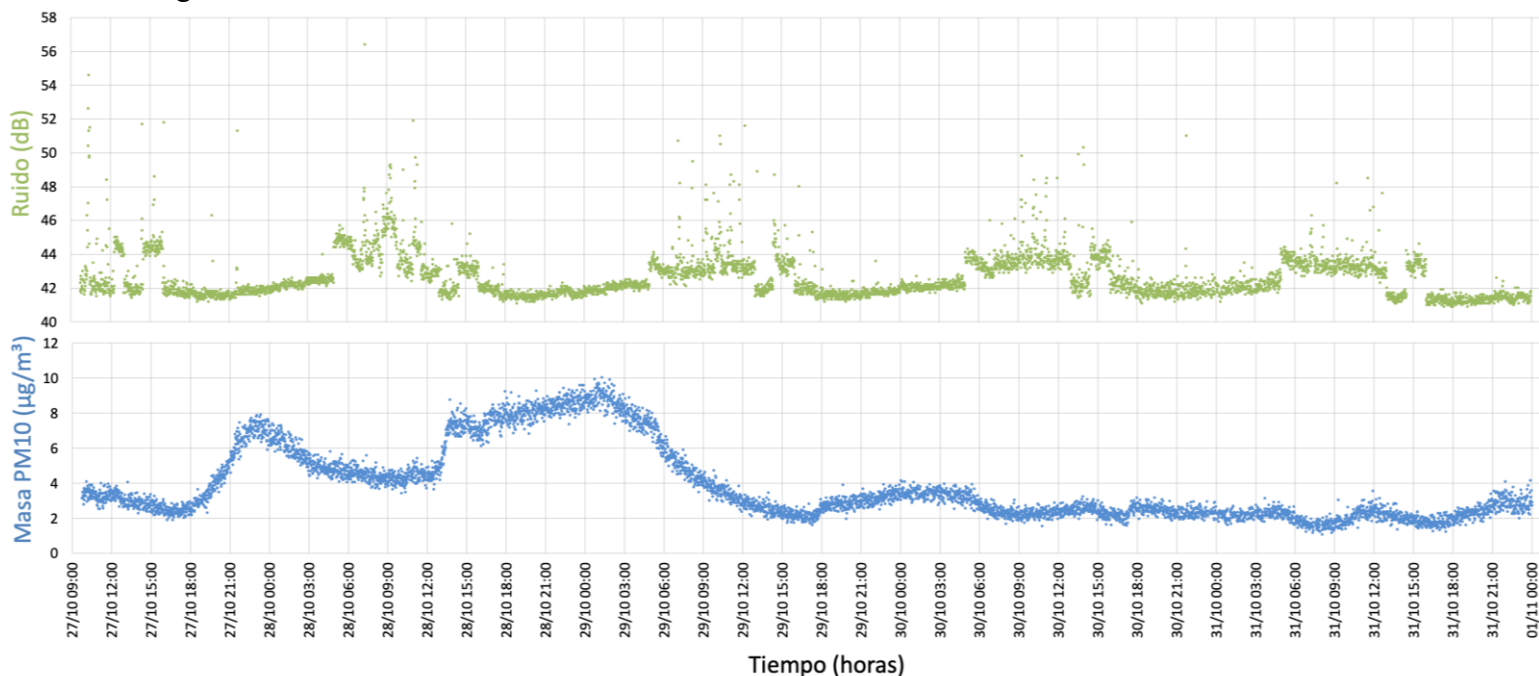


Figura 4-5 Comparación series temporales del ruido y las PM10 (semana 9A).
(Elaboración propia)

¹⁰ En el análisis comparativo con otros parámetros ambientales se utilizan las gráficas de PM10 como representación del material particulado. Esta elección permite evitar redundancias, ya que las PM2.5 forman parte de la fracción PM10 y ambas presentan patrones de variación temporal similares.

Evolución térmica

En cuanto a las variables térmicas, la temperatura y la humedad relativa presentan una evolución más suave. La gráfica de la Figura 4-6 muestra un comportamiento higrotérmico interior relativamente estable, con oscilaciones de temperatura pequeñas (entre 19 y 22 °C), lo que indica un efecto de amortiguación térmica¹¹ debido a la inercia del edificio. En contraste, los datos meteorológicos exteriores (Figura 4-7) presentan una mayor amplitud térmica, con diferencias más acusadas entre temperaturas máximas y mínimas.

La evolución temporal de ambas variables muestra que la temperatura interior sigue la tendencia de la temperatura exterior, pero de forma suavizada y con cierto desfase temporal, lo cual es característico de espacios interiores sin climatización activa continua. Por otra parte, aunque no se dispone de gráficas de humedad relativa exterior para la semana analizada para realizar una comparación directa, se puede establecer una relación con los niveles de precipitación registrados en la estación meteorológica. Los periodos en los que se producen precipitaciones suelen ir acompañados de un aumento de la humedad ambiental y de una reducción de la temperatura exterior. Este comportamiento se refleja en la gráfica del interior del taller, donde se observan descensos de temperatura coincidentes con los días de mayor precipitación (Figura 4-8).

Esto indica que las condiciones exteriores, especialmente los episodios de lluvia, influyen en el ambiente interior del taller, provocando descensos térmicos y variaciones en las condiciones higrotérmicas interiores. Además, la presencia de lluvia suele implicar una mayor humedad del aire exterior, que puede penetrar en el interior a través de la ventilación o infiltraciones. Por tanto, a pesar de no disponer de evidencias directas, la coincidencia entre los episodios de precipitación y las variaciones observadas en el interior permite concluir que existe una influencia directa de las condiciones meteorológicas exteriores sobre el comportamiento térmico del taller durante los días de lluvia.

Cabe también señalar que los picos puntuales observados en la temperatura interior no se corresponden con los datos exteriores, por lo que se asocian a cargas internas debidas a la actividad del taller y a la ocupación.

En conclusión, el comportamiento observado indica que el ambiente interior está dominado principalmente por las condiciones exteriores, mientras que la actividad del taller genera variaciones térmicas puntuales, pero no modifica de forma significativa la tendencia general.

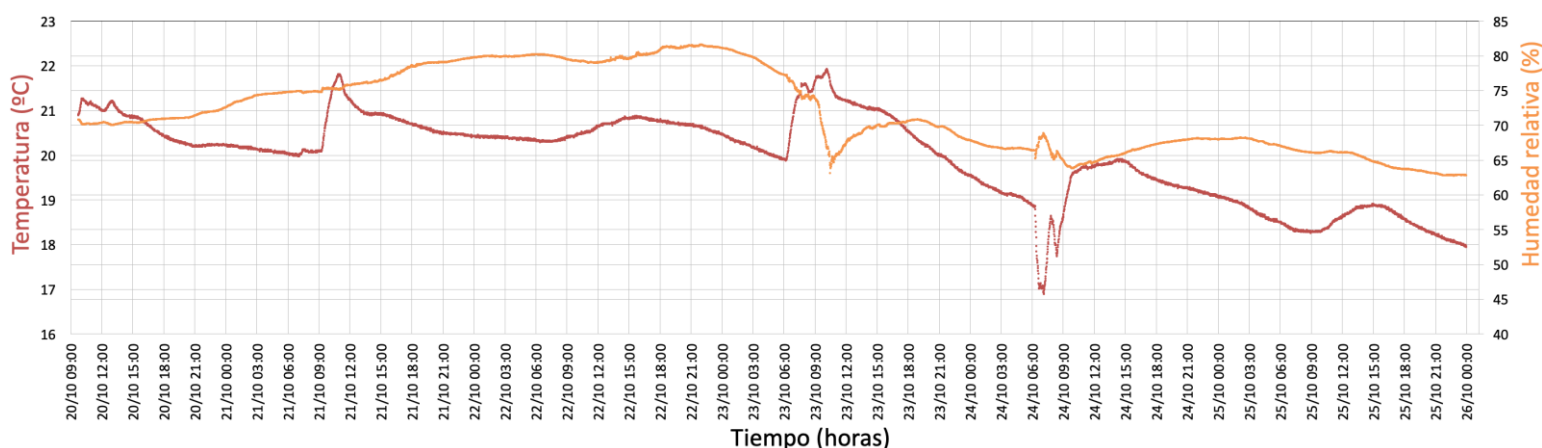


Figura 4-6 Evolución temporal de la Tª y humedad relativa (semana 8B).
(Elaboración propia)

¹¹ La inercia térmica del edificio es la capacidad de sus materiales para almacenar calor y liberarlo lentamente, lo que provoca que la temperatura interior varíe de forma más suave y con cierto retraso respecto a la temperatura exterior, actuando el edificio como un amortiguador térmico.

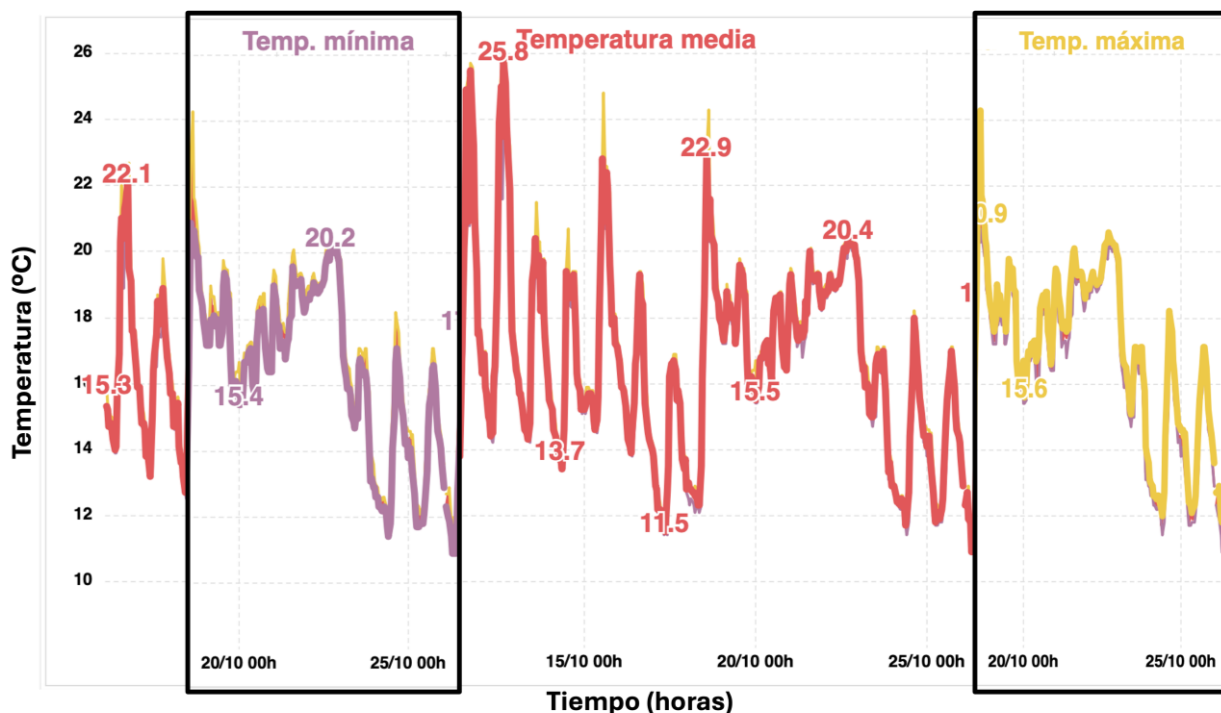


Figura 4-7 Gráficas de T^{as} mínima, media y máxima (semana 8B: 20-25OCT).
(Estación meteorológica de la Escuela Naval Militar [37])

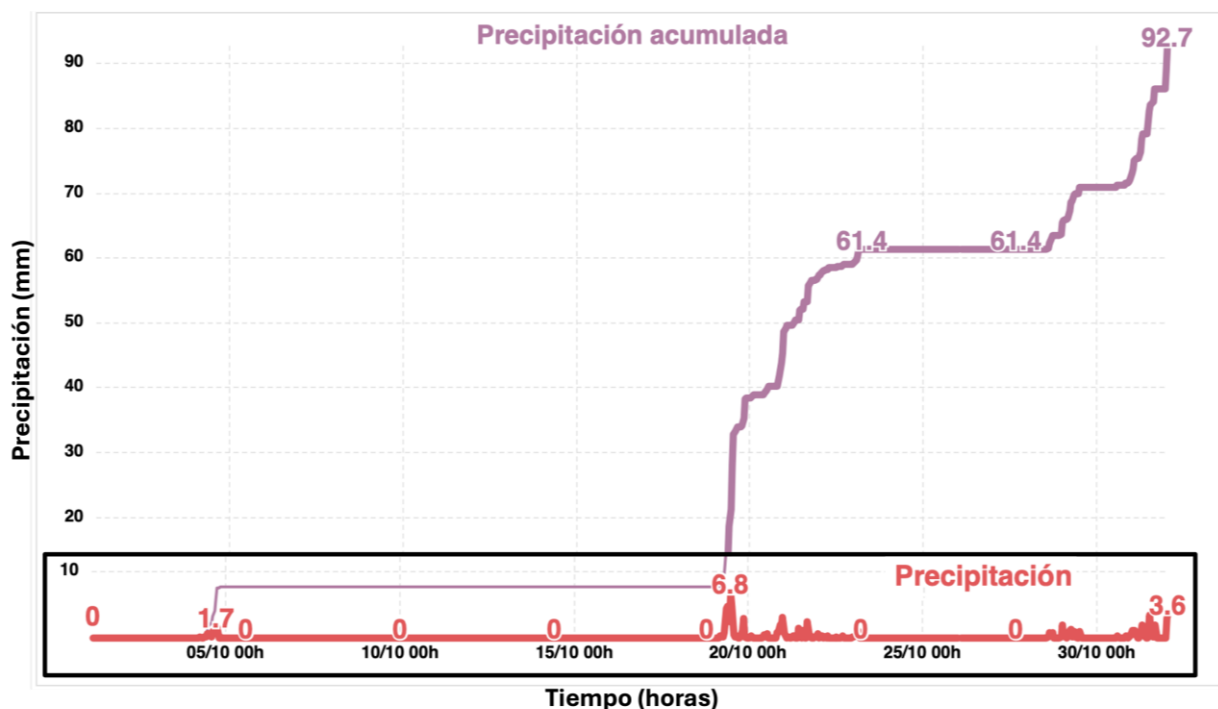


Figura 4-8 Precipitaciones, puntual y acumulada, registradas en la ENM en OCT25.
(Estación meteorológica de la Escuela Naval Militar [37])

En general, las series temporales muestran una estructura claramente diferenciada entre los periodos de prácticas (picos) y los periodos de inactividad (valles). Durante las horas de uso del taller, se observan incrementos simultáneos en todas las variables ambientales monitorizadas. Por el contrario, durante las horas sin actividad o fuera del horario lectivo, las variables ambientales tienden a estabilizarse en valores más bajos, presentando una menor variabilidad. Este comportamiento confirma que la actividad desarrollada en el taller constituye una fuente directa de perturbación ambiental, generando variaciones que a continuación se especifican.

4.4 Comparación estadística entre escenarios operativos

La Tabla 4-6 muestra los valores medios de cada variable en función de la semana analizada:

Semana	NumPM2.5	MassPM2.5	NumPM10	MassPM10	Ruido	Temperatura	Humedad Relativa
8B	24.791	3.811	24.905	4.454	42.951	19.627	69.217
9A	29.396	3.908	29.409	3.925	42.606	20.621	65.370
14A	17.012	2.291	17.026	2.337	42.495	18.100	64.408

Tabla 4-6 Medias de cada variable en función de la semana.
(Elaboración propia)

Para reforzar la interpretación de los distintos escenarios operativos, se analizan representaciones gráficas de las variables que aportan más información sobre la influencia de la actividad del taller, en particular las relacionadas con la concentración de partículas y el nivel sonoro.

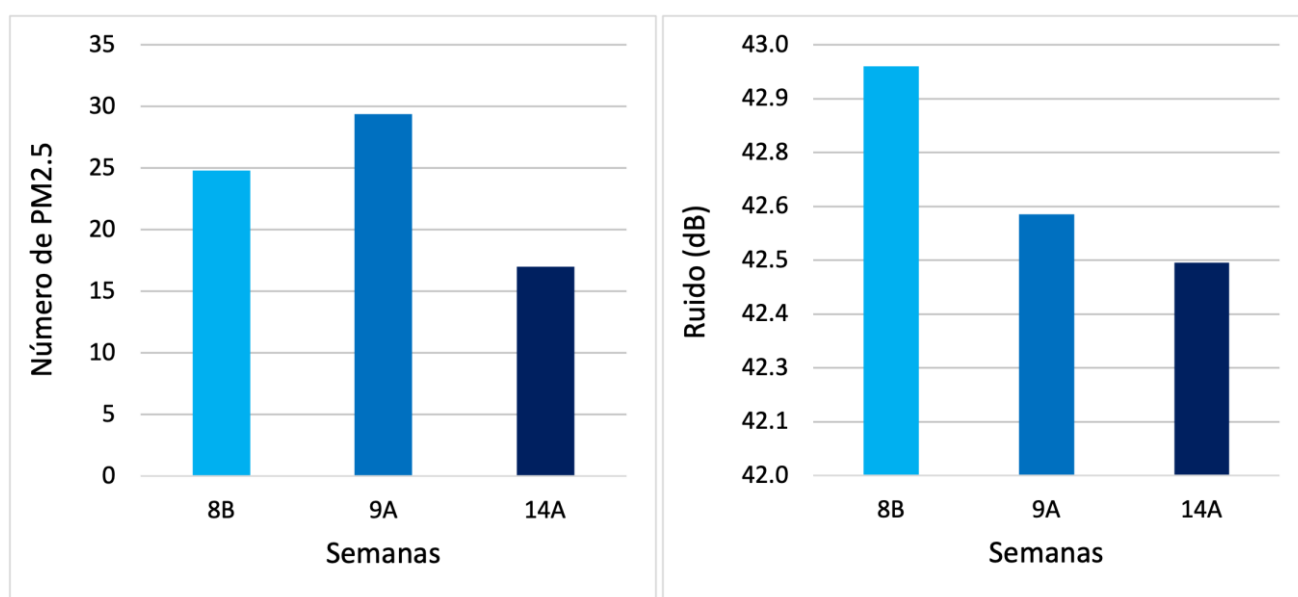


Figura 4-9 Medias del número de PM2.5 y ruido para las tres semanas.
(Elaboración propia)

La Figura 4-9 muestra la comparación de los valores medios de las principales variables ambientales en cada semana. De forma general, se observa que las semanas 8B y 9A presentan valores medios relativamente similares, mientras que la semana 14A muestra valores inferiores en varias de las variables, especialmente en aquellas relacionadas con la concentración de partículas en suspensión.

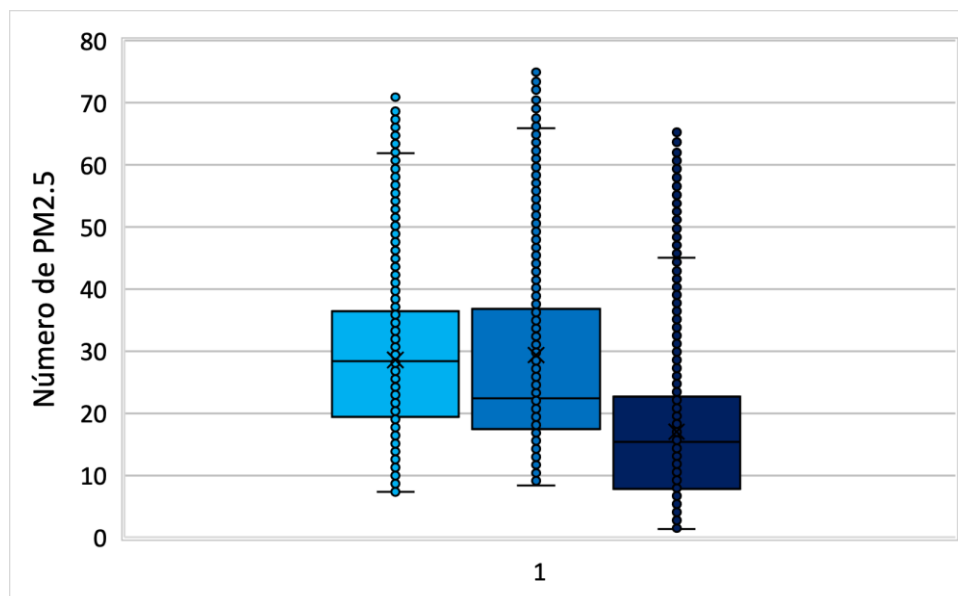


Figura 4-10 Número de partículas para las tres semanas.
(Elaboración propia)

Los diagramas de cajas (*boxplots*) incluidos en la Figura 4-10 permiten analizar con mayor detalle la distribución de los datos en cada periodo. En particular, indican que las condiciones ambientales registradas durante la semana 14A difieren de las observadas en los periodos anteriores. Por el contrario, la similitud entre las semanas 8B y 9A puede explicarse por su proximidad temporal, ya que la semana 9A, aunque corresponde a un periodo sin prácticas, se sitúa inmediatamente después de la semana 8B, lo que favorece la persistencia de condiciones ambientales similares en el espacio monitorizado.

No obstante, las diferencias observadas a partir de las medias y las representaciones gráficas no permiten determinar por sí solas si se trata de variaciones reales del sistema o de fluctuaciones aleatorias. Por este motivo, se aplica el análisis ANOVA cuyos resultados se encuentran y se interpretan en la Tabla 4-7.

Variable	F	p-value	Diferencias	Interpretación
Num PM2.5	1785.47	0	Significativas	Dinámica del aerosol/ indicador principal de calidad del aire
Masa PM2.5	2499.76	0		
Num PM10	1800.30	0		
Masa PM10	3446.01	0		
Ruido	145.97	0	Moderadas	Indicador de actividad
Temperatura	6473.76	0	Significativas	Influenciada principalmente por condiciones exteriores
Humedad	9011.37	0		Estabilidad ambiental de las condiciones externas

Tabla 4-7 Resultados/Interpretación de los resultados del ANOVA.
(Elaboración propia)

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) indican que el comportamiento de las variables ambientales no es homogéneo entre las semanas analizadas. Los resultados muestran que existen diferencias estadísticamente significativas en todas las variables analizadas ($p < 0.05$), siendo la humedad relativa y la temperatura las variables con mayor estadístico F, lo que indica mayor variabilidad entre escenarios en estas variables.

Con este análisis se refuerza la interpretación de los datos de las secciones anteriores, evidenciando que el régimen de actividad influye de forma medible en el comportamiento de las variables monitorizadas. No obstante, el hecho de que variables como la temperatura y la humedad relativa presenten diferencias notables entre semanas, sugiere que parte del comportamiento ambiental del espacio está condicionado por factores externos.

Buscando comprender con mayor detalle la dinámica del sistema ambiental del taller, resulta de interés analizar las posibles relaciones entre las variables registradas, lo cual se aborda en el siguiente apartado mediante el análisis de correlaciones¹².

4.5 Análisis de correlaciones

8B	NumPM2_5	MassPM2_5	NumPM10	MassPM10	Ruido	Temperatura	Humedad Relativa
NumPM2_5	1	0.9352	0.9999	0.8209	0.0299	-0.1454	0.3772
MassPM2_5	0.9352	1	0.9394	0.9699	0.1117	-0.0174	0.4285
NumPM10	0.9999	0.9394	1	0.8276	0.0327	-0.1414	0.3797
MassPM10	0.8209	0.9699	0.8276	1	0.1596	0.0719	0.4317
Ruido	0.0299	0.1117	0.0327	0.1596	1	0.0576	-0.0483
Temperatura	-0.1454	-0.0174	-0.1414	0.0719	0.0576	1	0.4328
Humedad Relativa	0.3772	0.4285	0.3797	0.4317	-0.0483	0.4328	1
14A	NumPM2_5	MassPM2_5	NumPM10	MassPM10	Ruido	Temperatura	Humedad Relativa
NumPM2_5	1	0.9974	1	0.9874	-0.1732	0.0176	-0.3588
MassPM2_5	0.9974	1	0.9976	0.9962	-0.1850	0.0308	-0.3726
NumPM10	1	0.9976	1	0.9877	-0.1735	0.0179	-0.3592
MassPM10	0.9874	0.9962	0.9877	1	-0.1981	0.0466	-0.3868
Ruido	-0.1732	-0.1850	-0.1735	-0.1981	1	-0.0042	0.0802
Temperatura	0.0176	0.0308	0.0179	0.0466	-0.0042	1	-0.7249
Humedad Relativa	-0.3588	-0.3726	-0.3592	-0.3868	0.0802	-0.7249	1

Figura 4-11 Matrices de correlaciones semanas 8B (superior) y 14A (inferior).
(Elaboración propia)

Las matrices de correlación obtenidas para las semanas 8B y 14A se presentan en la Figura 4-11. Observamos en ellas patrones que muestran comportamientos similares, lo que sugiere que las relaciones entre las variables se mantienen relativamente estables a pesar de las diferencias en la intensidad de la actividad docente. A continuación, se identifican las más destacables:

En primer lugar, en ambos periodos analizados se observa una correlación positiva elevada entre las diferentes métricas de material particulado, tanto en número como en masa. Este comportamiento es coherente desde el punto de vista físico, ya que las fracciones más finas de partículas forman parte del mismo aerosol ambiental y suelen generarse simultáneamente. Asimismo, se aprecia una correlación positiva moderada entre las concentraciones de partículas y el nivel sonoro, lo que sugiere que ambos parámetros responden, en parte, a la misma dinámica operativa del taller. Durante las sesiones de prácticas, la utilización de herramientas, maquinaria o manipulación de materiales puede generar simultáneamente emisiones acústicas y de partículas, lo que explica la asociación observada entre estas variables.

Sin embargo, las variables térmicas presentan un comportamiento distinto en el caso de la semana 14A. En ella se observa una correlación negativa entre la temperatura y la humedad relativa, coherente con la relación psicrométrica entre ambas magnitudes. Por el contrario, la semana 8B muestra una correlación positiva; esto lleva a la necesidad de profundizar en el estudio de esta relación (apartado 4.6) ya que, desde el punto de vista físico, cuando la temperatura del aire aumenta, la humedad relativa tiende a disminuir.

¹² A partir de este punto, el análisis se limita a las semanas con actividad docente en el taller, por aportar información más relevante para la interpretación del comportamiento de las variables analizadas.

En relación con las partículas, las variables térmicas muestran correlaciones débiles o moderadas, lo que sugiere que su evolución está influida principalmente por factores distintos a la generación directa de contaminantes. Este resultado refuerza lo observado previamente en el análisis de medias, donde la temperatura mostró variaciones relativamente independientes de la intensidad de la actividad del taller.

De igual manera que los anteriores análisis, éste pone de manifiesto que el sistema ambiental del taller está gobernado por dos dinámicas principales: por un lado, la actividad operativa del espacio, que influye simultáneamente en variables como el nivel sonoro y las concentraciones de partículas; y por otro, los factores ambientales y de ventilación, que condicionan principalmente el comportamiento de las variables térmicas. Esta diferenciación permite comprender los mecanismos que gobiernan la evolución de los parámetros monitorizados en el interior del taller.

A raíz de estas deducciones, resulta de interés profundizar en la naturaleza de las relaciones mediante modelos de regresión lineal, y así evaluar de forma cuantitativa el grado en que variables como el nivel sonoro y la concentración de PM_{2.5}, o la temperatura y la humedad relativa, se relacionan entre sí.

4.6 Modelos de regresión

A partir de las regresiones lineales obtenidas para las semanas 8B y 14A se pueden identificar dos tipos de relaciones diferenciadas entre las variables analizadas: aquellas vinculadas directamente con la actividad del taller (ruido y partículas) (Figura 4-12) y aquellas asociadas a la dinámica ambiental del espacio (temperatura y humedad relativa) (Figura 4-13). Tanto en la Figura 4-12, como en la Figura 4-13, aparecen las representaciones de las semanas 8B, a la izquierda, y 14A, a la derecha.

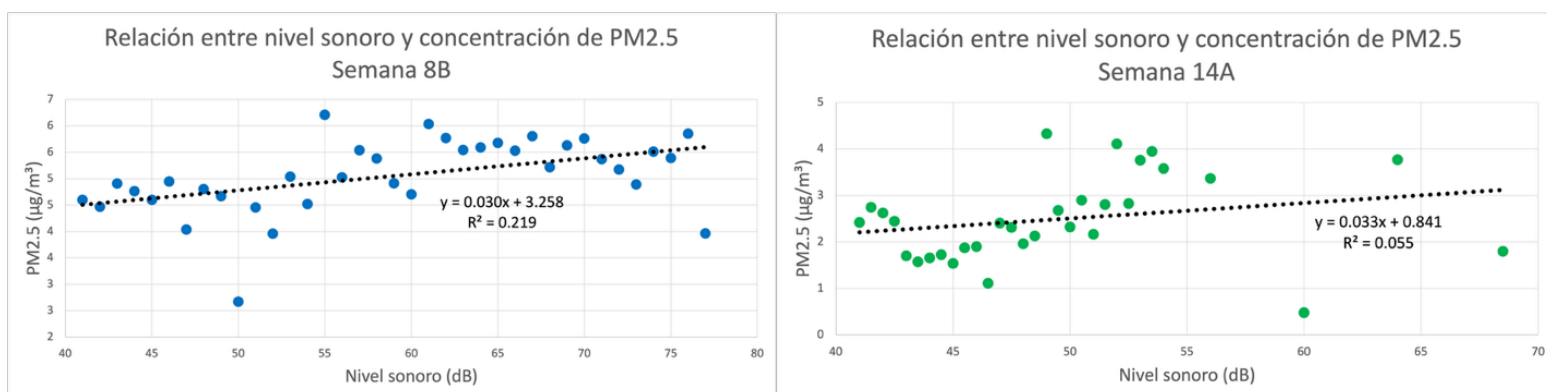


Figura 4-12 Gráficos de dispersión nivel sonoro-PM_{2.5}.
(Elaboración propia)

En primer lugar, la relación entre nivel sonoro y concentración de PM_{2.5} muestra una tendencia positiva de distintas intensidades en ambas semanas, lo que indica que, en general, a mayores niveles de ruido, se registran mayores concentraciones de partículas en suspensión. Este comportamiento es coherente ya que el incremento del nivel sonoro suele estar asociado al funcionamiento de maquinaria, herramientas o motores, procesos que pueden generar o resuspender partículas en el aire. Sin embargo, la intensidad de esta relación es moderada o débil, como reflejan los valores del coeficiente de determinación obtenidos.

En la semana 8B, la regresión obtenida ($PM_{2.5} = 0.030 \cdot \text{Ruido} + 3.258$) indica que un incremento de 1 dB en el nivel sonoro se asocia con un aumento medio aproximado de 0,03 µg/m³ en la concentración de PM_{2.5}. El valor de $R^2 = 0,219$ muestra que el nivel sonoro explica alrededor del 22 % de la variabilidad observada en la concentración de partículas, lo que sugiere una relación moderada entre ambas variables. Por el contrario, en la semana 14A, aunque la pendiente del modelo ($PM_{2.5} = 0.033 \cdot \text{Ruido} + 0.841$) mantiene una tendencia positiva similar, el coeficiente de determinación desciende hasta $R^2 = 0,055$, lo que indica que el nivel sonoro explica únicamente alrededor del 5 % de la variabilidad de PM_{2.5}, evidenciando una relación mucho más débil entre ambas variables. Este último

resultado sugiere que durante este periodo la concentración de partículas estuvo influida principalmente por otros factores ambientales o procesos de ventilación del espacio.

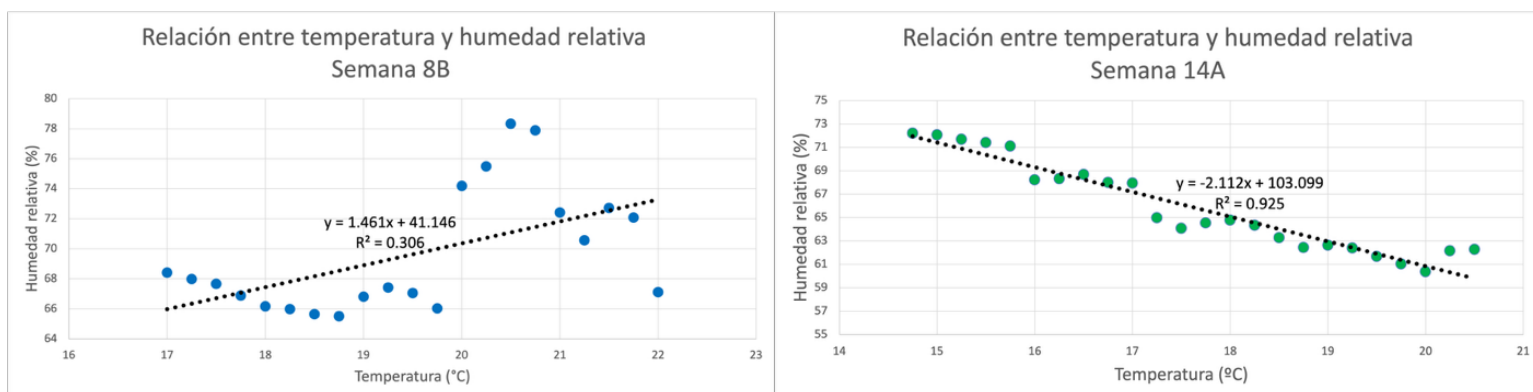


Figura 4-13 Gráficos de dispersión temperatura-humedad relativa.
(Elaboración propia)

Por otra parte, la relación entre temperatura y humedad relativa muestra comportamientos distintos entre las dos semanas estudiadas. En la semana 8B, la regresión ($HR = 1.461 \cdot T + 41.146$) presenta una tendencia positiva moderada con $R^2 = 0,306$, lo que indica que ambas variables tienden a aumentar conjuntamente dentro del rango de temperaturas observado. Este comportamiento se asocia a las condiciones ambientales exteriores durante ese periodo, Figura 4-7 y Figura 4-8, ya que la entrada de aire exterior más cálido y húmedo puede provocar incrementos simultáneos de temperatura y humedad relativa en el interior del taller. En cambio, durante la semana 14A se obtiene una relación negativa muy fuerte, descrita por el modelo ($HR = -2.112 \cdot T + 103.099$), con un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0,925$). En este caso, un aumento de 1°C en la temperatura se asocia con una disminución aproximada de $2,1\%$ en la humedad relativa, comportamiento que resulta coherente con la relación psicrométrica esperada entre ambas variables.

En resumen, las regresiones confirman que las variables térmicas presentan una relación más estructurada y predecible, mientras que la relación entre ruido y partículas es más débil y variable, lo que coincide con los resultados obtenidos previamente mediante el análisis de correlaciones y ANOVA. En el siguiente apartado se analizará la estabilidad del sistema ambiental y la detección de eventos mediante técnicas de Control Estadístico de Procesos (SPC), centrándose en el comportamiento del nivel sonoro y la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en masa, por tratarse de los parámetros más directamente vinculados a la actividad del taller.

4.7 Estabilidad del sistema y detección de eventos

Mientras que la mayoría de las variables se mantienen de forma consistente dentro de los límites de control establecidos, esta estabilidad no se observa en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y en el nivel sonoro, donde se identifican episodios puntuales de superación de los límites. Por este motivo, estas variables se analizan con mayor detalle mediante sus correspondientes gráficos de control (Figura 4-14 y Figura 4-15), con el objetivo de identificar posibles eventos asociados a la actividad desarrollada en el taller.

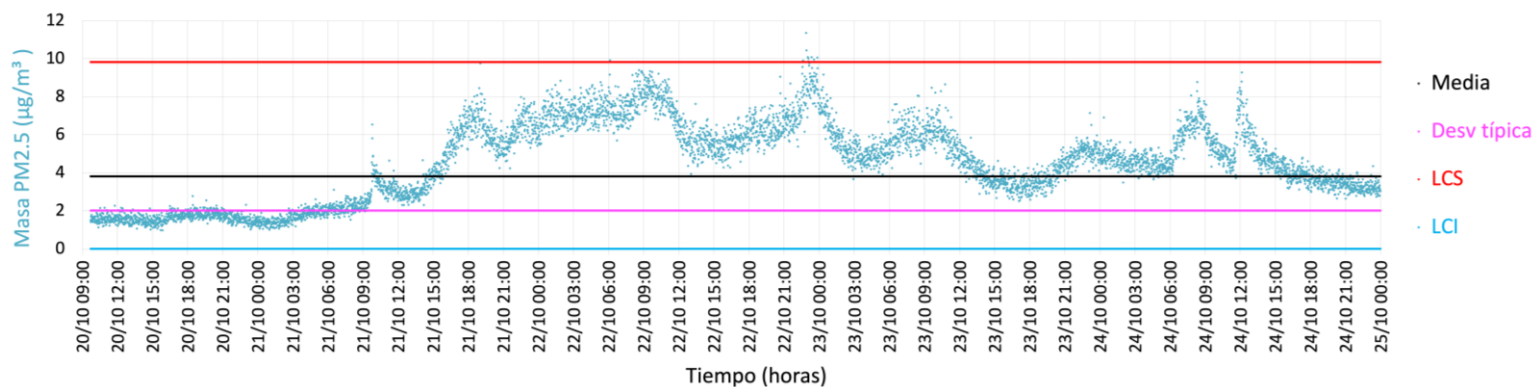


Figura 4-14 SPC de la masa de PM2.5 (semana 8B).
(Elaboración propia)

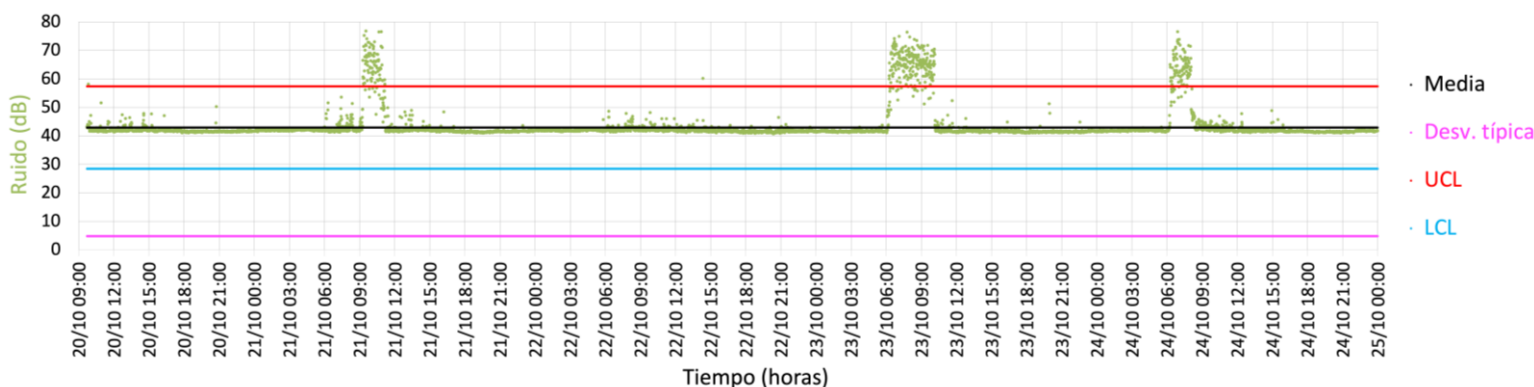


Figura 4-15 SPC del ruido (semana 8B).
(Elaboración propia)

En ambas semanas se observa que la mayor parte de las mediciones se mantienen dentro de los límites de control, lo que indica que el sistema ambiental presenta un comportamiento globalmente estable durante los periodos monitorizados. Tanto en el caso del ruido como en el de las partículas, los valores tienden a oscilar alrededor de la media, reflejando la variabilidad normal asociada al funcionamiento habitual del espacio.

No obstante, los gráficos muestran episodios puntuales en los que los valores superan el límite superior de control, especialmente en el caso del nivel sonoro durante la semana 8B, donde se registran picos claramente diferenciados. Estos eventos coinciden con periodos de mayor actividad en el taller y se manifiestan también, aunque de forma más moderada, en las concentraciones de PM2.5. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos en los apartados anteriores, donde se observó una relación positiva entre ruido y concentración de partículas, así como una variabilidad asociada a la intensidad de la actividad registrada.

En el caso de la concentración de PM2.5, los incrementos se producen generalmente en forma de episodios temporales de aumento, tras los cuales los valores vuelven a situarse dentro del rango de normalidad del sistema. Este patrón sugiere que los procesos de dispersión y ventilación del espacio contribuyen a restablecer las condiciones de fondo tras los eventos de emisión.

El análisis SPC confirma que el sistema ambiental del taller funciona mayoritariamente bajo condiciones de control estadístico, con la aparición ocasional de eventos transitorios asociados a las sesiones de prácticas. Estos resultados son coherentes con los análisis de correlación y regresión presentados anteriormente, que indicaban una relación limitada pero observable entre el nivel sonoro y las concentraciones de partículas.

4.8 Predicción del comportamiento del sistema ambiental (*Random Forest*)

Los resultados obtenidos (Figura 4-16) muestran un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,926$, lo que indica que el modelo es capaz de explicar aproximadamente el 92,6 % de la variabilidad observada en la concentración de PM2.5 dentro del conjunto de datos analizado. Asimismo, el error cuadrático medio obtenido ($RMSE = 0,56$) indica que el error medio de predicción se mantiene en valores relativamente reducidos, evidenciando una buena concordancia entre los valores medidos y los valores estimados por el modelo.

```
>>>
===== RESTART: /Users/raquelcalvo/Desktop/AI/random_forest_model.py =====
  PM2.5  Noise  Temp  RH
0   1.50   43.3  20.89  70.85
1   1.41   42.9  20.91  70.88
2   1.68   43.1  20.92  70.86
3   1.49   44.0  20.92  70.82
4   1.78   43.5  20.94  70.83
Index(['PM2.5', 'Noise', 'Temp', 'RH'], dtype='str')
R2: 0.9257767407177396
RMSE: 0.5605218238140741
>>>
```

Figura 4-16 Resultados obtenidos con *Random Forest*.
(Modelo *Random Forest*)

La representación gráfica de los valores reales frente a los valores predichos (Figura 4-17) muestra que la mayor parte de los puntos se distribuyen próximos a la línea de igualdad entre ambos, lo que confirma la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente la dinámica observada en el sistema ambiental del taller. Este comportamiento indica que las variables ambientales consideradas contienen información suficiente para describir en gran medida la evolución de la concentración de partículas dentro del rango de condiciones analizadas.

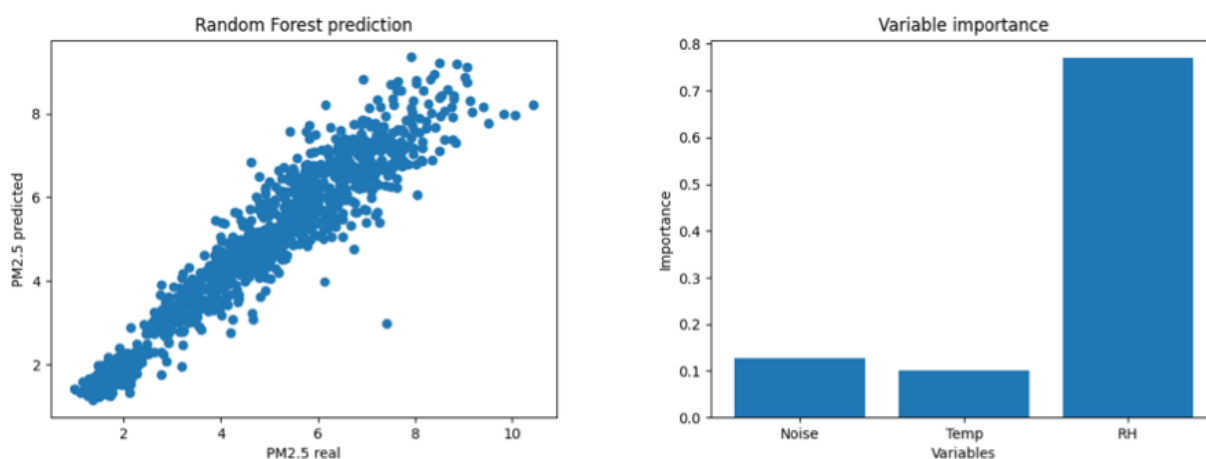


Figura 4-17 Gráfica de predicción (izq.) y de importancia (der.) de *Random Forest*.
(Elaboración propia)

El modelo *Random Forest* permite además estimar la importancia relativa de cada variable en el proceso de predicción (Figura 4-17). Los resultados obtenidos indican que la humedad relativa (RH) presenta la mayor contribución en la predicción de PM2.5, seguida del nivel sonoro, mientras que la temperatura muestra una influencia menor dentro del conjunto de variables analizadas. Este resultado sugiere que las condiciones ambientales relacionadas con la humedad del aire pueden desempeñar un papel relevante en la dinámica de suspensión, deposición o permanencia de partículas en el ambiente interior del taller.

Desde un punto de vista físico, la influencia de la humedad relativa puede interpretarse considerando que el comportamiento de los aerosoles atmosféricos depende en gran medida de las condiciones higrométricas del aire. La humedad puede afectar al tamaño efectivo de las partículas mediante procesos de crecimiento higroscópico, así como modificar su velocidad de deposición o resuspensión en superficies. Por otra parte, la presencia del nivel sonoro como variable relevante refuerza la interpretación obtenida en los análisis anteriores del capítulo, donde se observó que los incrementos en el nivel acústico se asocian con periodos de mayor actividad mecánica en el taller.

No obstante, debe considerarse que el modelo se ha construido utilizando un número limitado de variables explicativas, por lo que parte de la variabilidad del sistema ambiental puede estar asociada a otros factores no incluidos en el modelo, como la ventilación del espacio, la ocupación del taller, la dinámica del flujo de aire o la influencia de las condiciones ambientales exteriores. En consecuencia, el modelo debe interpretarse principalmente como una herramienta de análisis exploratorio que permite identificar patrones y relaciones dentro del sistema monitorizado, más que como un modelo predictivo generalizable a otros entornos.

A partir de estos resultados, en el siguiente y último apartado se presenta una síntesis global del análisis realizado, integrando la información obtenida a partir de los diferentes enfoques metodológicos y discutiendo los resultados.

4.9 Síntesis y discusión de resultados

Con el objetivo de sintetizar los principales resultados obtenidos a lo largo del capítulo, la Tabla 4-8 resume los principales hallazgos del conjunto de análisis realizados y lo que implican.

Análisis realizado	Variables analizadas	Resultado principal	Implicaciones
Validación y selección de datos	Series temporales completas	Sólo las semanas 8B, 9A y 14A presentan registros continuos	Reducción del conjunto de datos y limitación en la representatividad temporal
Análisis descriptivo	PM2.5, PM10, ruido, temperatura y humedad	Valores medios estables con picos puntuales. En general, se mantienen dentro de los rangos recomendados	Comparación de los valores registrados con los valores de referencia normativos
Evolución temporal	PM2.5, PM10, ruido	Incrementos coincidentes con periodos de actividad docente confirman su impacto directo	Ventaja de la monitorización continua frente a mediciones puntuales para comprender el comportamiento ambiental real
Comparación entre escenarios	Semanas con actividad vs sin actividad	Mayor variabilidad y aparición de picos de mayor magnitud en semanas con prácticas	Permite distinguir entre condiciones de fondo y emisiones asociadas al trabajo o factores ambientales
Análisis de correlación	PM2.5, PM10, ruido, temperatura y humedad	Correlaciones relevantes entre las variables de material particulado y entre la temperatura y la humedad	Identificación de relaciones físicas entre variables
Modelos de regresión	PM2.5 vs. Ruido y temperatura vs. humedad	Determinadas variables explican parcialmente el comportamiento de otras	Relaciones cuantificables entre los pares de variables
Control estadístico del proceso (SPC)	Series temporales de partículas y ruido	Detección de anomalías en momentos de actividad	Identificación de eventos fuera de control
Modelos de IA (Random Forest)	PM2.5	Capacidad de predicción del comportamiento del sistema	Aplicabilidad de técnicas de IA en monitorización ambiental

Tabla 4-8 Principales resultados y su importancia.
(Elaboración propia)

Los distintos enfoques de análisis han permitido caracterizar el comportamiento ambiental del taller de motores y sintetizar la relevancia de cada variable desde el punto de vista del comportamiento ambiental del sistema en la Tabla 4-9; que clasifica las variables monitorizadas según su sensibilidad a la actividad del taller, su estabilidad temporal y su nivel de criticidad¹³. Como puede observarse, las variables relacionadas con material particulado y el nivel sonoro presentan la mayor sensibilidad a la actividad desarrollada en el taller, constituyendo por tanto los indicadores más representativos del impacto ambiental generado durante las prácticas.

Variable ambiental	Sensibilidad a la actividad del taller	Estabilidad temporal	Nivel de criticidad	Interpretación
PM2.5 (masa y número)	Media	Moderada	Media	Mayor impacto en salud, pero menor relación con eventos puntuales del taller.
PM10 (masa y número)	Alta	Baja–moderada	Alta	Indicador directo de actividad y exposición a partículas inhalables.
Ruido	Alta	Moderada	Alta	Refleja de forma directa la intensidad de la actividad desarrollada.
Temperatura	Baja	Alta	Baja	Evolución dominada por las condiciones ambientales más que por la actividad del taller.
Humedad relativa	Baja	Alta	Baja	Variaciones, sin una relación clara con las operaciones realizadas en el taller.

Tabla 4-9 Relevancia de las variables en el sistema ambiental.
(Elaboración propia)

No obstante, la interpretación de los resultados obtenidos debe realizarse considerando diversas fuentes de incertidumbre y limitaciones metodológicas que condicionan el alcance de las conclusiones derivadas.

En primer lugar, la disponibilidad de datos válidos ha constituido una limitación relevante del estudio. Durante el periodo de monitorización se detectaron interrupciones en el registro de varias semanas, lo que obligó a descartar parte de la información inicialmente recopilada para evitar sesgos en el análisis estadístico. Como consecuencia, el estudio se ha centrado únicamente en las semanas 8B, 9A y 14A, siendo esta última la empleada para el desarrollo de los modelos predictivos debido a la mayor coherencia de sus registros. Esta reducción del conjunto de datos limita la representatividad temporal del análisis y restringe la capacidad de generalización de los resultados obtenidos.

Asimismo, deben considerarse las limitaciones instrumentales asociadas al sistema de medida. Los sensores empleados presentan incertidumbres inherentes relacionadas con su calibración, sensibilidad y resolución, particularmente en el caso de las mediciones de partículas en suspensión y niveles sonoros. Del mismo modo, la ubicación puntual de los sensores dentro del taller introduce un posible sesgo espacial en las mediciones, dado que la distribución de contaminantes o de niveles de ruido puede variar en función de la proximidad a las fuentes emisoras o de las condiciones locales de ventilación.

Otro elemento de incertidumbre relevante es la variabilidad asociada a las actividades desarrolladas durante las prácticas docentes. Las emisiones de partículas y los incrementos de ruido dependen directamente del tipo de operación realizada, del número de alumnos presentes y del tipo de tareas desarrolladas. En este sentido, las diferencias observadas entre semanas pueden estar parcialmente condicionadas por la naturaleza específica de las prácticas realizadas, además de por las condiciones ambientales del espacio.

¹³ El nivel de criticidad de una variable ambiental es el riesgo asociado a esa variable según su impacto ambiental, sobre la salud o el cumplimiento legal, con el fin de priorizar su control y gestión.

Adicionalmente, la influencia de factores externos, como las condiciones de ventilación del edificio o la calidad del aire exterior, puede introducir fluctuaciones en las concentraciones registradas, especialmente durante periodos de actividad de las embarcaciones en el muelle (aparatado 3.1).

A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos permiten identificar tendencias consistentes en el comportamiento de las variables estudiadas y evidenciar la existencia de episodios puntuales de incremento de partículas y ruido asociados a determinadas actividades del taller. En términos de PRL, ello sugiere que, aunque las condiciones ambientales se mantienen generalmente dentro de rangos compatibles con un entorno de trabajo seguro, existe margen de mejora mediante medidas orientadas a la optimización de la ventilación y la monitorización continua del entorno.

Finalmente, el estudio demuestra el potencial de los sistemas de monitorización ambiental y del análisis avanzado de datos como herramientas de apoyo a la gestión preventiva; contribuyendo al desarrollo de soluciones alineadas con los objetivos de innovación establecidos en la ETID, además de cumplir con el quinto objetivo de este trabajo. En el capítulo siguiente se recogen las principales conclusiones derivadas del trabajo y se plantean posibles líneas de mejora y desarrollo futuro del sistema propuesto.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El análisis de la calidad ambiental en entornos docente-técnicos requiere metodologías capaces de detectar la variabilidad temporal de estos sistemas, especialmente en contextos formativos donde coexisten múltiples condiciones operativas. Para ello, el presente trabajo se ha basado en la monitorización continua mediante sensores multiparamétricos que, complementada con técnicas de análisis estadístico e inteligencia artificial, ha sido aplicada al taller de motores del CUD-ENM con el fin de caracterizar su comportamiento ambiental y evaluar su impacto en términos de seguridad, confort y condiciones de trabajo.

En este capítulo se recogen las principales conclusiones del estudio, así como una serie de líneas de trabajo futuras orientadas a la mejora, ampliación y aplicación del sistema desarrollado.

5.1 Conclusiones

El estudio realizado ha permitido alcanzar los objetivos inicialmente marcados y establecer cinco conclusiones principales:

- i. El análisis estadístico ha permitido caracterizar el comportamiento ambiental del taller (objetivo 3) y demostrar que el **entorno** puede considerarse **seguro**, al mantenerse la mayor parte del tiempo dentro de condiciones aceptables. No obstante, el hecho de haber identificado episodios en los que se pueden ver comprometidas las condiciones de seguridad y confort nos lleva a concluir que existe **margen de mejora** en la gestión del entorno.
- ii. La **monitorización** ambiental **continua** mediante sensores multiparamétricos se confirma como una **herramienta eficaz** para la caracterización del entorno del taller (objetivo 2), superando las limitaciones de los enfoques basados en mediciones puntuales, permitiendo identificar patrones temporales y eventos transitorios asociados a la actividad.
- iii. El sistema ambiental presenta una **variabilidad asociada** tanto a la **actividad interna** como a **factores externos**. De tal modo, el comportamiento de las variables higrotérmicas lo determinan principalmente las condiciones meteorológicas, mientras que el resto de las variables reflejan la actividad desarrollada en el taller (objetivo 5).
- iv. La aplicación de modelos de **regresión** y técnicas de **aprendizaje automático** ha permitido **identificar patrones** relevantes en el sistema y evaluar la capacidad predictiva del sistema (objetivo 4).
- v. No obstante, la **capacidad predictiva** del modelo se ve **condicionada** por la complejidad del sistema y el número de variables consideradas, por lo que debe interpretarse como una **herramienta de análisis exploratorio** con potencial para evolucionar hacia modelos predictivos más robustos (objetivo 5).

En definitiva, este TFG demuestra que la integración de la monitorización continua, el análisis estadístico y las técnicas de inteligencia artificial no solo permite caracterizar el comportamiento ambiental del taller, sino que sienta las bases para una gestión proactiva del entorno, orientada a mejorar su seguridad, confort y eficiencia.

5.2 Líneas futuras

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas al realizar el análisis ambiental del taller de motores del CUD-ENM, se proponen las siguientes líneas futuras que permiten dar continuidad al trabajo realizado y mejorar los resultados obtenidos:

- **Optimización de la red de sensores**, aumentando el número de dispositivos y estudiando su distribución espacial dentro del taller, con el fin de analizar la heterogeneidad del entorno e identificar posibles zonas con mayor exposición a contaminantes o condiciones desfavorables.
- **Evaluación de nuevos modelos de análisis y predicción**, explorando el uso de algoritmos adicionales de aprendizaje automático, como Gradient Boosting u otros métodos avanzados, así como técnicas de detección automática de anomalías que permitan mejorar la capacidad predictiva y la identificación de eventos críticos. Compararlas.
- **Integración del sistema de monitorización con sistemas de control**, como alarmas, con el objetivo de evolucionar hacia un modelo de gestión inteligente del entorno basado en datos en tiempo real.
- **Extensión de la metodología a otros entornos** dentro de la Escuela Naval Militar, que permita validar la aplicabilidad, reproducibilidad y escalabilidad del enfoque desarrollado.

Al margen del alcance específico de este trabajo, la metodología basada en monitorización continua y análisis avanzado de datos podría extenderse a otros ámbitos de aplicación dentro del entorno naval o industrial, contribuyendo a la mejora de la seguridad, la eficiencia operativa y la sostenibilidad mediante el uso de tecnologías de digitalización e inteligencia artificial.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Martínez-Sánchez, J. L. Gutiérrez-González y M. A. Aguilar-López, “Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa,” *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*, vol. 30, no. 3, pp. 362–372, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://scielo.isciii.es>. [Accedido: 19-ene-2026].
- [2] Ministerio de Defensa, *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID 2020*. Madrid: Secretaría General Técnica, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-pdf.html>. [Accedido: 19-ene-2026].
- [3] M. Frontczak and P. Wargocki, “Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments,” *Building and Environment*, vol. 207, 2022. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [4] H. Yang, Y. Zhang and X. Li, “Deep learning approaches for indoor environmental monitoring and prediction,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [5] A. López Gómez, “Sistema IoT para la monitorización de calidad ambiental interior en edificios docentes,” Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid, 2023. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [6] K. D. P. Mariano, F. L. N. Almada and M. A. Dutra, “Smart Air Quality Monitoring for Automotive Workshop Environments,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2410.03986>. [Accedido: 12-feb-2026].
- [7] World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines*. Geneva: WHO, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int>. [Accedido: 20-ene-2026].
- [8] España, Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, Boletín Oficial del Estado, n.º 269, 10-nov-1995. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-24292> [Accedido: 12-feb-2026].
- [9] P. Wargocki and D. Wyon, “The effects of indoor air quality on performance and productivity in schools and offices,” *Building and Environment*, vol. 210, 2022, Art. no. 108691, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108691. [Último acceso: 21-mar-2026].

- [10] J. Kim and T. Hong, “Impact of indoor environmental quality on occupants’ comfort and cognitive performance,” *Energy and Buildings*, vol. 256, 2022, Art. no. 111678, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111678. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [11] S. J. Bennett et al., “The impact of indoor environmental quality on student performance,” *Indoor Air*, vol. 30, no. 2, pp. 245–256, 2020. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [12] J. Fisk, “Health and productivity gains from better indoor environments,” *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, pp. 537–566, 2000. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [13] U.S. EPA, “Particulate Matter (PM) Basics,” 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov>. [Accedido: 21-ene-2026].
- [14] I. Sánchez-Sellero et al., “Relationship between occupational exposure to noise and/or vibrations and vertigo,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 21, no. 2, 2024. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [15] Y. Yuan et al., “Effects of ambient temperature and relative humidity on natural particle deposition,” *Building and Environment*, vol. 230, 2023. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [16] European Environment Agency, “Air quality standards and policies,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu>. [Accedido: 21-ene-2026].
- [17] European Parliament, “Directive 2003/10/EC on noise exposure,” 2003. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu>. [Accedido: 22-ene-2026].
- [18] ISO, *ISO 7730: Thermal comfort*, 2021. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [19] UNE, *UNE-EN 16798-1: Energy performance of buildings*, 2019. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [20] Airthings, Business indoor air quality monitoring systems, Technical White Paper, 2023. [En línea]. Available: <https://www.airthings.com>. [Accedido: 18-mar-2026].
- [21] Sensirion AG, Environmental sensing solutions for building monitoring, Application Note, 2022. [En línea]. Available: <https://www.sensirion.com>. [Accedido: 18-mar-2026].
- [22] Netatmo, Smart indoor air quality monitoring solutions, Technical Report, 2022. [En línea]. Available: <https://www.netatmo.com>. [Accedido: 18-mar-2026].
- [23] Energesis, “GTNode IoT environmental monitoring system,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://energesis.es>. [Accedido: 23-ene-2026].
- [24] Energesis, “Energesis IoT – Plataforma IoT,” Energesis. [En línea]. Available: <https://iot.energesis.es/home>. [Último acceso: 21-mar-2026].
- [25] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley, 2018. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [26] E. Wójcik-Gront, “Air Pollution Monitoring and Modeling: A Comparative Study,” *Atmosphere*, vol. 16, no. 10, 2025. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/10/1199>. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [27] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson, 2021. [Último acceso: 22-mar-2026].

- [28] J. MacGregor and T. Kourti, “Statistical process control of multivariate processes,” *Technometrics*, vol. 37, no. 1, pp. 37–44, 1995. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [29] J. VanderPlas, *Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data*, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O’Reilly Media, 2023. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [30] H. Khanna, P. Kaur y S. K. Singh, “Internet of Things (IoT) for smart environment monitoring: A comprehensive review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 109-134, 2022. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [31] A. Ali, Y. Zhu y M. Zakarya, “Exploiting machine learning for environmental monitoring in IoT-based smart systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 318, 2021. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [32] S. S. Raut, S. B. Mane y P. Kulkarni, “IoT based smart environmental monitoring system using cloud computing and AI,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 5, pp. 5123–5135, 2023. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [33] J. Wang, Y. Wang y L. Zhang, “Air quality prediction using machine learning algorithms: A review,” *Atmospheric Environment*, vol. 252, 2021. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [34] . Reynoso-Guajardo et al., “Prediction of CO, CO₂, and Particulate Matter Using Random Forest: Implementation of a Smart Monitoring Prototype,” *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, vol. 17, no. 2, 2026. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/400832703>. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [35] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, “Recursos materiales,” Universidad de Vigo. [En línea]. Disponible en: <https://cud.uvigo.es/recursos-materiales/>. [Accedido: 21-mar-2026].
- [36] Elentir, “[Fotografía en Flickr],” *Flickr*. [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/elentir/4832024453>. [Último acceso: 22-mar-2026].
- [37] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), “Datos meteorológicos. Estación 1486E – Escuela Naval de Marín (octubre 2025).” [En línea]. Disponible: <https://x-y.es/aemet/est-1486E-escuela-naval-de-marin?mes=2025-10>. [Último acceso: 21-mar-2026].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente Trabajo de Fin de Grado, centrado en la monitorización ambiental del taller de motores del CUD-ENM mediante sensores multiparamétricos, presenta una serie de implicaciones relevantes desde el punto de vista social, económico y ambiental, en línea con los objetivos de mejora de la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en entornos técnico-industriales.

Implicaciones sociales

La principal aportación social del trabajo radica en la mejora objetiva de las condiciones de seguridad y salud de un entorno docente. La monitorización continua de variables críticas (PM2.5, PM10, nivel sonoro, temperatura y humedad) permite superar el enfoque tradicional basado en mediciones puntuales e identificar situaciones potencialmente perjudiciales que podrían derivar en efectos adversos para la salud: fatiga, estrés térmico, sobreexposición acústica o afecciones respiratorias. Esto facilita la detección temprana de situaciones de riesgo, contribuyendo a la reducción de riesgos higiénicos y ergonómicos. En este sentido, el trabajo se integra dentro de una estrategia de mejora de la calidad ambiental interior, directamente relacionada con la salud, el confort y el rendimiento cognitivo de los usuarios.

Asimismo, el carácter formativo del entorno analizado implica un impacto adicional: el desarrollo de competencias en digitalización, análisis de datos y uso de tecnologías avanzadas (IoT e IA). Esta incorporación contribuye a la formación de perfiles técnicos más cualificados y adaptados a las necesidades actuales.

Implicaciones económicas

Desde el punto de vista económico, la implantación de sistemas de monitorización continua supone una inversión inicial en instrumentación y desarrollo tecnológico. No obstante, esta inversión se justifica por su retorno en términos de eficiencia operativa.

La disponibilidad de datos en tiempo real permite optimizar el funcionamiento de sistemas de ventilación y climatización conforme a la demanda real. Esto se traduce en una mejora de la eficiencia energética, reduciendo el consumo y, por tanto, los costes operativos. En esta línea, la detección temprana de condiciones inadecuadas contribuye a minimizar costes indirectos derivados de la exposición a riesgos laborales (disminución del rendimiento o potenciales daños a la salud), reforzando el enfoque preventivo frente al correctivo.

Por último, el uso de modelos predictivos basados en inteligencia artificial introduce capacidades de anticipación que permiten optimizar la toma de decisiones y reducir intervenciones no planificadas.

Implicaciones ambientales

En el ámbito ambiental, este TFG contribuye a una gestión más sostenible de los recursos y a la reducción del impacto ambiental asociado al funcionamiento del taller.

La optimización de los sistemas de ventilación y climatización basada en datos reales favorece un uso más eficiente de los recursos energéticos, reduciendo el impacto ambiental asociado al consumo energético y las emisiones indirectas de CO₂. Es por ello que el enfoque adoptado, basado en la monitorización continua, favorece una gestión más sostenible de las instalaciones, contribuyendo al cumplimiento de normativas y estándares ambientales de aplicación.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente TFG implica diversas consideraciones éticas asociadas al uso de tecnologías de monitorización y análisis de datos en entornos laborales y formativos.

En primer lugar, aunque los datos recogidos son de naturaleza ambiental y no personal, la implementación de sistemas de monitorización puede generar percepción de vigilancia. Desde un punto de vista ético, resulta fundamental que estos sistemas se orienten exclusivamente a la mejora de la seguridad y el bienestar, y que su finalidad sea comunicada de forma transparente, en línea con los principios de confianza y responsabilidad.

Por otro lado, el uso de técnicas de inteligencia artificial introduce retos adicionales relacionados con la interpretabilidad y fiabilidad de los modelos. En este contexto, es fundamental que las herramientas empleadas no sustituyan el juicio crítico del ingeniero, sino que actúen como apoyo en la toma de decisiones. Asimismo, es importante destacar la responsabilidad asociada a la correcta interpretación y uso de los resultados obtenidos. Las conclusiones derivadas del análisis de datos deben basarse en criterios objetivos y rigurosos, evitando interpretaciones erróneas que puedan dar lugar a la adopción de medidas inadecuadas.

Finalmente, este trabajo refuerza la necesidad de integrar la ética en el ejercicio de la ingeniería, promoviendo un desarrollo tecnológico orientado al bienestar, la seguridad y la sostenibilidad, en coherencia con la responsabilidad social inherente a la profesión.

ANEXO III: DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado se ha hecho uso de herramientas de Inteligencia Artificial generativa como apoyo en tareas auxiliares de redacción y estructuración del documento.

En particular, dichas herramientas han sido empleadas para mejorar la claridad expositiva, la coherencia del texto y la precisión terminológica, así como para facilitar la organización de contenidos y la reformulación de determinados apartados.

Asimismo, la inteligencia artificial se ha utilizado como herramienta de apoyo en la consulta y síntesis de información, facilitando la identificación de conceptos relevantes en la estructuración del marco teórico.

Se hace constar que el uso de estas herramientas ha tenido en todo momento un carácter complementario y no sustitutivo. El planteamiento del problema, el diseño metodológico, la adquisición y tratamiento de datos, el análisis de resultados y la elaboración de conclusiones han sido realizados íntegramente por la autora, aplicando su criterio técnico y formación académica.

De este modo, la inteligencia artificial se ha integrado como una herramienta de apoyo en el proceso de elaboración del trabajo, manteniéndose en todo momento la autoría, responsabilidad y control sobre el contenido final de este.

ANEXO IV: GRÁFICAS Y REPRESENTACIONES ANALIZADAS

El presente anexo recoge el conjunto de gráficas generadas durante el desarrollo del TFG, las cuales han sido empleadas para el análisis, interpretación y validación de los resultados expuestos en el Capítulo 4. Su inclusión responde a la necesidad de mantener un equilibrio entre la claridad expositiva del cuerpo principal del documento y la disponibilidad de información detallada que respalde los resultados obtenidos.

Evoluciones temporales de las variables ambientales de la semana 8B

