



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la calidad del aire en términos de material
particulado en suspensión en el entorno de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Joan García Miroso
DIRECTORES: Lorena González Gil
Rafael Asorey Cacheda
CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_deVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la calidad del aire en términos de material
particulado en suspensión en el entorno de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

La contaminación atmosférica representa un importante riesgo medioambiental para la salud. De hecho, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que cada año se producen millones de muertes prematuras a causa de los altos niveles de material particulado en suspensión. Este contaminante se compone de una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, con un diámetro que oscila entre 0,1-10 μm . El PM afecta a más personas que ningún otro contaminante y no existe ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud, por lo que conviene identificar entornos en los que sus niveles puedan ser relevantes para tomar las correspondientes medidas de mitigación.

El principal objetivo de este trabajo es el uso de un dispositivo portátil con conectividad a una red del internet de las cosas (IoT) para monitorizar los niveles de material particulado en suspensión (PM10, PM2,5 y PM1) en diferentes localizaciones, tanto interiores como exteriores, de la Escuela Naval Militar.

Como resultados a destacables, se ha podido comprobar que se produce un fenómeno conocido como inversión térmica siempre que se mide en exteriores, pero que no sigue los mismos horarios ni se llegan a los mismos niveles de concentraciones.

También se ha podido ver en las mediciones en interiores que se producen aumentos en los niveles con el movimiento de personas, pudiendo llegar a intuir los horarios que siguen.

La principal conclusión a la que se ha llegado con este trabajo es que la Escuela Naval Militar sí cumple con los parámetros establecidos de calidad del aire relacionada con el material particulado.

PALABRAS CLAVE

Material particulado, Contaminación atmosférica, PM10, PM2,5, PM1.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Lorena González y Rafael Asorey por haber mostrado tanto interés y preocupación por el desarrollo del trabajo a lo largo del cuatrimestre, por haberme prestado los equipos y haberme resuelto con prontitud todas las cuestiones y problemas que han ido surgiendo a lo largo de éste.

A toda mi familia por haberme apoyado tanto durante estos años y a mis mejores compañeros, convertidos en segunda familia, por haber hecho más fácil y soportables estos pesados cinco años.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Introducción	9
1.2 Motivación	12
1.3 Objetivos	12
2 Estado del arte	14
2.1 Principales contaminantes atmosféricos	14
2.1.1 Contaminantes Primarios.....	14
2.1.2 Contaminantes Secundarios.....	14
2.2 Contaminación atmosférica en España	15
2.2.1 Efectos medioambientales y sobre la salud	15
2.2.2 Evolución de las emisiones contaminantes.....	16
2.2.3 Índice de Calidad del Aire	18
2.3 Objetivos y legislación relativa a material particulado en suspensión.....	19
2.3.1 Objetivos de España	19
2.3.2 Legislación.....	20
2.4 Tecnologías eliminación material particulado	23
2.4.1 Ámbito industrial	23
2.4.2 Ámbito automovilístico	26
2.4.3 Ámbito naval	27
3 Desarrollo del TFG.....	28
3.1 Equipo de medición de material particulado en suspensión	28
3.1.1 Configuración Gateway LoRa	29
3.1.2 Configuración dispositivo de medición de partículas en suspensión	31
3.2 Ubicación geográfica y duración de mediciones	32
3.2.1 Lugares de medición.....	32
3.2.2 Tiempo de monitorización	33
3.3 Inversión térmica.....	33
4 Resultados	36
4.1 Resultados de la medición en exteriores	36
4.1.1 Balcón cuartel Francisco Moreno	36

4.1.1.1 25 de enero 2023.....	36
4.1.1.2 27 de enero 2023.....	39
4.1.1.3 2 de febrero 2023	42
4.1.1.4 3 de febrero 2023	45
4.1.1.5 7 de febrero 2023	48
4.1.2 Balcón edificio Isaac Peral	51
4.1.2.1 21 de febrero 2023	51
4.1.2.2 23 de febrero 2023	54
4.1.3 Puerta Carlos I	56
4.1.3.1 2 de marzo 2023.....	56
4.2 Comparación y discusión de resultados en exteriores	59
4.2.1 Balcón cuartel Francisco Moreno	60
4.2.2 Balcón edificio Isaac Peral	61
4.2.3 Puerta Carlos I	61
4.3 Resultados de la medición en interiores.....	62
4.3.1 Estudio cuartel Francisco Moreno	62
4.3.1.1 10 de febrero 2023	62
4.3.2 Camareta cuartel Francisco Moreno	64
4.3.2.1 28 de enero 2023.....	64
4.3.2.2 5 de febrero 2023	66
4.3.2.3 24 de febrero 2023	68
4.3.3 Clase edificio Isaac Peral.....	70
4.3.3.1 9 de febrero 2023	70
4.3.3.2 14 de febrero 2023	72
4.3.4 Seminario 1 Edificio CUD.....	74
4.3.4.1 28 de febrero 2023	74
4.3.5 Cantina de marinería.....	76
4.3.5.1 16 de febrero 2023	76
4.3.5.2 27 de febrero 2023	78
4.3.6 Lanchas de instrucción	80
4.3.6.1 13 de marzo 2023.....	80
4.3.6.1 22 de marzo 2023.....	82
4.4 Comparación y discusión de resultados en interiores	84
4.4.1 Estudio cuartel Francisco Moreno	85
4.4.2 Clases edificio Isaac Peral	85
4.4.3 Seminario edificio CUD	86

4.4.4 Cantina de marinería.....	86
4.4.5 Lanchas de instrucción	86
5 Conclusiones y líneas futuras	87
5.1 Cumplimiento de la legislación.....	87
5.2 Inversión térmica y anticiclón.....	87
5.3 Impacto de fuentes de emisión.....	88
5.4 Personal y nivel de concentraciones	88
6 Bibliografía.....	90
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	92
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	93
Anexo III: Contenido del tercer anexo	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Distribución principales emisores PM10 año 2020 (INE).....	9
Figura 1-2 Distribución principales emisores PM2,5 año 2020 (INE).....	10
Figura 1-3 Distribución de aerosoles por diámetros en μm (Envira IoT) [3].....	11
Figura 1-4 Esquema aparato respiratorio humano (Junta de Andalucía – Portal Ambiental de Andalucía) [4].....	12
Figura 2-1 “Boina” de Madrid (TeleMadrid)	15
Figura 2-2 Emisiones de gases de efecto invernadero 2008-2021 (INE).....	16
Figura 2-3 Emisiones CO ₂ 2008-2021 (INE)	16
Figura 2-4 Emisión COVs 2008-2020 (INE)	17
Figura 2-5 Emisión PM10 2008-2020 (INE)	17
Figura 2-6 Emisión PM2,5 2008-2020 (INE)	17
Figura 2-7 Mapa global coloreado según media anual PM2,5 (IQAir) [11].....	19
Figura 2-8 Indicadores anuales de exposición 2009-2021, IME 2011-2021 y objetivo nacional de reducción 2020.	20
Figura 2-9 Precipitador electrostático	24
Figura 2-10 Lavador Venturi (Verlek)	25
Figura 2-11 Filtro de mangas (Calero Group).....	26
Figura 2-12 Filtro de partículas (Motor y Racing).....	26
Figura 2-13 Scrubber (Puente de Mando)	27
Figura 3-1 Interfaz servidor Grafana.....	28
Figura 3-2 Dispositivo de medición de partículas en suspensión (Smart Air Quality Monitoring IOT-Based Infrastructure for Industrial Environments).....	29
Figura 3-3 Gateway LoRa (RAK Wireless).....	29
Figura 3-4 Interfaz de configuración modelo RAK7240	30
Figura 3-5 Ajustes de Red.....	30
Figura 3-6 Configuración dirección IP.....	31
Figura 3-7 Desplegable de Pymakr en Virtual Studio Code en el que se aprecia el código fuente del dispositivo.	31
Figura 3-8 Vista Escuela Naval Militar (Ayuntamiento de Marín).....	32
Figura 3-9 Fotografía aérea ENM (TopoGPS).....	33
Figura 3-10 Esquema inversión térmica (meteo Sojuela)	34
Figura 4-1 Temperatura y humedad (25 de enero) en el balcón del cuartel Francisco Moreno.....	37
Figura 4-2 Niveles de partículas en suspensión (25 enero) en el balcón del cuartel Francisco Moreno.	38

Figura 4-3 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (25 enero) en el balcón del cuartel Francisco Moreno.	39
Figura 4-4 Temperatura y humedad (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.	40
Figura 4-5 Niveles de partículas en suspensión (27 enero) en el balcón del Francisco Moreno.	41
Figura 4-6 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.	42
Figura 4-7 Temperatura y humedad (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	43
Figura 4-8 Niveles de partículas en suspensión (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	44
Figura 4-9 Nivel de partículas en suspensión, escala logarítmica (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	45
Figura 4-10 Temperatura y humedad (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	46
Figura 4-11 Niveles de partículas en suspensión (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	47
Figura 4-12 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	48
Figura 4-13 Temperatura y humedad (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	49
Figura 4-14 Nivel de partículas en suspensión (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	50
Figura 4-15 Nivel de partículas en suspensión, escala logarítmica (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	51
Figura 4-16 Temperatura y humedad (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.	52
Figura 4-17 Niveles de partículas en suspensión (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.	53
Figura 4-18 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.	54
Figura 4-19 Temperatura y humedad (23 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.	55
Figura 4-20 Niveles de partículas en suspensión (23 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.	56
Figura 4-21 Temperatura y humedad (2 de marzo) en la Puerta Carlos I.	57
Figura 4-22 Niveles de partículas en suspensión (2 de marzo) en la Puerta Carlos I.	58
Figura 4-23 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (2 de marzo) en la Puerta Carlos I.	59
Figura 4-24 Temperatura y humedad (10 de febrero) en el estudio del Francisco Moreno.	62
Figura 4-25 Niveles de partículas en suspensión (10 de febrero) en el estudio del Francisco Moreno.	63
Figura 4-26 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (10 de febrero) en el estudio del Francisco Moreno.	64
Figura 4-27 Temperatura y humedad (28 de enero) en la camareta del Francisco Moreno.	65
Figura 4-28 Niveles de partículas en suspensión (28 de enero) en la camareta del Francisco Moreno.	66
Figura 4-29 Temperatura y humedad (5 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.	67

Figura 4-30 Niveles de partículas en suspensión (5 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.	68
Figura 4-31 Temperatura y humedad (24 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.	69
Figura 4-32 Niveles de partículas en suspensión (24 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.	70
Figura 4-33 Temperatura y humedad (9 de febrero) en la clase del Isaac Peral.	71
Figura 4-34 Niveles de partículas en suspensión (9 de febrero) en la clase del Isaac Peral.	72
Figura 4-35 Temperatura y humedad (14 de febrero) en la clase del Isaac Peral.	73
Figura 4-36 Niveles de partículas en suspensión (14 de febrero) en la clase del Isaac Peral.	74
Figura 4-37 Temperatura y humedad (28 de febrero) en el seminario del CUD.	75
Figura 4-38 Niveles de partículas en suspensión (28 de febrero) en el seminario del CUD.	76
Figura 4-39 Temperatura y humedad (16 de febrero) en la cantina de marinería.	77
Figura 4-40 Niveles de partículas en suspensión (16 de febrero) en la cantina de marinería.	78
Figura 4-41 Temperatura y humedad (27 de febrero) en la cantina de marinería.	79
Figura 4-42 Niveles de partículas en suspensión (27 de febrero) en la cantina de marinería.	80
Figura 4-43 Temperatura y humedad (13 de marzo) en la lancha de instrucción.	81
Figura 4-44 Niveles de partículas en suspensión (13 de marzo) en la lancha de instrucción.	82
Figura 4-45 Temperatura y humedad (22 de marzo) en la lancha de instrucción.	83
Figura 4-46 Niveles de partículas en suspensión (22 de marzo) en la lancha de instrucción.	84
Figura A3-1 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (25 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.	96
Figura A3-2 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (25 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.	97
Figura A3-3 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.	98
Figura A3-4 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.	99
Figura A3-5 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	100
Figura A3-6 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	101
Figura A3-7 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	102
Figura A3-8 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	103
Figura A3-9 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	104
Figura A3-10 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.	105

Figura A3-11 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (16 de febrero) en la cantina de marinería.....	106
Figura A3-12 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (16 de febrero) en la cantina de marinería.....	107
Figura A3-13 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.....	108
Figura A3-14 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.....	109
Figura A3-15 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (27 de febrero) en la cantina de marinería.....	110
Figura A3-16 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (27 de febrero) en la cantina de marinería.....	111
Figura A3-17 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (2 de marzo) en la puerta de Carlos I.....	112
Figura A3-18 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (2 de marzo) en la puerta de Carlos I.....	113
Figura A3-19 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (13 de marzo) en la lancha de instrucción.....	114
Figura A3-20 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (13 de marzo) en la lancha de instrucción.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores límite PM10 en condiciones ambientales para la protección de la salud (Real Decreto 34/2023).....	21
Tabla 2 Umbrales de activación, información y alerta PM10 (Real Decreto 34/2023)	21
Tabla 3 Valores límite PM2,5 en condiciones ambientales para la protección de la salud (Real Decreto 34/2023).....	22
Tabla 4 Umbrales de activación, información y alerta PM2,5 (Real Decreto 34/2023)	22
Tabla 5 Decisión 2011/850/UE sobre exposición a concentraciones de PM10 y PM2,5.	23
Tabla 6 Resumen mediciones en exteriores	60
Tabla 7 Resumen mediciones en interiores	85

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La contaminación del aire que respiramos es uno de los mayores problemas que se plantean para la salud en todo el mundo. La exposición continuada a emisiones contaminantes tanto en el ambiente como en los hogares es amplia y está en crecimiento. Esto se debe en parte al aumento de las emisiones en países de rentas bajas y medias, con una legislación ambiental muy laxa y un menor acceso a energías renovables.

Según la OMS, la contaminación ambiental provocó en 2019 alrededor de 4,2 millones de fallecimientos prematuros, la mayoría de ellos asociados a enfermedades cardiovasculares, respiratorias y oncológicas, derivadas principalmente de la alta exposición a materias particuladas finas que se encuentran en suspensión en el aire [1]. Estas partículas están formadas por una mezcla heterogénea de sustancias orgánicas e inorgánicas de tamaño y composición variables, sólidas y/o líquidas y de origen tanto natural como artificial.

En España, el MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica), afirma que las fuentes de emisión de material particulado más comunes son el uso de combustibles fósiles, la industria, el tráfico rodado, la minería, las emisiones domésticas, el polvo mineral africano o los aerosoles marinos, entre otros (Figura 1-1) [2].

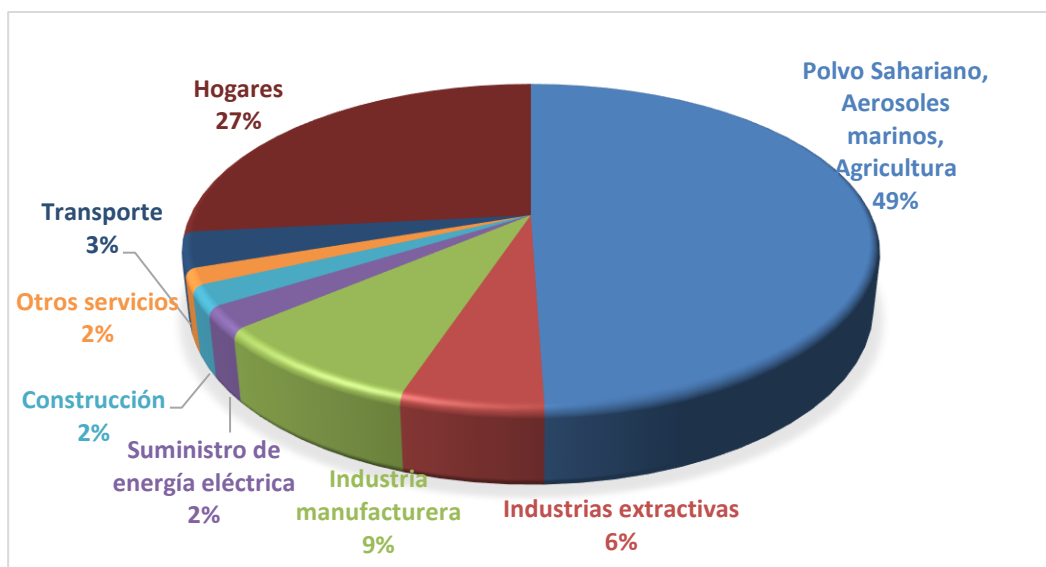


Figura 1-1 Distribución principales emisores PM10 año 2020 (INE)

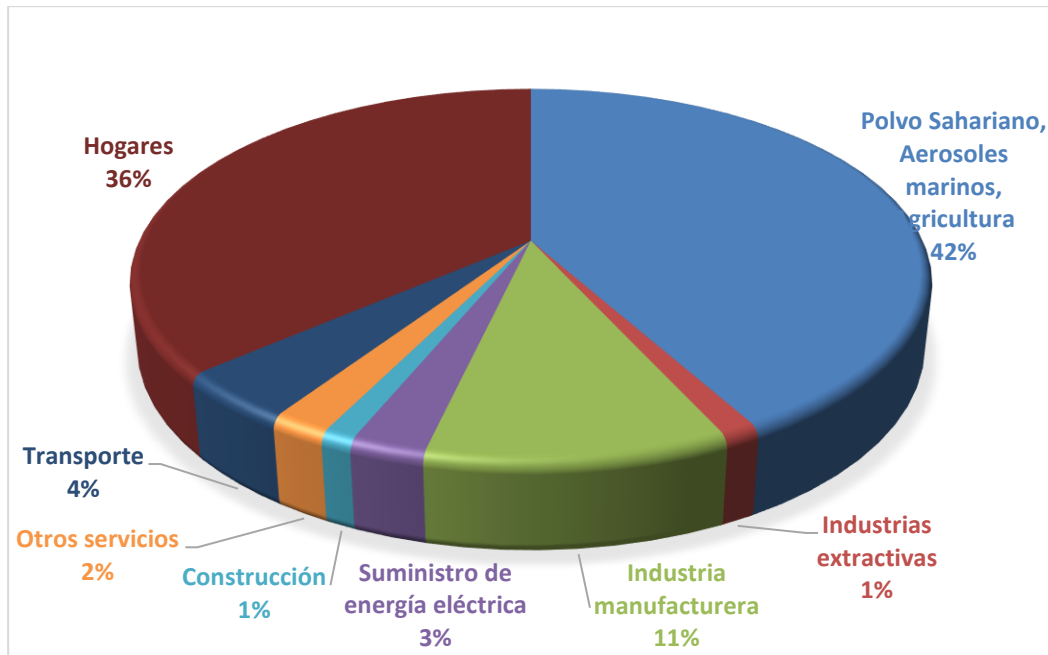


Figura 1-2 Distribución principales emisores PM2,5 año 2020 (INE)

Como se puede observar en la imagen (Figura 1-3), los aerosoles pueden clasificarse según distintos parámetros, siendo el más común el que los agrupa en función de su diámetro.

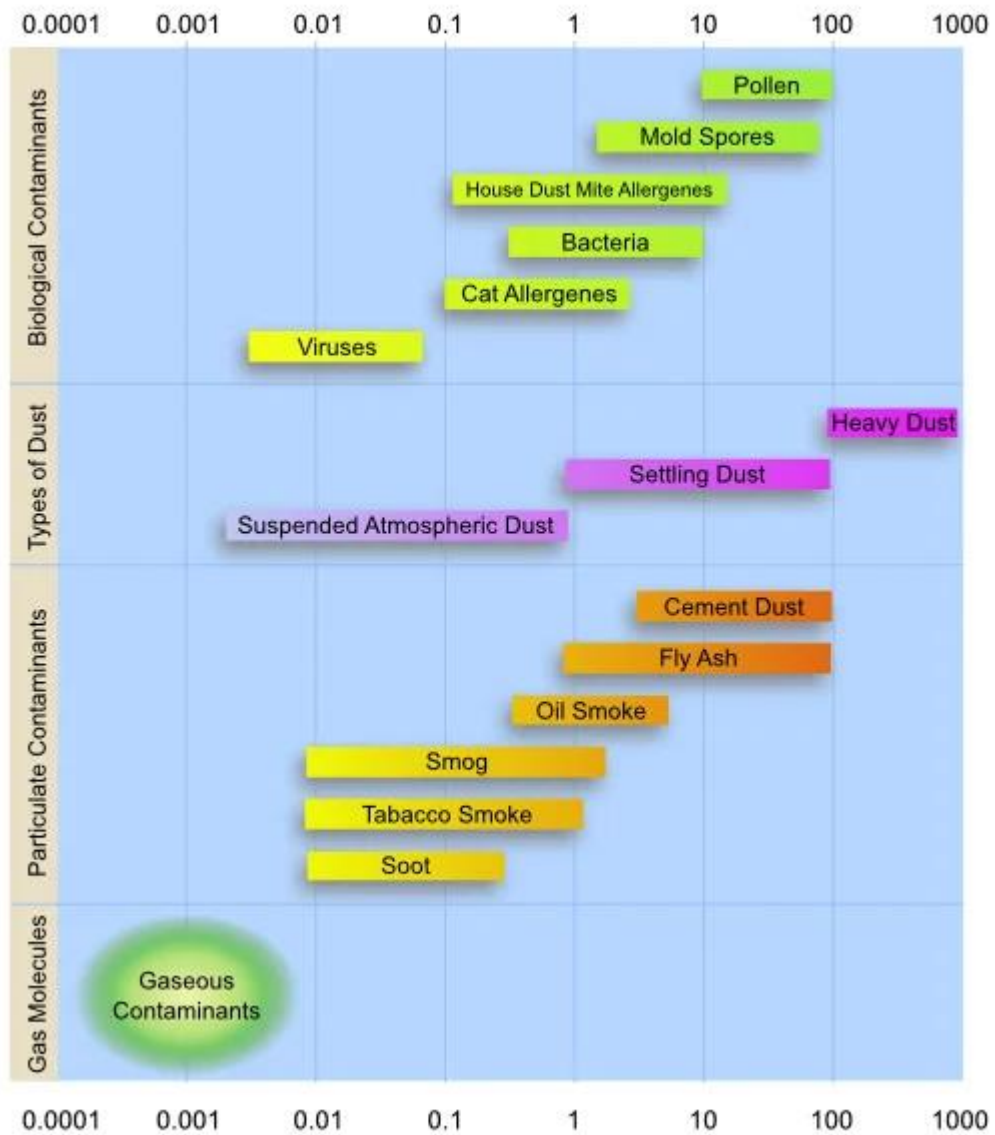


Figura 1-3 Distribución de aerosoles por diámetros en µm (Envira IoT) [3].

De menos a más peligrosas encontramos las PM10 (con diámetro igual o inferior a 10 µm) ya que pueden ser aspiradas y entrar en el sistema respiratorio; las PM2,5 (diámetro igual o inferior a 2,5 µm) que pueden alcanzar los alveolos pulmonares y las PM1 que llegan incluso a penetrar hacia el torrente sanguíneo, pudiendo causar cardiopatías isquémicas o accidentes cerebrovasculares.

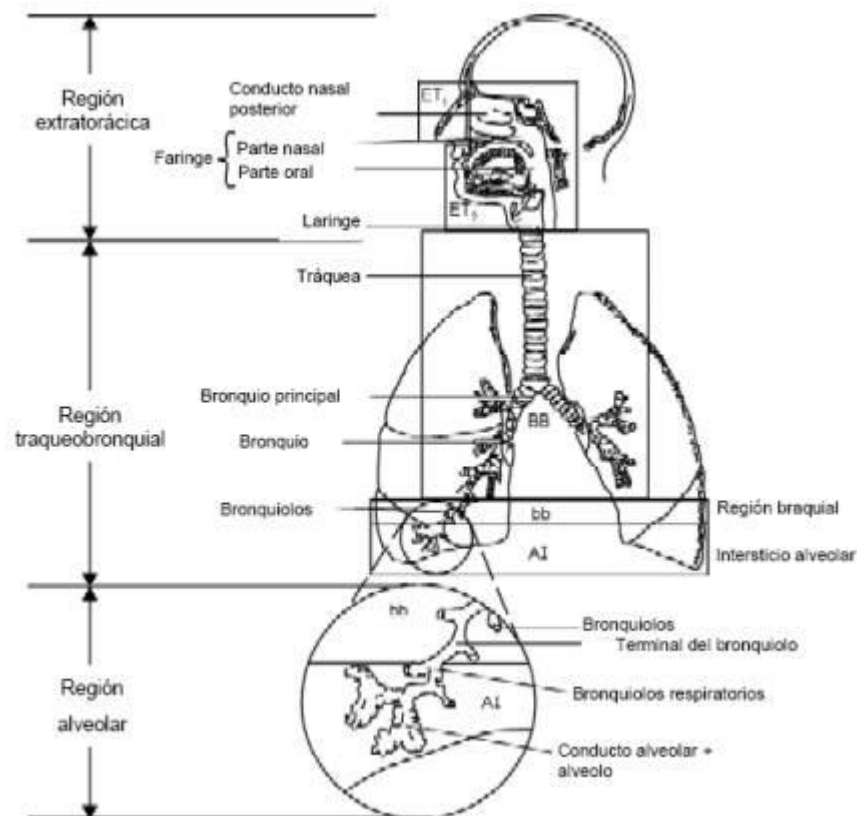


Figura 1-4 Esquema aparato respiratorio humano (Junta de Andalucía – Portal Ambiental de Andalucía) [4].

En este esquema (Figura 1-4) se puede ver cómo penetran las partículas por las vías aéreas hasta los pulmones, donde las más finas llegan hasta los alveolos, en los que se produce el intercambio de oxígeno con la sangre.

1.2 Motivación

La contaminación atmosférica debida al material particulado ha sido reconocida como uno de los mayores retos medioambientales para la salud humana debido a su notable contribución a enfermedades cardiovasculares, respiratorias, cánceres o diabetes [5]. Estas partículas provienen de numerosas fuentes, tanto de origen antropogénico como natural y su exposición a ellas varía según se esté en exteriores o interiores.

Las emisiones en exteriores a menudo siguen patrones predecibles, siendo los meteorológicos los más determinantes en las variaciones temporales, pudiendo llegar a tener mayores efectos que la emisión de los contaminantes por sí sola. En el caso de interiores, las concentraciones pueden depender de la cantidad de contaminantes provenientes del exterior, de aquellos que se producen dentro de instalaciones o de las rutinas que siguen sus usuarios, pudiendo correlacionarse por ejemplo el pico de emisiones de partículas en un aula con la entrada o salida de los alumnos [6]. Estos factores, permiten predecir cuándo y por qué se darán mayores concentraciones de partículas nocivas para la salud y adoptar las medidas de prevención oportunas.

1.3 Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado busca conocer los niveles de calidad del aire en el entorno de la Escuela Naval Militar (ENM), tanto en espacios al aire libre como en espacios cerrados, y estudiar la

variación de sus concentraciones en base a fenómenos atmosféricos y patrones de vida de usuarios de las instalaciones de la ENM.

Por lo tanto, para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Uso de un dispositivo portátil con conectividad a una red IoT (Internet of Things) para monitorizar los niveles de material particulado en suspensión en diferentes localizaciones. Esto permite transmitir los datos a un servidor en tiempo real desde el que se pueden descargar los datos y obtener gráficas.
- Analizar los datos recibidos del dispositivo para obtener conclusiones.
- Comprobar si la ENM cumple o no con los requisitos de calidad del aire establecidos en la normativa actual promulgada por España (Real Decreto 34/2023) y la UE (Decisión 2011/850/UE) [7].
- Proponer soluciones y mejoras en caso de que no cumpla con la normativa en vigor.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Principales contaminantes atmosféricos

En la atmósfera existen dos principales tipos de contaminantes, los primarios, que son emitidos directamente a la atmósfera, y los secundarios, formados por reacciones químicas a partir de otros contaminantes primarios [8].

2.1.1 Contaminantes Primarios

- Dióxido de azufre (SO_2): Procedente del uso de combustibles fósiles y de los procesos de combustión, es dañino para la salud y causa la corrosión de ciertos materiales.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Provenientes de la quema de combustibles a altas temperaturas, pueden dar lugar a la formación de lluvia ácida y smog al reaccionar químicamente con compuestos orgánicos volátiles (COVs). Perjudica a la salud y causa la eutrofización (gran proliferación de algas) de masas de algas.
- Aerosoles (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$): Dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire provenientes de procesos de combustión, manipulación de sólidos, de la formación por reacciones entre compuestos gaseosos o arrastre de partículas de salen la evaporación del agua del mar. Contribuye al smog y causa daños en la salud.
- Óxidos de carbono (CO y CO_2): Provenientes del uso de combustibles fósiles y de la quema incompleta de carburantes. Contribuyen al efecto invernadero y en el caso del CO es altamente tóxico.
- Compuestos orgánicos volátiles (COVs): Grupo amplio de compuestos volátiles como hidrocarburos, alcoholes o aldehídos, entre otros, procedentes de motores de combustión y el uso de disolventes que producen olores, dañan a las plantas y al resto de seres vivos, pudiendo ser cancerígenos y contribuyen al smog fotoquímico.

2.1.2 Contaminantes Secundarios

- Trióxido de azufre (SO_3): Se forma en la atmósfera por oxidación del SO_2 y es una sustancia muy reactiva con el agua, que puede provocar lluvia ácida.

- Ozono (O_3): Ocasionado por reacciones fotoquímicas con COVs y óxidos de nitrógeno (NO_x), causa irritación en ojos y vías aéreas, reduce la capacidad pulmonar y daña a plantas y cosechas.

2.2 Contaminación atmosférica en España

2.2.1 Efectos medioambientales y sobre la salud

La polución es un problema provocado por interacciones químicas derivadas de procesos naturales o causadas por la actividad humana, que tiene efectos sobre el medioambiente y los seres vivos.

- Los gases acidificantes, como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre (ambos provenientes de la quema de combustibles fósiles) (Figura 2-1) o amoníaco (causado entre otros por la descomposición de materia orgánica) provocan disminución de biodiversidad [9].
- Nutrientes de nitrógeno procedentes de la fabricación de fertilizantes, que pueden filtrarse a las aguas y provocar eutrofización, es decir, que haya un exceso de nutrientes que provoque un crecimiento desmesurado de vegetación acuática, que agota el oxígeno de los fondos, provocando la muerte de un gran número de especies.



Figura 2-1 “Boina” de Madrid (TeleMadrid)

- Ozono troposférico, causado por la reacción de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno con la radiación solar, que ocasiona daños a cultivos, bosques y plantas, llegando a frenar su crecimiento y provoca irritación del sistema respiratorio o alergias.
- Metales pesados que pueden bioacumularse, como el caso del mercurio en pescados azules y luego ser absorbidos en la comida por los humanos.
- Trastornos respiratorios y cardiovasculares anteriormente mencionados por la inhalación de partículas finas en suspensión [10].

2.2.2 Evolución de las emisiones contaminantes

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), las emisiones totales de gases contaminantes se han visto notablemente reducidas, tal y como se puede observar en el gráfico [11].

Emisiones de gases de efecto invernadero - Serie 2008-2021

	Valor	Variación
Total	294.944,4	5,7
Dióxido de carbono	233.699,7	7,1
Metano	38.131,9	1,0
Óxido nitroso	17.694,3	0,0
Otros GEI	5.418,5	-0,2

Total. Valor

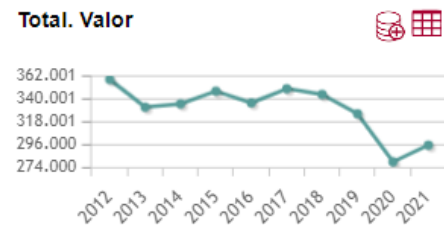


Figura 2-2 Emisiones de gases de efecto invernadero 2008-2021 (INE)

Entre las explicaciones a esta tendencia podemos encontrar la implementación de leyes más restrictivas y cupos para emitir gases contaminantes, un uso cada vez más extendido de energías renovables y la ralentización de la industria derivada de la pandemia del SARS-CoV-2 (Covid-19).

Observamos el mismo patrón en el resto de factores analizados como el CO₂, COVs, PM10 y PM2,5.

Cuentas Medioambientales: Cuenta de Emisiones a la Atmósfera, CO₂ - Dióxido de carbono (miles de toneladas), TOTAL SUSTANCIA CONTAMINANTE

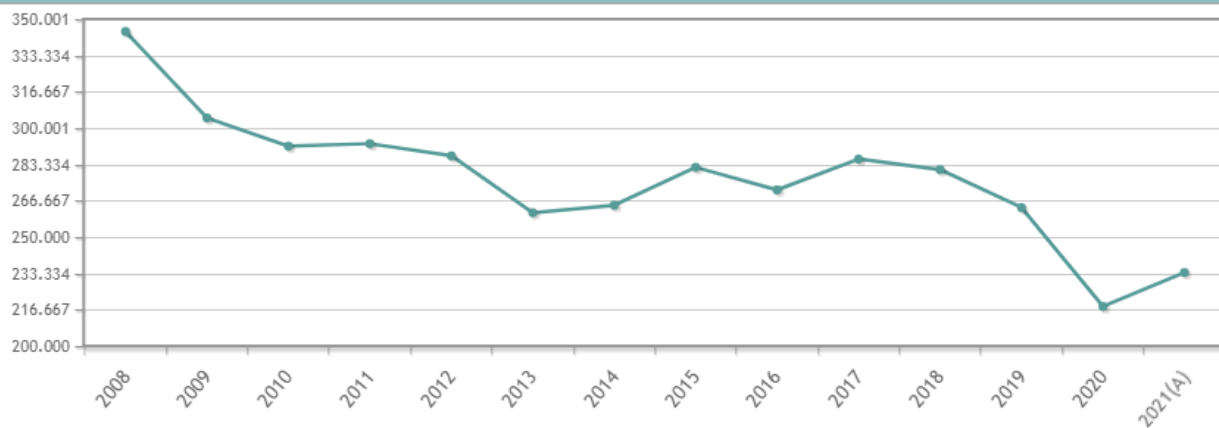


Figura 2-3 Emisiones CO₂ 2008-2021 (INE)

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN TÉRMINOS DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN EN EL ENTORNO DE LA ENM

Cuentas Medioambientales: Cuenta de Emisiones a la Atmósfera, COVNM - Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (toneladas), TOTAL SUSTANCIA CONTAMINANTE

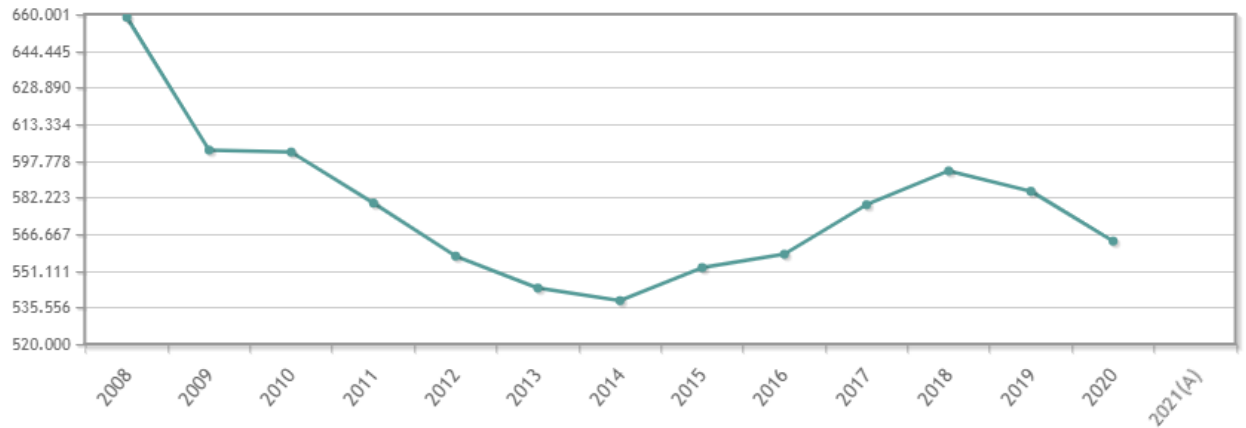


Figura 2-4 Emisión COVs 2008-2020 (INE)

Cuentas Medioambientales: Cuenta de Emisiones a la Atmósfera, PM10 - Partículas de diámetro menor o igual a 10 µm (toneladas), TOTAL SUSTANCIA CONTAMINANTE

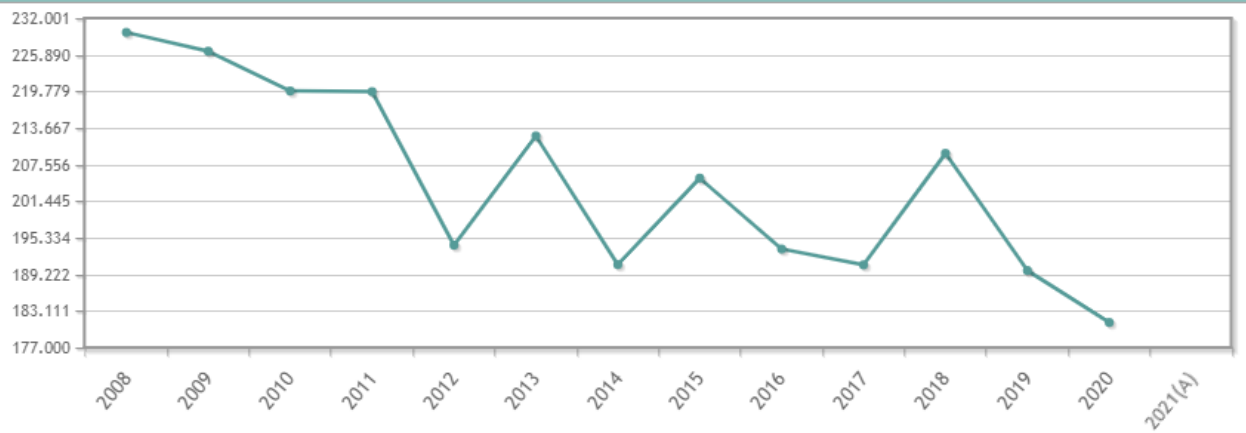


Figura 2-5 Emisión PM10 2008-2020 (INE)

Cuentas Medioambientales: Cuenta de Emisiones a la Atmósfera, PM2.5 - Partículas de diámetro menor o igual a 2,5 µm (toneladas), TOTAL SUSTANCIA CONTAMINANTE

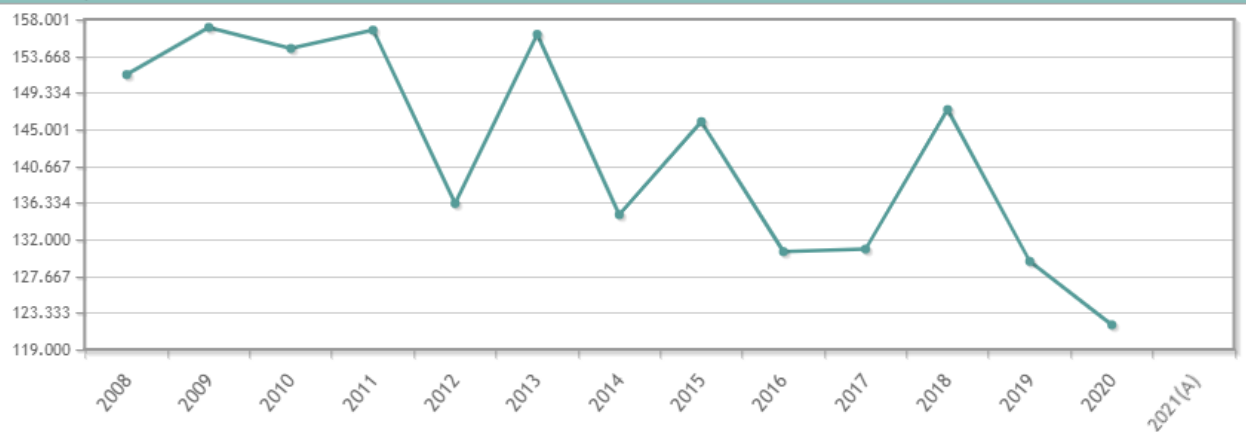


Figura 2-6 Emisión PM2,5 2008-2020 (INE)

Al no disponer de los datos del año 2021, se debe tener en cuenta que al pararse la economía por completo en 2020 debido a las restricciones impuestas, los registros en cuanto a contaminantes son anormalmente bajos. Por lo tanto, cabe esperar que esas emisiones crezcan en los dos siguientes años, pero dentro de una tendencia a la baja.

2.2.3 Índice de Calidad del Aire

El Índice de Calidad del Aire (ICA) evalúa el estado del aire en base a los datos recibidos en tiempo real de las estaciones de medición de la red nacional de vigilancia repartidas por toda España.

Cuenta con 6 categorías de calidad: buena, razonablemente buena, regular, desfavorable, muy desfavorable y extremadamente desfavorable.

Los contaminantes que se miden para realizar el cálculo son: PM10, PM2,5, dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y dióxido de azufre (SO₂).

Hay que tener en cuenta que este índice solamente refleja la calidad a corto plazo y no el periodo anual, que normalmente difiere de la anterior medida. Los límites de exposición a largo plazo marcados por la normativa son más restrictivos que aquellos a corto plazo, por lo que el ICA no serviría para verificar el cumplimiento de la normativa de calidad del aire en cuanto al cumplimiento de los objetivos reglamentarios.

El método de cálculo empleado es el siguiente:

- Para el NO₂ y el SO₂ se utiliza la concentración media de la última hora.
- Para el O₃ se usa la media móvil de las concentraciones de las últimas 8 h.
- Para PM10 y PM2,5 se emplea la media móvil de las concentraciones de las últimas 24 h.
- En casos en los que una estación no pueda realizar medidas de alguno de los contaminantes, el índice se calcula con datos de al menos uno de ellos. Así se evita la exclusión de medidores que no envían datos de los diferentes contaminantes.

España se encontraba en el año 2021 en el puesto 88 de la lista de países con peor Índice de Calidad del aire con respecto a la concentración de PM2,5. En concreto la media de exposición para ese año fue de 10,3 µg/m³, 0,6 µg/m³ superior al dato de 2020 pero 0,1 µg/m³ inferior al registrado en 2019[12].

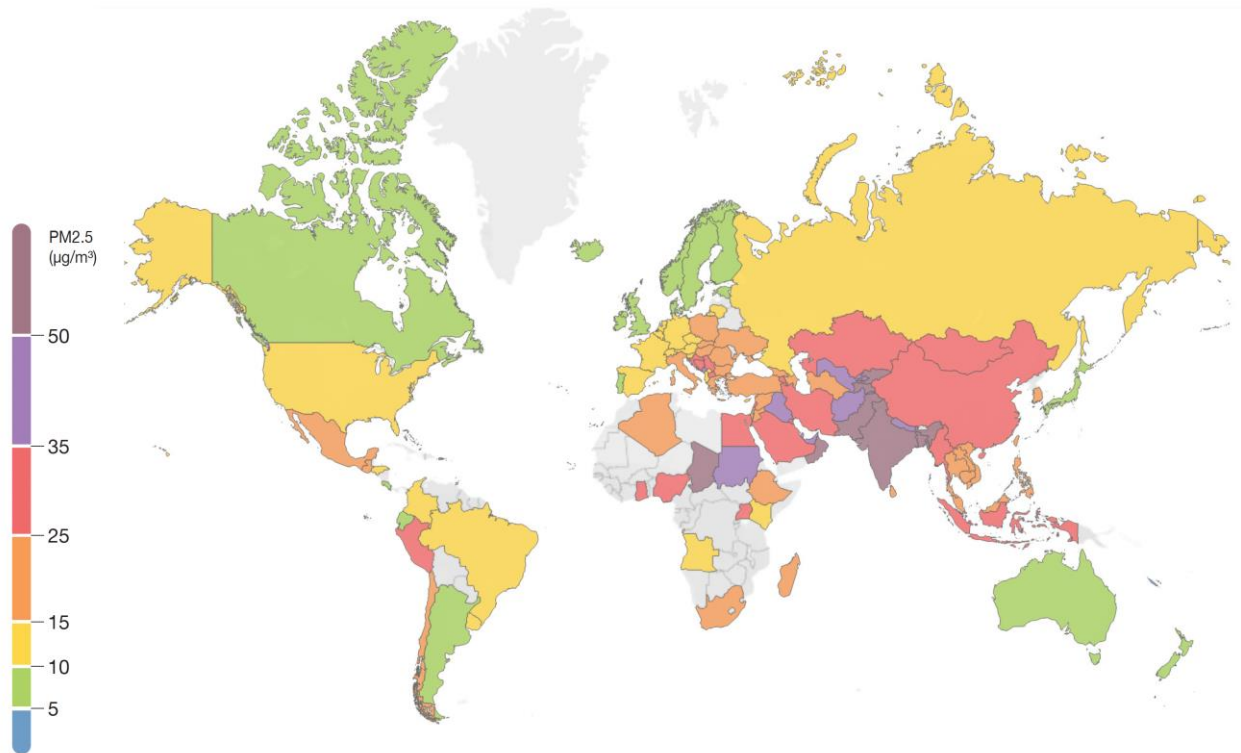


Figura 2-7 Mapa global coloreado según media anual PM2,5 (IQAir) [13].

2.3 Objetivos y legislación relativa a material particulado en suspensión

2.3.1 *Objetivos de España*

El Indicador Medio de Exposición de PM2,5 (IME) evalúa el nivel al que están expuestos los españoles a este fenómeno. Según el Real Decreto 102/2011, el objetivo nacional a cumplir en el año 2020 era reducir el valor tomado en 2011 un 15%. Como el IME de 2011 fue de 14,1 µg/m³ y el de nueve años después de 11,3 µg/m³, esto ha supuesto una reducción del 19,9%. Sin embargo, se ha prolongado la comparación hasta el año 2021, en el que se obtuvo un valor de 10,9 µg/m³ y una reducción del 22,7% con respecto a hace diez años.

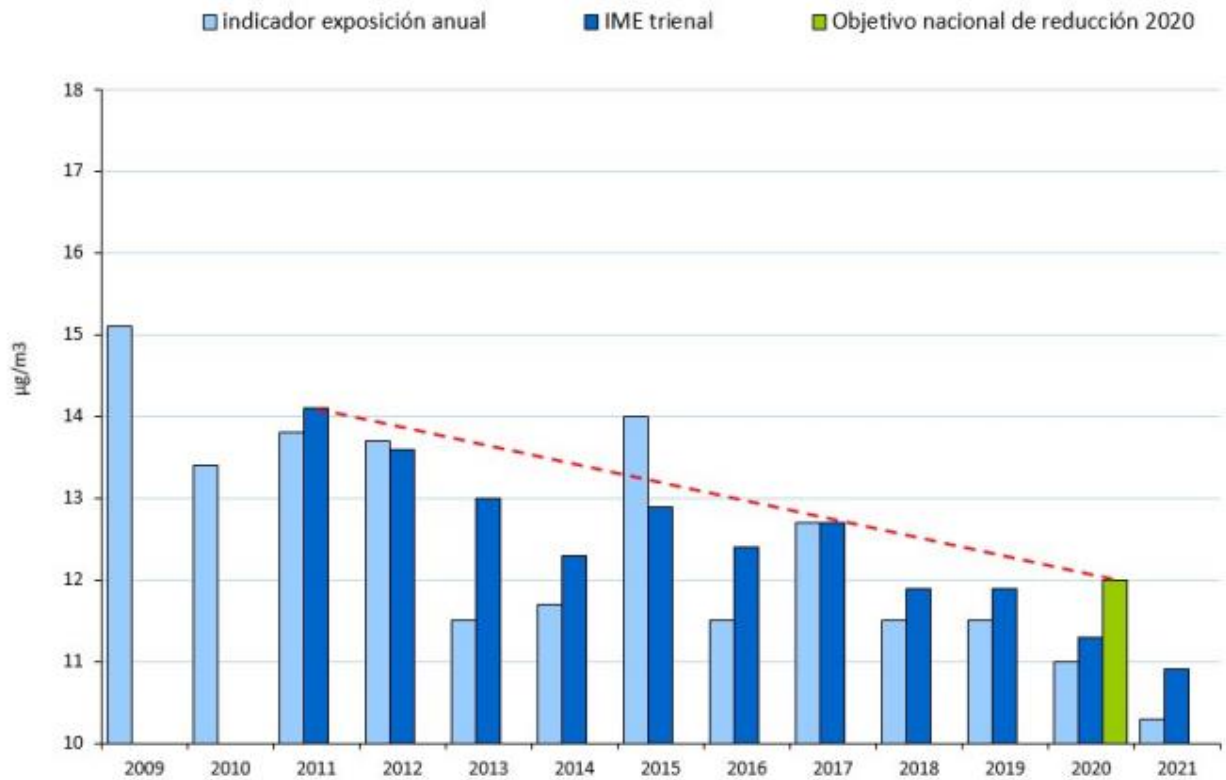


Figura 2-8 Indicadores anuales de exposición 2009-2021, IME 2011-2021 y objetivo nacional de reducción 2020.

2.3.2 Legislación

En España se lleva legislando en materia de calidad del aire desde 1972 con la ley de Protección del Ambiente Atmosférico y en la Unión Europea la primera Directiva de Calidad del Aire se promulgó en 1972.

Recientemente, se aprobó el Real Decreto 34/2023, que establece unos límites más estrictos de exposición a concentraciones de material particulado. Éstos se dividen en valores de exposición diaria, anual y también establecen los umbrales de activación, información y alerta para la población.

Como podemos observar en las tablas, éstos son de 50 µg/m³ diarios y 40 µg/m³ anuales para el caso de las PM10 y de 20 µg/m³ anuales para las PM2,5.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN TÉRMINOS DE
MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN EN EL ENTORNO DE LA ENM

	Período de promedio	Valor límite	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor límite diario	24 horas	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año.	50%	En vigor desde el 1 de enero de 2005
Valor límite anual	1 año civil	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20%	En vigor desde el 1 de enero de 2005

Tabla 1 Valores límite PM10 en condiciones ambientales para la protección de la salud (Real Decreto 34/2023)

	Parámetro	Umbral
Umbral de activación	Promedio 24h o Promedio móvil 24h	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de información	Promedio 24h o Promedio móvil 24h	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de alerta	Promedio 24h o Promedio móvil 24h	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 2 Umbrales de activación, información y alerta PM10 (Real Decreto 34/2023)

Para las PM2,5, el límite de exposición anual sería de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tal y como se puede comprobar en las siguientes tablas.

	Período de promedio	Valor	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor objetivo anual	1 año civil	25 µg/m ³	-	
Valor límite anual (fase I)	1 año civil	25 µg/m ³	20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y cada 12 meses hasta alcanzar un 0% el 1 de enero del 2015, estableciéndose los siguientes valores: 5 µg/m ³ en 2008; 4 µg/m ³ en 2009 y 2010; 3 µg/m ³ en 2011; 2 µg/m ³ en 2012; 1 µg/m ³ en 2013 y 2014.	1 de enero de 2015
Valor límite anual (fase II)	1 año civil	20 µg/m ³	-	1 de enero de 2020

Tabla 3 Valores límite PM2,5 en condiciones ambientales para la protección de la salud (Real Decreto 34/2023)

	Parámetro	Umbral
Umbral de activación	Promedio 24h o Promedio móvil 24h	25 µg/m ³
Umbral de información	Promedio 24h o Promedio móvil 24h	35 µg/m ³
Umbral de alerta	Promedio 24h o Promedio móvil 24h	50 µg/m ³

Tabla 4 Umbrales de activación, información y alerta PM2,5 (Real Decreto 34/2023)

La normativa europea actual es la Decisión 2011/850/UE, que también establece los límites máximos de concentración diarios y anuales, siendo los mismos que en la norma nacional.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN TÉRMINOS DE
MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN EN EL ENTORNO DE LA ENM

PM10	Salud	1 día	Días de superación en un año civil.	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (35) Percentil 90,4
		1 año civil	Media anual	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM2,5	Salud	Tres años civiles consecutivos	Indicador de la exposición media: (para el cálculo véase Directiva 2008/50/CE)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 año civil	MEDIA anual	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 5 Decisión 2011/850/UE sobre exposición a concentraciones de PM10 y PM2,5.

En EEUU, los márgenes diarios son menos estrictos, sin embargo, para los límites anuales distinguen entre estándares primarios y secundarios. Los primarios son los que buscan proteger la salud de las personas, especialmente de población de riesgo como ancianos, menores y de aquellos que sufren enfermedades respiratorias. Los estándares secundarios, se encargan de la protección contra situaciones de visibilidad reducida y daño a animales, vegetación, cosechas y edificios[14].

Contaminación por Partículas (PM)		Primarias	1 año	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual, promediada durante 3 años.
	PM2,5	Secundarias	1 año	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual, promediada durante 3 años.
		Primarias y secundarias	24 horas	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Percentil 98, promediado durante 3 años.
	PM10	Primarias y secundarias	24 horas	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	No exceder más de una vez al año, en un promedio de 3 años.

Tabla 8 Límites de exposición PM10 y PM2,5 EEUU (US Environmental Protection Agency)

2.4 Tecnologías eliminación material particulado

2.4.1 *Ámbito industrial*

Las industrias están adoptando tecnologías en sus procesos para minimizar las emisiones de partículas inferiores a 10 y 2,5 micras y poder seguir con su actividad económica causando el menor impacto.

Entre estas tecnologías destacan:

- Precipitador electrostático: Estos dispositivos constan de una serie de placas paralelas por las que se hace circular el gas a tratar. Una fuente de alto voltaje transfiere electrones a las placas, entre las que se crean diferencias de potenciales. Mientras el fluido atraviesa las placas cargadas negativamente, las partículas se ionizan. Luego circulan por las placas positivas, donde el material es atraído, pasando a ceder sus electrones y a formar parte del

colector. A esto hay que sumar sistemas de evacuación de la tolva, que recogen el material, permitiendo el funcionamiento continuo del colector [15].

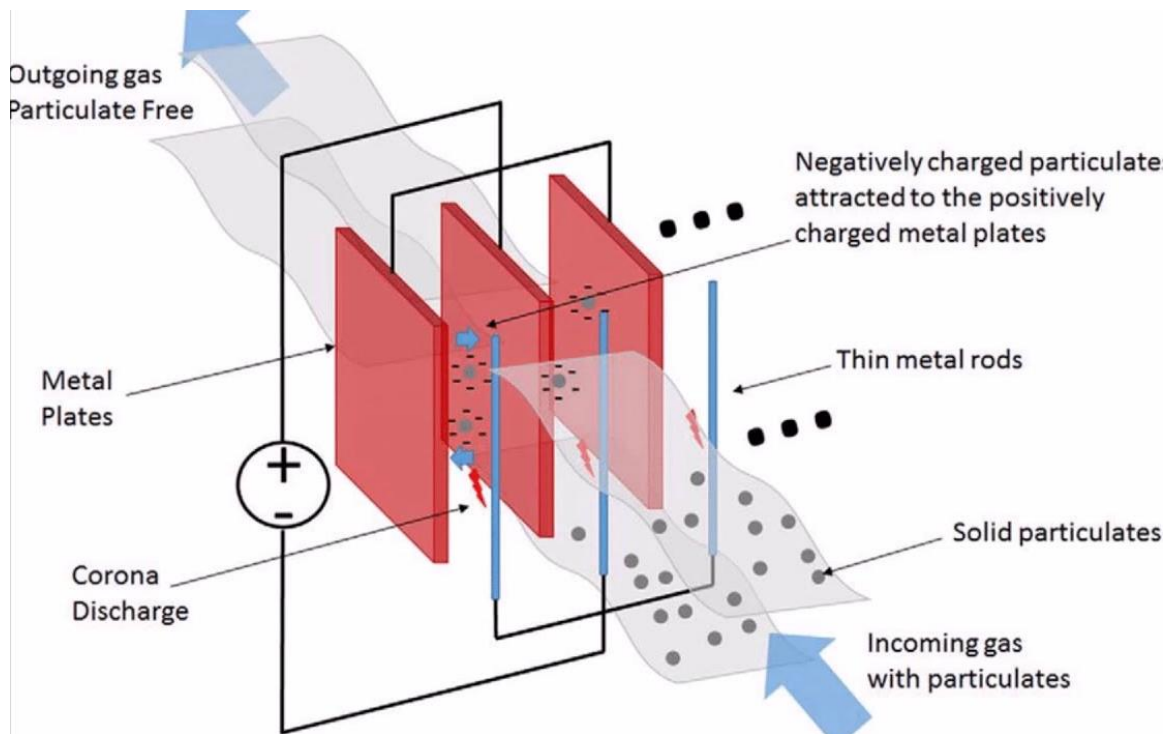


Figura 2-9 Precipitador electrostático

- Lavador Venturi: Es un tipo de lavador de gases húmedo. El gas ingresa al Venturi y se hace circular a través de una solución de lavado que retiene las partículas. Más tarde se centrifuga, depositando los lodos en un sedimentador.

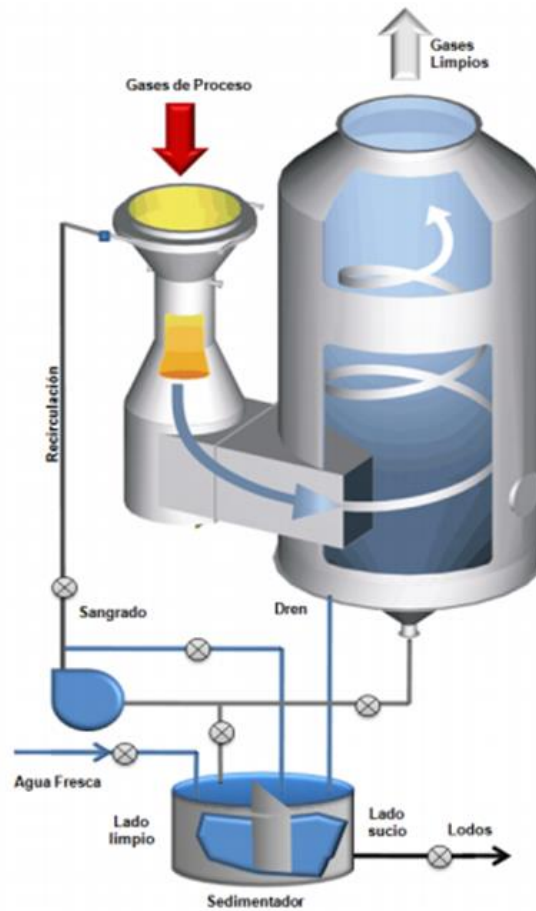


Figura 2-10 Lavador Venturi (Verlek)

- Filtro de Mangas: El gas circula por una serie de tubos con forma de mangas que contienen una serie de filtros realizados con un tejido poroso que retiene las sustancias sólidas que no consiguen pasar el filtro o que se adhieren de manera electrostática, similar al precipitador electrostático [16].



Figura 2-11 Filtro de mangas (Calero Group)

2.4.2 Ámbito automovilístico

La aplicación en el año 2007 de la normativa EURO 6 a nivel comunitario, obligaba a reducir a 5 mg/km el nivel de partículas que se podían expulsar por el tubo de escape, por esa razón se hizo de obligado cumplimiento el siguiente sistema en aquellos vehículos propulsados por gasoil [17].

- Filtro de partículas: Se utiliza en los vehículos diésel, ya que la temperatura de combustión en el interior del motor, es significativamente menor que en la de los coches propulsados por gasolina, por lo que no logran quemar todas las partículas generadas en el proceso de combustión [18].

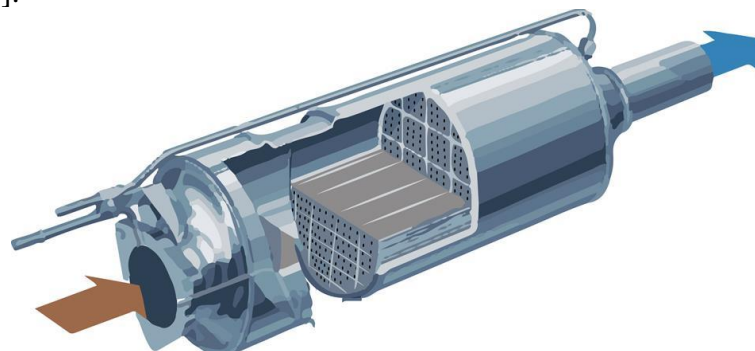


Figura 2-12 Filtro de partículas (Motor y Racing)

El filtro va instalado cerca del motor y antes del tubo de escape. Está formado por pequeñas celdas en su interior que filtran el hollín, para evitar que se emita directamente a la atmósfera. Una vez el filtro se encuentra cercano al 40% de saturación, se elevan las temperaturas mediante un proceso llamado pirólisis, haciendo que se queme el hollín y salga más depurado.

2.4.3 *Ámbito naval*

El convenio MARPOL nació en 1973 con el objetivo de reducir el impacto que tiene el tráfico marítimo sobre los océanos. En su anexo VI, establece la normativa a seguir para prevenir la contaminación atmosférica en dicho ámbito [19].

El método más utilizado para la reducción de partículas y gases contaminantes, es el uso de scrubbers o lavadores, que funcionan de un modo muy similar al lavador Venturi citado anteriormente [20].

Los gases de escape del motor pasan por un material alcalino para neutralizar la naturaleza ácida de estos gases y eliminar las partículas.

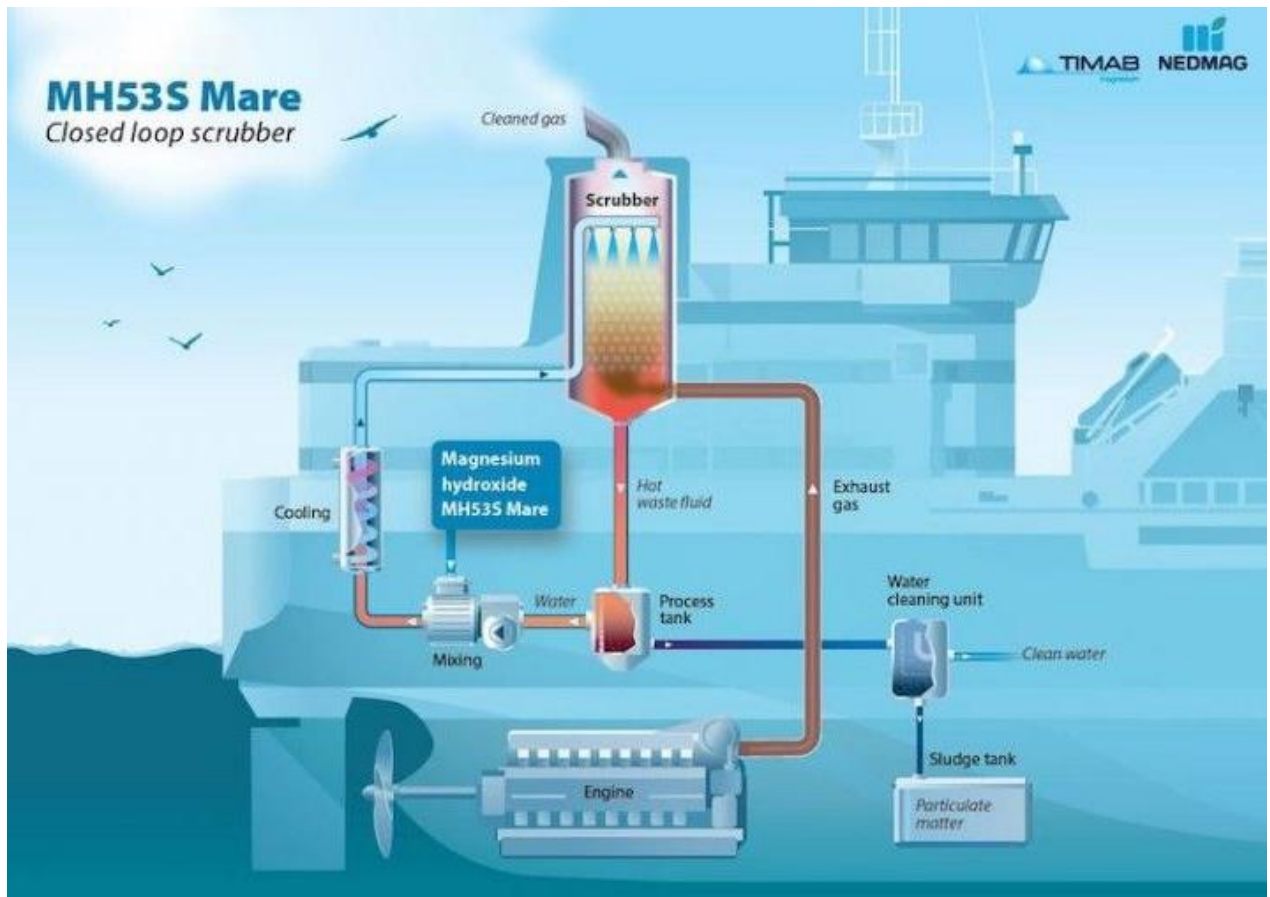


Figura 2-13 Scrubber (Puente de Mando)

Los hay de dos tipos:

- Secos: emplean cal sólida como elemento de depuración, para eliminar el NO_x y partículas.
- Húmedos: utilizan agua dulce o del mar con aditivos químicos para poder filtrar los gases de escape del motor.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Equipo de medición de material particulado en suspensión

El equipo consta de dos partes, un dispositivo de medición de partículas en suspensión y un portal (Gateway) conectado a una antena de largo alcance (Long Range). El dispositivo transmite los datos de forma inalámbrica a la antena, que los exporta a un servidor llamado Grafana mediante una conexión Ethernet, en el que se almacenan.

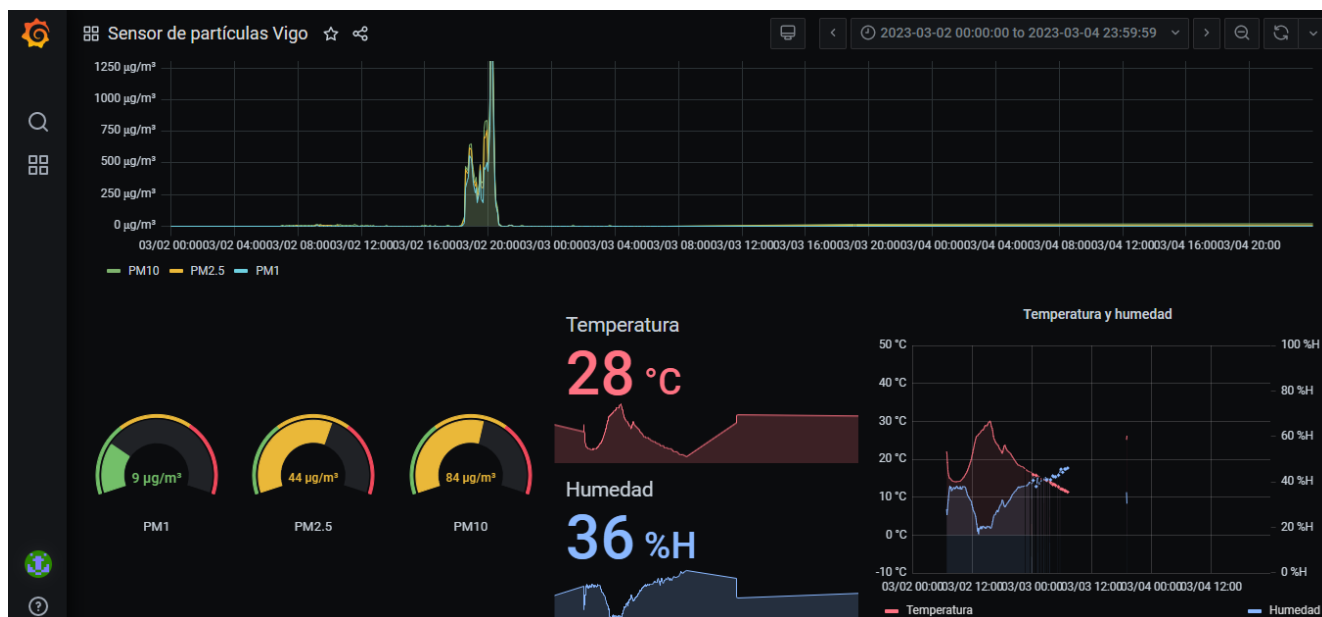


Figura 3-1 Interfaz servidor Grafana

El dispositivo (Figura 3-2), contiene en su interior un sensor capaz de medir partículas en el rango de 0,3 a 40 μm . En este caso está configurado para medir las PM10, PM2,5 y PM1. Además, incluye un sensor de temperatura y humedad y un microcontrolador que lee y procesa los datos y los transmite al Gateway LoRaWAN aproximadamente cada minuto. El dispositivo cuenta con una batería de Litio en su interior con una autonomía menor a 24 horas.

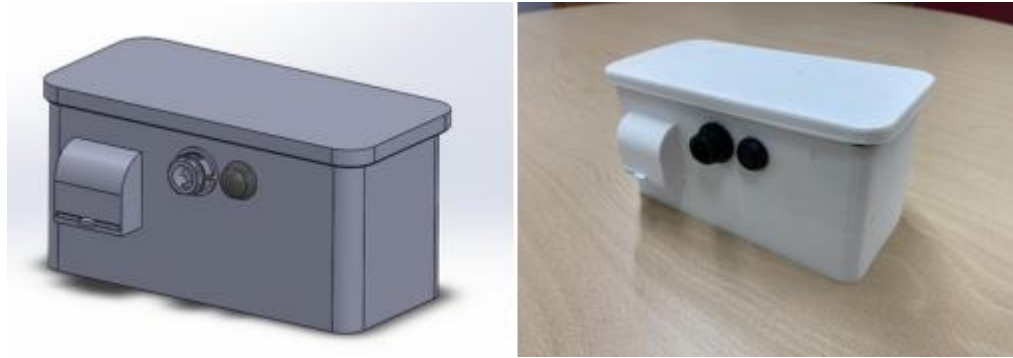


Figura 3-2 Dispositivo de medición de partículas en suspensión (Smart Air Quality Monitoring IOT-Based Infrastructure for Industrial Environments)

El Gateway (Figura 3-3) consta de una carcasa a la que van conectadas la antena LoRa, una antena WiFi para poder acceder a su configuración, además de un receptor GPS. Utiliza bandas de licencia libre, en este caso de 868 MHz, para recibir y transmitir los datos. Tiene una cobertura de 1 km en zonas urbanas y de hasta 10 km en zonas rurales. El equipo requiere de conexión a un puerto Ethernet y a la corriente eléctrica.

3.1.1 Configuración Gateway LoRa

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC) para redes amplias que enlaza dispositivos de baja potencia con aplicaciones en Internet mediante comunicación inalámbrica a larga distancia.

Para ser capaces de recibir la información, es necesario un gateway (portal) que conecte los dispositivos de la propia red con un servidor conectado al gateway desde Ethernet. Para ello es necesaria su configuración.

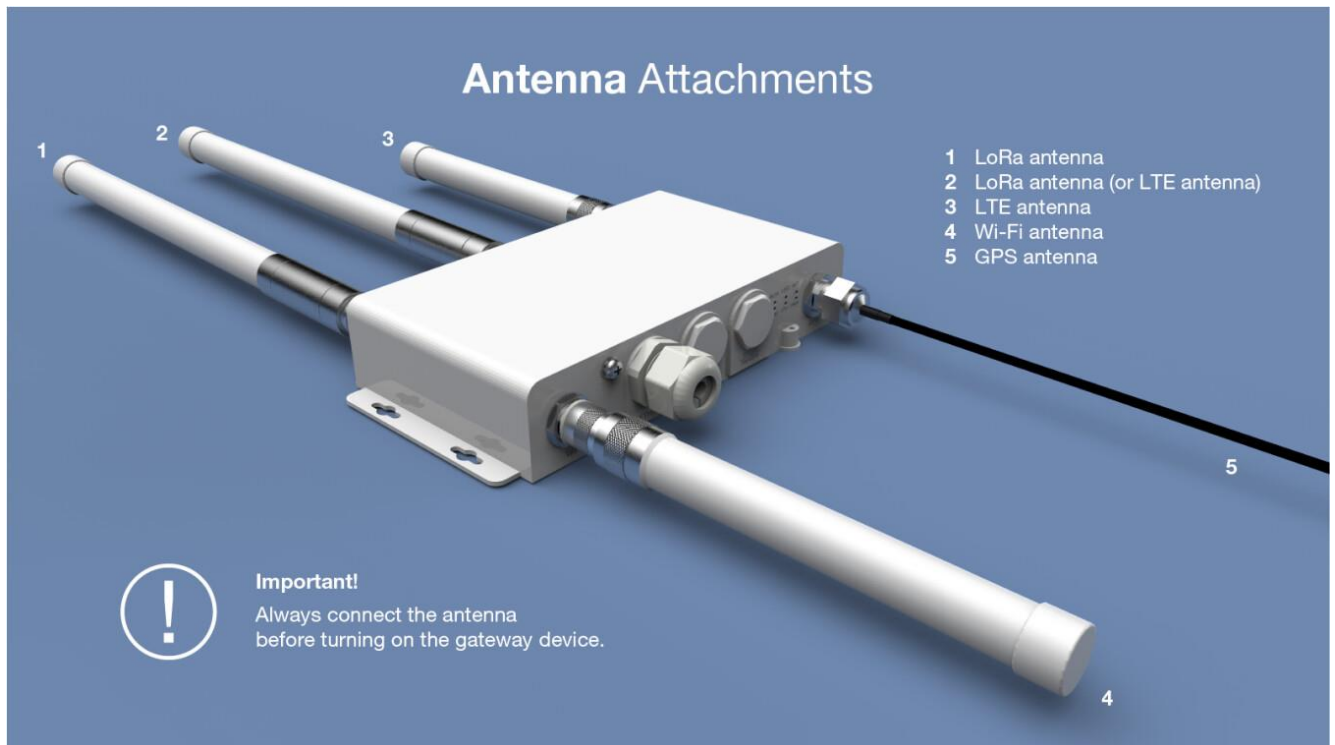


Figura 3-3 Gateway LoRa (RAK Wireless)

En primer lugar debe conectarse simultáneamente a la red eléctrica, a un puerto de Ethernet y al ordenador desde el que se va a proceder a la configuración.

A continuación, es necesario que el ordenador se conecte a la red WiFi del gateway, RAK7240_204E (los siete primeros caracteres se corresponden con la marca y el modelo y los restantes con la dirección MAC del dispositivo), desde el que podemos acceder a la interfaz de configuración del modelo.

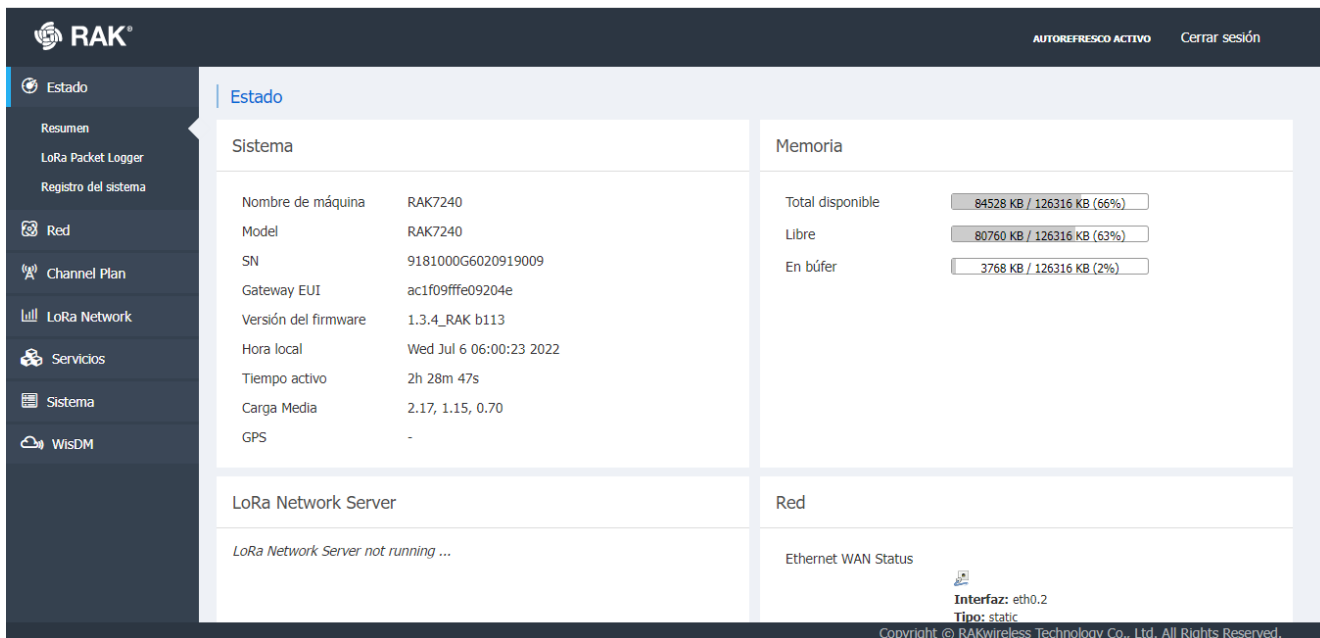


Figura 3-4 Interfaz de configuración modelo RAK7240

Una vez allí, entramos en **Red** → **Ethernet Port**, y fijamos el tipo de puerto Ethernet en WAN.

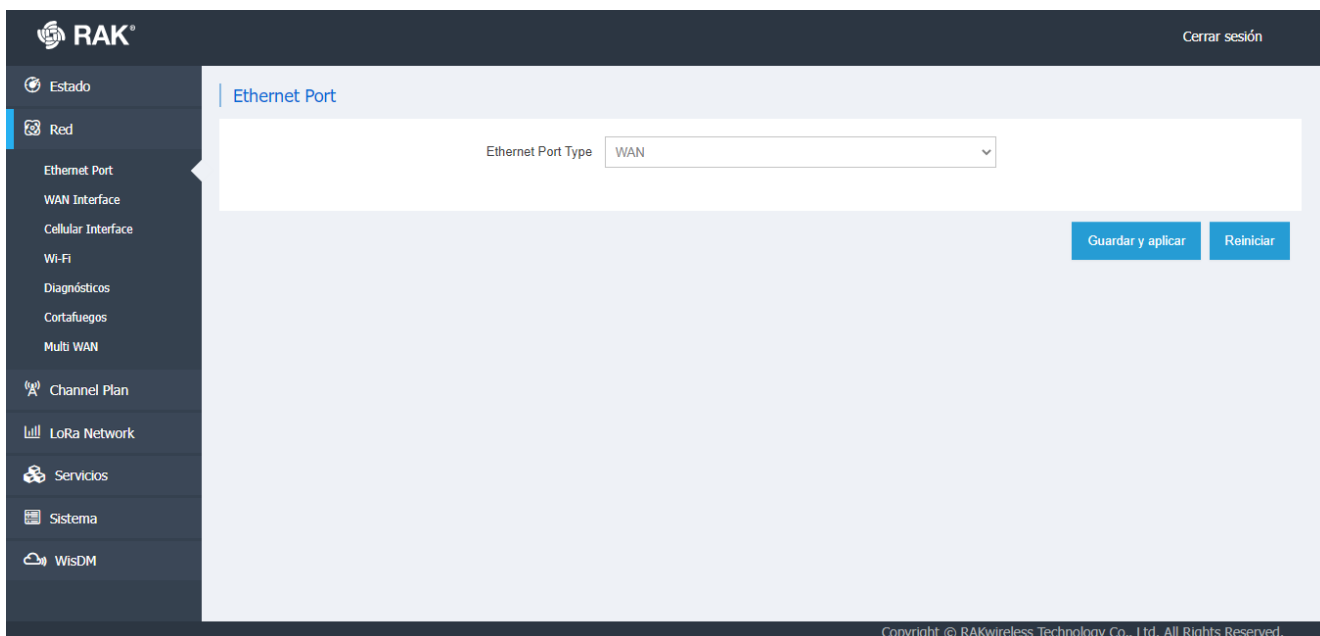


Figura 3-5 Ajustes de Red

Seguidamente, pinchamos en **LoRa Network** → **Network Settings**, y escribimos la dirección IP del servidor al cual queremos que se transmitan los datos obtenidos.

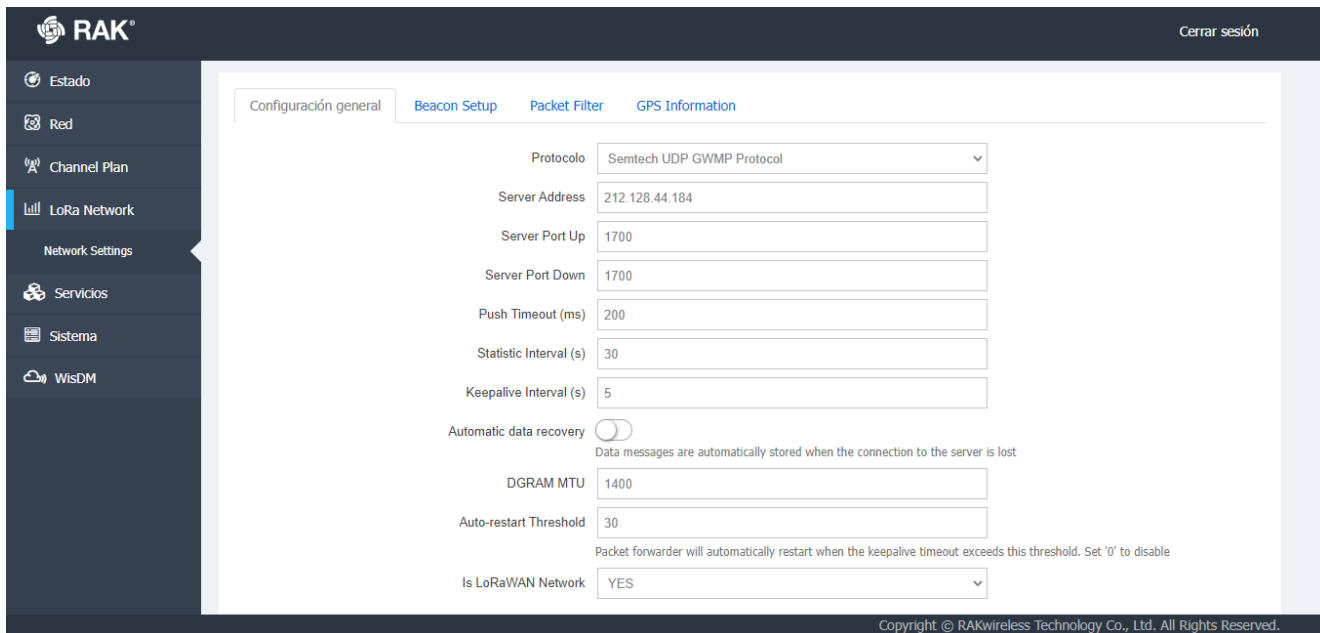


Figura 3-6 Configuración dirección IP

3.1.2 Configuración dispositivo de medición de partículas en suspensión

En primer lugar, es necesario conectar la placa base del interior del dispositivo al ordenador personal. Será necesario descargar un programa llamado “Virtual Studio Code” desde el que se realizará la configuración.

Abriendo el desplegable “Pymakr”, aparecerá el dispositivo en la esquina inferior izquierda de la pantalla. Haciendo click en el rayo que aparece al poner el cursor sobre el dispositivo, nos estaremos conectando a él.

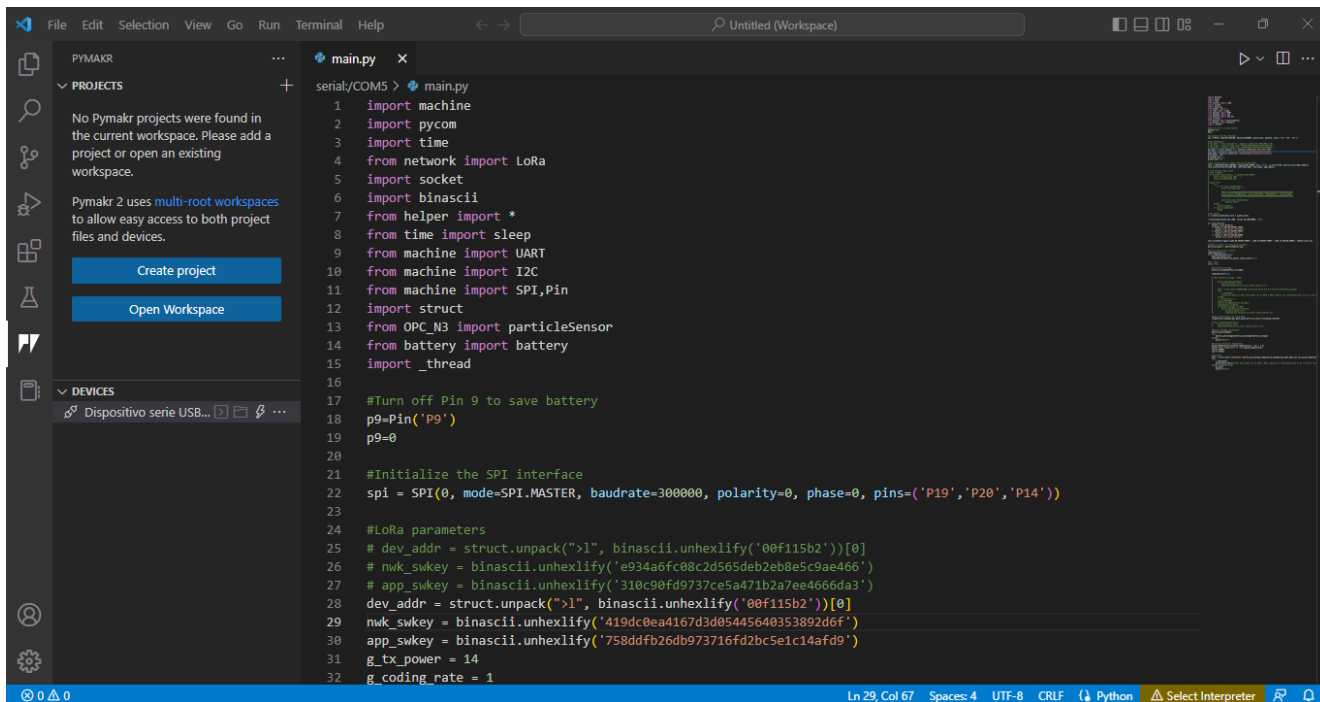


Figura 3-7 Desplegable de Pymakr en Visual Studio Code en el que se aprecia el código fuente del dispositivo.

Por último, en las líneas 29 y 30 del código, se borran los caracteres naranjas que se muestran por determinado y se introducen los que permitirán enlazar el dispositivo con la antena.

3.2 Ubicación geográfica y duración de mediciones

3.2.1 Lugares de medición

En este proyecto, se ha querido comprobar la calidad del aire relacionada con la cantidad de partículas en suspensión y ver si se cumple la legislación española y europea.

El lugar elegido para ello ha sido la Escuela Naval Militar de Marín, situada en la Ría de Pontevedra y a 8 km al este de dicha ciudad del noroeste de España.



Figura 3-8 Vista Escuela Naval Militar (Ayuntamiento de Marín)

Se ha tomado muestras en diversos lugares del propio centro, tanto en exteriores como en interiores.

En exteriores se han tomado muestras desde lugares capaces de abarcar importantes masas de aire, como puede ser el balcón del Cuartel Francisco Moreno que da a la explanada de la ENM. También se ha medido en ubicaciones cercanas a posibles focos de emisión, como en las cercanías de la dársena donde están atracadas las lanchas de instrucción y el patrullero P-28 Tabarca o la puerta de acceso de Carlos I, por donde circula un considerable tráfico de vehículos.

IMAGEN BORRADA POR CONFIDENCIALIDAD

Figura 3-9 Fotografía aérea ENM (TopoGPS)

En interiores se ha escogido espacios de convivencia como estudios y camareras, así como lugares con una densidad importante de personas, como pueden ser clases o la cantina de marinería.

3.2.2 Tiempo de monitorización

En total se han tomado mediciones en 19 ocasiones y en 10 lugares distintos. Los intervalos de tiempo en los que se han registrado datos han dependido de la autonomía de las baterías de Litio del sensor.

Hay lugares en los que se ha medido más veces, como es el caso del balcón del Francisco Moreno, para observar los distintos comportamientos del material particulado a las condiciones meteorológicas, que se han tenido en cuenta, obtenidas de la base del histórico de datos de la plataforma MeteoGalicia [21].

En otras ubicaciones, como puede ser el seminario del CUD o la puerta de Carlos I, no ha sido necesario realizar más de una observación, bien porque no era un sitio concurrido, como en el primer caso, o bien porque no se obtuvieron resultados significativamente a los ya realizados en exteriores, como en el segundo caso.

3.3 Inversión térmica

Durante las mediciones realizadas en zonas al aire libre, se ha venido observando un patrón característico que hacía que en las horas cercanas al ocaso los días de anticiclón, se disparara la concentración de partículas.

Generalmente, en la troposfera, la temperatura del aire desciende conforme se va ascendiendo en altura, sin embargo, con la inversión térmica el aire frío queda atrapado en la capa más baja de la troposfera, con una masa de aire a mayor temperatura encima y por lo tanto con diferente densidad, que actúa como tapón, impidiendo que se mezclen diferentes masas de aire.

Este fenómeno atmosférico suele darse en valles o lugares cercanos a la costa y en condiciones anticiclónicas y de gran estabilidad como las que ha habido durante estos tres meses (enero, febrero y marzo de 2023) en la Ría de Pontevedra.

Al anochecer, la temperatura terrestre cae de manera rápida, lo que se conoce como enfriamiento por irradiación, cediendo ese calor a la masa de aire que está en contacto con ella. Esto provoca que en las horas posteriores al ocaso, se levante material particulado. Además, la inversión térmica provoca que al no poder mezclarse las distintas masas de aire, las partículas en suspensión queden atrapadas en la capa más cercana a la superficie terrestre.

La inversión térmica se puede observar fácilmente al ver que el humo de una chimenea, en vez de subir verticalmente, se esparce horizontalmente [22].

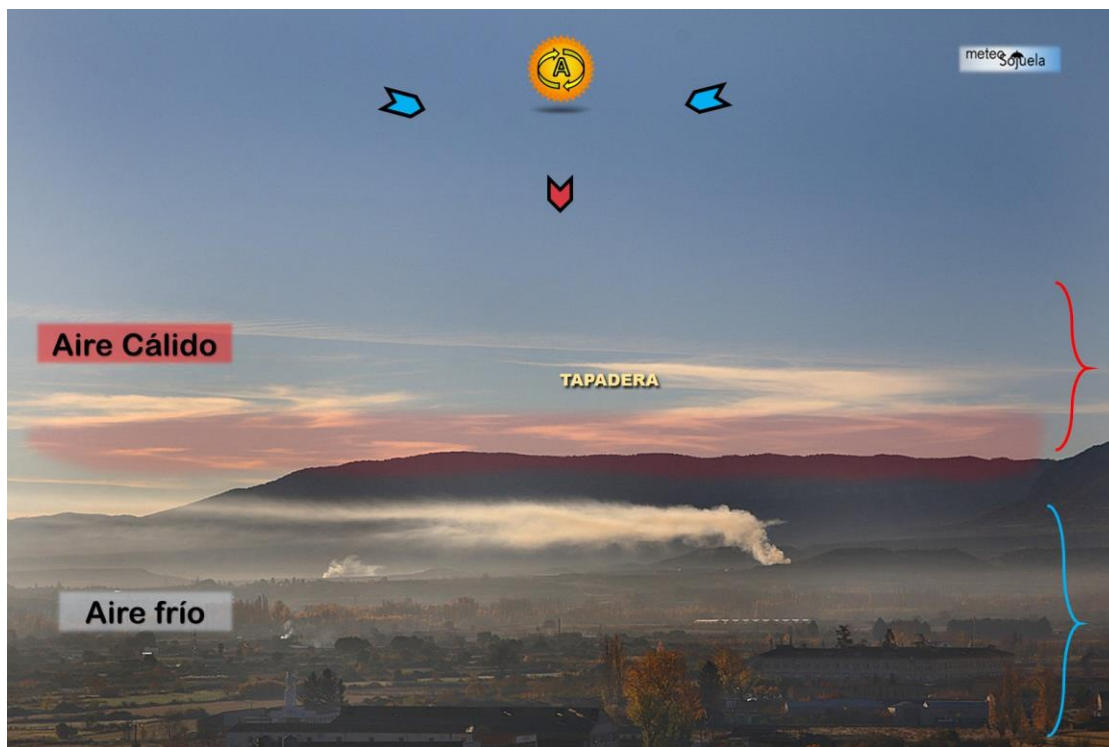


Figura 3-10 Esquema inversión térmica (meteo Sojuela)

Este hecho dura hasta que esa masa de aire se vuelve a calentar o bien hasta que se producen vientos capaces de mezclarlas.

En todas las mediciones realizadas en exteriores se ha dado este fenómeno, que causa que la cantidad de material particulado se eleve drásticamente desde el ocaso hasta aproximadamente las cuatro horas posteriores.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de la medición en exteriores

4.1.1 Balcón cuartel Francisco Moreno

4.1.1.1 25 de enero 2023

Este día se comenzó a tomar medidas a partir de las 17:00 h y se finalizó a las 03:20 h. El intervalo de medición viene condicionado en todas ellas por la duración de la batería del sensor. Según MeteoGalicia, no hubo precipitaciones durante ese periodo, la humedad relativa media fue del 68%, la temperatura media de 9,7 °C y nos encontrábamos en pleno anticiclón, con una presión media de 1028,4 hPa.

El dispositivo recibía la luz solar por la tarde, que sumada al propio calor generado por el funcionamiento interno del sensor y la batería, explica las altas temperaturas y la baja humedad relativa registradas en la imagen (Figura 4-1). Por lo tanto, estos valores son válidos para indicar tendencias en la variación de temperaturas y humedad, más que para determinar cuantitativamente su valor.

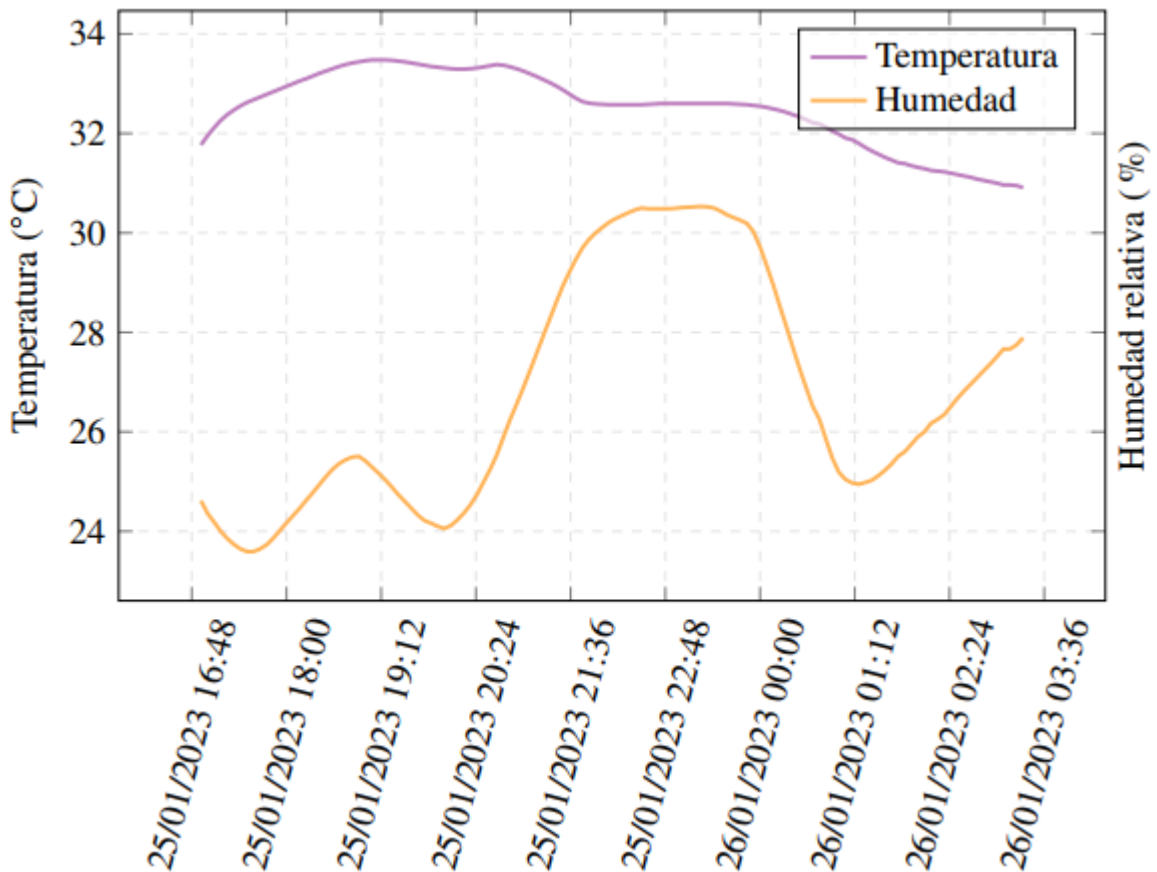


Figura 4-1 Temperatura y humedad (25 de enero) en el balcón del cuartel Francisco Moreno.

En la Figura 4-2 se representan las medidas para los tres tipos de materia en suspensión (PM10, PM2,5 y PM1). Se observa un pico muy diferenciado entre las 21:40 h y las 23:20 h, derivado del efecto de la inversión térmica (sección 3.3). Entre las 21:30 h y las 00:00 h, se da la máxima concentración de humedad relativa, coincidiendo en el tiempo con los mayores niveles registrados de material particulado (Figura 4-2). Los elevados niveles alcanzados en ese pico dificultan la visualización de las mediciones del resto de horas del día.

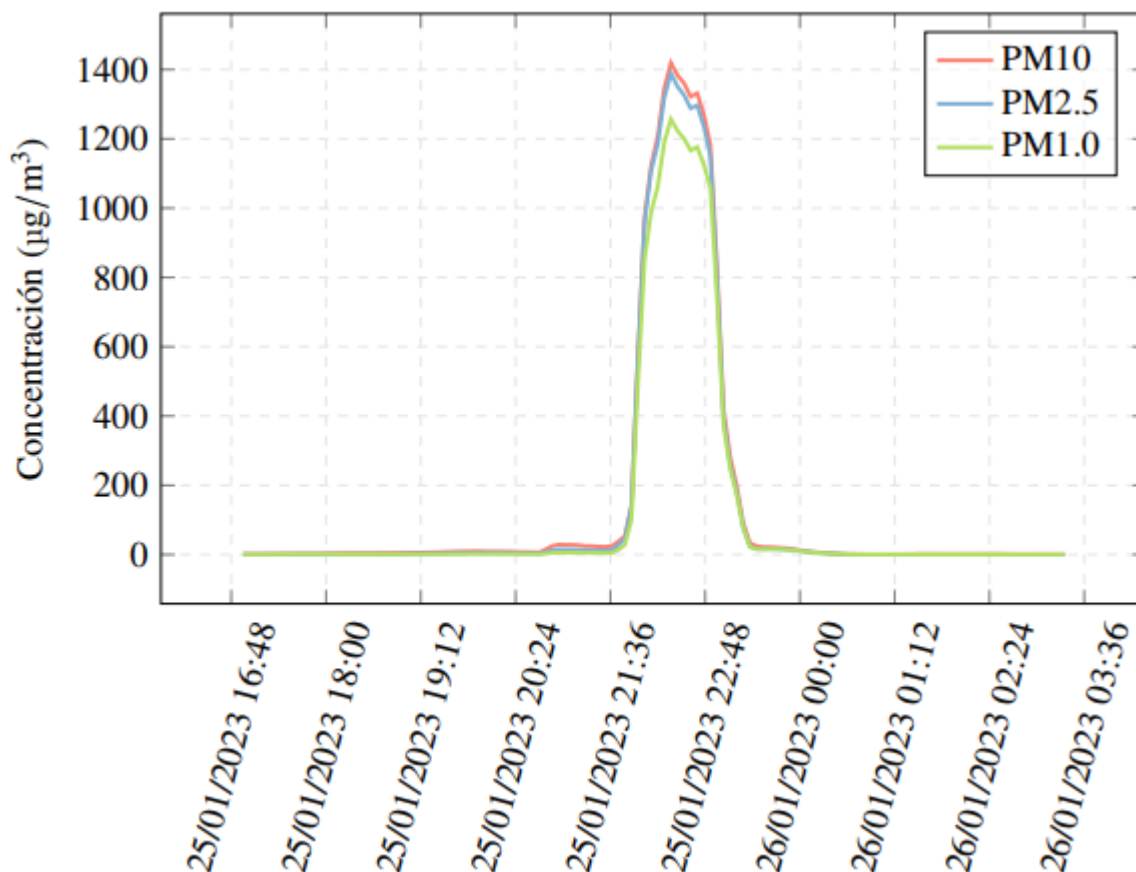


Figura 4-2 Niveles de partículas en suspensión (25 enero) en el balcón del cuartel Francisco Moreno.

Para una mejor interpretación de los datos, se emplea a continuación una escala logarítmica (Figura 4-3) que reduce la proporción de las mediciones más altas y aumenta la de las más bajas, posibilitando su comprensión.

En las tres primeras horas de la tarde, los niveles de concentración crecen de manera moderada, tanto para las PM10 como para las PM2,5 y PM1, y no se alcanzan cifras de más de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta alrededor de las 20:45 h, hora a partir de la cual empiezan a ascender los valores hasta alcanzar un pico máximo a las 22:22 h de $1.419 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el caso de las PM10, $1.389 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM2,5 y $1.257 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM1. Con esto se puede ver como la mayoría del material en suspensión durante la inversión térmica se corresponde con el de diámetro inferior a una micra.

A partir de las 23:30 h, las PM1 y las PM2,5 caen drásticamente, quedando una concentración total de PM10 cercana a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

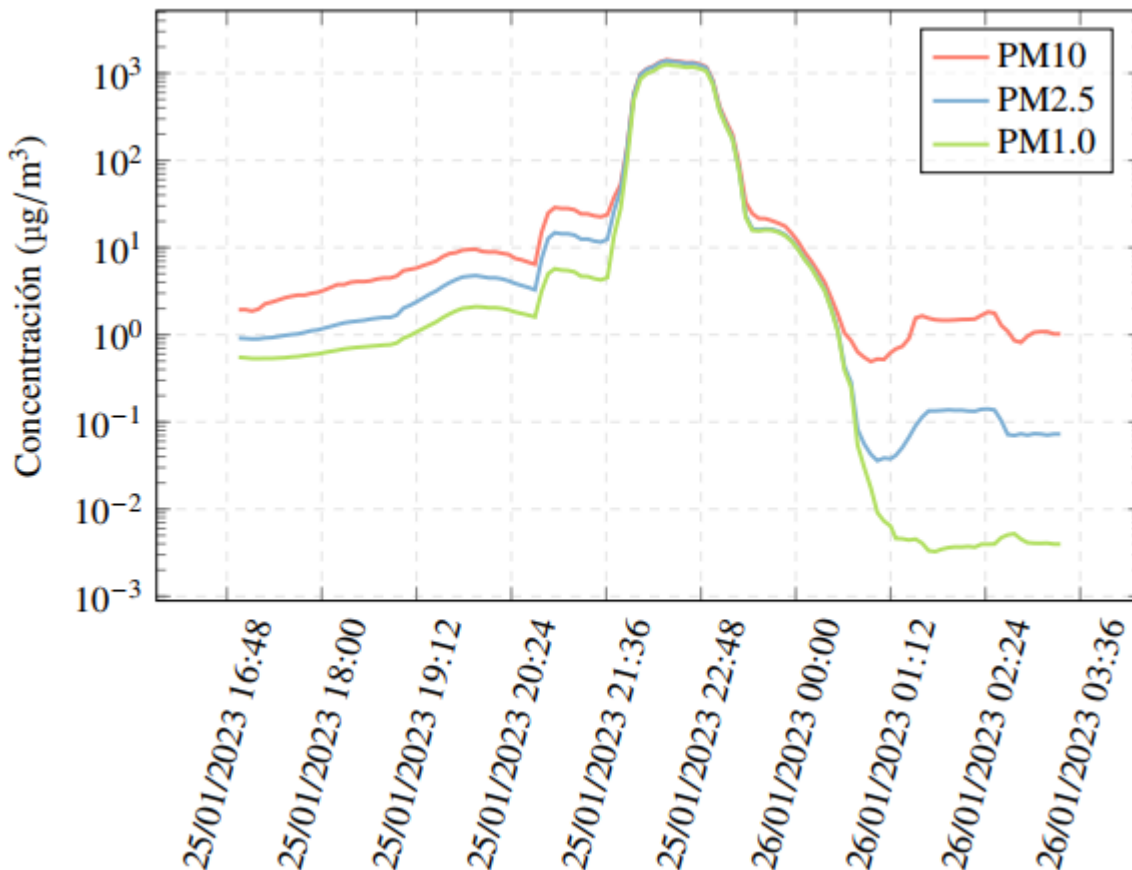


Figura 4-3 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (25 enero) en el balcón del cuartel Francisco Moreno.

En el punto A3.1 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 3 horas.

4.1.1.2 27 de enero 2023

Durante este día se comienzan a tomar medidas a las 07:45 h y finalizan a las 04:35 h. Según MeteoGalicia, no se produjeron precipitaciones ese día, la temperatura media de 9,6 °C, la presión de 1023,9 hPa y la humedad relativa del 84%, 16 puntos porcentuales superior a la registrada el día 25.

Al igual que en el día anterior, el sensor se encontraba en una zona en la que recibía luz solar, razón que explica las altas temperaturas alcanzadas durante la mañana. Sin embargo, y pese a no coincidir con la humedad relativa proporcionada por MeteoGalicia, sí que se observa una mayor humedad (Figura 4-4) durante la noche que en el día 25 de enero y que además es de unos 15 puntos superior, como ocurre con los datos proporcionados por la agencia meteorológica.

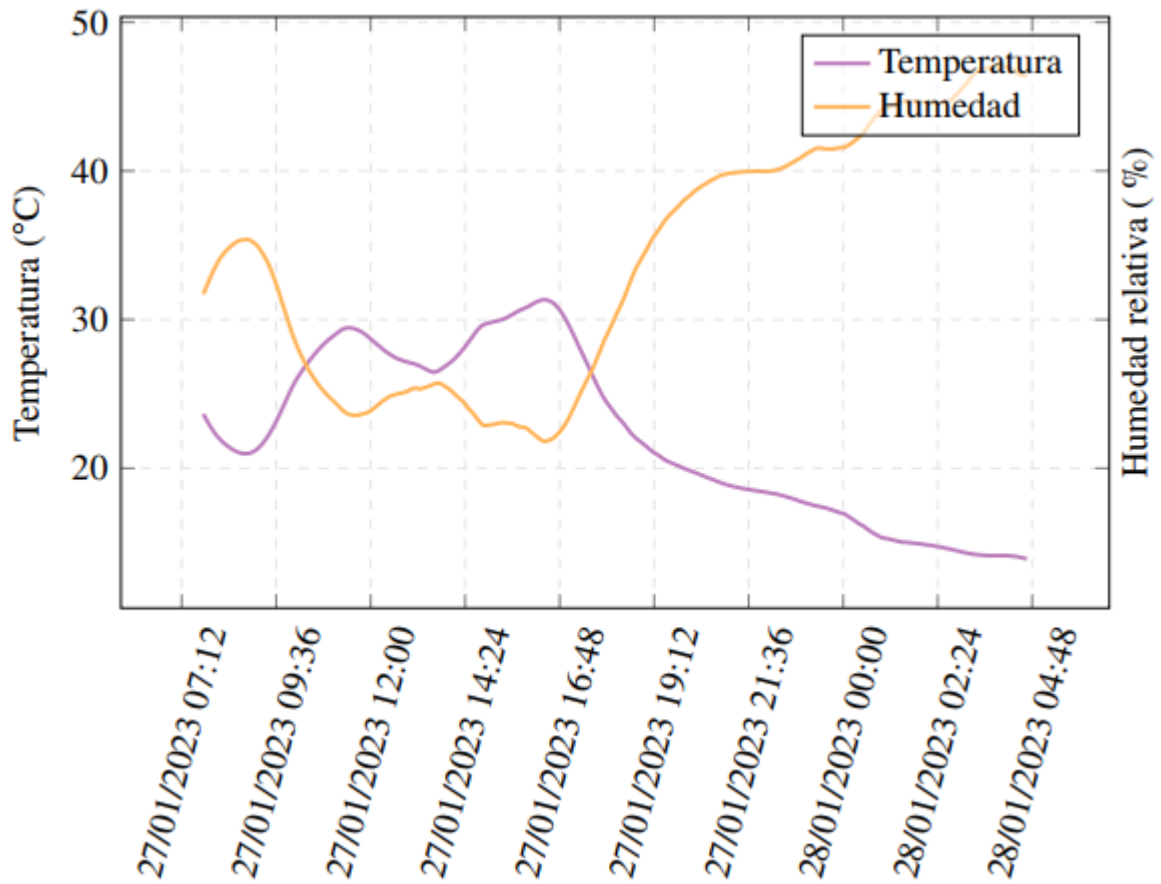


Figura 4-4 Temperatura y humedad (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.

En el siguiente gráfico (Figura 4-5) se intuyen dos picos de PM10, en torno a las 08:00 h y a las 16:45 h, y que al igual que en el día anterior, vuelve a producirse una inversión térmica, siendo compuesta en su mayoría por PM1.

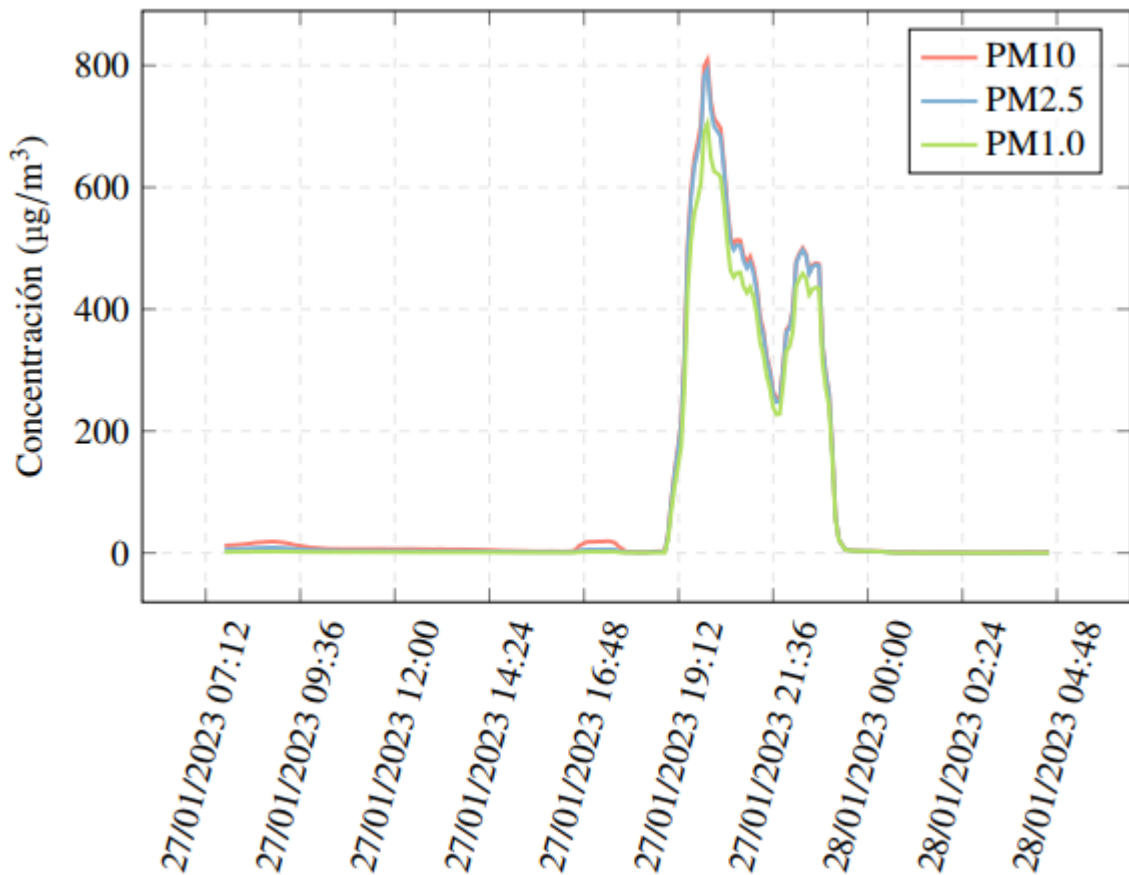


Figura 4-5 Niveles de partículas en suspensión (27 enero) en el balcón del Francisco Moreno.

Gracias a la escala logarítmica (Figura 4-6), se puede comprobar que el día comienza con un nivel de partículas elevado, de entorno los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM10 y de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM2,5, mientras que las PM1 se encuentran en $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A lo largo de la mañana, se reducen paulatinamente hasta que a las 16:45 h se elevan todas las concentraciones a una cantidad similar a la de la mañana, que además coincide con un aumento en la humedad relativa del ambiente.

Sin embargo, vuelven a reducirse hasta niveles cercanos a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM10 hasta las 19:00 h, momento en el que comienza a registrarse la inversión térmica, finalizando alrededor de las 23:10 h, siendo las PM1 las más numerosas. En el transcurso de ésta, se observa como al contrario que en el día anterior, tiene lugar en dos tiempos.

Una vez ha terminado, se puede comprobar que las PM1 y las PM2,5 se reducen hasta niveles muy cercanos a $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y las PM10 quedan en torno a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

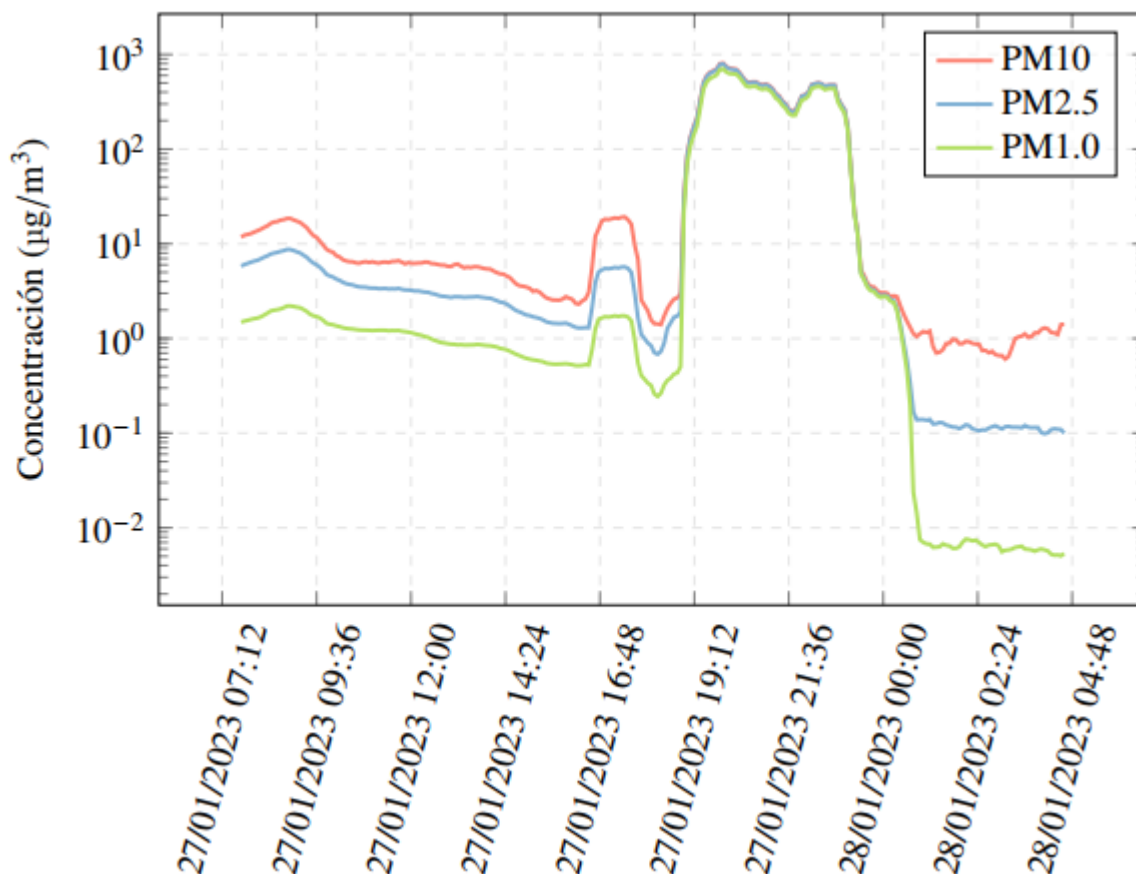


Figura 4-6 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.

Como fenómeno nuevo, se observa que aunque la humedad presente en el aire es alta y sigue una tendencia creciente, las concentraciones de material particulado se reducen hasta niveles muy bajos durante la madrugada, por lo que un aumento en la humedad relativa no tendría efecto sobre el aumento en las concentraciones de partículas en el aire, al contrario de lo que se parecía observar en el día 25 de enero.

En el punto A3.2 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 5 horas.

4.1.1.3 2 de febrero 2023

El sensor comienza a tomar medidas a las 07:35 h y termina a las 03:20 h. No se producen precipitaciones, la humedad relativa media es del 87%, la temperatura de 9,2 °C y la presión de 1028 hPa, condiciones muy parecidas al día anterior. Por lo tanto, el gráfico registrado de temperatura y humedad (Figura 4-7) sigue un patrón similar al del día 27 de enero.

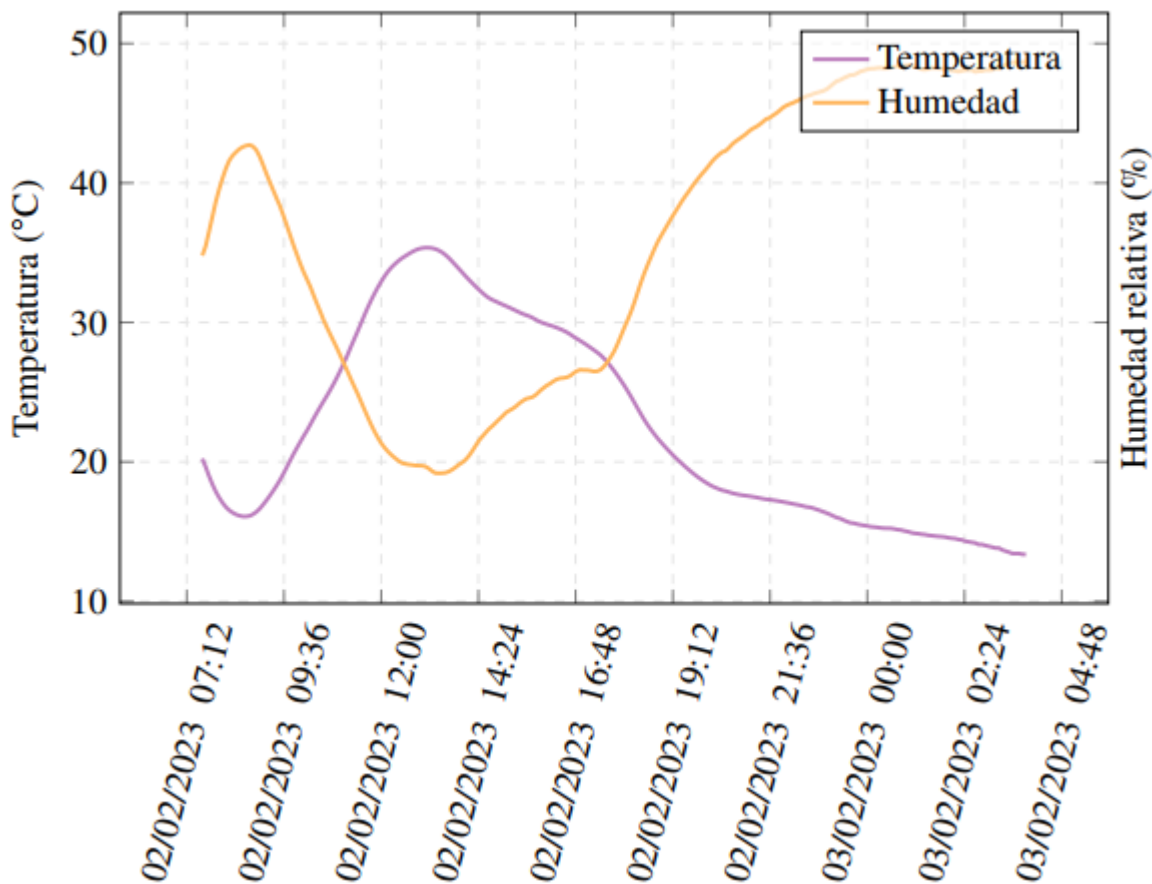


Figura 4-7 Temperatura y humedad (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

Igualmente, se ve (Figura 4-8) un primer pico por la mañana que va disminuyendo, un segundo durante la tarde, pero mucho más pronunciado, compuesto en su mayoría por PM10 y PM2,5, que alcanzan niveles de $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Como novedad, las concentraciones medidas durante la inversión térmica, que tiene lugar antes, desde las 16:45 h hasta las 19:30 h, son mucho menores a las registradas durante los dos días previos. Además, la concentración de PM1 es bastante menor a lo habitual.

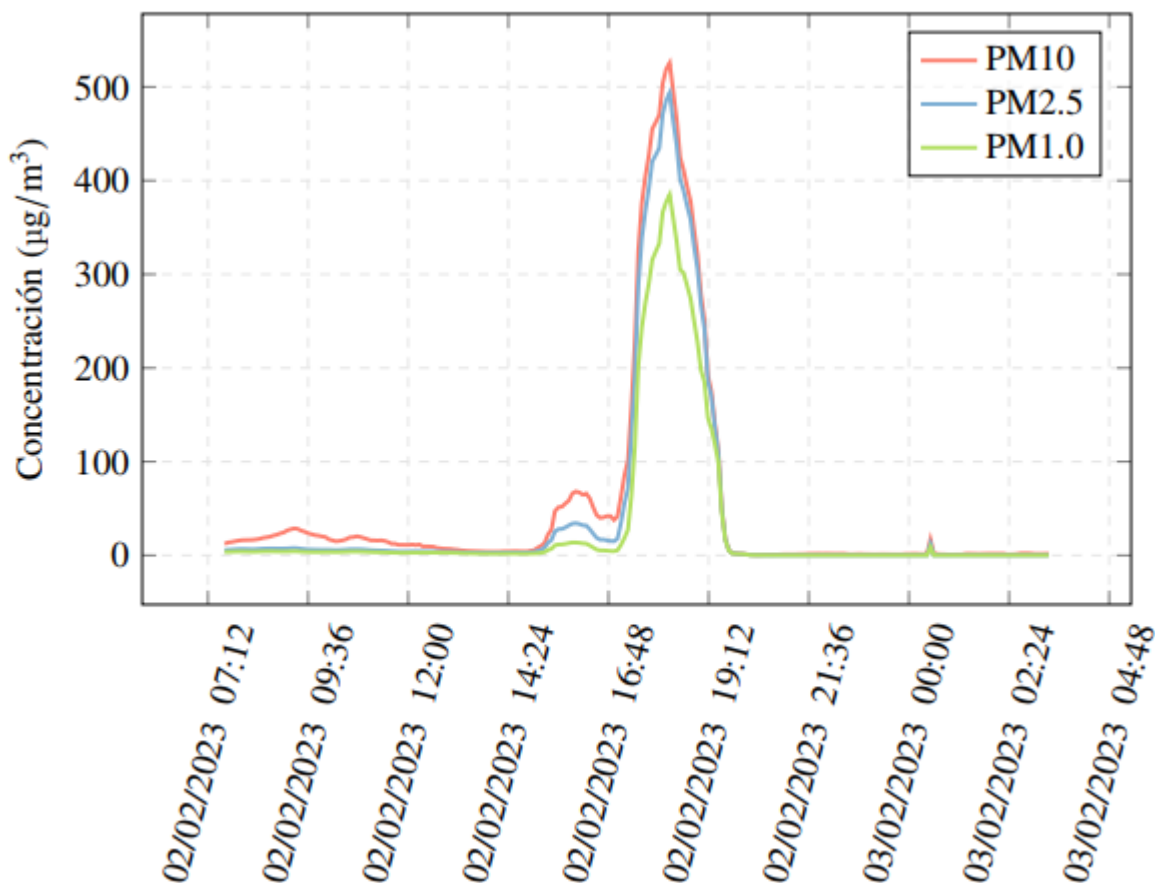


Figura 4-8 Niveles de partículas en suspensión (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En el gráfico logarítmico (Figura 4-9), se aprecia como al igual que en el día anterior, las concentraciones son mayores alrededor de las 08:30 h, llegándose a registrar un nivel de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM10, $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el caso de las PM2,5 y $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM1. Estas dos últimas se reducen ligeramente hasta las 14:30 h, mientras que las PM10 caen con una pendiente más pronunciada.

Antes de la inversión térmica (de 14:30 h a 16:40 h), vuelven a subir las concentraciones, que coincide con el comienzo del ascenso de la humedad relativa desde su mínimo.

Como se ha comentado previamente, en este caso la inversión térmica ocurre antes y levanta una menor cantidad de material particulado.

Finalizada ésta, se observa como vuelven a caer las medidas obtenidas hasta las 00:31 h en el que se da una medición aislada de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10, $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2,5 y $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM1. Puesto que en MeteoGalicia los valores de viento, humedad y presión son casi iguales durante la media hora anterior y posterior a ese instante (3,5 km/h, 82% y 988 hPa), es posible que el dato registrado no sea correcto y que se deba a un error en la transmisión desde el sensor hasta la antena y de ésta al servidor Grafana.

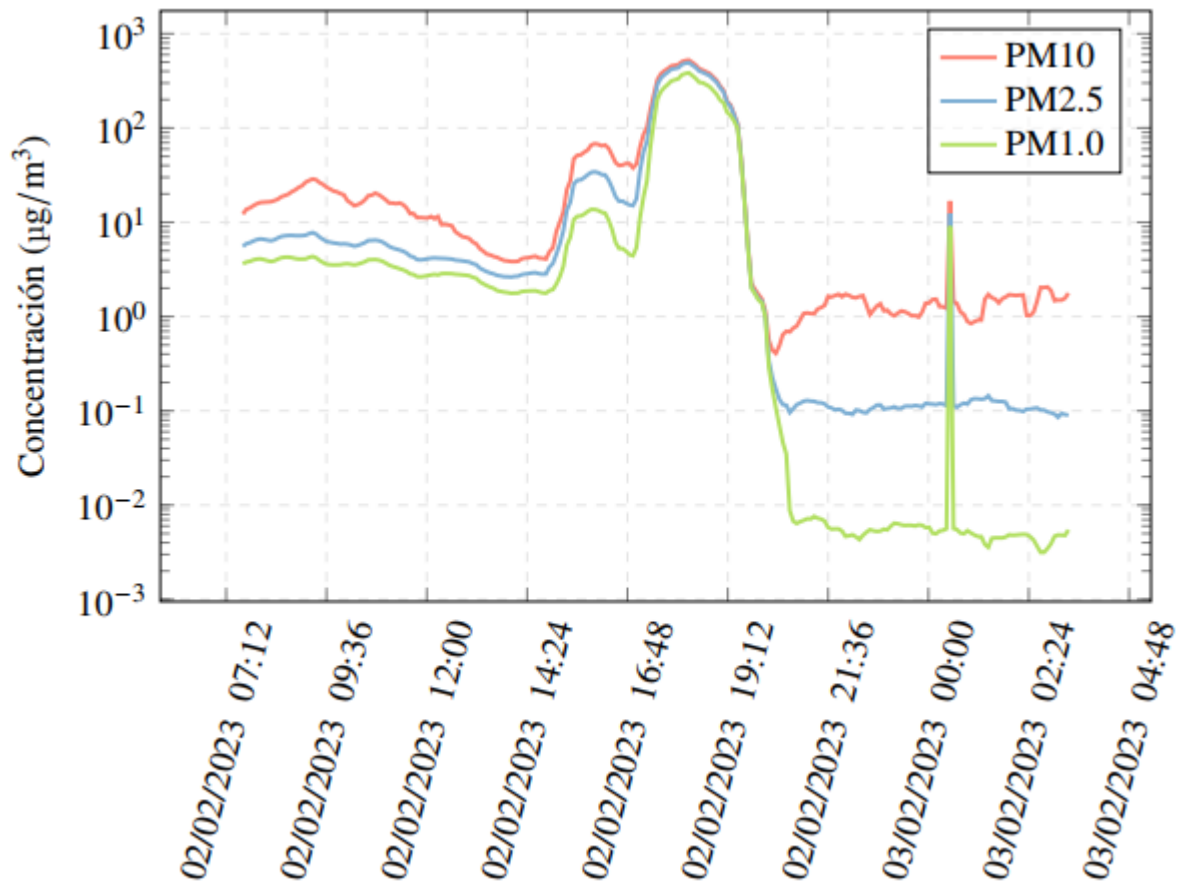


Figura 4-9 Nivel de partículas en suspensión, escala logarítmica (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En el punto A3.3 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 4 horas.

4.1.1.4 3 de febrero 2023

En este caso, debido a la necesidad de cargar la batería del dispositivo por la mañana, las medidas comienzan a las 19:30 h y finalizan a las 19:00 h del día siguiente. No hay precipitaciones en ambos días, y los parámetros medios para los dos son de 81,5% de humedad relativa, 1031,3 hPa y 9,8 °C.

El gráfico de humedad (Figura 4-10) parece muy diferente a los vistos anteriormente, sin embargo, como las medidas se empiezan a tomar a las 19:30 h, sí se puede decir que coincide con el resto, ya que alrededor de esa hora es el momento en el que la humedad relativa crece desde su punto mínimo hasta volver a disminuir conforme suben las temperaturas de la mañana siguiente.

Cabe destacar que a las 09:55 h se dejan de recibir datos de temperatura y humedad pero se continúan recibiendo los relativos al material particulado hasta 10 horas después.

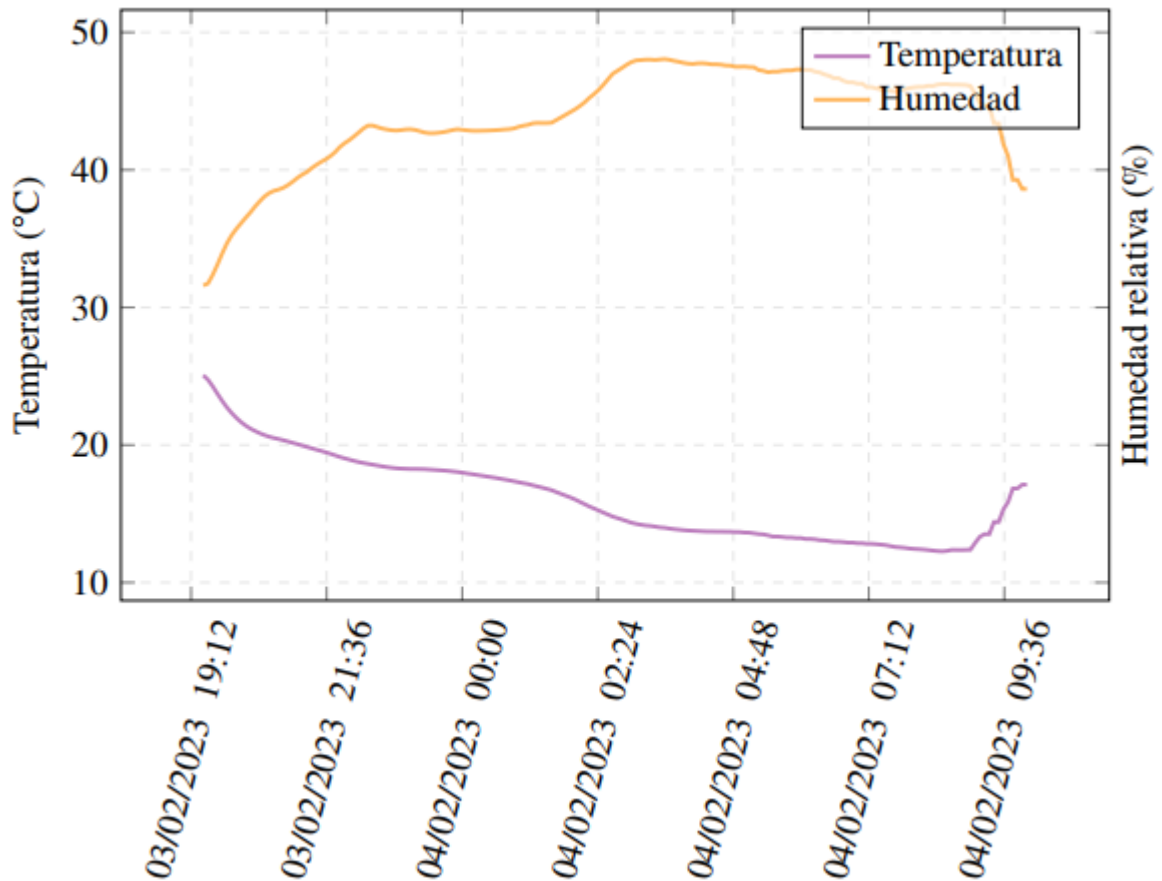


Figura 4-10 Temperatura y humedad (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En cuanto a las concentraciones de material particulado en suspensión (Figura 4-11), sí se observa la tendencia bajista durante la tarde, pero no se da ningún pico antes del inicio de la inversión térmica, tal y como ocurría en las anteriores. Además, ésta tiene lugar mucho más tarde de lo registrado en otras ocasiones, de 02:40 h a 03:50 h y las concentraciones máximas apenas pasan de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y PM2,5, y los 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM1.

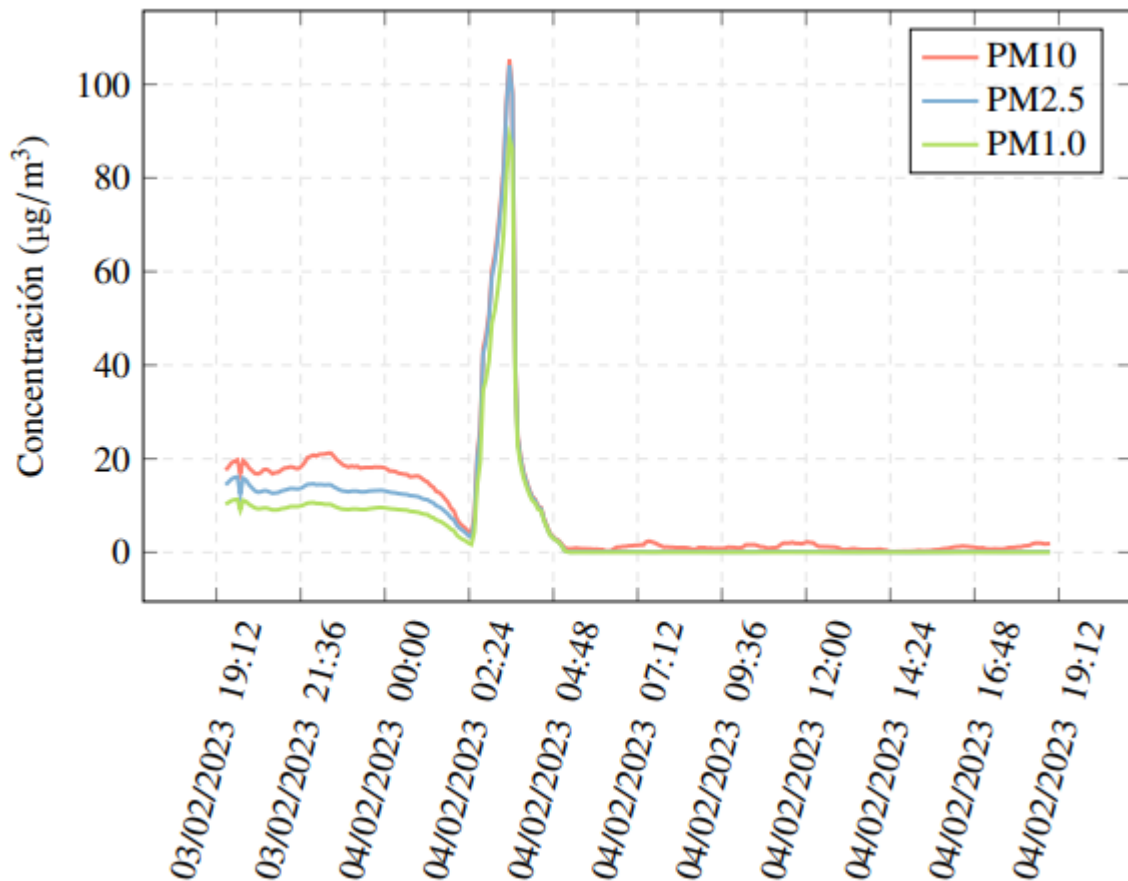


Figura 4-11 Niveles de partículas en suspensión (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En la escala logarítmica (Figura 4-12), se puede observar de una mejor manera como la gran parte del material en suspensión cuando se da la inversión se corresponde con PM1 y como después de ésta se reduce a niveles ínfimos, como ha ocurrido en las anteriores ocasiones. Sin embargo, a lo largo de la mañana y la tarde del día 4, se obtienen valores muy bajos de todas las concentraciones, siendo lo máximo de 2 µg/m³ para las PM10 durante el medio día.

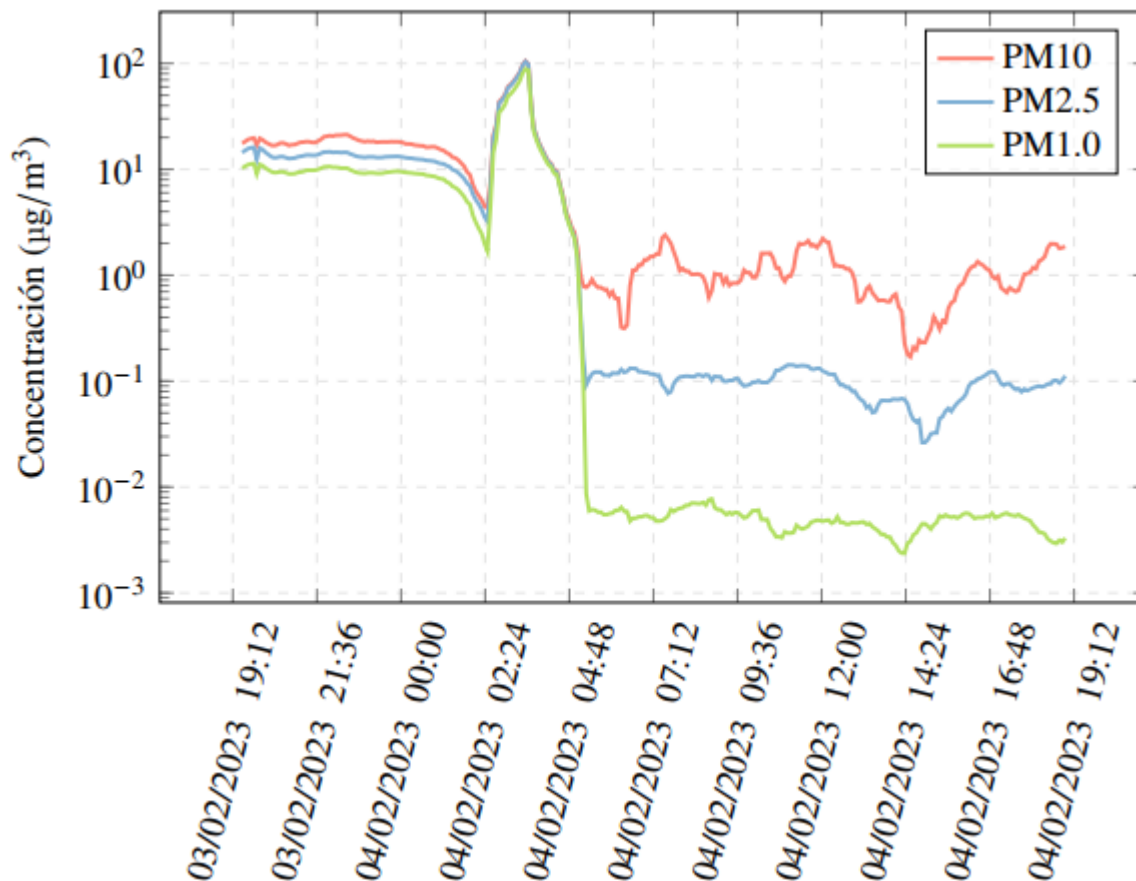


Figura 4-12 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En el punto A3.4 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante una hora.

4.1.1.5 7 de febrero 2023

Los datos se toman desde las 08:25 h hasta la 01:05 h. No hay precipitaciones, la humedad es del 53%, la presión de 1019,5 hPa y la temperatura media de 9,9 °C.

En el gráfico (Figura 4-13) se puede comprobar como los niveles de humedad relativa son muy bajos durante la mañana, de acuerdo con lo apuntado por la agencia meteorológica gallega. Además, se registran temperaturas altas dada la ubicación y el funcionamiento interno del sensor.

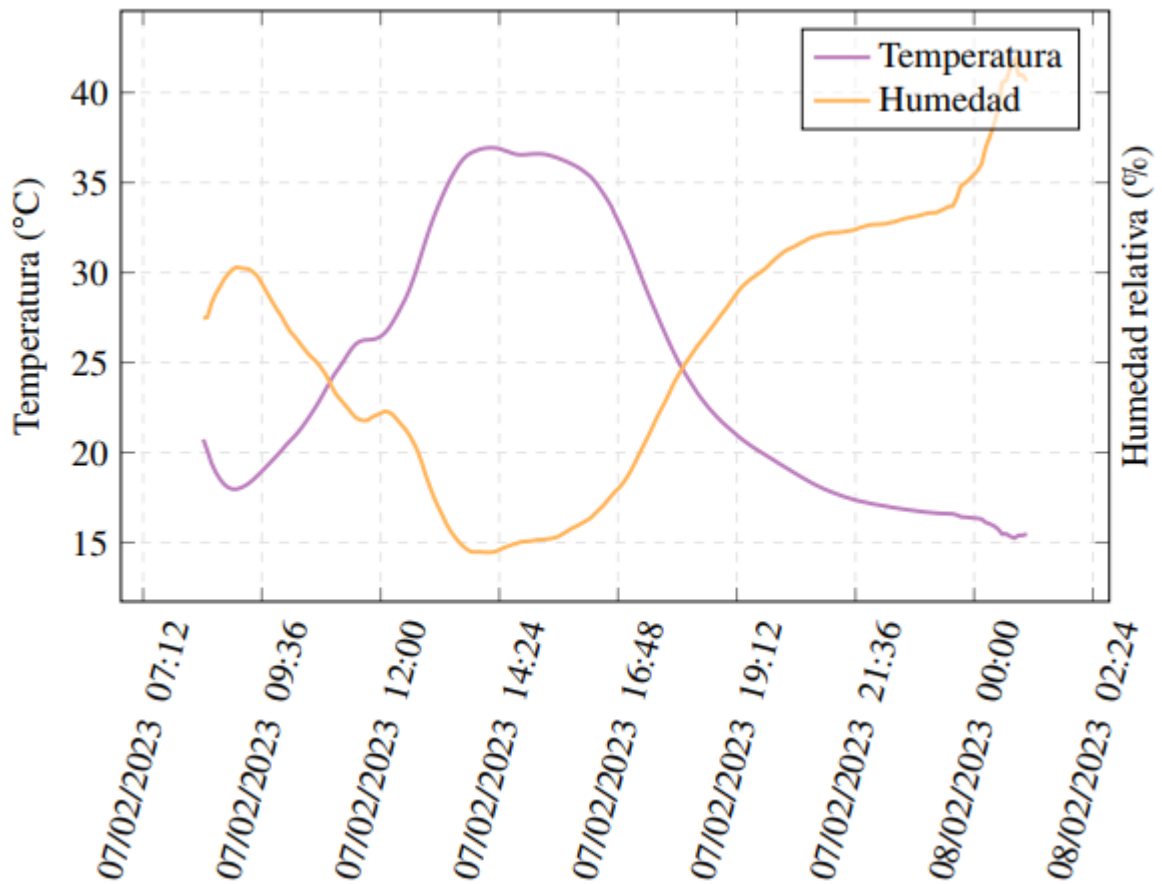


Figura 4-13 Temperatura y humedad (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En la siguiente tabla (Figura 4-14) se ve como durante toda la mañana se mantienen niveles muy bajos de material particulado en suspensión y que se da un pico considerable antes de la inversión térmica, tal y como ocurría en los días 27 de enero (4.1.1.227 de enero 2023) y 2 de febrero (4.1.1.3). Los valores que se registran durante ese pico son de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM₁₀, $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2,5} y $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁.

La inversión tiene lugar desde las 18:55 h hasta 21:30 h y se registran valores de máximos de $575 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀, $534 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2,5} y $457 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁, volviendo a suponer la mayoría de partículas medidas.

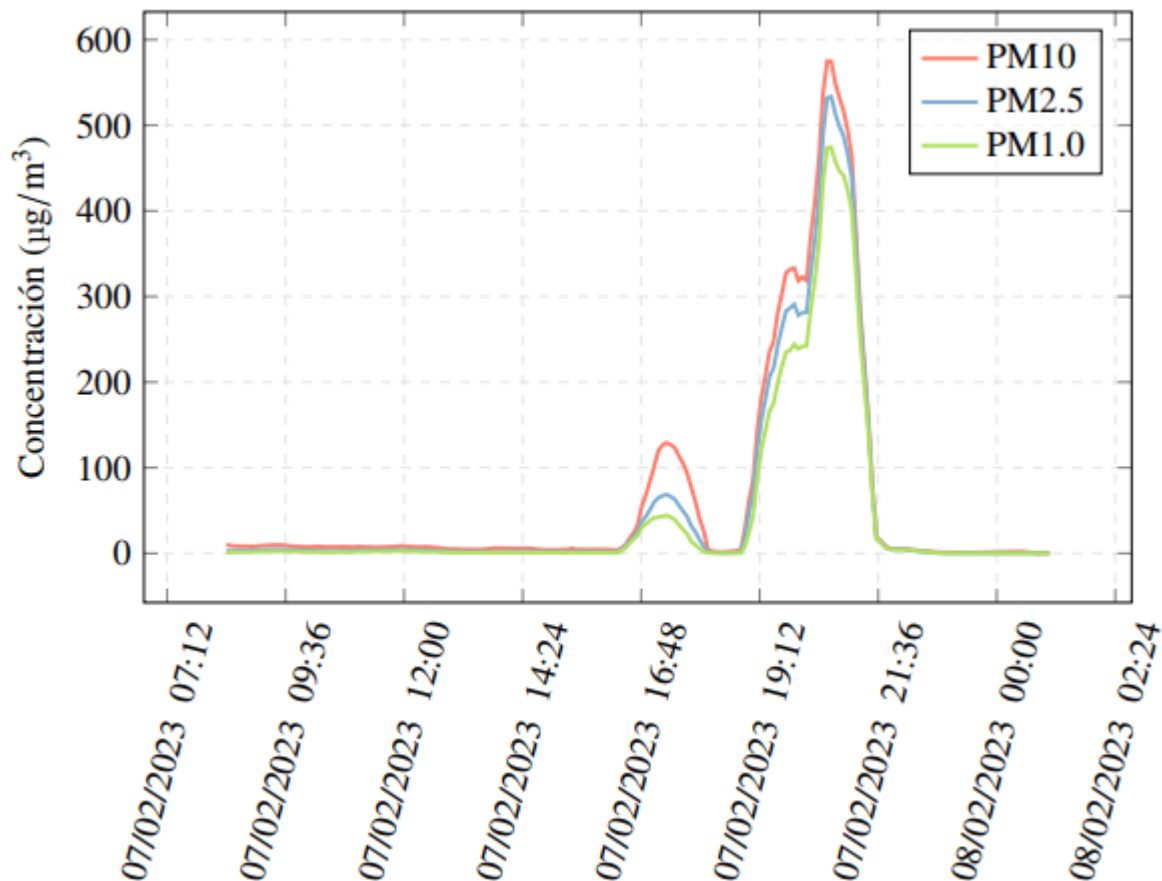


Figura 4-14 Nivel de partículas en suspensión (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

Más en detalle (Figura 4-15), se comprueba que durante la mañana los máximos valores registrados son de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y que aunque menor que en otros días, como el 2 de febrero (4.1.1.3), la curva sigue un ligero camino descendiente, hasta que vuelve a dispararse, justo en el momento en el que la humedad relativa comienza a ascender desde su mínimo de alrededor de las 14:00 h.

Una vez terminada la inversión, los valores de las tres clasificaciones caen hasta niveles muy cercanos a 0, excepto para las PM10, que experimentan un pequeño ascenso hasta llegar a los $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ desde las 00:00 h hasta 40 minutos después, momento en el que se vuelven a reducir, coincidiendo con una ligera bajada en la humedad relativa.

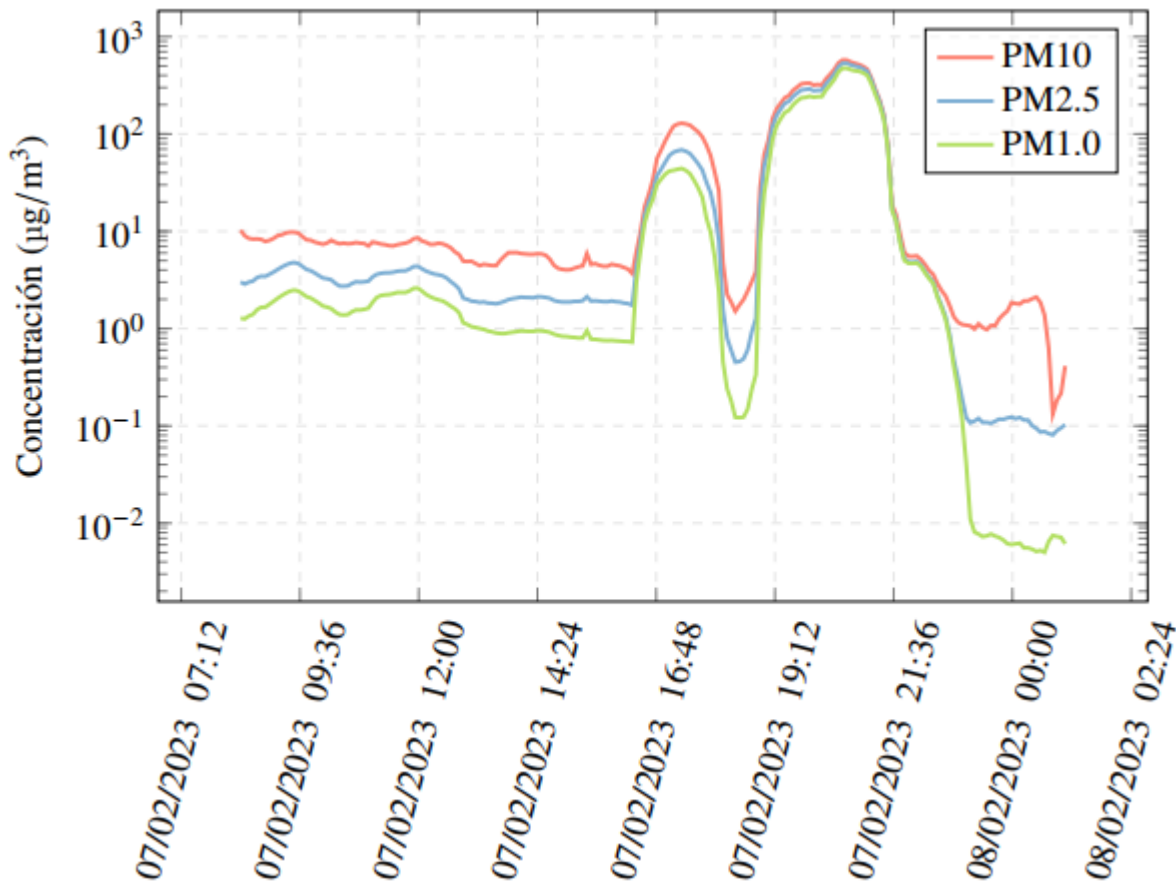


Figura 4-15 Nivel de partículas en suspensión, escala logarítmica (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

En el punto A3.5 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 5 horas.

4.1.2 Balcón edificio Isaac Peral

4.1.2.1 21 de febrero 2023

Se empieza a medir a las 08:35 h y finaliza a las 04:40 h. Llovió 0,7 l/m², la humedad relativa media fue del 99%, la presión era de 1017,7 hPa, por lo que pese a las precipitaciones la situación era de anticiclón, que favorece la aparición de la inversión térmica, y la temperatura fue de 13,7 °C.

En este caso, el lugar en el que se encontraba el dispositivo de medición no recibía la misma radiación solar que en el Cuartel Francisco Moreno, por lo que las temperaturas registradas son bastante más bajas de lo habitual. También se observa (Figura 4-16) una mayor humedad relativa, debido a las precipitaciones ocurridas durante ese día, que se dan entre las 02:00 h y las 04:00 h.

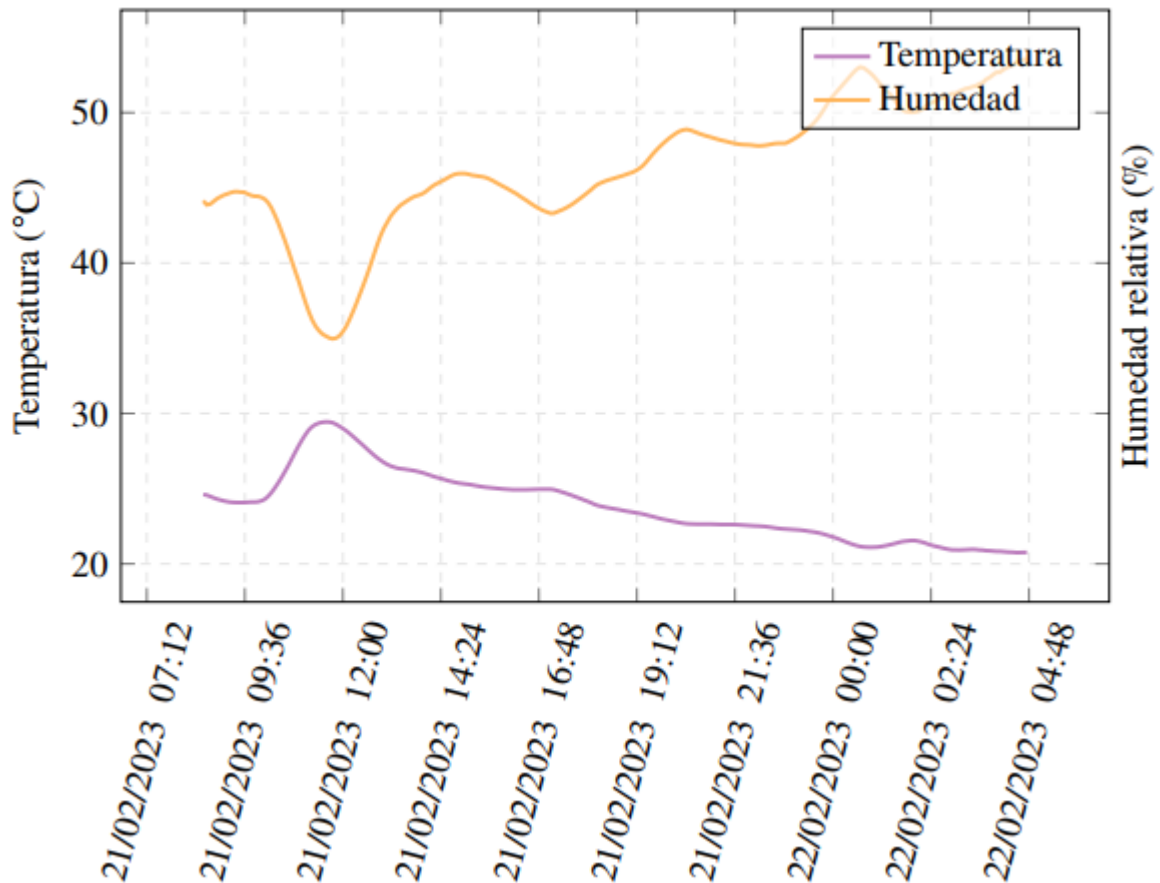


Figura 4-16 Temperatura y humedad (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

Se observa como durante la mañana y aunque su pendiente es negativa, las concentraciones de partículas son más altas de lo habitual (Figura 4-17), llegando a medirse $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Una posible explicación a este hecho es la cercanía a un foco emisor como es el patrullero P-28 Tabarca.

La inversión ocurre de 18:10 h a 20:50 h, se registran niveles de $747 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $629 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $482 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1, cuya presencia es menor a lo habitual.

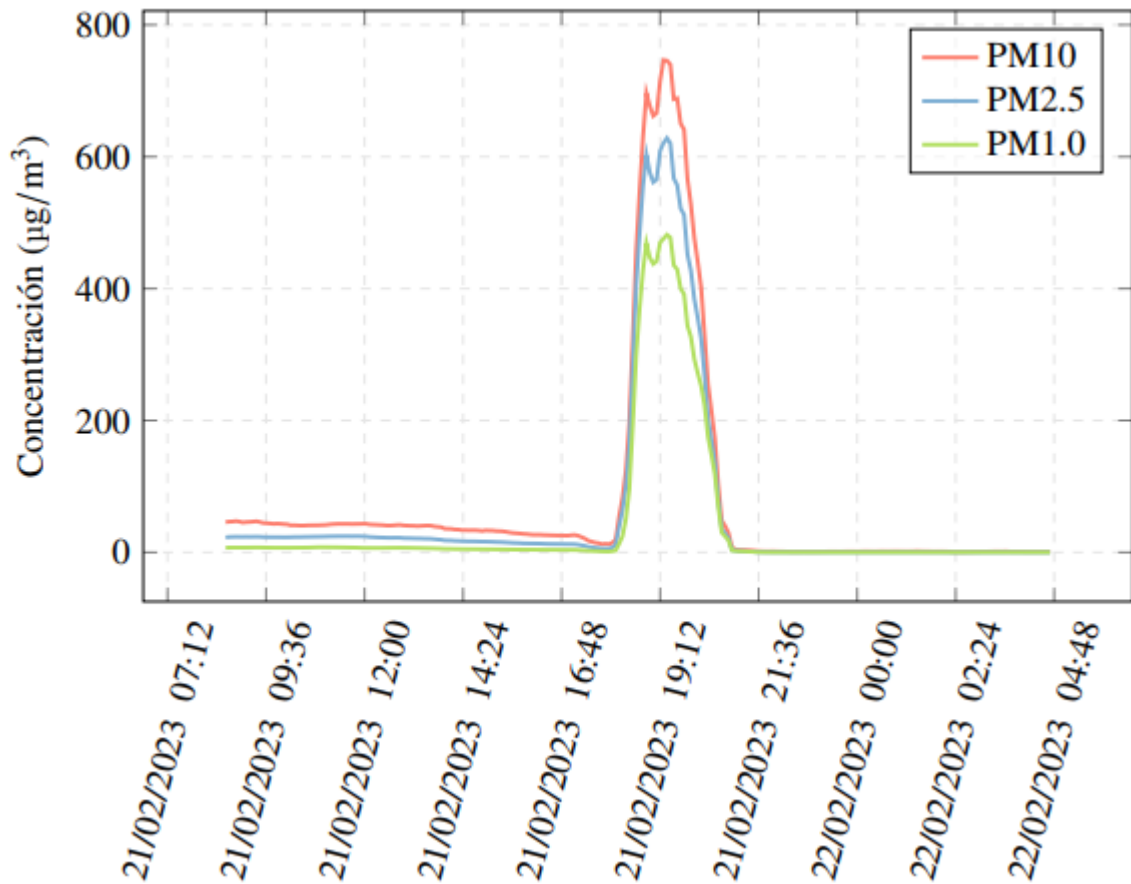


Figura 4-17 Niveles de partículas en suspensión (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

Con el gráfico logarítmico (Figura 4-18) se comprueba como los niveles de concentración son anormalmente altos durante la mañana, hasta que a las 17:57 h marcan un mínimo de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, para luego volver a escalar durante el periodo que dura la inversión.

Posteriormente, se observa el mismo comportamiento registrado durante los días anteriores en el Cuartel Francisco Moreno, en el que de madrugada todos los niveles de material en suspensión caen hasta valores muy bajos.

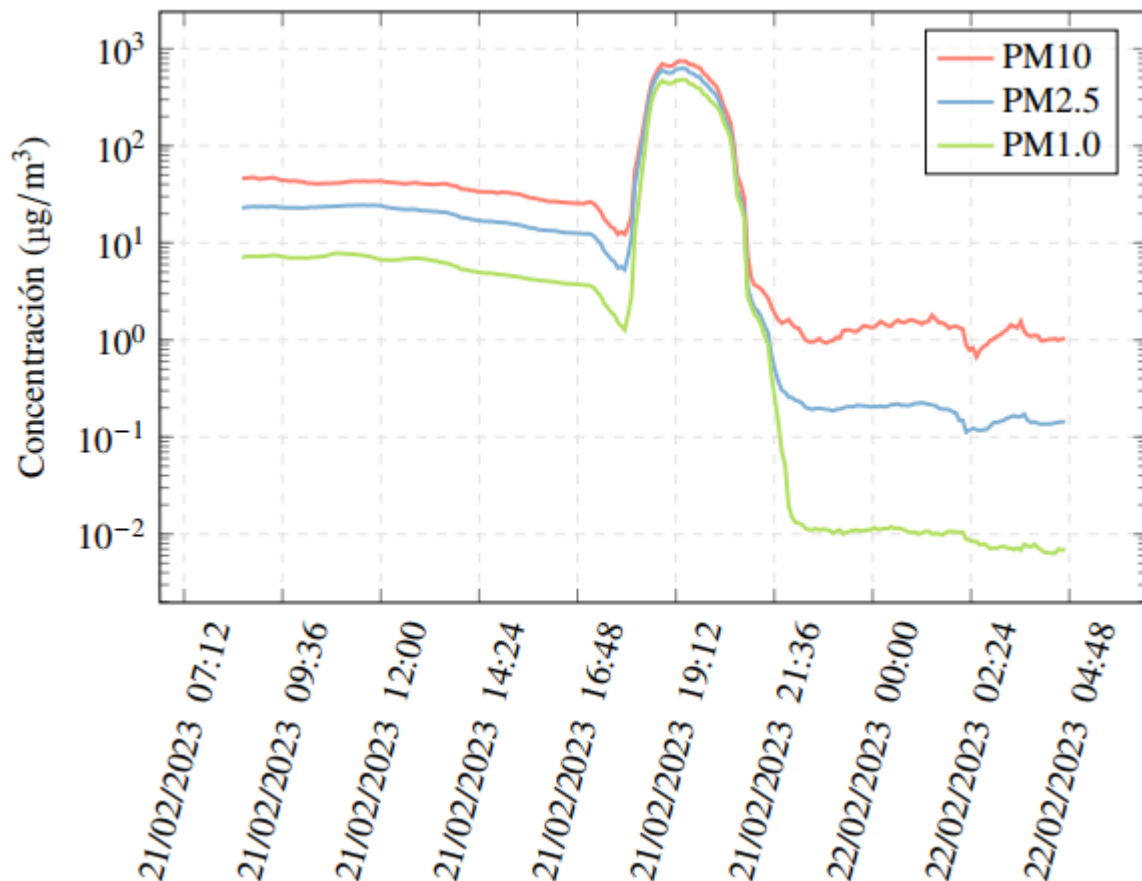


Figura 4-18 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

En el punto A3.7 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 3 horas.

4.1.2.2 23 de febrero 2023

Las mediciones comienzan a las 07:40 h y por algún problema bien de cobertura o bien de batería, termina de transmitir datos a las 10:50 h. Durante ese intervalo no hay precipitaciones, la presión es de 1017 hPa, la temperatura media es de 6,5 °C y la humedad es del 94,5%.

Al igual que en el anterior ejemplo, el equipo no recibe tanta luz solar por lo que la temperatura es baja, y la humedad es menor que la del día 21 de febrero, ya que no llueve durante el intervalo de medición (Figura 4-19).

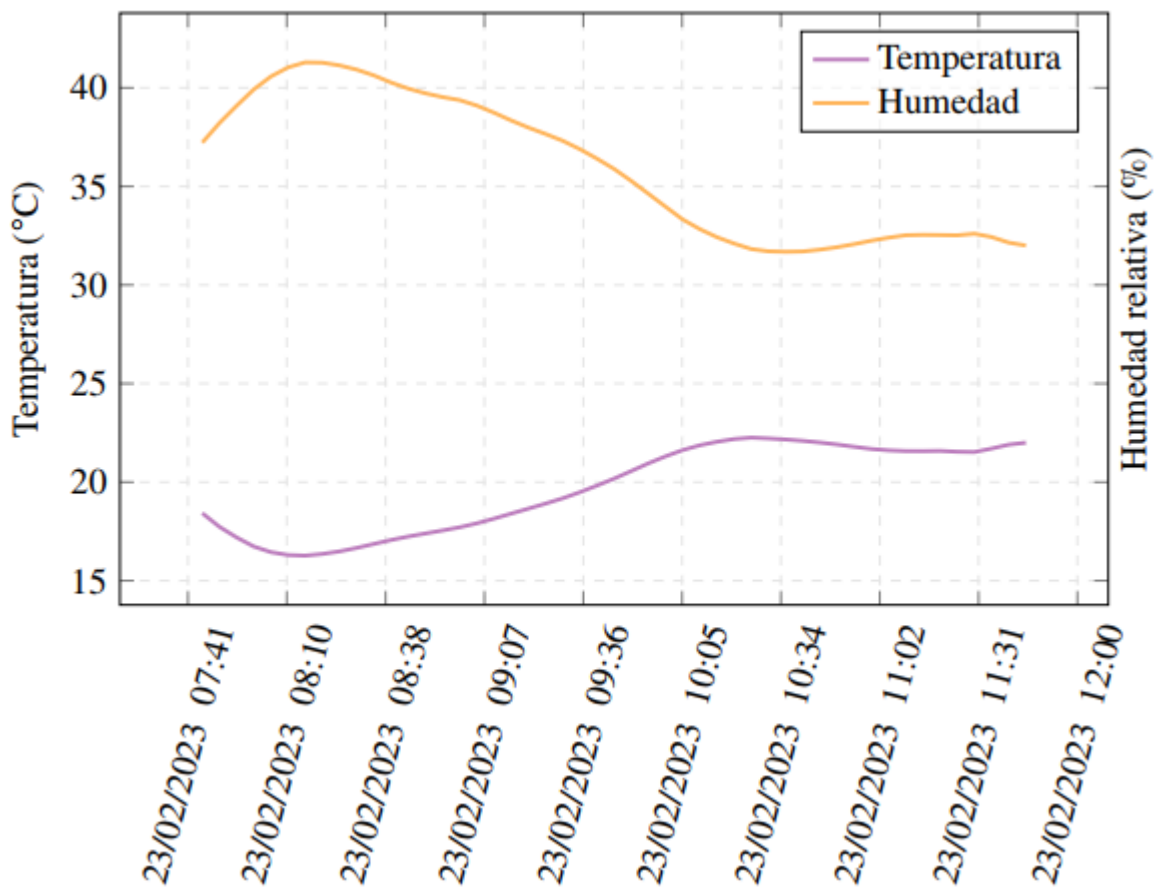


Figura 4-19 Temperatura y humedad (23 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

Como solamente se reciben resultados durante tres horas, y éstos no sufren grandes aumentos que distorsionen su visualización, no es necesaria una escala logarítmica para poder interpretar los datos.

Se puede apreciar (Figura 4-20) como las PM_{2,5} y las PM₁ marcan niveles estables, en torno a 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Sin embargo, las PM₁₀ ascienden desde los 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta los 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:33 h, momento en el que vuelven a bajar hasta los 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

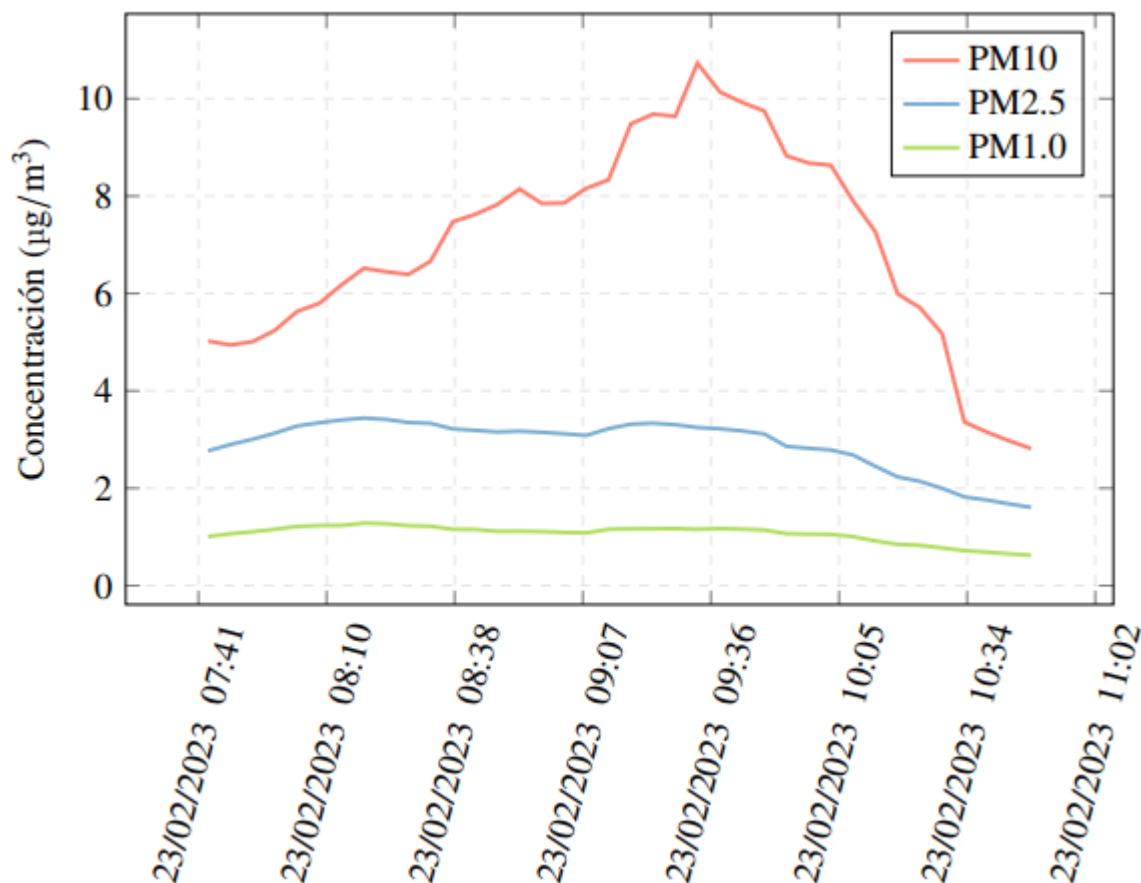


Figura 4-20 Niveles de partículas en suspensión (23 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

Este comportamiento es muy diferente al observado el día 21 de febrero y la única diferencia que se puede observar en las condiciones atmosféricas es que la humedad relativa es 5 puntos superior a la del día 23, por lo que me lleva a pensar que durante esa mañana, los motores del patrullero Tabarca no estuvieran en funcionamiento y que por esa razón se registrase un nivel considerablemente inferior de partículas en suspensión.

4.1.3 Puerta Carlos I

4.1.3.1 2 de marzo 2023

Se reciben datos desde las 07:00 h hasta las 02:50 h. No se producen precipitaciones, la humedad es del 73%, la presión de 1019,5 hPa y la temperatura de 7,2 °C.

El gráfico de temperatura y humedad (Figura 4-21) sigue un patrón parecido al de los días 27 de enero (4.1.1.2), 2 de febrero (4.1.1.3) y 7 de febrero (4.1.1.5), en los que el dispositivo recibe directamente la radiación de la luz solar.

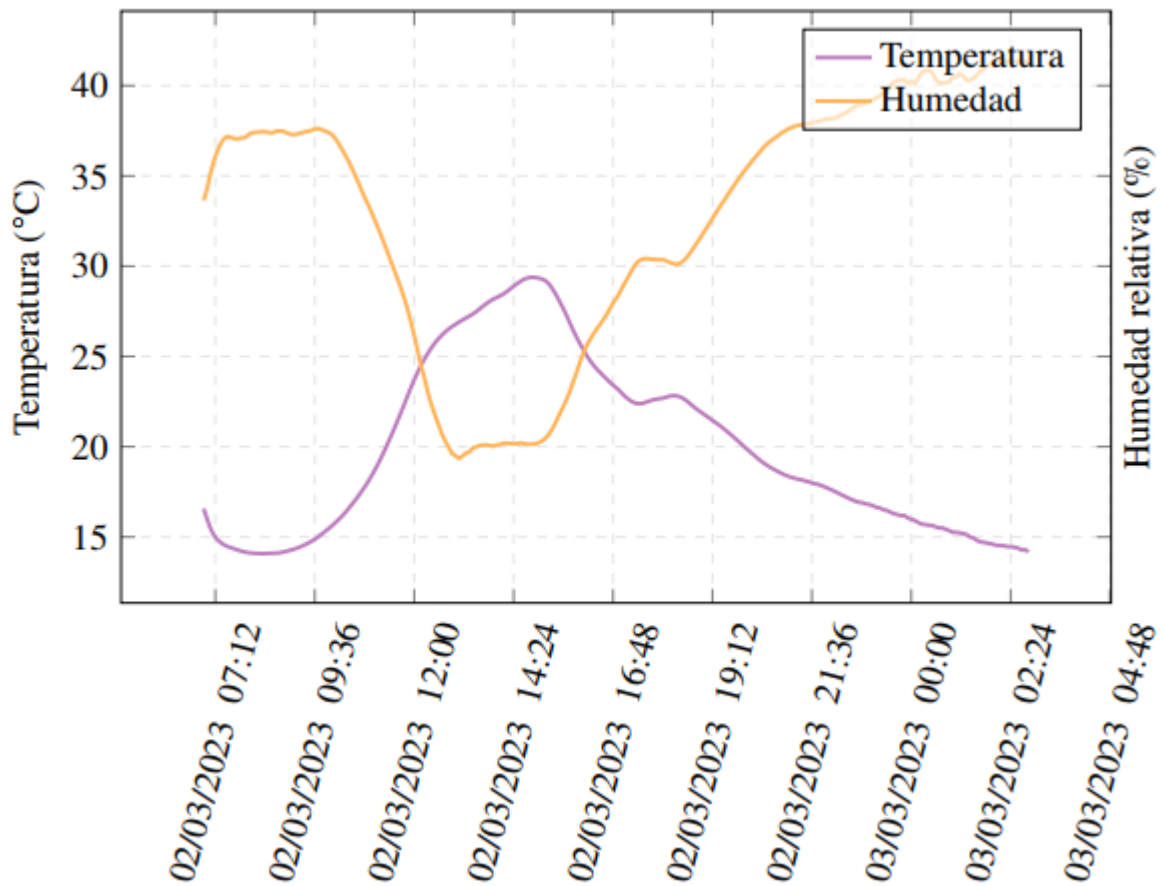


Figura 4-21 Temperatura y humedad (2 de marzo) en la Puerta Carlos I.

En la siguiente tabla (Figura 4-22) se puede observar como se vuelve a dar la inversión térmica, que ocurre de las 17:35 h a las 20:30 h, obteniendo valores máximos de 856 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, 790 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y 653 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1.

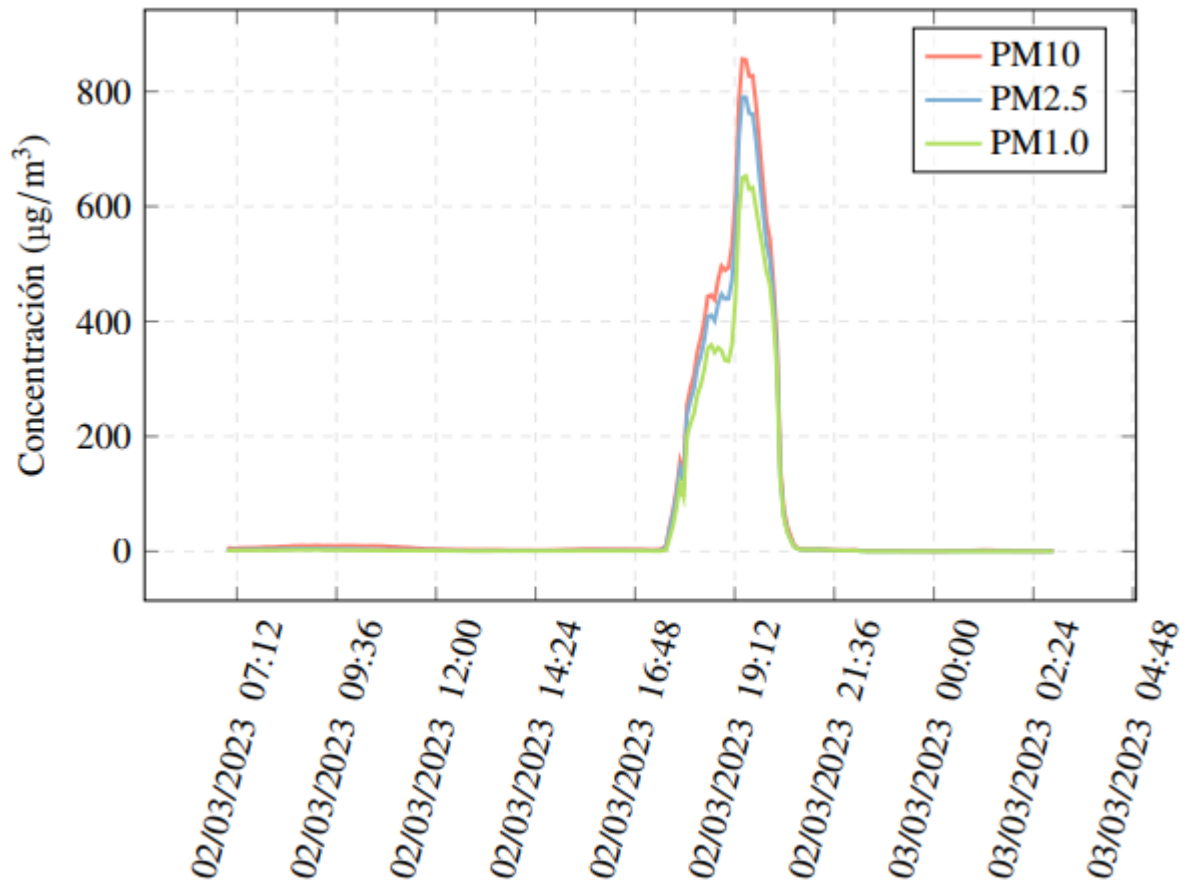


Figura 4-22 Niveles de partículas en suspensión (2 de marzo) en la Puerta Carlos I.

Más en detalle (Figura 4-23), podemos percibir mediante la representación logarítmica que por la mañana lo máximo que se registra son $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, la mitad de PM2,5 y $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1 y que estas concentraciones van disminuyendo hasta un mínimo de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 justo antes del comienzo de la inversión térmica (17:23 h), momento en el que se vuelven a disparar, alcanzando picos anteriormente mencionados. Posteriormente, descienden hasta niveles muy bajos de madrugada, de menos de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10, como se ha venido comprobando durante todos los días anteriores en diferentes ubicaciones.

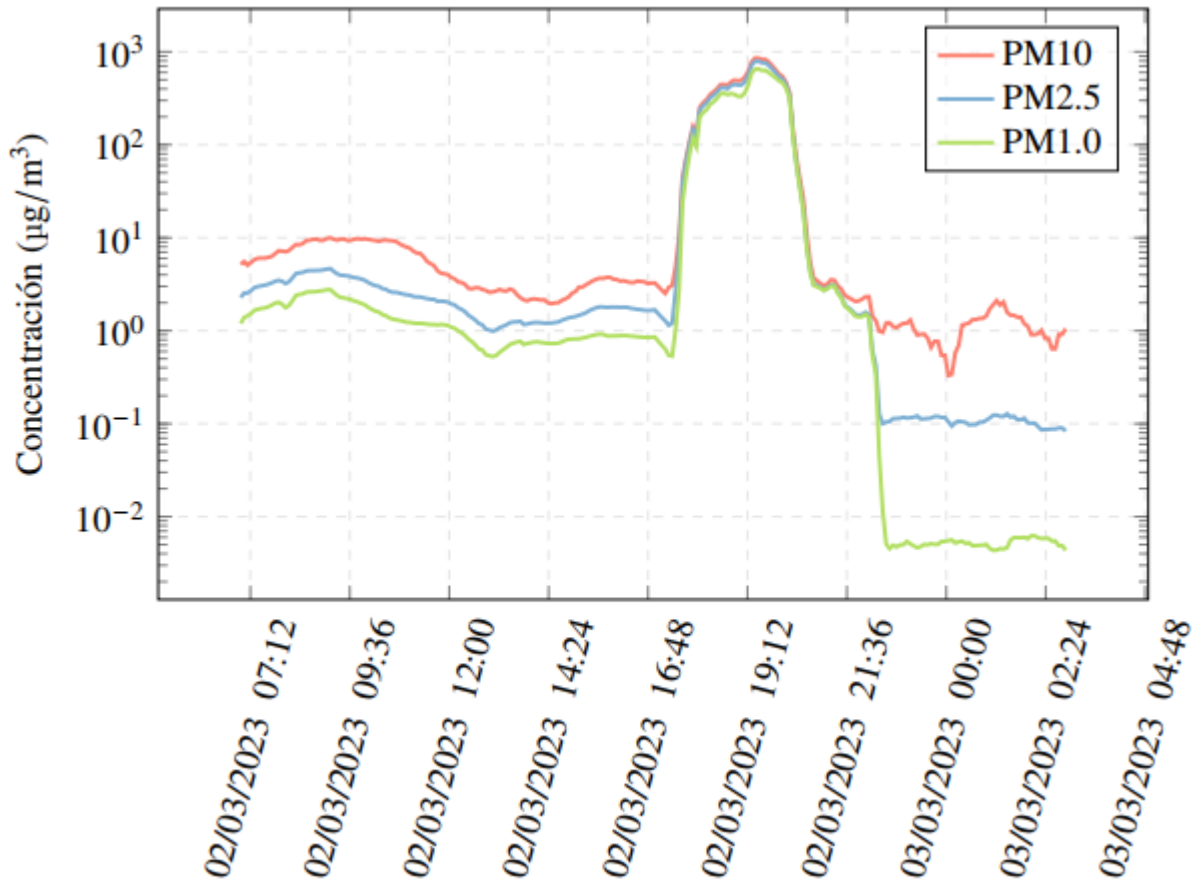


Figura 4-23 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (2 de marzo) en la Puerta Carlos I.

Por lo tanto y pese a estar en un lugar con mucho tráfico rodado, no se alcanzan valores altos de materia en suspensión durante las horas de más tránsito de vehículos.

En el punto A3.9 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 3 horas.

4.2 Comparación y discusión de resultados en exteriores

En la siguiente tabla (Tabla 6) se resumen las condiciones ambientales y los datos más característicos de cada día.

Debido a la distorsión que la inversión térmica produce en los datos del resto de días, se ha decidido no incluir el nivel medio de partículas durante todo el intervalo de medición, ya que los datos no serían representativos.

Para dar una idea más veraz, se ha incluido el tiempo durante el cual se superarían los umbrales de alerta para las PM10 y las PM2,5. Como indica la normativa española (2.3.2), no se alcanzaría el umbral de activación hasta que la media de partículas estuviese por encima de 40 µg/m³ de PM10 y 25 µg/m³ de PM2,5 durante 24 horas seguidas.

Lugar y fecha	Intervalo medida	Condiciones meteo	PM10 máx. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5 máx. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM1 máx. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Horas que supera umbrales	Cumple legislación
BFM 25/01/23	17:00 h – 03:20 h	9,7 °C 68% Hr 1028,4 hPa	1419	1389	1257	3 h	Sí
BFM 27/01/23	07:45 h – 04:35 h	9,6 °C 84 % Hr 1023,9 hPa	809	793	704	5 h	Sí
BFM 02/02/23	07:35 h – 03:20 h	9,2 °C 87 % Hr 1028 hPa	525	494	385	4 h	Sí
BFM 03/02/23	19:30 h – 19:00	9,8 °C 81,5 % Hr 1031,3 hPa	105	104	89	1 h	Sí
BFM 07/02/23	08:25 h – 01:05 h	9,9 °C 53 % Hr 1019,5 hPa	130	70	44	5 h	Sí
BIP 21/02/23	08:35 h – 04:40 h	0,7 l/m ² 13,7 °C 99 % Hr 1017,7 hPa	747	629	482	3 h	Sí
BIP 23/02/23	07:40 h – 10:50 h	6,5 °C 94,5 % Hr 1017 hPa	11	3	1	0 h	Sí
Carlos I 02/03/23	07:00 h – 02:50 h	7,2 °C 73 % Hr 1019,5 hPa	856	790	653	3 h	Sí

Tabla 6 Resumen mediciones en exteriores

*BFM: Balcón Francisco Moreno

BIP: Balcón Isaac Peral

4.2.1 Balcón cuartel Francisco Moreno

Todos las medidas realizadas desde esta ubicación tienen en común que presentan una inversión térmica en algún momento de la tarde. Este fenómeno se da cuando hay cambios más pronunciados en la temperatura, en este caso cuando desciende. Sin embargo, no ocurren a la misma hora ni tampoco se dan los mismos niveles de concentración.

La única diferencia encontrada que puede explicar por qué el día 25 de enero (4.1.1.1) se registran los mayores niveles durante este fenómeno (1.419 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, 1.389 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y 1.257

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1) es que mientras se produce, la temperatura y la humedad (Figura 4-1) permanecen constantes, para progresivamente caer.

En el resto de días, cuando se da la inversión la temperatura disminuye pero la humedad siempre aumenta. Los niveles de PM10 suelen oscilar entre 800 y 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto para el 3 de febrero, que sólo se alcanzan 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 (Figura 4-11) y además ocurre mucho más tarde de lo habitual, entre las 02:20 h y las 04:00 h. La posible explicación es que es el único ejemplo de la serie en el que se mide la temperatura más baja (Figura 4-10), factor que quizás no favorezca que se levanten una mayor cantidad de material particulado.

4.2.2 Balcón edificio Isaac Peral

En este lugar se toman medidas en dos ocasiones.

La primera, del día 21 de febrero (4.1.2.1), muestra unas concentraciones altas en comparación con otras mediciones realizadas en exteriores, que llevarían a pensar que la cercanía a focos de emisión como el patrullero P-28 Tabarca y las lanchas de instrucción serían las causantes. Sin embargo, las salidas de lanchas comienzan alrededor de las 14:30 h, momento en el que el nivel de partículas se está reduciendo, sin llegarse a observar ningún pico adicional (a excepción de la inversión térmica).

La segunda se realiza 48 horas después (4.1.2.2), pero solamente se reciben datos de las tres primeras horas. En ellos, y al contrario que lo sucedido anteriormente, el material particulado es considerablemente inferior, con un nivel de PM10 creciente desde 5 a 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante dos horas, que luego vuelve a caer hasta 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y un nivel de PM2,5 y PM1 prácticamente constante, con 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Por lo tanto, con las medidas disponibles, no se puede concluir que el Tabarca influye en la cantidad de partículas presente en sus cercanías.

4.2.3 Puerta Carlos I

Las muestras se toman durante un día laborable, jueves 2 de marzo, por lo que se espera que haya una mayor afluencia de vehículos cerca de las 08:00 h y de las 14:00 h. Si bien el máximo se observa a las 09:30 h, no supera los 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, comprobándose que pese al tráfico que suele haber en este punto no produce emisiones nocivas para la salud.

4.2.4 Comparación con otros trabajos

Se han podido establecer puntos en común con un artículo realizado en la Universidad de Pomerania Occidental, en Polonia, que trata sobre “Inversiones térmicas y material particulado en la ciudad de Wrocław en la temporada invernal”, que se realizó con datos de cuatro inviernos, de 2015 a 2020 [23].

En éste, divide en dos los periodos en los que se puede producir una inversión, diurna (07:00 h - 18:00 h) y nocturna (19:00 h - 06:00 h). Establece que en la temporada invernal de 2015/16 alrededor del 60 % de las inversiones térmicas eran nocturnas y el resto diurnas, y en las demás temporadas la frecuencia de las nocturnas estaba entre el 45 y el 52 %, mientras que las diurnas se registraban esporádicamente. Las inversiones nocturnas son más frecuentes debido a la radiación que emite la tierra al ambiente al enfriarse.

En este proyecto, del total de siete mediciones en exteriores que registraron una inversión, tres ocurrieron durante el periodo diurno (4.1.1.3, 4.1.2.1 y 4.1.3.1) y cuatro durante el nocturno (4.1.1.1, 4.1.1.2, 4.1.1.4 y 4.1.1.5), suponiendo estas últimas el 57,14 %, similar a lo obtenido en la ciudad polaca de Wrocław.

Otro punto coincidente encontrado con el artículo, es que en todos los periodos de medición, encontraron que durante la inversión, las PM_{2,5} (ellos no llegaron a medir PM₁) eran las que más contribuían al total de concentración mientras se daba el fenómeno.

En este TFG, en todas las mediciones realizadas en exteriores que registraron inversión, las PM₁ y PM_{2,5} eran las que aportaban unos mayores niveles, a excepción del día 21 de febrero (4.1.2.1), que si bien contiene una carga importante de estas dos clasificaciones de diámetro, es menos significativa que las del resto de días.

4.3 Resultados de la medición en interiores

4.3.1 Estudio cuartel Francisco Moreno

4.3.1.1 10 de febrero 2023

Las mediciones comienzan a las 13:50 h y finalizan a la 01:00 h, encontrándose en él alumnos desde las 16:00 h hasta alrededor de las 19:30 h. La representación de la temperatura (Figura 4-24) muestra una forma estable, acorde con estar midiendo dentro de una habitación con climatización, sin cambios bruscos en la temperatura y con valores altos debido al funcionamiento del propio equipo. En cuanto a la humedad, se ve como aumenta ligeramente desde las 16:45 hasta estabilizarse por la noche.

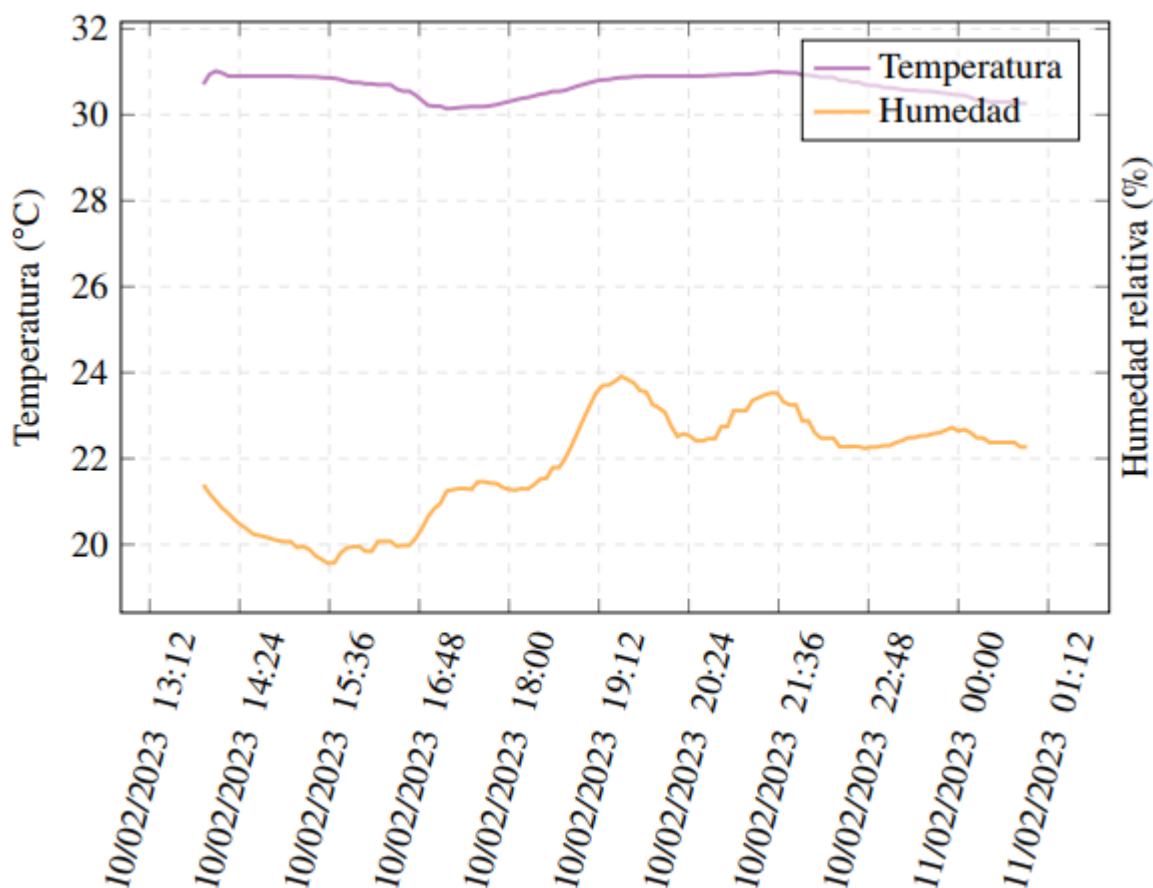


Figura 4-24 Temperatura y humedad (10 de febrero) en el estudio del Francisco Moreno.

En la siguiente tabla (Figura 4-25), se observa un importante pico al comienzo que tras 10 minutos remite, mostrando valores de PM₁₀ de entre 1 y 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y datos casi despreciables de PM_{2,5} y PM₁. Se puede pensar que los primeros datos que se obtienen se corresponderían con polvo que se habría levantado al colocar el sensor a medir desde una estantería, por lo que no deben ser tenidos en cuenta.

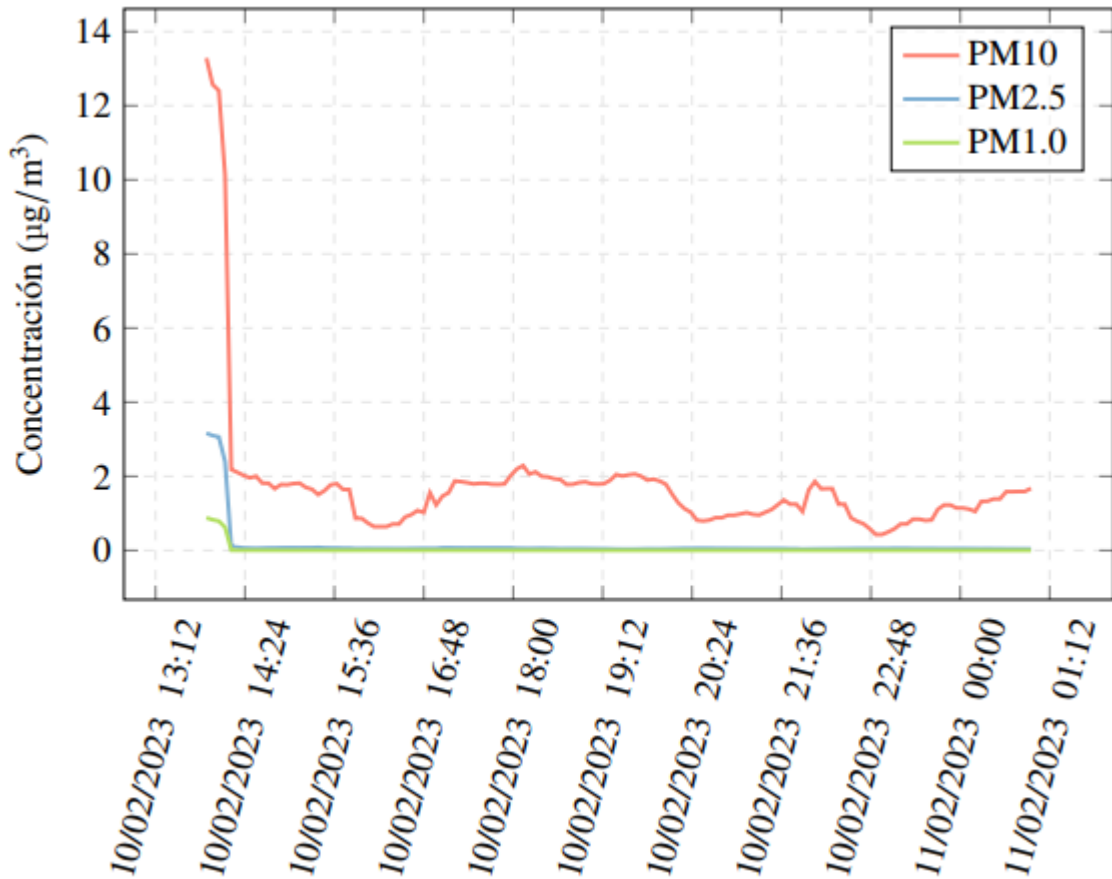


Figura 4-25 Niveles de partículas en suspensión (10 de febrero) en el estudio del Francisco Moreno.

En la siguiente escala logarítmica (Figura 4-26) se aprecia de mejor manera como los niveles de PM10 son cercanos a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y que los del resto apenas influirían en el total.

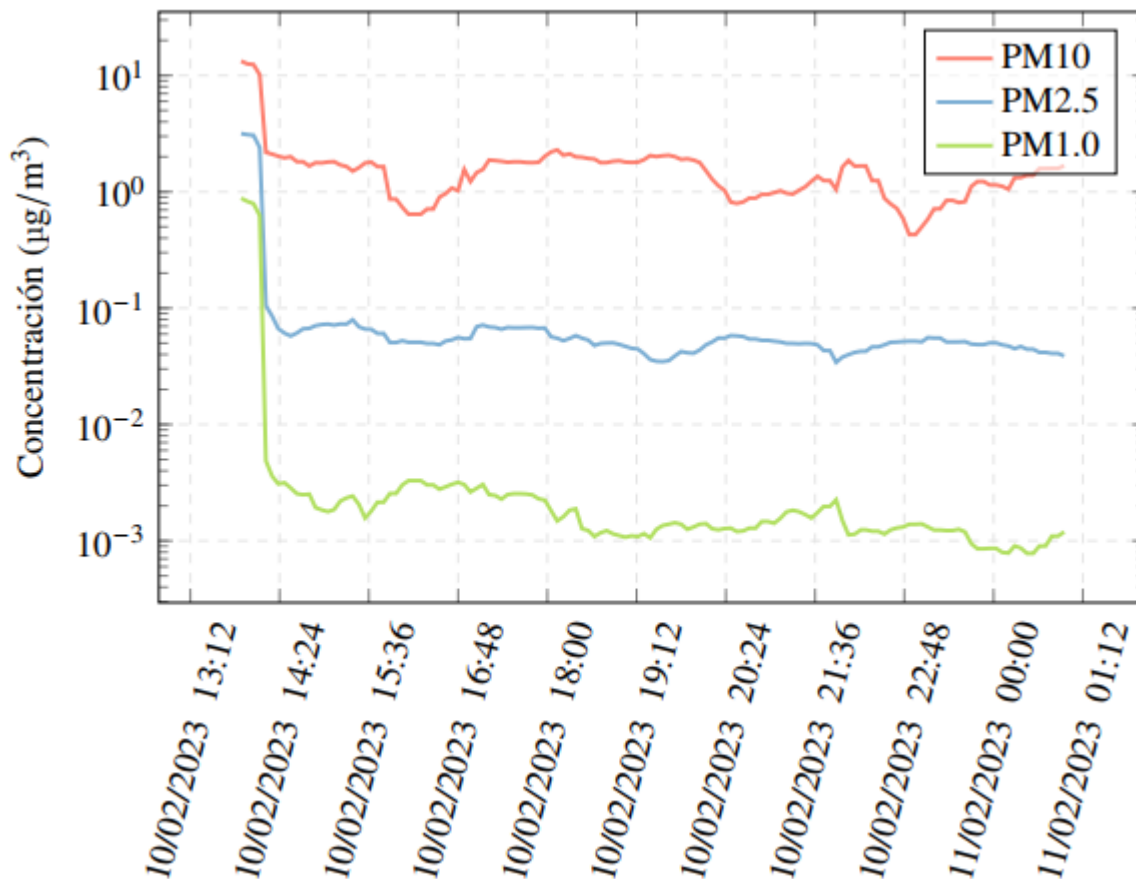


Figura 4-26 Niveles de partículas en suspensión, escala logarítmica (10 de febrero) en el estudio del Francisco Moreno.

4.3.2 Camareta cuartel Francisco Moreno

4.3.2.1 28 de enero 2023

Este sábado se toman registros desde las 13:20 h hasta las 21:10 h del mismo día, hora a la que el dispositivo dejó de transmitir datos sobre material particulado pero continuó enviando temperatura y humedad cada 5 minutos hasta la 01:50 h. La temperatura se mantiene estable y los ascensos de la humedad coinciden con la presencia de personas en la camareta (Figura 4-27).

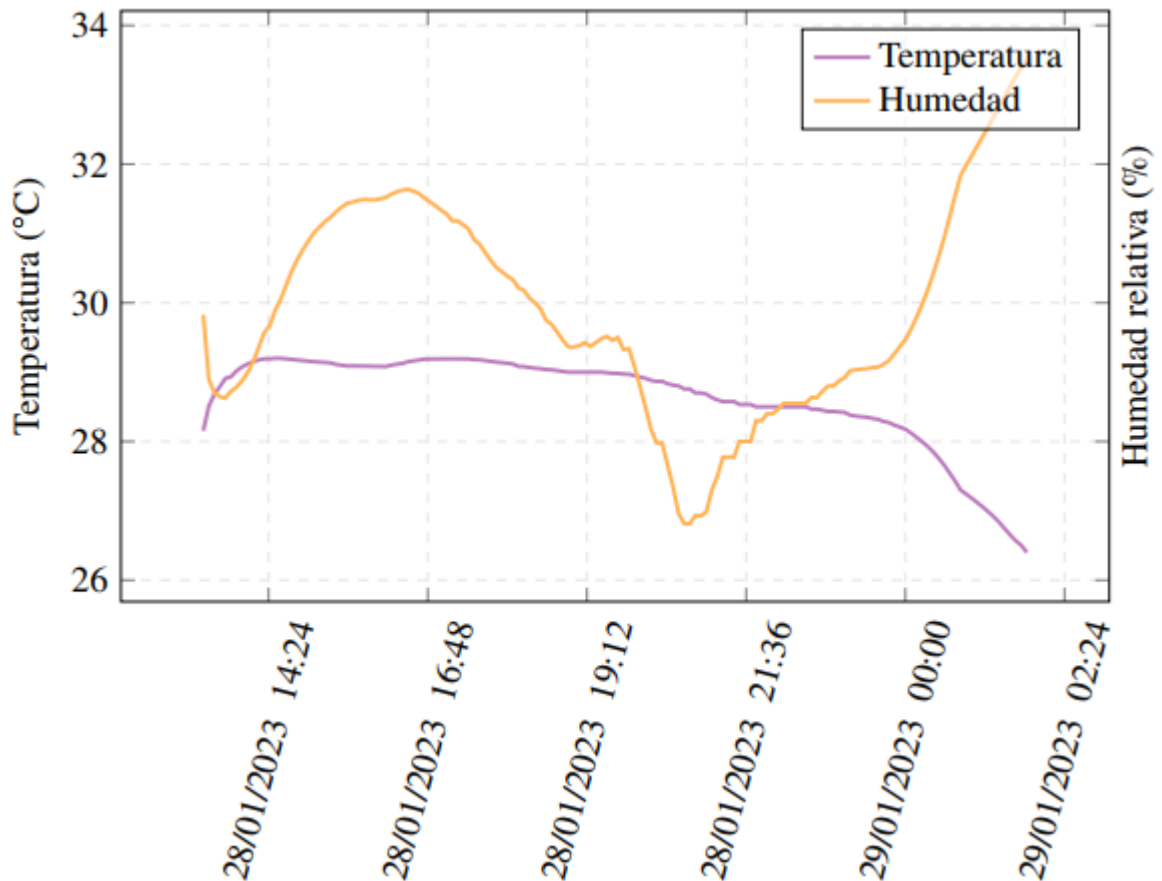


Figura 4-27 Temperatura y humedad (28 de enero) en la camareta del Francisco Moreno.

En la Figura 4-28 se comprueba como las PM10 oscilan entre 1 y 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y que la presencia de PM2,5 y PM1 es insignificante.

El primer pico, que va de 13:45 h a 14:30 h, comprende los momentos en que se entra para coger los abrigo y se sale para ir a la comida, y cuando se regresa de la comida para descansar.

Mientras hay personal descansando dentro, el nivel de PM10 cae a 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y asciende hasta los 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 16:30, hora a la que los que habitan la camareta suelen terminar su periodo de descanso y salir para el estudio.

Desde las 18:30 h y hasta alrededor de las 20:00 h, la concentración vuelve a subir debido a que en ese intervalo entran para cambiarse de ropa. Durante la media hora siguiente se reducen paulatinamente hasta que caen debido a la ausencia de personal dentro.

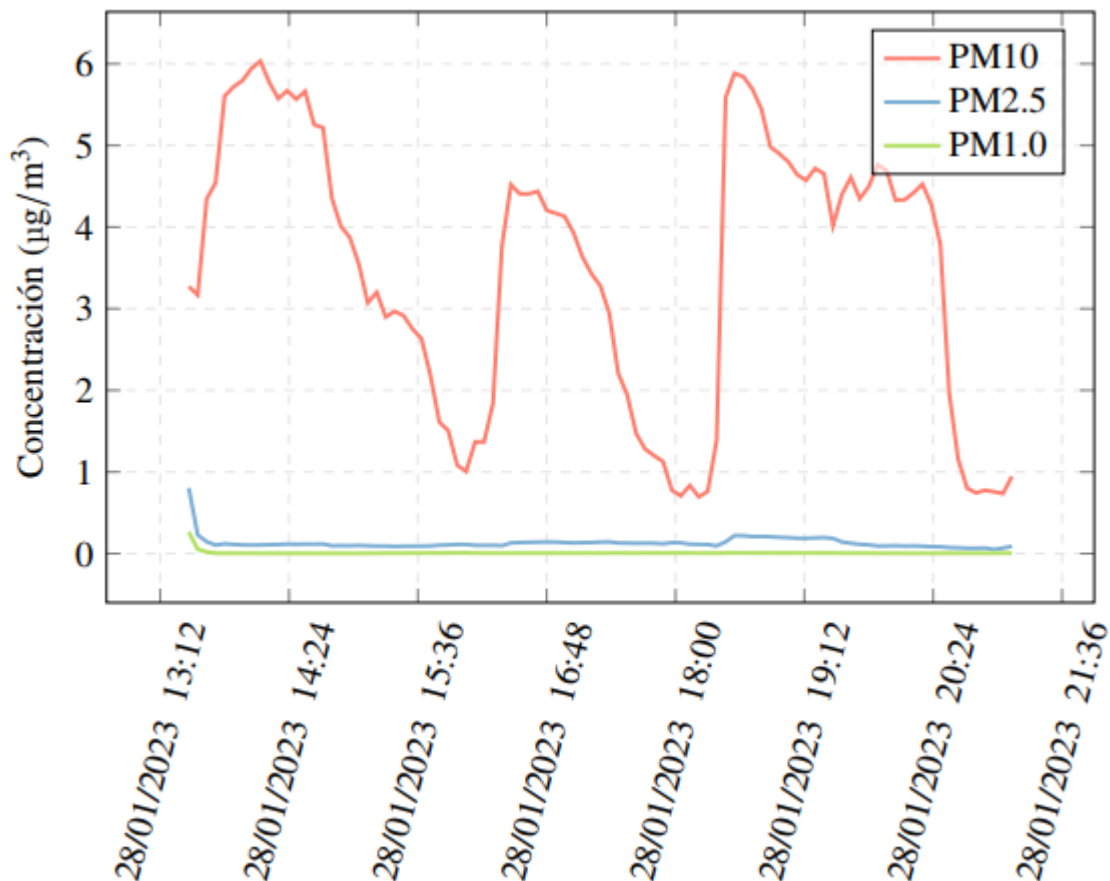


Figura 4-28 Niveles de partículas en suspensión (28 de enero) en la camareta del Francisco Moreno.

4.3.2.2 5 de febrero 2023

Este día se toman medidas de las 14:30 h a las 00:30 h. Al igual que en el anterior, continuó con la transmisión de datos de temperatura y humedad hasta las 04:15 h. Se observa que la temperatura es estable en el interior de la camareta y que la humedad aumenta de manera constante desde las 19:00 h (Figura 4-29).

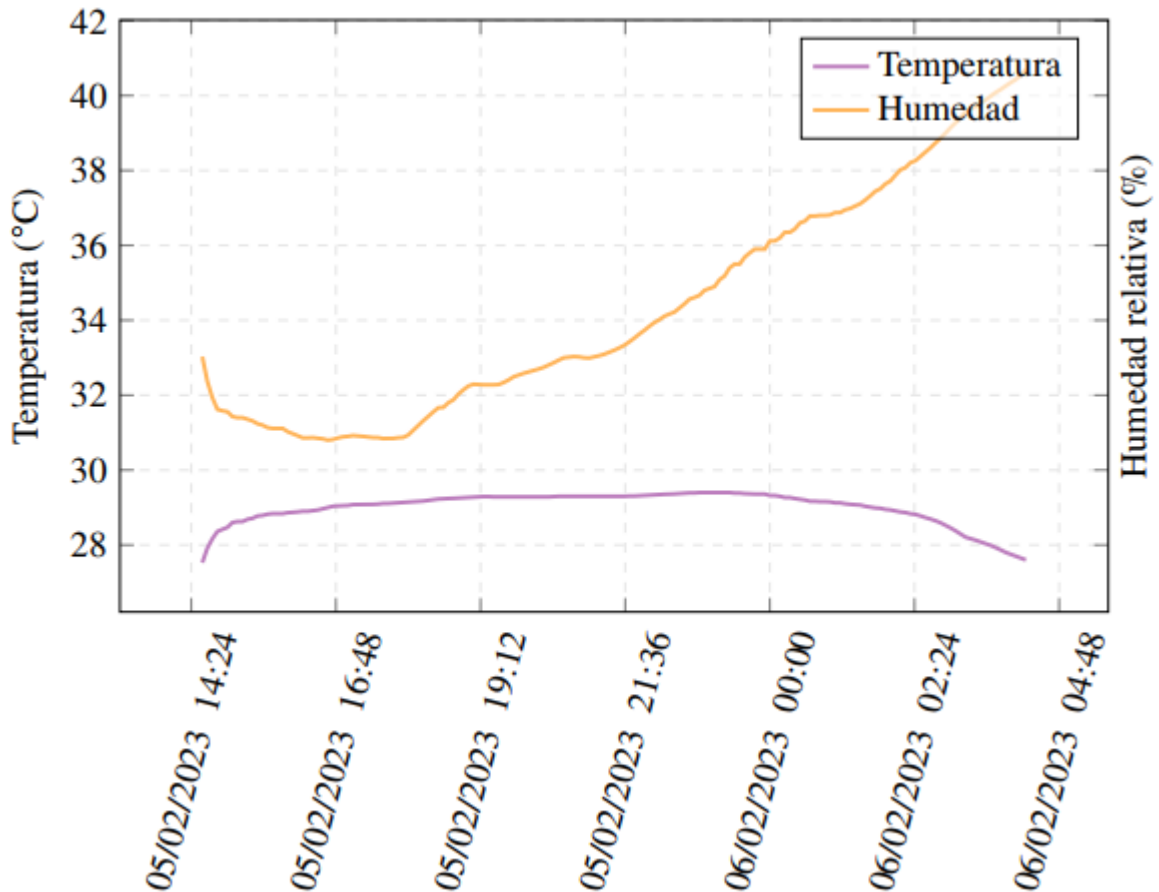


Figura 4-29 Temperatura y humedad (5 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.

Vuelven a registrarse valores despreciables de PM_{2,5} y PM₁ y las PM₁₀ oscilan entre 2 y 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4-30).

De 14:30 h a 15:30 h, las partículas descienden desde 4 a 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, porque el personal se encuentra descansando después de volver de la comida. A las 15:30 h y a las 17:00 h se dan dos picos coincidentes con momentos en los que los inquilinos suelen salir de la camareta para dirigirse a estudio.

Entre las 18:30 h y las 19:30 h aumenta de nuevo la concentración de PM₁₀ porque es cuando el personal vuelve a entrar para cambiarse de ropa. Los siguientes picos de las 21:36 h, las 22:48 h y las 00:00 h coinciden con el regreso para dormir.

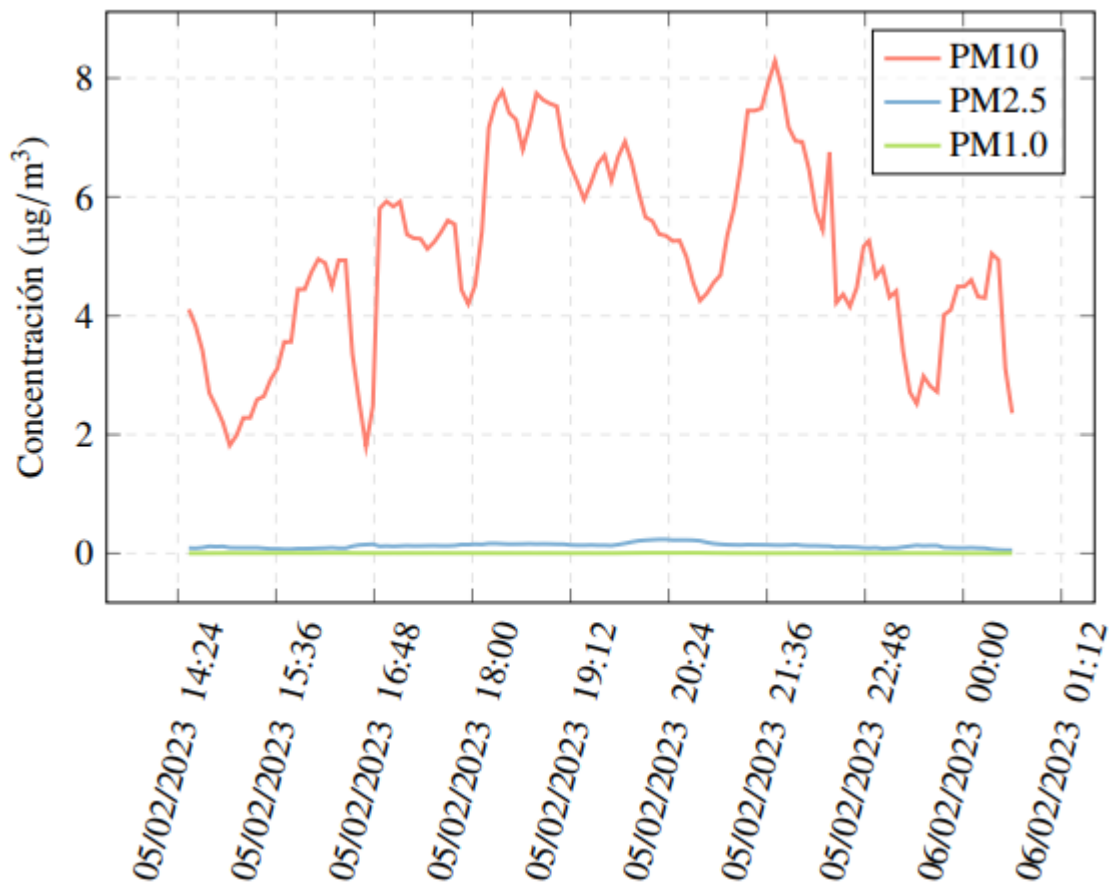


Figura 4-30 Niveles de partículas en suspensión (5 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.

4.3.2.3 24 de febrero 2023

Este día se mide de 23:40 h a 10:40 h. La temperatura registrada es alta debido al propio funcionamiento del equipo, bajando y estabilizándose a lo largo de la noche y la mañana. La humedad es más baja que la medida los días anteriores y asciende a lo largo de la madrugada hasta las 08:45, momento en que sale el personal de la camareta (Figura 4-31).

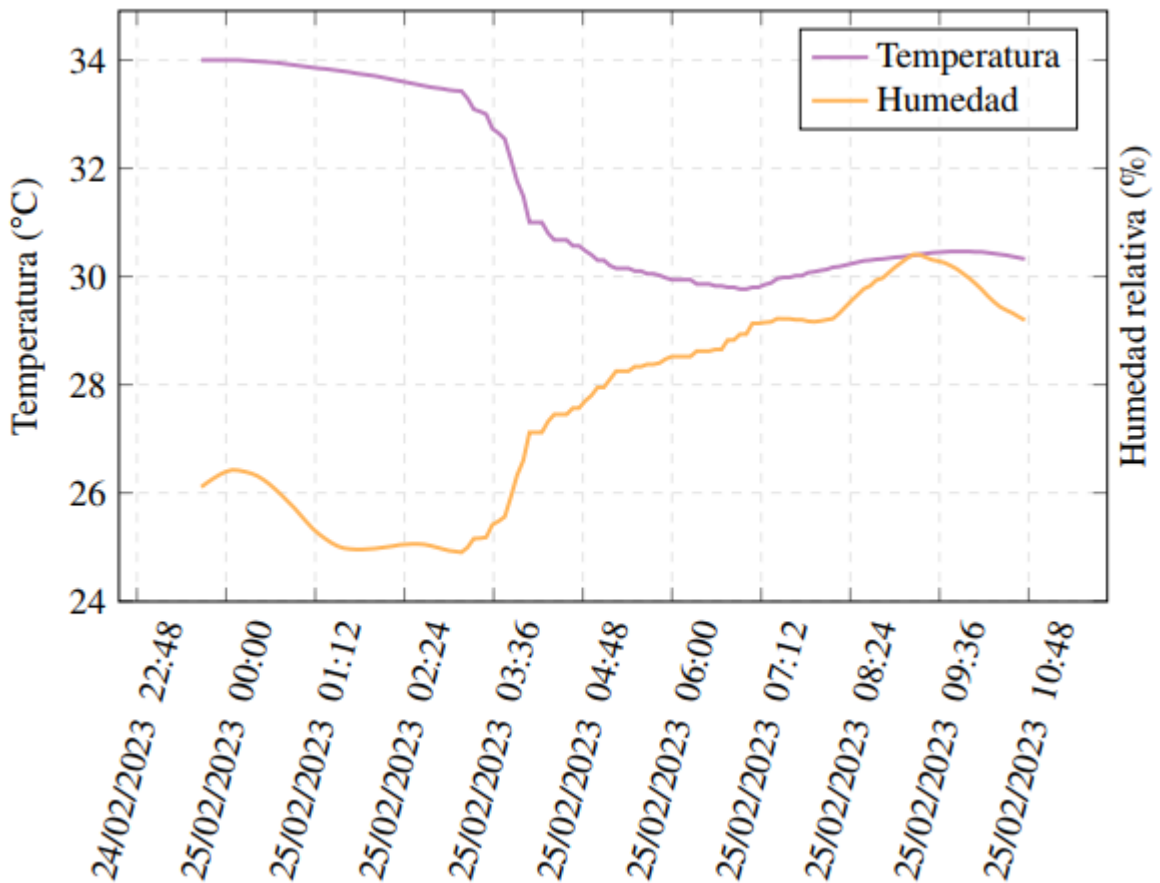


Figura 4-31 Temperatura y humedad (24 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.

En el gráfico de partículas en suspensión (Figura 4-32), se observa como se comienzan a registrar valores relativamente altos de PM10 durante la primera hora, que se mueve entre los 16 y los 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. También cabe destacar el nivel de PM2,5, que va de 4 a 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de las PM1 que van de 2 a 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambas durante las primeras cuatro horas y media, siendo despreciables a partir de ese punto.

Desde las 03:30 h alrededor de las 07:00, las PM10 oscilan entre 1 y 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y a partir de esa hora vuelven a ascender hasta 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, porque es cuando se despiertan los miembros de la camareta. Se mantiene el nivel de partículas en suspensión hasta que vuelve a caer una hora después.

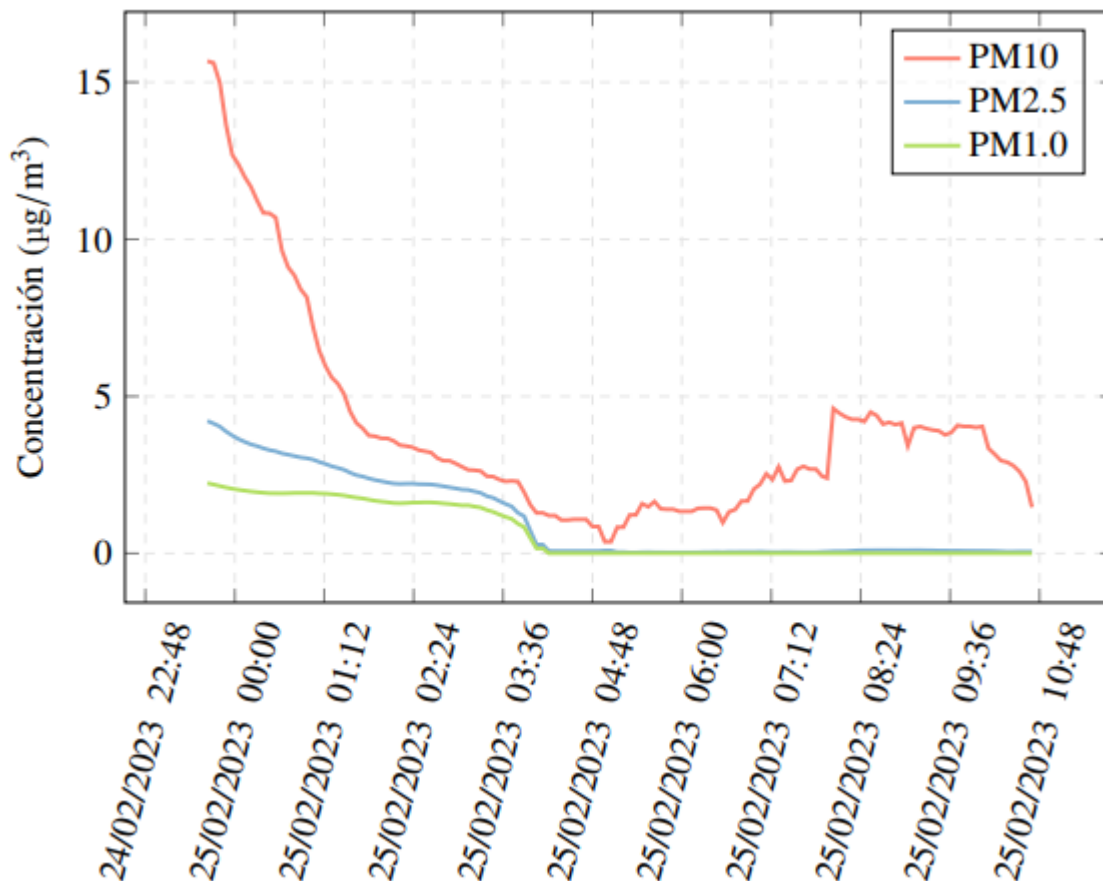


Figura 4-32 Niveles de partículas en suspensión (24 de febrero) en la camareta del Francisco Moreno.

4.3.3 Clase edificio Isaac Peral

4.3.3.1 9 de febrero 2023

Durante este día se consigue medir de 07:52 h a las 19:02 h en el aula 51. La temperatura aumenta con la entrada de los alumnos a clase y se mantiene relativamente estable hasta las 16:30, momento en que finaliza la última clase del día. La humedad sin embargo, cae desde la 09:30 h, marcando su punto más bajo a las 10:00 h, que es cuando los alumnos abandonan la clase para almorzar. Momentos después vuelve a ascender ligeramente y a partir de las 13:10 h cae otra vez, que es cuando finalizan las clases de por la mañana. Cuando empiezan las clases de por la tarde a las 15:30 h vuelve a subir hasta que finalizan antes de las 17:00 h (Figura 4-33).

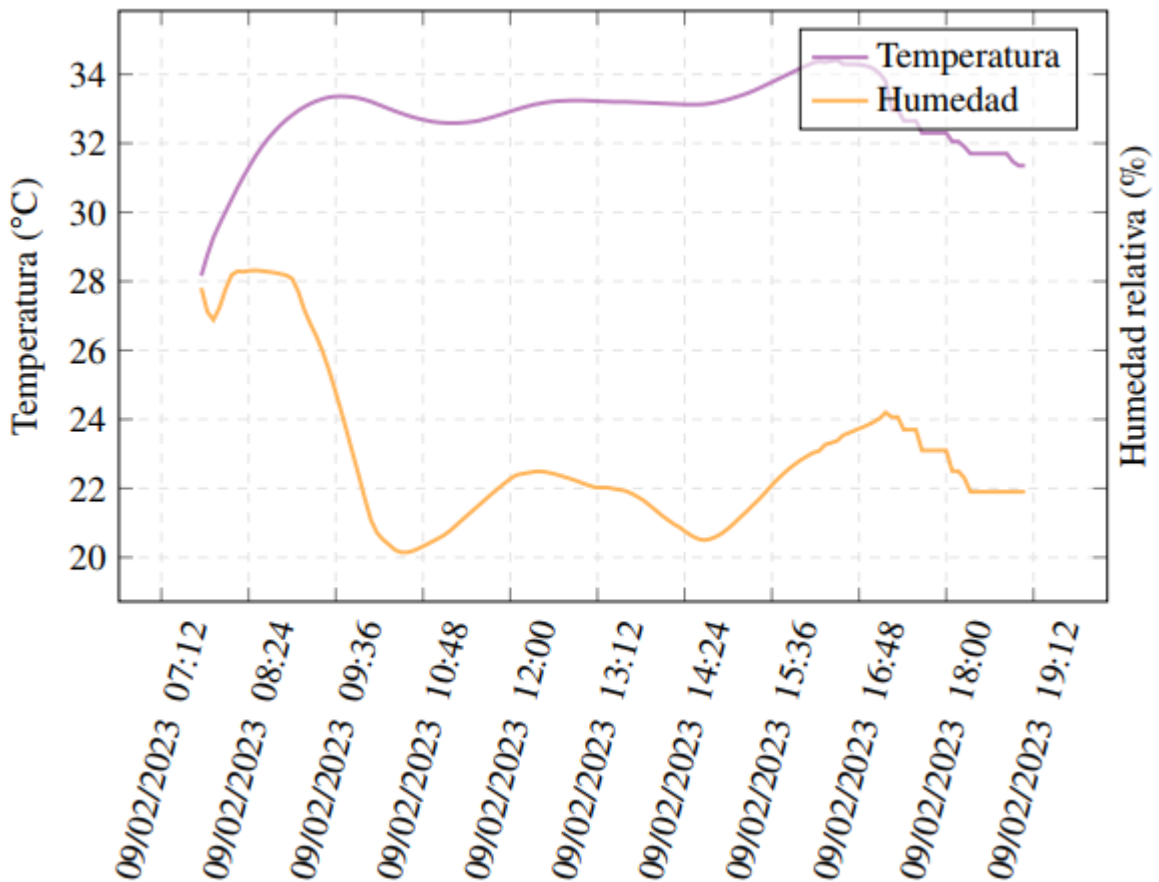


Figura 4-33 Temperatura y humedad (9 de febrero) en la clase del Isaac Peral.

En cuanto al nivel de partículas en suspensión (Figura 4-34), todas ascienden cerca de las 08:15 h, que es cuando los alumnos entran a clase. En este punto se registran los niveles máximos de las tres clasificaciones, midiéndose $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1. Éstas últimas siguen curvas muy parecidas, volviendo a marcar un pico desde la vuelta del almuerzo a las 10:20 h hasta la finalización de la siguiente clase a las 11:10 h, punto a partir del cual descienden hasta llegar a valores muy cercanos a $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ terminadas las clases de por la tarde.

En las PM10, a parte de la hora en que comienza el almuerzo y finaliza la siguiente clase, también se distingue cuando empiezan las clases de por la tarde, por el aumento que tiene lugar a las 15:30 h y que termina una hora después, cuando las concentraciones caen a niveles de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

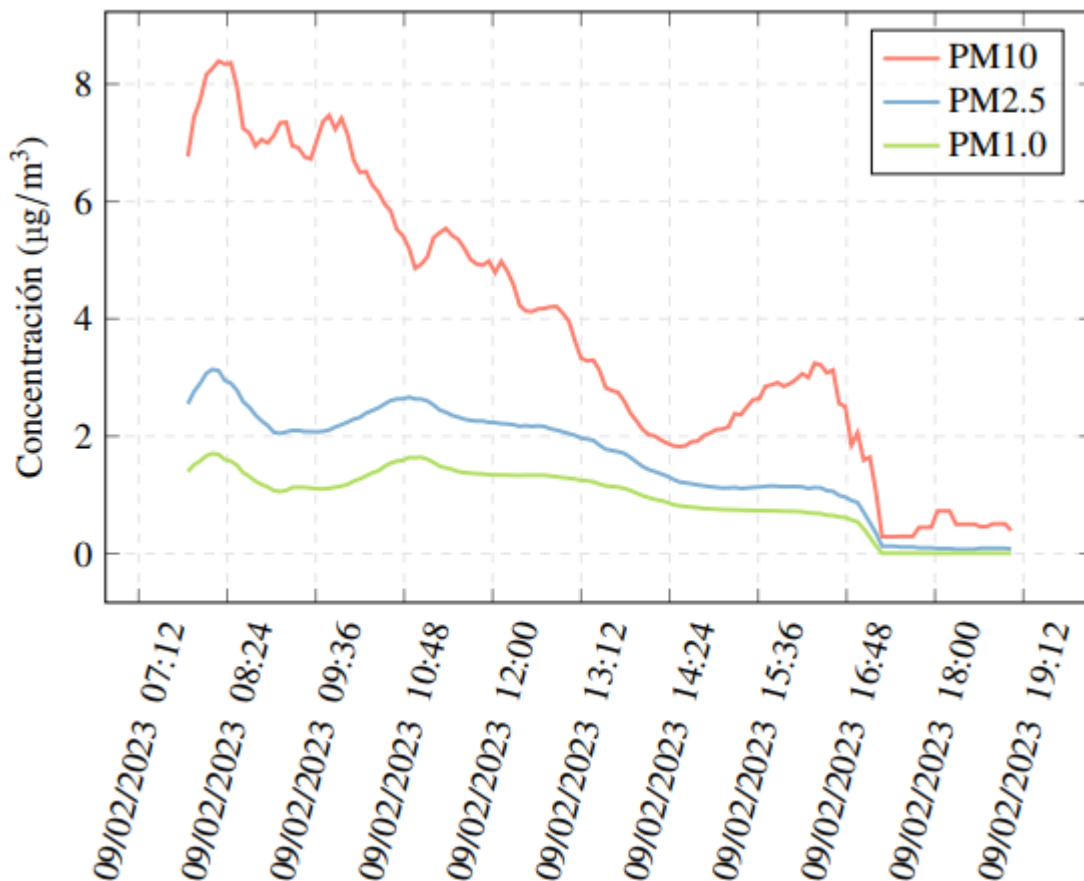


Figura 4-34 Niveles de partículas en suspensión (9 de febrero) en la clase del Isaac Peral.

4.3.3.2 14 de febrero 2023

Se realizan mediciones desde las 07:50 h hasta las 00:25 h en el aula 40. En este caso el dispositivo se encuentra en un lugar en el que recibe la radiación solar, motivo que explica por qué se registran temperaturas más altas que en el día anterior. En cuanto a la humedad, asciende desde el comienzo de la primera clase a 08:15 h hasta la finalización de la tercera clase a las 11:10 h, momento en que comienza a reducirse para llegar a su mínimo a las 14:30 h, cuando ésta está vacía. A partir de ese punto crece con una pendiente más o menos constante hasta que finaliza de realizar medidas (Figura 4-35).

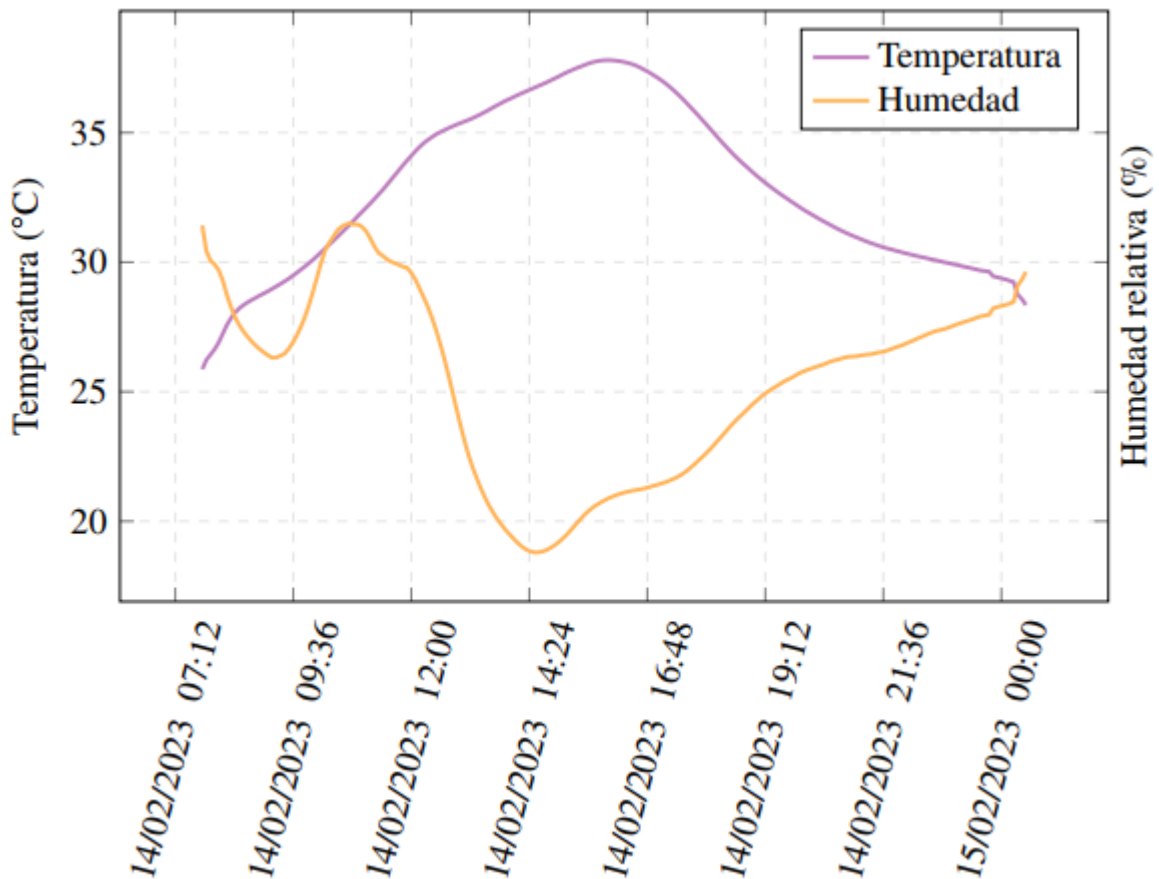


Figura 4-35 Temperatura y humedad (14 de febrero) en la clase del Isaac Peral.

Los niveles de partículas en suspensión (Figura 4-36), se muestran ascendentes para las PM10 desde que empiezan las clases a 08:15 h, llegando a un máximo de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:06, cuando los alumnos dejan la clase para el almuerzo. Se registra otro pico de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:10, momento en que finaliza la cuarta hora, para después reducirse hasta niveles de entre 8 y $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las PM2,5 y las PM1 siguen una curva similar entre ellas, llegando a un máximo de 8 y $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente a las 10:00 h, coincidiendo con el primer pico de las PM10 causado por el movimiento de los alumnos hacia el exterior de la clase. Desde ahí descienden hasta alrededor de las 16:00 h, con las clases de la tarde, en los que se registran 5 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para cada una.

Por último, entre las 22:40 h y las 23:15 h, se registra un pequeño pico de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1, para volver a reducirse a niveles de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

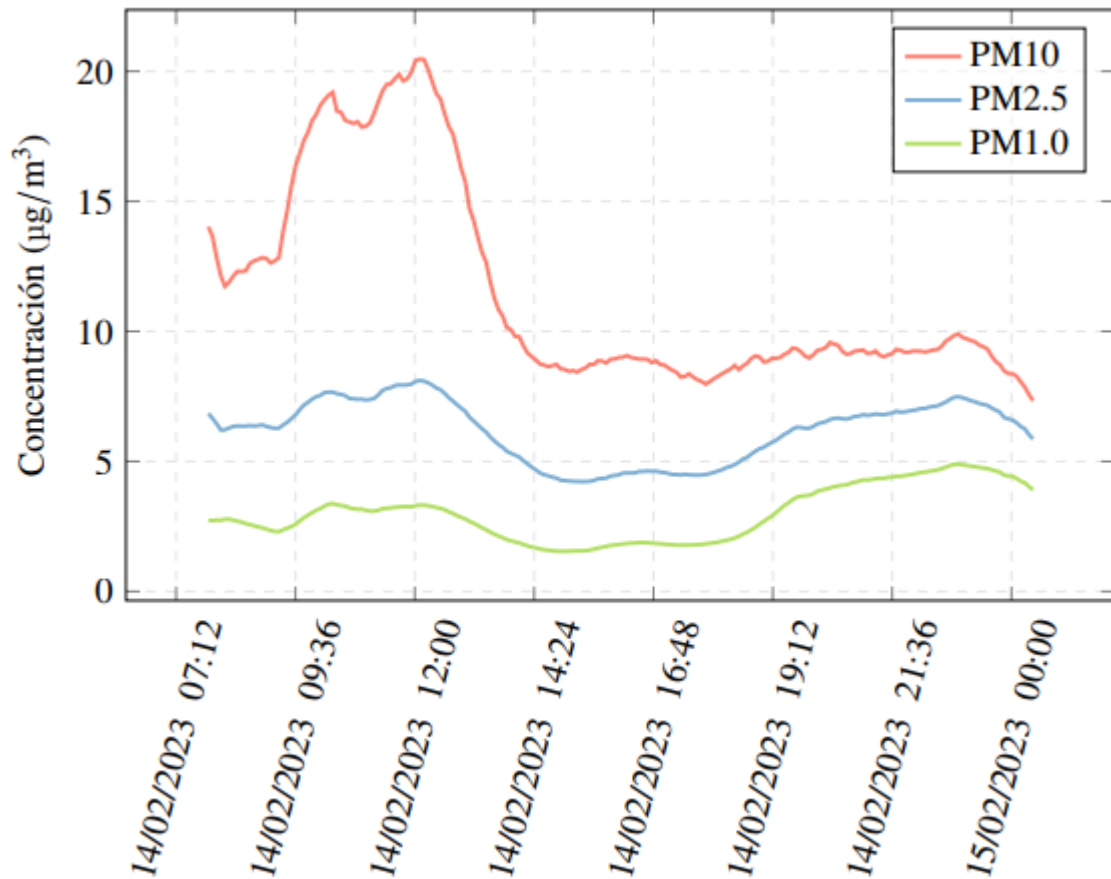


Figura 4-36 Niveles de partículas en suspensión (14 de febrero) en la clase del Isaac Peral.

4.3.4 Seminario 1 Edificio CUD

4.3.4.1 28 de febrero 2023

Se toman medidas de las 16:40 h a la 01:30 h. La temperatura aumenta al principio por el funcionamiento del equipo hasta estabilizarse y la humedad se reduce desde el inicio de las mediciones, mientras tiene lugar una exposición en el seminario durante la última hora de clases (de 16:20 h a 17:15 h), hasta caer a niveles muy bajos cuando deja de haber personal (Figura 4-37).

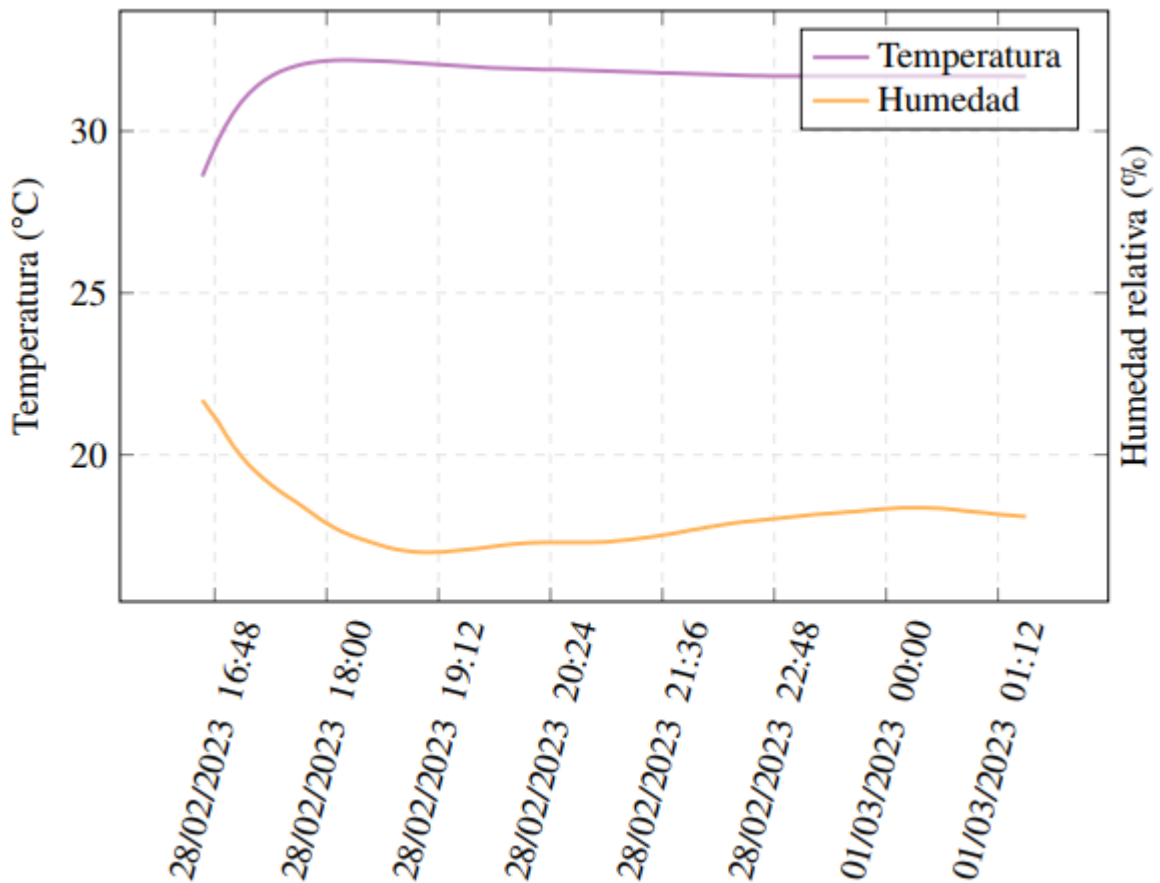


Figura 4-37 Temperatura y humedad (28 de febrero) en el seminario del CUD.

En el siguiente gráfico (Figura 4-38) se observa como todo el material en suspensión registrado se corresponde a partículas de diámetro igual o inferior a 1 micra. Comienza marcando un nivel máximo de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a la presencia de personas en el seminario y a partir de las 18:10 h se registran valores muy bajos que oscilan entre 0 y $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1.

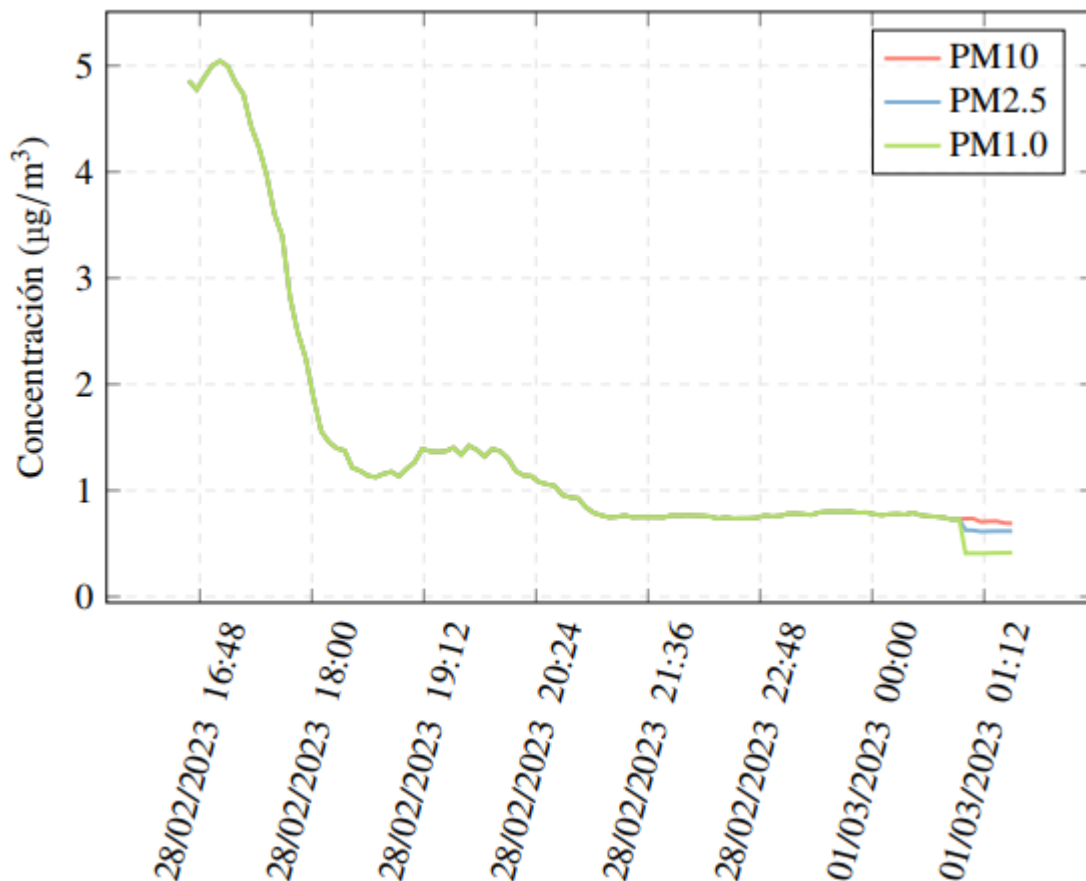


Figura 4-38 Niveles de partículas en suspensión (28 de febrero) en el seminario del CUD.

4.3.5 Cantina de marinería

4.3.5.1 16 de febrero 2023

Se comienza a medir a las 07:35 h y al igual que lo ocurrido el día 23 de febrero (4.1.2.2), bien por un problema en la transmisión de datos o de cobertura, finalizan los registros tres horas después.

Se puede observar (Figura 4-39) como la temperatura crece al principio y luego se estabiliza y como la humedad cae desde el inicio de las mediciones, vuelve a ascender a partir de las 08:30, cuando comienza a haber más afluencia de gente hay en dicho comedor y cae de nuevo alrededor de las 10:00h.

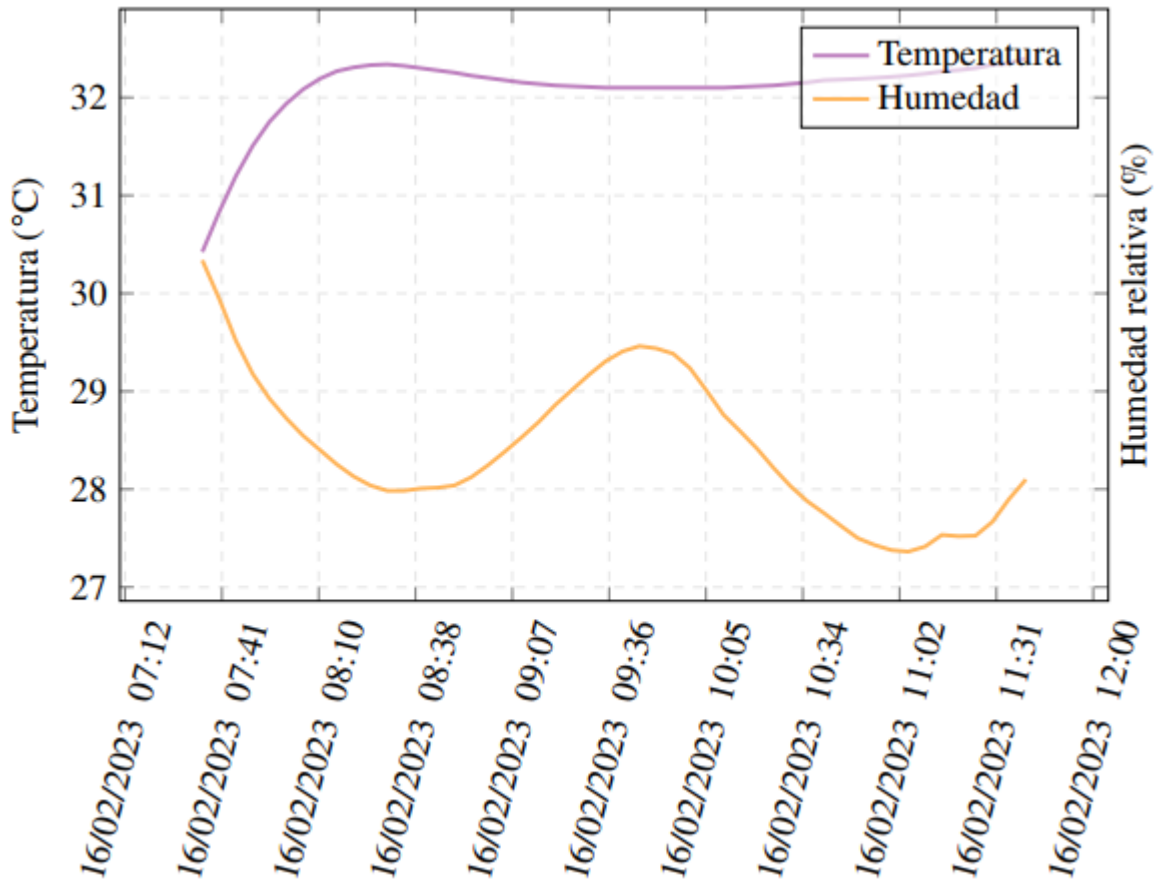


Figura 4-39 Temperatura y humedad (16 de febrero) en la cantina de marinería.

Las PM10 oscilan entre 10 y 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante las dos primeras horas, las PM2,5 varían entre 7 y 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y las PM1 van de 4 a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambas para el mismo intervalo de tiempo (Figura 4-40).

A partir de las 09:35 h, aumentan las concentraciones hasta llegar a un máximo de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, debido a la mayor presencia de personal y al funcionamiento de los equipos de cocina desde 09:35 h hasta que se dejan de recibir medidas a las 10:45, registrando valores de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para cada clasificación.

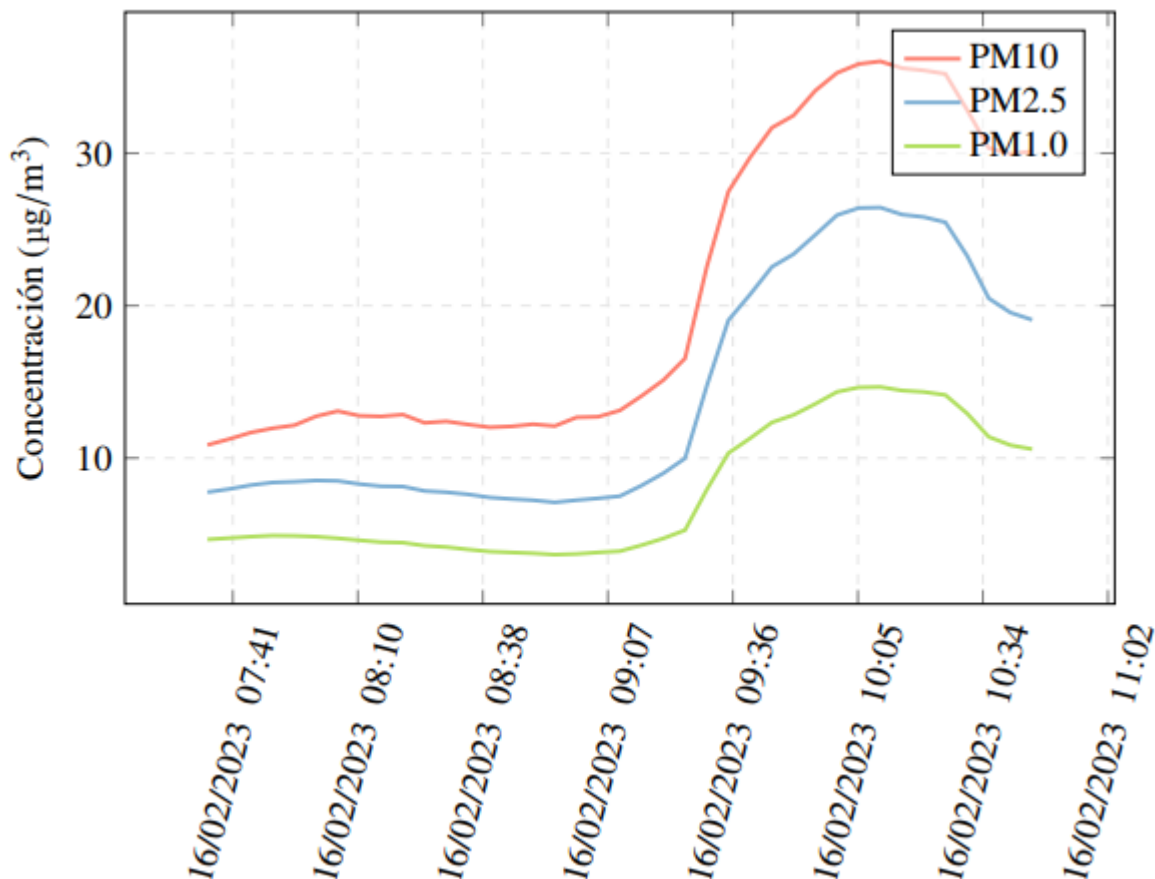


Figura 4-40 Niveles de partículas en suspensión (16 de febrero) en la cantina de marinería.

En el punto A3.6 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante menos de una hora.

4.3.5.2 27 de febrero 2023

Se toman datos desde las 07:40 h hasta las 22:00 h, abarcando casi todo su horario de funcionamiento (de 07:30 h a 16:30 h). La temperatura asciende ligeramente a lo largo del día y empieza a caer a partir de las 20:20 h. La humedad muestra inicialmente una curva similar a la del día anterior, descendiendo desde el comienzo de las medidas para empezar a subir alrededor de las 09:00 h, cayendo otra vez a partir de las 11:00 h y volviendo a subir a las 13:30 h coincidiendo con la comida (Figura 4-41).

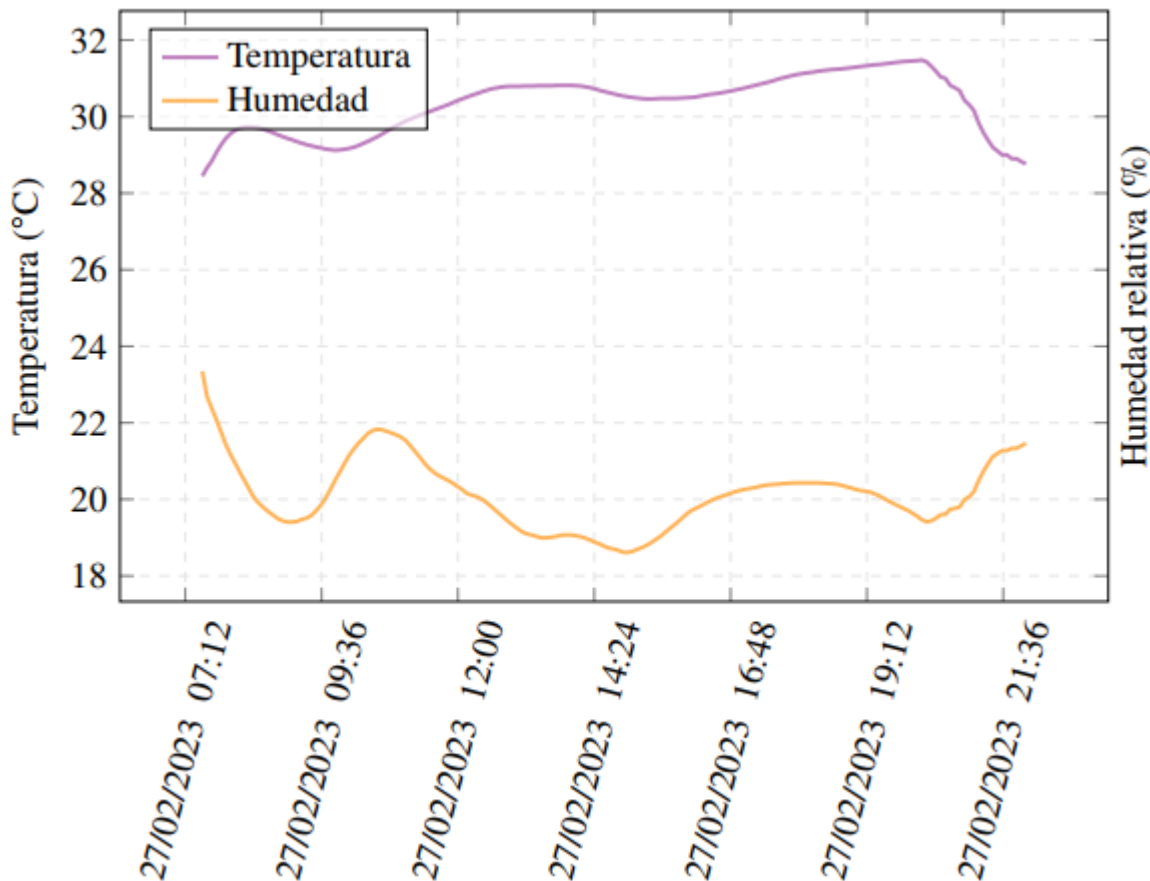


Figura 4-41 Temperatura y humedad (27 de febrero) en la cantina de marinería.

Durante las primeras horas de registros se observa (Figura 4-42) un comportamiento parecido al del día 16 de febrero (4.3.5.1), las concentraciones ascienden hasta marcar un máximo de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1 a las 12:00 h.

Aunque cabría esperar otro aumento en el nivel de partículas alrededor de la hora de la comida, desde que se marca el máximo de las 12:00 h las concentraciones caen paulatinamente hasta marcar un mínimo de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1 desde las 17:55 h hasta las 19:00 h, momento en el que se dispersan.

La razón de este fenómeno, que se prolonga durante dos horas hasta que se dispersa de nuevo, es que se realiza la limpieza del comedor, por lo que se levanta abundante polvo, compuesto en su mayoría por PM10 y PM2,5, midiéndose en su pico a las 20:10 h $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1.

Pasado ese intervalo, caen los tres tipos de partículas a niveles muy cercanos a $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

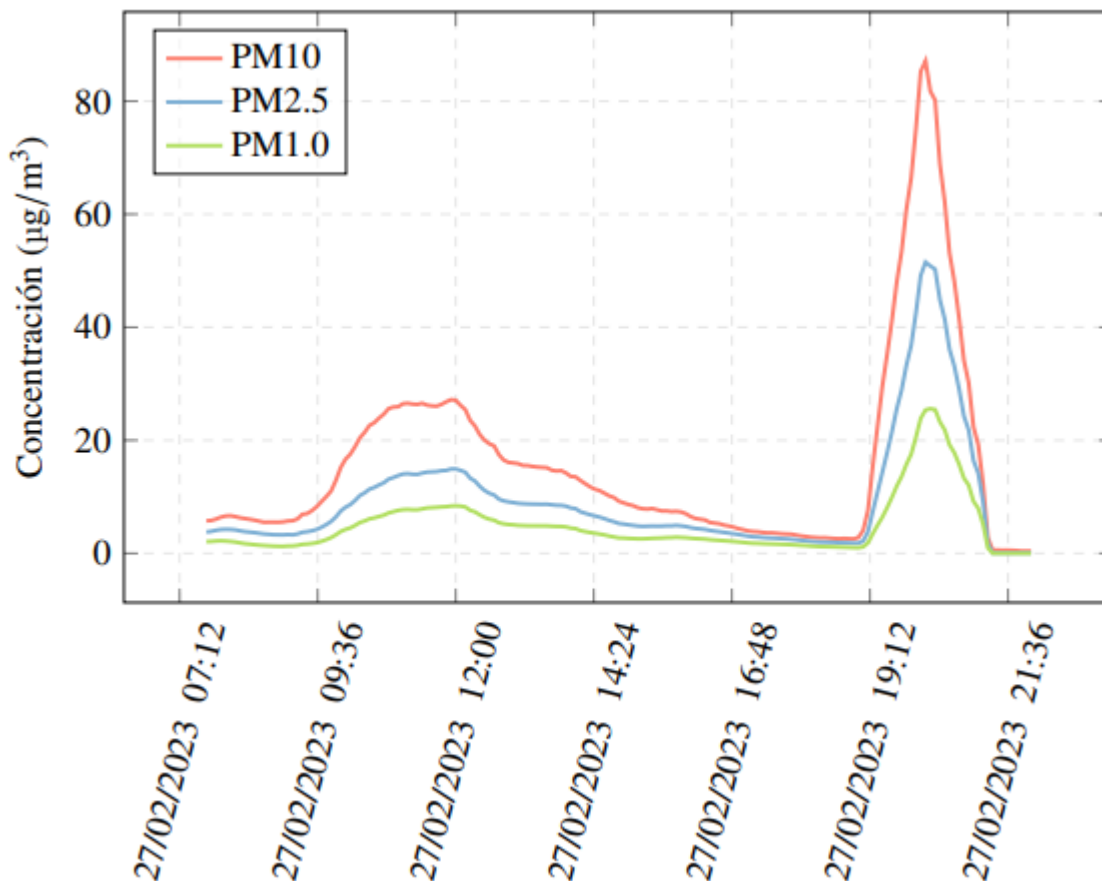


Figura 4-42 Niveles de partículas en suspensión (27 de febrero) en la cantina de marinería.

En el punto A3.8 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 1 hora.

4.3.6 Lanchas de instrucción

4.3.6.1 13 de marzo 2023

Se realizan medidas en el interior del puente de la lancha de instrucción de las 11:10 h a las 13:00 h. Cabe destacar que debido a fuertes rachas de viento, ese día no salió a la mar, por lo que toda la dotación se encontraba reunida en el puente.

La temperatura se mantiene estable y en cuanto a la humedad se comprueba que es más alta que la registrada en otras localizaciones debido a su cercanía al medio acuático (Figura 4-43).

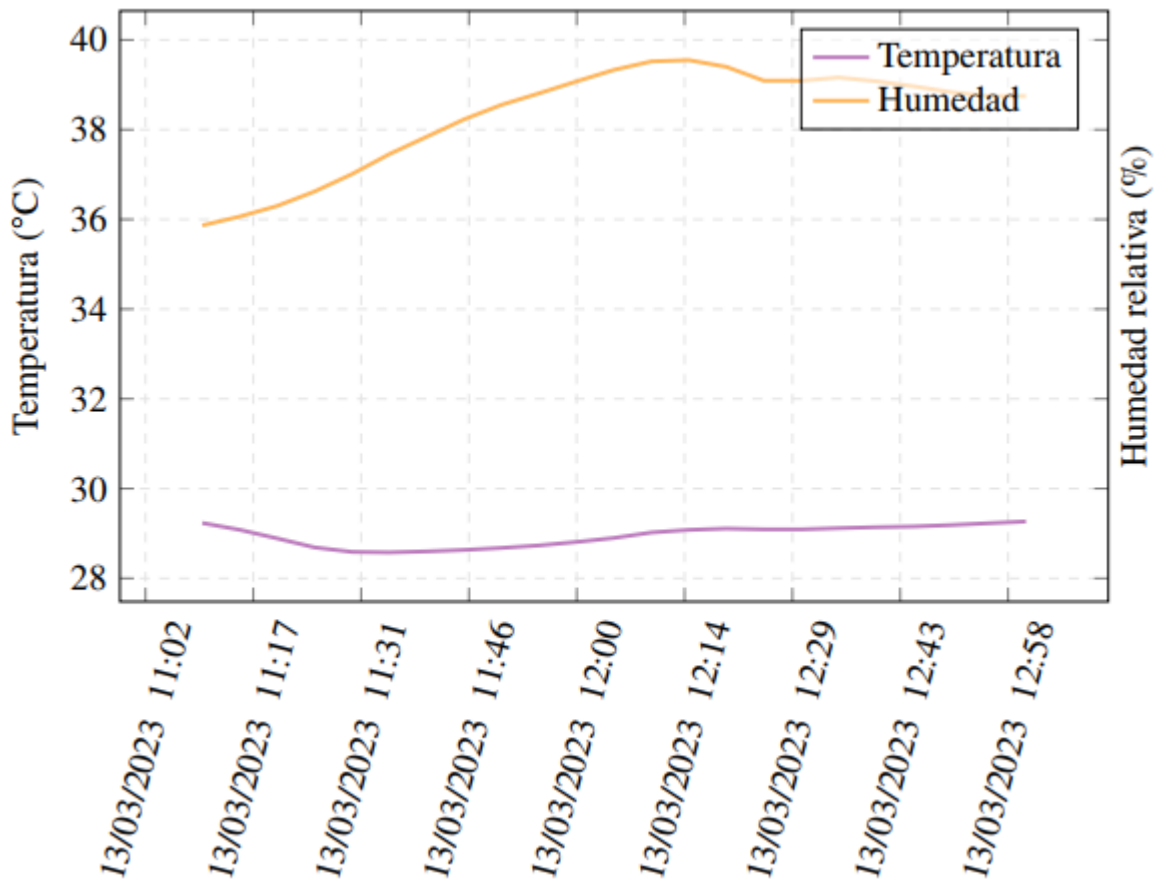


Figura 4-43 Temperatura y humedad (13 de marzo) en la lancha de instrucción.

Los niveles de PM10 y de PM2,5 son altos y crecientes debido a que la dotación se encuentra reunida en un espacio pequeño como es el puente. En concreto, las PM10 comienzan a registrar 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 11:10 h y terminan obteniendo un valor de 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cuando finalizan. Las PM2,5 miden valores iniciales de 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y finales de 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4-44).

En cuanto a las PM1, su presencia es mucho menor, oscilando entre 5 y 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

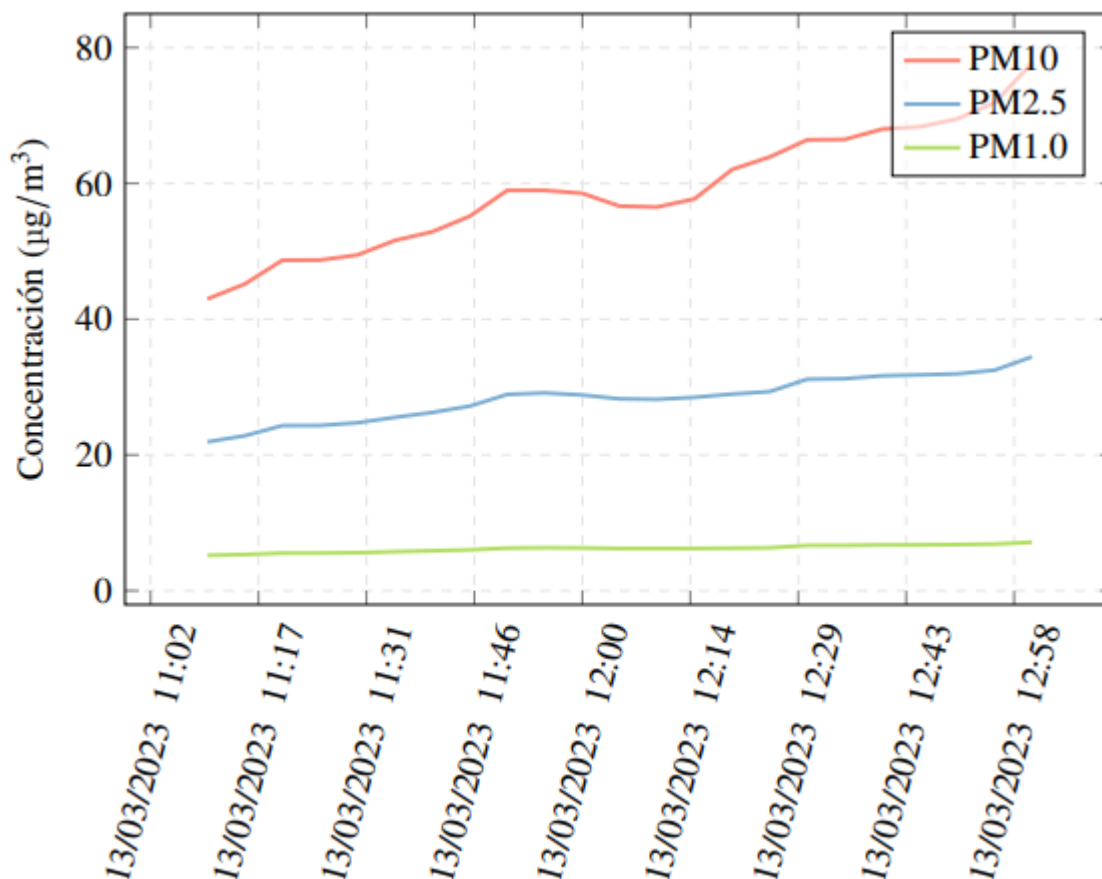


Figura 4-44 Niveles de partículas en suspensión (13 de marzo) en la lancha de instrucción.

En el punto A3.10 del Anexo III se pueden ver las tablas de los promedios realizados cada 30 minutos y una hora, en las que se puede determinar que solamente se superan los umbrales durante 2 horas.

4.3.6.1 22 de marzo 2023

El día 22, se logró tomar medidas de la salida. Sin embargo, al no tener la antena LoRa la cobertura suficiente, solamente se obtienen datos de los intervalos de 14:30 h a 14:45 h y de 17:40 h a 18:40 h.

Durante los primeros 15 minutos se muestra un ligero descenso de la temperatura y una clara tendencia ascendente de la humedad. Las líneas de pendiente constante que siguen sería el periodo de tiempo (de 14:45 h a 17:40 h) en el que se deja de recibir señal. Tras ese paréntesis, se ve claramente como la humedad ha crecido debido a la cercanía al medio marino y como la temperatura ha descendido, hasta las 18:15 h, momento en el que se intercambian las tendencias, coincidiendo con el debriefing que se da a toda la dotación en el puente.

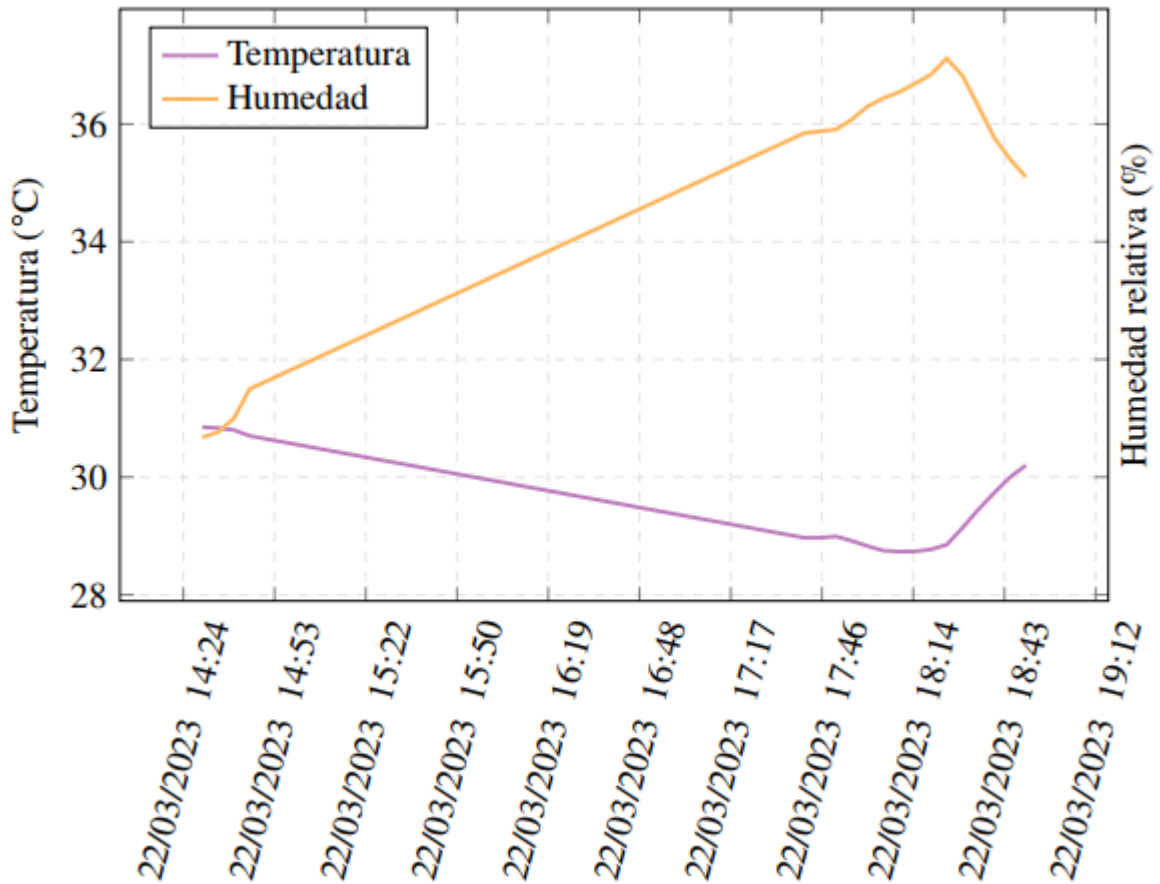


Figura 4-45 Temperatura y humedad (22 de marzo) en la lancha de instrucción.

En cuanto a los niveles de partículas, vemos como al principio de la salida ascienden, llegando a $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10, $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2,5 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM1 en el primer intervalo. Cuando se vuelven a recibir datos se marca el siguiente máximo, incrementándose en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ las PM10. Las concentraciones descienden hasta las 18:10 h, coincidiendo con la bajada de la humedad y la subida de la temperatura, manteniéndose constantes durante los siguientes diez minutos, para posteriormente seguir cayendo hasta $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10, $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2,5 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM1.

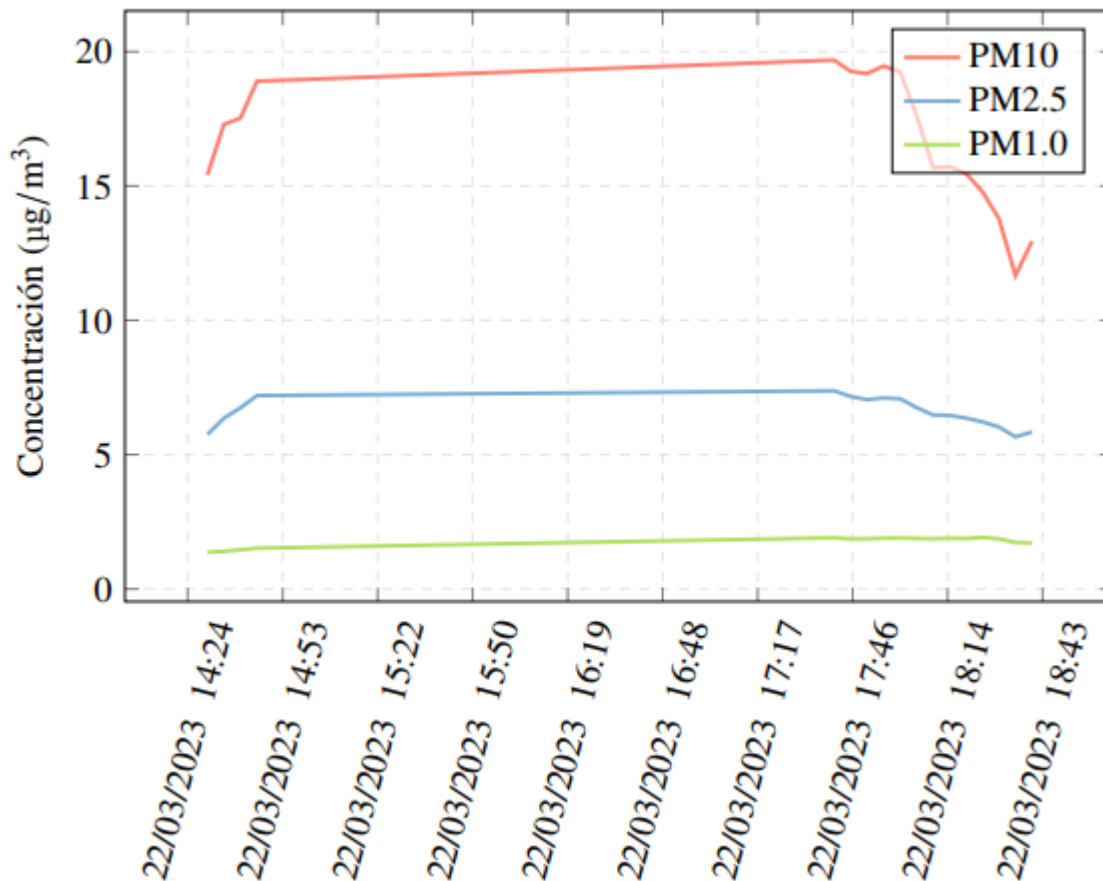


Figura 4-46 Niveles de partículas en suspensión (22 de marzo) en la lancha de instrucción.

4.4 Comparación y discusión de resultados en interiores

Al igual que en el punto 4.2, se muestra el resumen de los datos más significativos. Sin embargo, hay dos principales diferencias con la tabla de las mediciones en exteriores.

La primera es que no se incluyen datos meteorológicos, ya que no tiene mucha utilidad aplicar parámetros externos a lugares que están climatizados.

Por último, se añaden las medias de niveles de concentración durante los intervalos de medida, ya que no se dan hechos que distorsionen el resto de registros.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN TÉRMINOS DE
MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN EN EL ENTORNO DE LA ENM

Lugar y fecha	Intervalo medida	PM10 máx. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5 máx. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM1 máx. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio PM10* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio PM2,5* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio PM1* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Horas que supera umbrales	Cumple legislación
Estudio 10/02/23	13:50 h – 01:00 h	13	3	1	2	0	0	0 h	Sí
Camareta 28/01/23	13:30 h – 21:10 h	6	1	0	3	0	0	0 h	Sí
Camareta 05/02/23	13:30 h – 21:10 h	8	0	0	5	0	0	0 h	Sí
Camareta 24/02/23	23:40 h – 10:40	16	4	2	4	1	1	0 h	Sí
Aula 51 09/02/23	07:50 h – 19:05 h	8	3	2	4	2	1	0 h	Sí
Aula 40 14/02/23	07:50 h – 00:25 h	20	8	3	12	6	3	0 h	Sí
Seminario 28/02/23	16:40 h – 01:30 h	5	5	5	1	1	1	0 h	Sí
Cantina 16/02/23	07:35 h – 10:45 h	36	26	15	21	14	8	0 h	Sí
Cantina 27/02/23	07:40 h – 22:00 h	87	52	25	16	9	5	1 h	Sí
Lancha 13/03/23	11:10 h – 13:00 h	78	37	7	59	28	6	2 h	Sí
Lancha 22/03/23	14:30 h – 14:45 h y 17:40 h – 18:40 h	20	7	2	17	7	2	0 h	Sí

Tabla 7 Resumen mediciones en interiores

*Promedio durante el intervalo de medición.

4.4.1 Camareta cuartel Francisco Moreno

Se mide en tres ocasiones y en todas no se alcanzan niveles superiores de PM10 de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, además se registran concentraciones casi despreciables de PM2,5 y PM1, pudiendo comprobar que en ningún caso se alcanzan valores de riesgo (Tabla 1).

4.4.2 Clases edificio Isaac Peral

Pese a ser lugares con una alta densidad de personal, el primer día (4.3.3.1) se recibe un dato máximo de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 a las 08:24 h, cerca de la hora a la que comienzan las clases.

El segundo (4.3.3.2), sí se llega a los 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, pero no se pasa de 7 y 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y PM1, por lo tanto las aulas no suponen un espacio expuesto a altas concentraciones.

4.4.3 Seminario edificio CUD

El seminario del CUD, al no ser un lugar concurrido se registran valores bajos. Como curiosidad, destacar que en su totalidad se corresponden a partículas de diámetro inferior a una micra, marcando el valor máximo de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1 a las 17:00 h mientras tenía lugar una tutoría y descendiendo a niveles inferiores a 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ las siguientes cinco horas.

4.4.4 Cantina de marinería

Se toman registros en dos ocasiones.

En la primera (4.3.5.1), si bien sólo se consigue medir durante cuatro horas, se observa como los valores crecen desde las 09:00 h hasta alrededor de las 10:00 h, alcanzando 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10, 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2,5 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM1, para después ver como se reducen hasta el momento en el que se deja de recibir datos.

El segundo día (4.3.5.2) sí se consigue obtener datos de toda la mañana y tarde. En la tabla (Figura 4-42) se puede ver como las cinco primeras horas prácticamente coinciden con el trazo del día anterior (Figura 4-40). A continuación, todas las concentraciones caen a valores no superiores a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a las 19:12 dispararse a 87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 y desplomarse hora y media después. La explicación a este fenómeno son las labores de limpieza que tuvieron lugar en ese periodo de tiempo.

4.4.5 Lanchas de instrucción

Hay dos días de registros. El primero (4.3.6.1) se mide durante dos horas y no se producen interrupciones por pérdida de cobertura, ya que por mal tiempo, la lancha no sale a la mar. Por esta misma razón, la dotación se encuentra reunida en un espacio reducido como es el puente, alcanzándose valores altos de hasta 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 y 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2,5, al contrario que las PM1, que se mantienen muy bajas por debajo de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El día 22 de marzo (4.3.6.1) la lancha sí navega, midiendo durante un primer intervalo de 15 minutos y un segundo de una hora. Al no estar toda la dotación presente en el puente y estar éste ventilado, se registran niveles normales de entre 20 y 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, 7 y 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5 y 2 y 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM1.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Cumplimiento de la legislación y medidas a adoptar

Como se menciona en el apartado 2.3.2, los niveles de alerta por superación del valor límite no se activan hasta que la media horaria de las concentraciones no sobrepasa los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el caso de las PM10 y los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM2,5 durante 24 horas.

En las mediciones realizadas en la ENM no se da este caso en ninguna ocasión. El máximo intervalo de tiempo en el que se superan los umbrales peligrosos para la salud son dos periodos de 5 horas los días 27 de enero (4.1.1.2) y 7 de febrero (4.1.1.5), ambos en el balcón del cuartel Francisco Moreno y bajo condiciones de anticiclón.

Se puede concluir que la calidad del aire en los espacios de la ENM es buena y cumple tanto con la legislación nacional (Real Decreto 34/2023) como con la normativa europea (Decisión 2011/850/UE).

Entre las posibles medidas a adoptar, se podría usar la actual red de instalaciones de calidad del aire de las ciudades para avisar de los intervalos de altas concentraciones, como la inversión térmica para evitar que instalaciones y viviendas tuvieran ventanas abiertas en esos momentos y deportistas realizasen sus actividades en ocasiones de menor concentración de partículas. Actualmente estas instalaciones solamente emiten alertas cuando los niveles máximos se rebasan durante 24 horas seguidas, no durante espacios cortos de tiempo.

En interiores, se podrían instalar medidores que al contrario de lo mencionado arriba, avisaran para así abrir ventanas y puertas para reducir la cantidad de material particulado presente en un espacio cerrado.

5.2 Inversión térmica y anticiclón

Durante los tres meses de 2023 en los que se ha desarrollado el proyecto, la Ría de Pontevedra ha gozado de un tiempo anticiclónico que ha provocado la ausencia de importantes precipitaciones, además, las pocas que se dieron coincidieron en momentos en los que se medía en interiores.

Esto ha permitido comprobar la existencia de la inversión térmica en esta zona geográfica, se ha visto en todas las mediciones realizadas en exteriores y se ha podido concluir que no siempre tiene que ocurrir en torno a la misma hora, por ejemplo en el caso del día 3 de febrero (4.1.1.4), que se da de madrugada (de 02:45 h a 03:43 h).

También, se ha podido determinar que las PM1 son las que más contribuyen al nivel de material particulado durante estos periodos, siendo las más peligrosas para la salud humana, ya que éstas entran en las vías respiratorias hasta los alveolos pulmonares con mayor facilidad.

Sin embargo, debido a la ausencia de importantes precipitaciones y a que no se estaba midiendo en exteriores en el momento de darse alguna, no se ha podido establecer si se da la inversión térmica o no bajo dichas condiciones.

5.3 Impacto de fuentes de emisión

Durante las mediciones en exteriores y en concreto en la realizada en un lugar cercano al tráfico como es la puerta de acceso a la ENM de Carlos I (4.1.3), se ha podido ver, que al menos el tráfico rodado de la localidad de Marín, no causa niveles nocivos para la salud, aunque puede contribuir de manera considerable, ya que en todas las mediciones, de madrugada, los niveles para los tres tipos de clasificación (PM10, PM2,5 y PM1) son cercanos a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM10 y despreciables para el resto.

Sin embargo, las tomas realizadas en el balcón del edificio Isaac Peral (4.1.2), cercano al patrullero P-28 Tabarca y a las lanchas de instrucción, no han sido concluyentes.

En la primera (4.1.2.1), se comenzaron a registrar niveles considerablemente altos, estando por encima de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante las primeras 5 horas de la mañana, hasta caer a niveles muy bajos de madrugada.

En la segunda, sólo se logró obtener resultados durante las tres primeras horas, que al contrario de lo sucedido en la anterior, mostraba niveles considerados normales, de entre 10 y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10.

5.4 Personal y nivel de concentraciones

En las mediciones realizadas en interiores, no se ha podido establecer una relación directa entre la presencia de personas y niveles altos de partículas.

Lo que sí se puede concluir es que en los movimientos, como las entradas y salidas a una camareta (4.3.2.1), aula (4.3.3.1) o comedor (4.3.5.2), sí se producen aumentos notables en las concentraciones de PM10 y con menor impacto en las PM2,5 y las PM1, llegando a poder intuir horarios y rutinas de las personas que hacen uso de dichas instalaciones.

5.5 Líneas futuras

El tiempo disponible para realizar el TFG, sumado a la intensa rutina de los alumnos de la ENM, hace que queden algunos aspectos en los que hubiera sido interesante incidir hayan quedado sin cubrir.

El primero, es que ninguna medición realizada en exteriores ha coincidido con abundantes y prolongadas precipitaciones, por lo que no se ha podido comprobar que ocurre con el material particulado bajo estas condiciones, si aumenta o por el contrario disminuye, o si se dan episodios de inversión térmica o no y en caso afirmativo, si tienen la misma intensidad.

El segundo, es que no se ha podido concluir en qué medida afectan los motores de patrullero Tabarca y de las lanchas de instrucción a la concentración de partículas, por lo que sería necesario tomar muestras en dicho punto.

Por último, sería interesante contar con medios con una mayor cobertura para en el futuro poder realizar medidas capaces de abarcar todo el periodo de las salidas de lanchas y poder medir en compartimentos diferentes, desde los cuales, con los medios disponibles, no existía la posibilidad de recibir datos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Calidad del aire ambiente (exterior) y salud». [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accedido 19 de marzo de 2023).
- [2] «Partículas». <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/particulas.aspx> (accedido 19 de marzo de 2023).
- [3] «Empresa de soluciones de monitorización ambiental | Envira IOT». <https://enviraiot.es/> (accedido 30 de marzo de 2023).
- [4] «Material particulado atmosférico - Portal Ambiental de Andalucía». <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/atmosfera/emisiones-a-la-atmosfera/principales-contaminantes-atmosfericos/material-particulado> (accedido 30 de marzo de 2023).
- [5] «Enfermedades no transmisibles». <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases> (accedido 19 de marzo de 2023).
- [6] World Health Organization, «WHO global air quality guidelines». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- [7] «BOE-A-2023-2026». 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2023/01/25/pdfs/BOE-A-2023-2026.pdf>
- [8] L. González Gil, «Tema 4 Contaminación atmosférica».
- [9] «El amoníaco atmosférico, una amenaza que ya tiene rostro». <https://www.elindependiente.com/desarrollo-sostenible/2019/01/12/el-amoniac-atmosferico-una-amenaza-que-ya-tiene-rostro/> (accedido 30 de marzo de 2023).
- [10] «Toda a poboación galega respira aire nocivo para a saúde, segundo a normativa da OMS». <https://www.gciencia.com/medioambiental/poboacion-galega-aire-nocivo-saude-normativa-oms/> (accedido 30 de marzo de 2023).
- [11] «Cuentas de emisiones a la atmósfera por agregación de ramas de actividad (CNAE 2009) y Hogares como consumidores finales, sustancias contaminantes y periodo». https://ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p084/base_2010/serie/10/&file=01002.px&L=0 (accedido 29 de marzo de 2023).
- [12] «Informe de la calidad del aire en España 2021».
- [13] «Ranking del índice de calidad del aire mundial (ICA) | IQAir». <https://www.iqair.com/es/world-air-quality-ranking> (accedido 30 de marzo de 2023).
- [14] «NAAQS Table | US EPA». <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (accedido 19 de marzo de 2023).
- [15] «Precipitadores electrostáticos». https://www.quimica.es/enciclopedia/Precipitadores_electrost%C3%A1ticos.html (accedido 29 de marzo de 2023).

- [16] «Filtro de mangas: funcionamiento - Ingeniería Agroindustrial». <https://www.calero-group.com/filtro-de-mangas-funcionamiento/> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [17] «¿Qué es la norma Euro 6?» <https://noticias.coches.com/noticias-motor/euro-6/172545> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [18] «¿Qué es el filtro de partículas y para qué sirve? | RACE». <https://www.race.es/filtro-de-particulas> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [19] «Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)». [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (accedido 30 de marzo de 2023).
- [20] «Sistemas de Scrubbers | Brenntag». <https://www.brenntag.com/es-es/industrias/soluciones-para-emisiones-maritimas/sistemas-de-scrubbers/> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [21] «Inicio - MeteoGalicia». <https://www.meteogalicia.gal/web/inicio.action> (accedido 30 de marzo de 2023).
- [22] «Inversión Térmica.¿Qué es? ¿Cómo se produce? | Meteosojuela.es». <https://www.meteosojuela.es/inversion-termica-que-es-como-se-produce/> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [23] J. Nidzgorska-Lencewicz y M. Czarnecka, «Thermal Inversion and Particulate Matter Concentration in Wrocław in winter season», p. 13, dic. 2020.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

Este trabajo ha estado enfocado en la mejora de la calidad del aire, aspecto íntimamente relacionado con la salud y bienestar humano y con el cuidado de nuestro entorno.

El material en suspensión, como se menciona en los apartados 1.1 y 2.2.1, tiene un impacto relevante sobre las enfermedades respiratorias y coronarias. Puede causar irritación en ojos y vías aéreas y aquellas partículas de diámetro inferior, las PM_{2,5} y las PM₁, pueden acumularse en los pulmones, llegando a pasar al torrente sanguíneo en el intercambio de gases producido en los alveolos. Esto hace que algunas de ellas se acumulen en arterias, siendo capaces de dificultar la circulación y en casos extremos provocar infartos.

En cuanto a aspectos ambientales, si bien las principales fuentes de emisión no están relacionadas con actividades humanas, como el polvo sahariano o los aerosoles marinos, la mayor parte de estas partículas se concentran en grandes ciudades a causa de la contaminación (2.2). Por lo tanto, la reducción de los gases de efecto invernadero mediante el uso de energías más limpias para cuidar el medio ambiente, repercutirá de manera directa en la disminución del material en suspensión en las ciudades.

Por último, la búsqueda de elementos innovadores que permitan reducir las emisiones en los procesos industriales y en el transporte, como los tratados en el punto 2.4, conllevan un enorme esfuerzo económico al tejido empresarial español para poder adaptarse tanto a la legislación nacional como a la europea (2.3.2). Sin embargo, tiene una repercusión positiva en la salud de las personas y del medio ambiente, que aunque es más difícil de cuantificar monetariamente supone un ahorro significativo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En lo que se refiere a reflexiones éticas, cabe destacar que la OMS reconoce que el aire contaminado por sustancias de diámetro inferior a 10, 2,5 y 1 micra supone una carga considerable en las enfermedades y muertes causadas por la polución [6].

Por ello, es necesaria una mayor implicación de los gobiernos y del sector privado para dejar atrás energías en las que tengan lugar procesos de combustión y acelerar en la adopción e instalación de energías más limpias y así evitar que más personas fallezcan en el futuro debido a esta causa.

Este trabajo, cuyo objetivo ha sido conocer la calidad del aire del entorno de la ENM, aporta su grano de arena en la mejora de la salud de las personas y en el impacto de sustancias contaminantes sobre nuestra sociedad.

ANEXO III: CONTENIDO DEL TERCER ANEXO

A3.1 25 de enero 2023

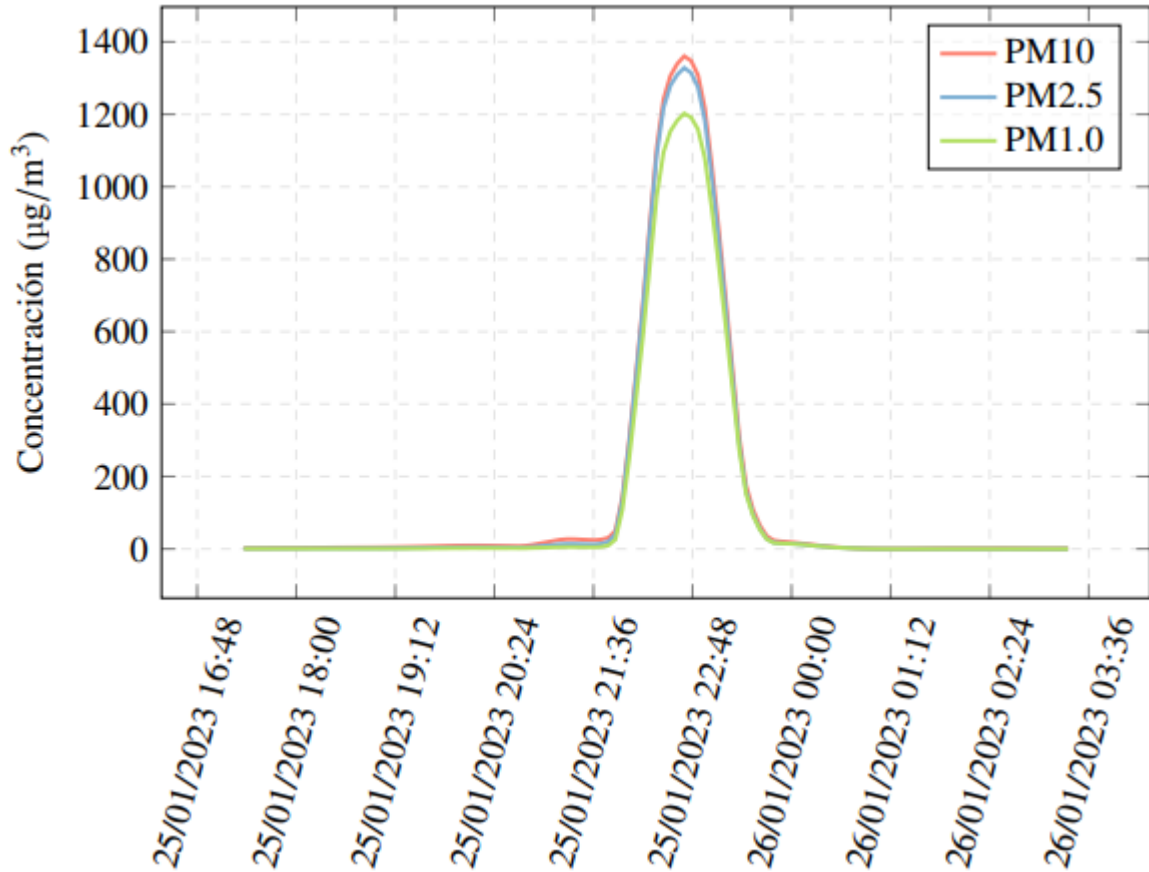


Figura A3-1 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (25 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.

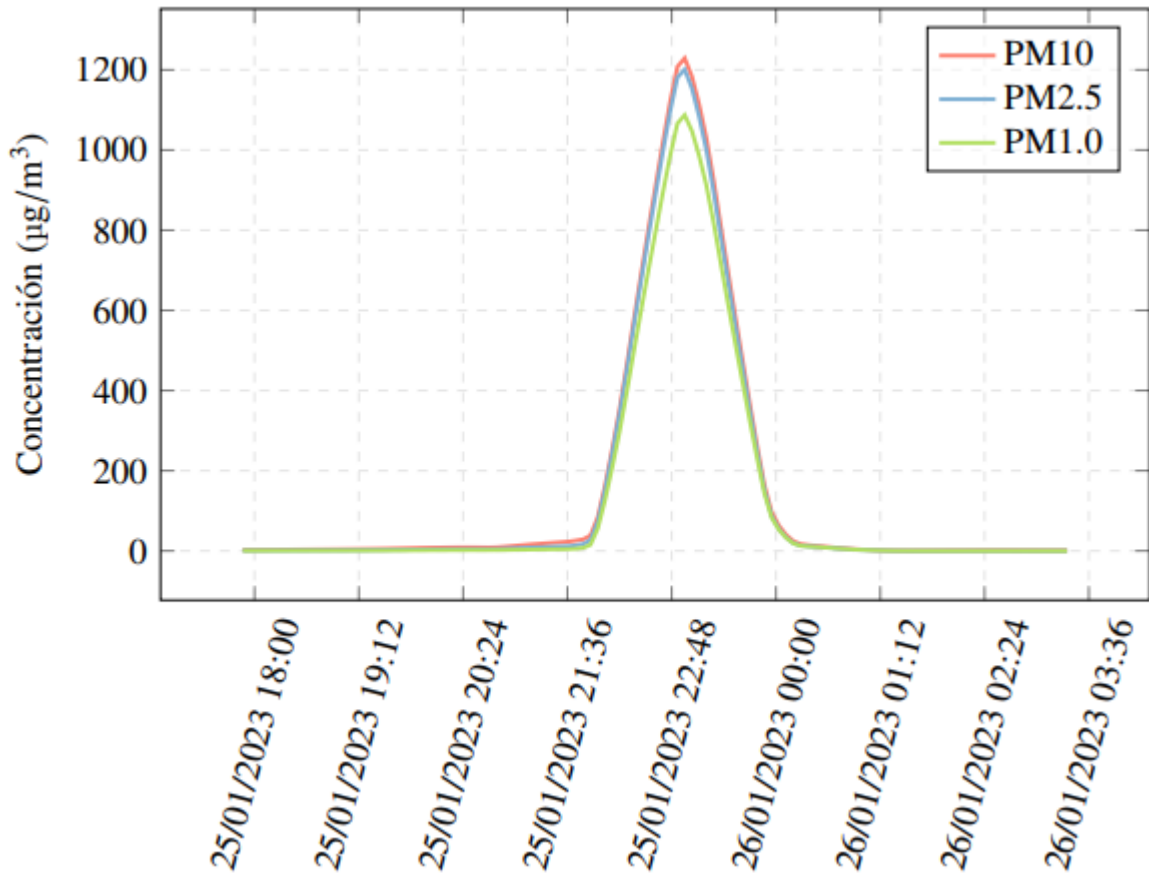


Figura A3-2 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (25 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.

A3.2 27 de enero 2023

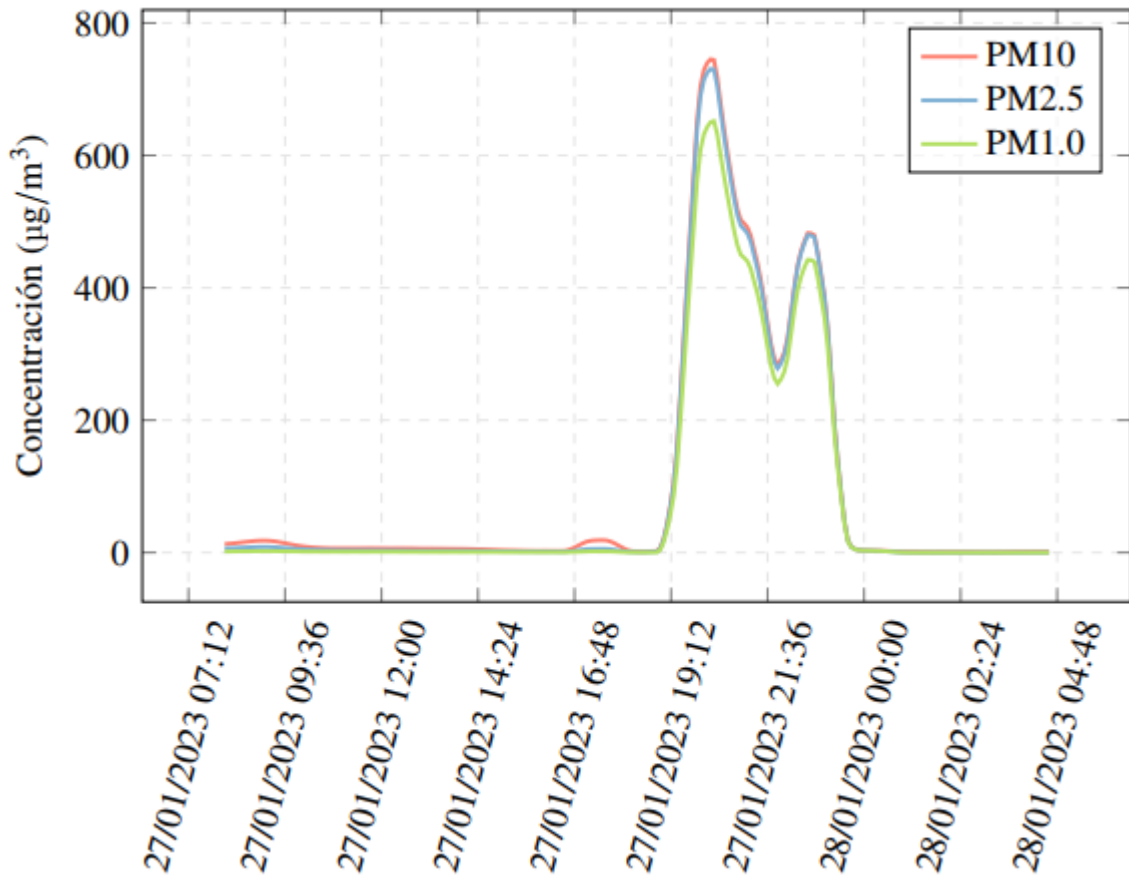


Figura A3-3 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.

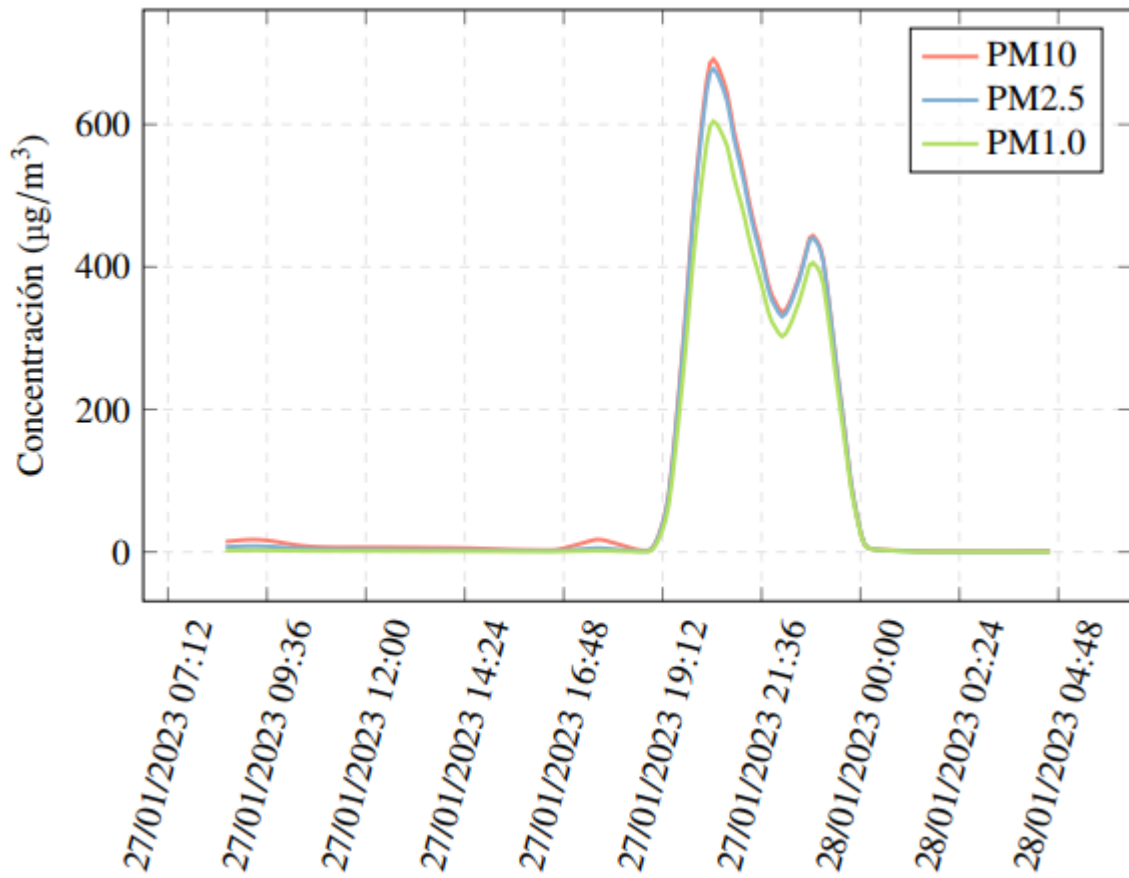


Figura A3-4 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (27 de enero) en el balcón del Francisco Moreno.

A3.3 2 de febrero 2023

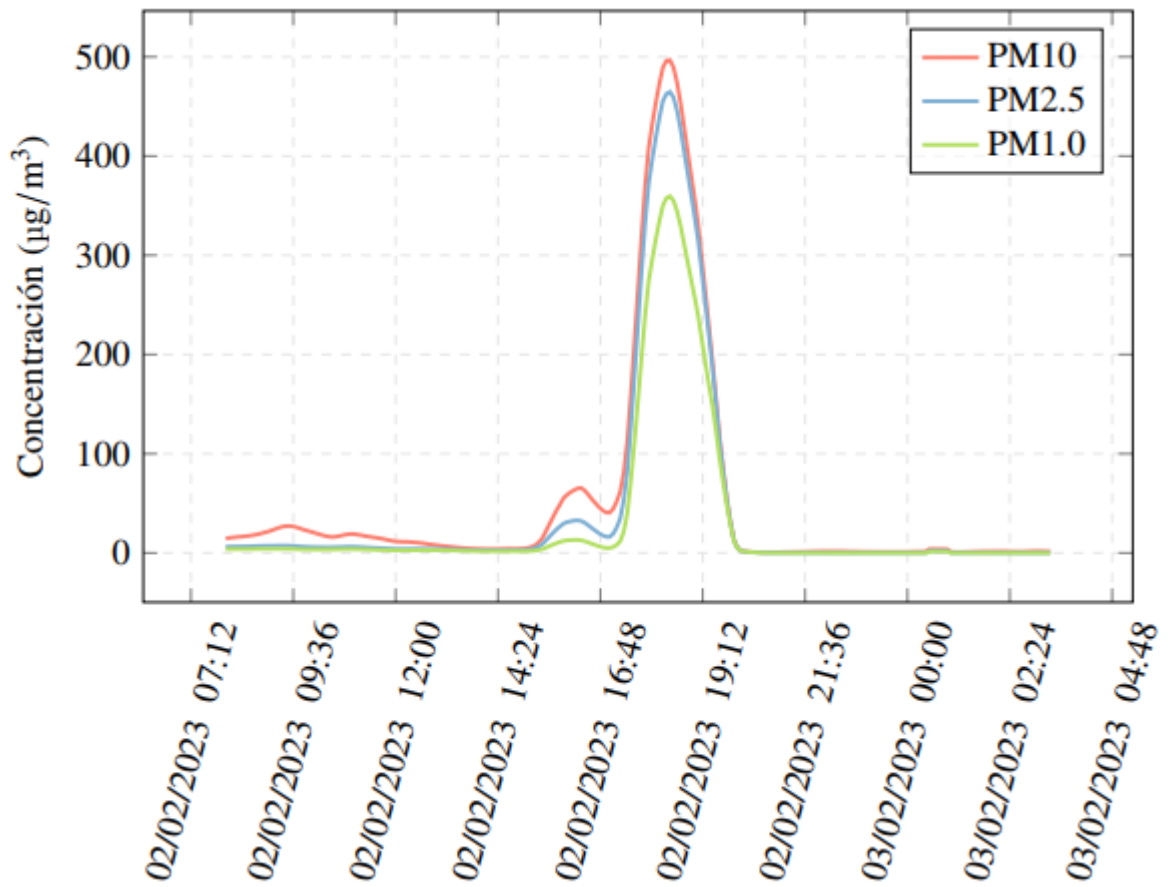


Figura A3-5 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

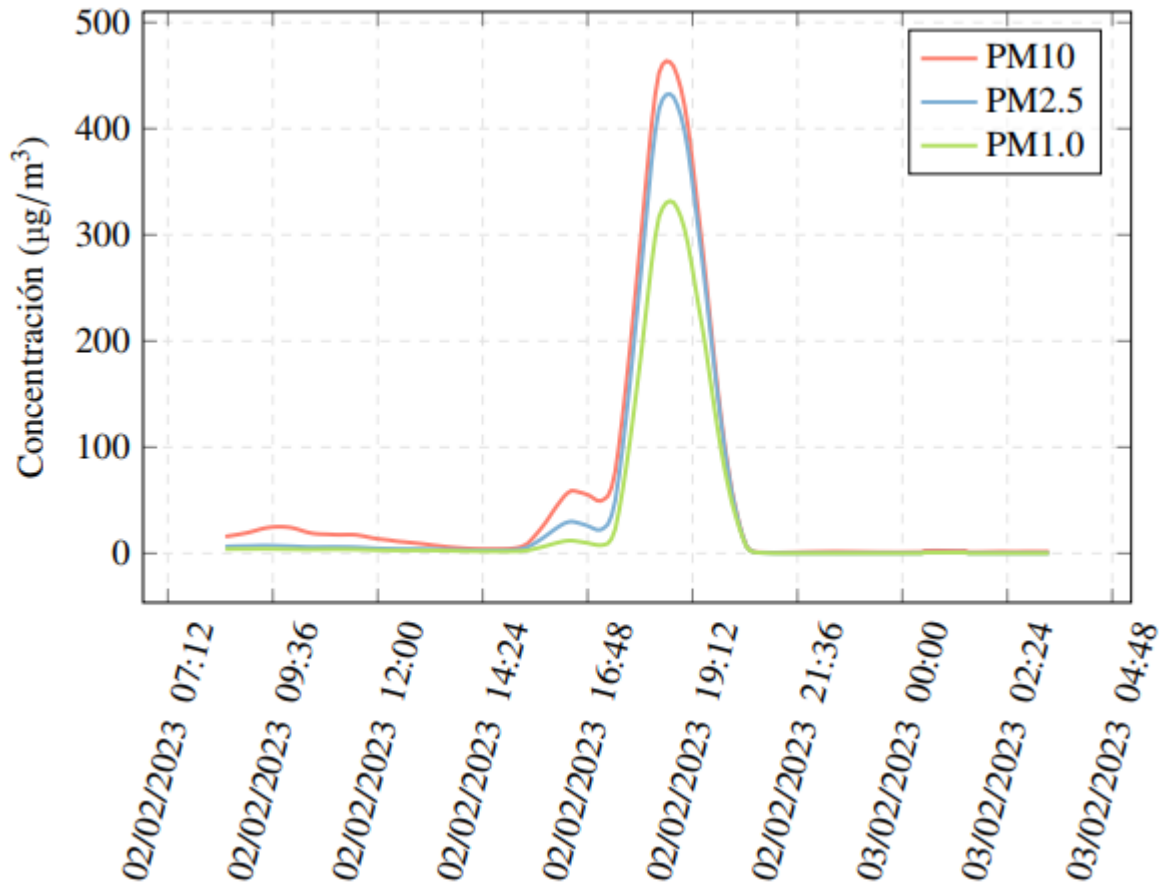


Figura A3-6 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (2 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

A3.4 3 de febrero 2023

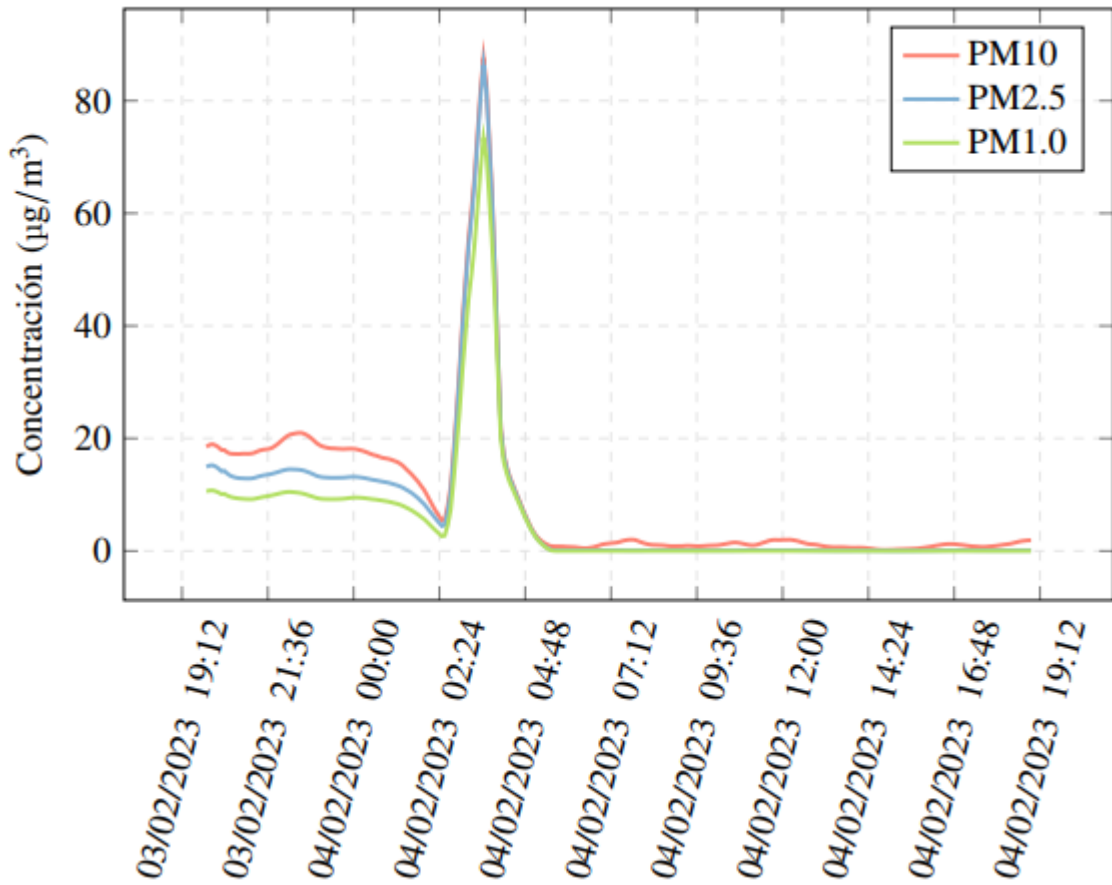


Figura A3-7 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

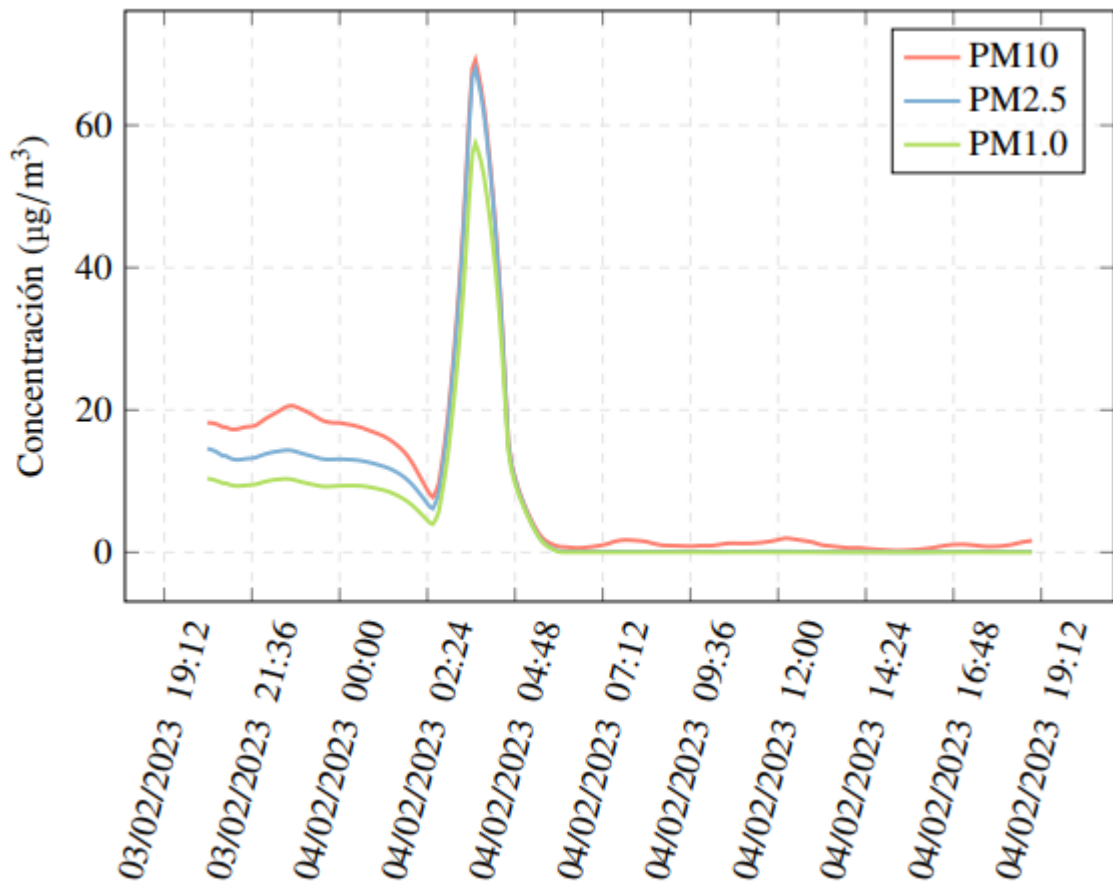


Figura A3-8 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (3 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

A3.5 7 de febrero 2023

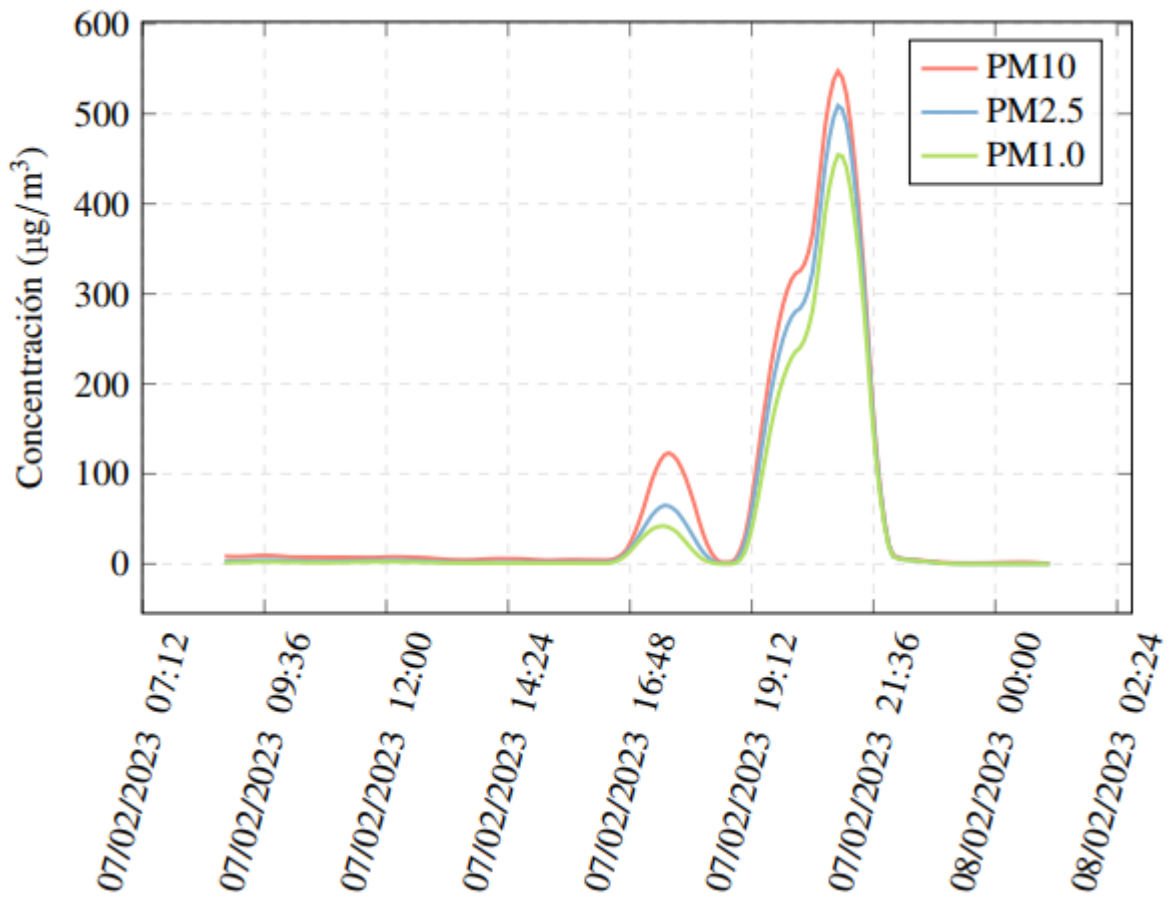


Figura A3-9 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

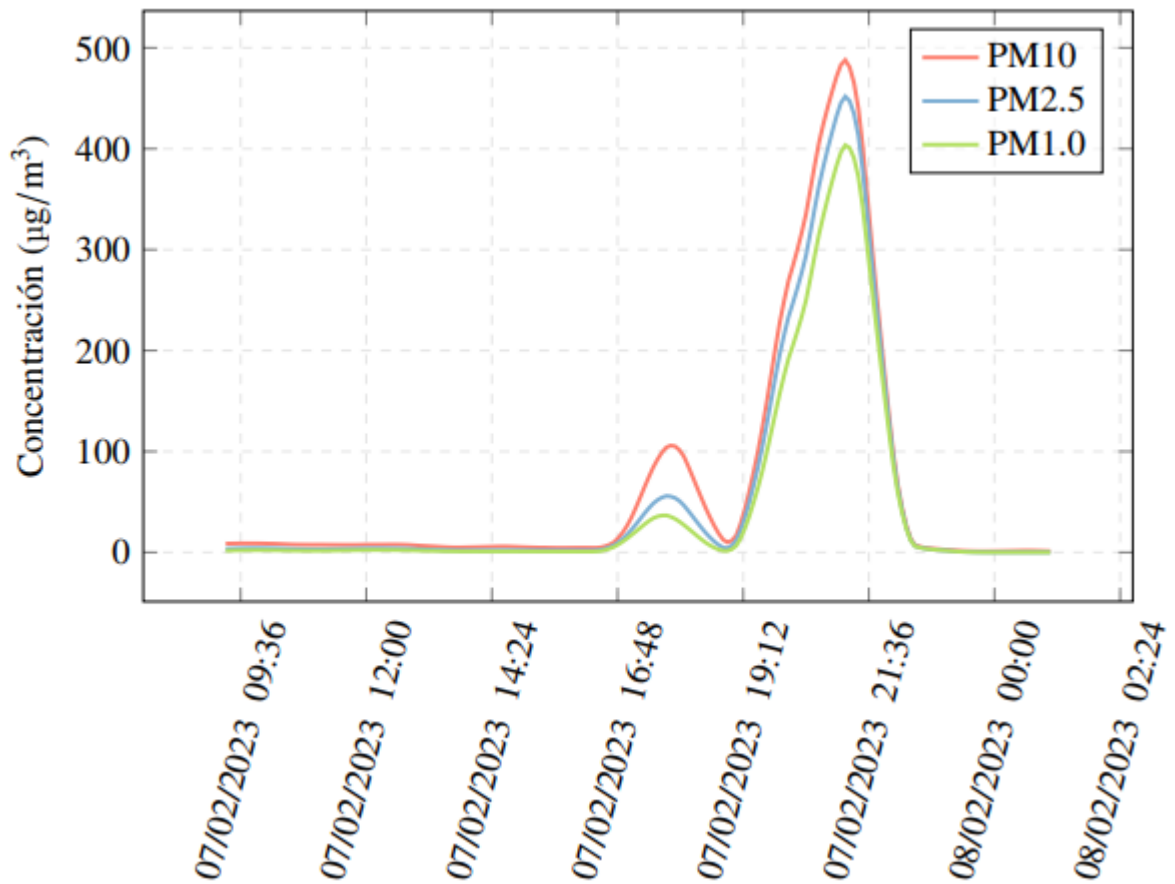


Figura A3-10 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (7 de febrero) en el balcón del Francisco Moreno.

A3.6 16 de febrero 2023

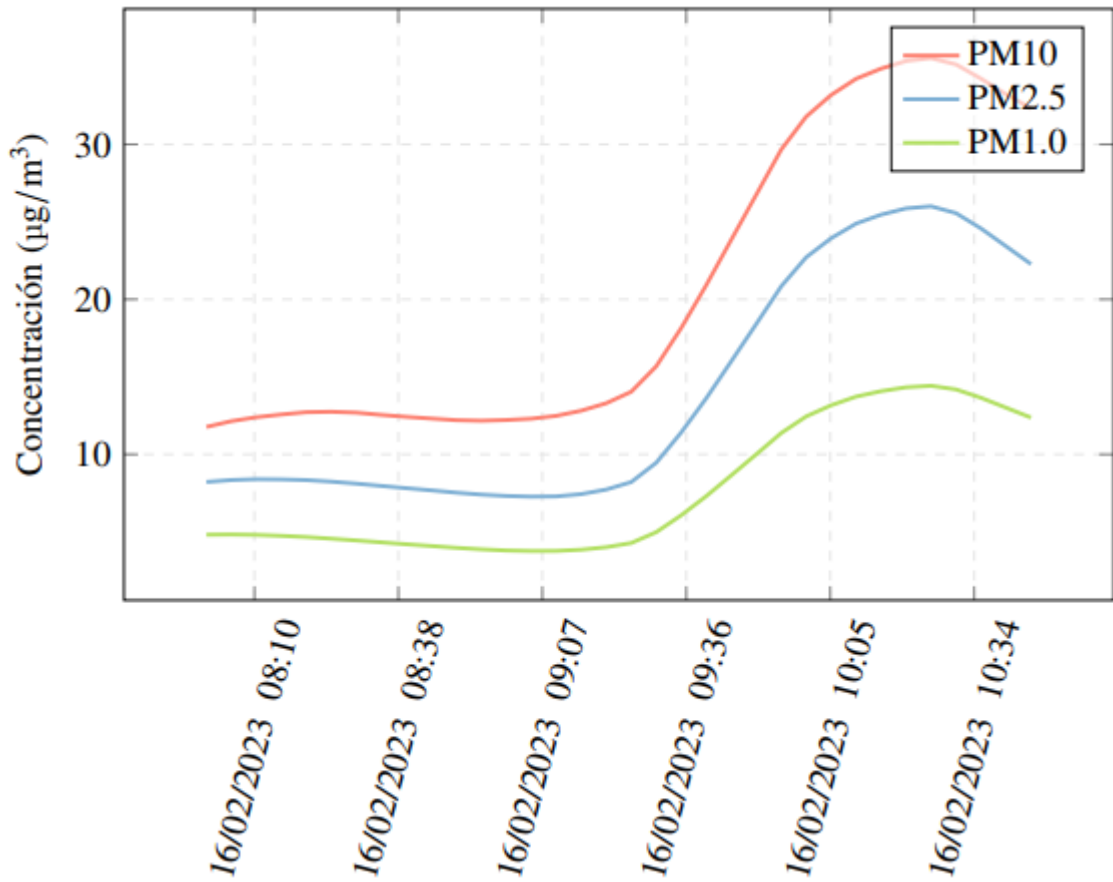


Figura A3-11 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (16 de febrero) en la cantina de marinería.

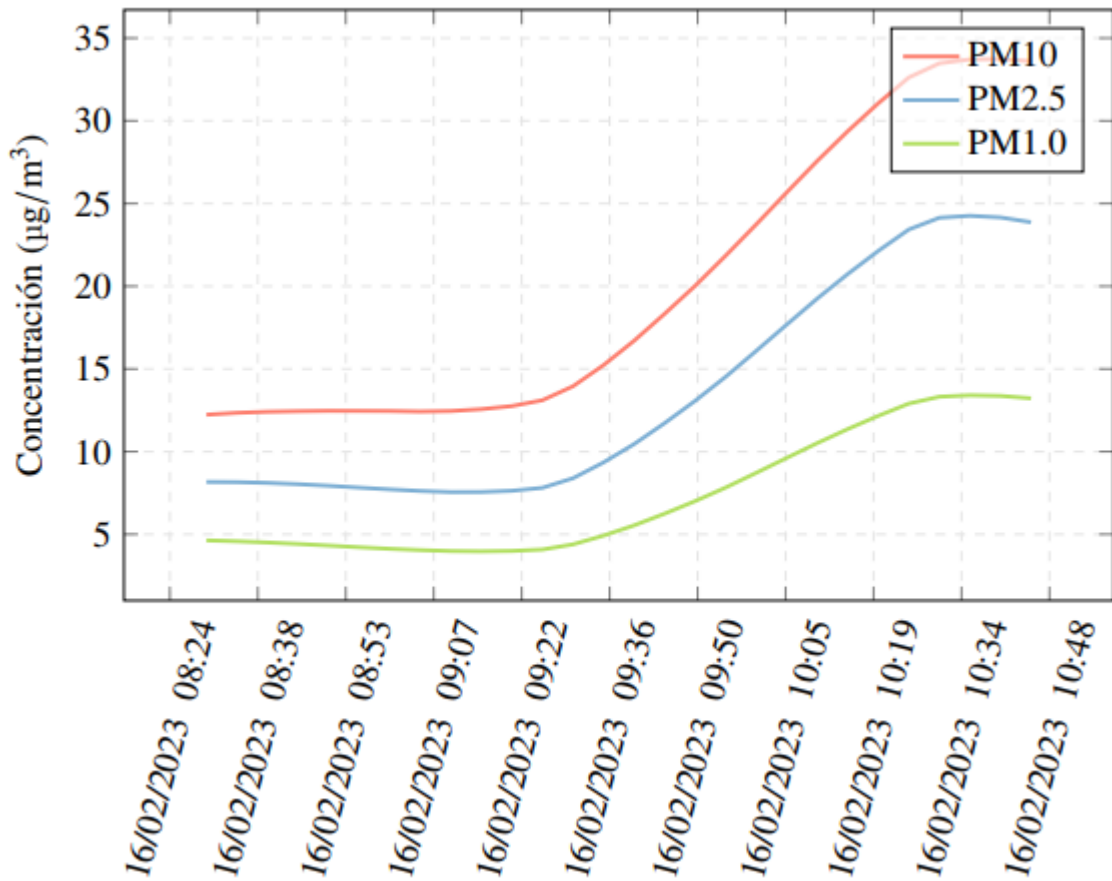


Figura A3-12 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (16 de febrero) en la cantina de marinería.

A3.7 21 de febrero 2023

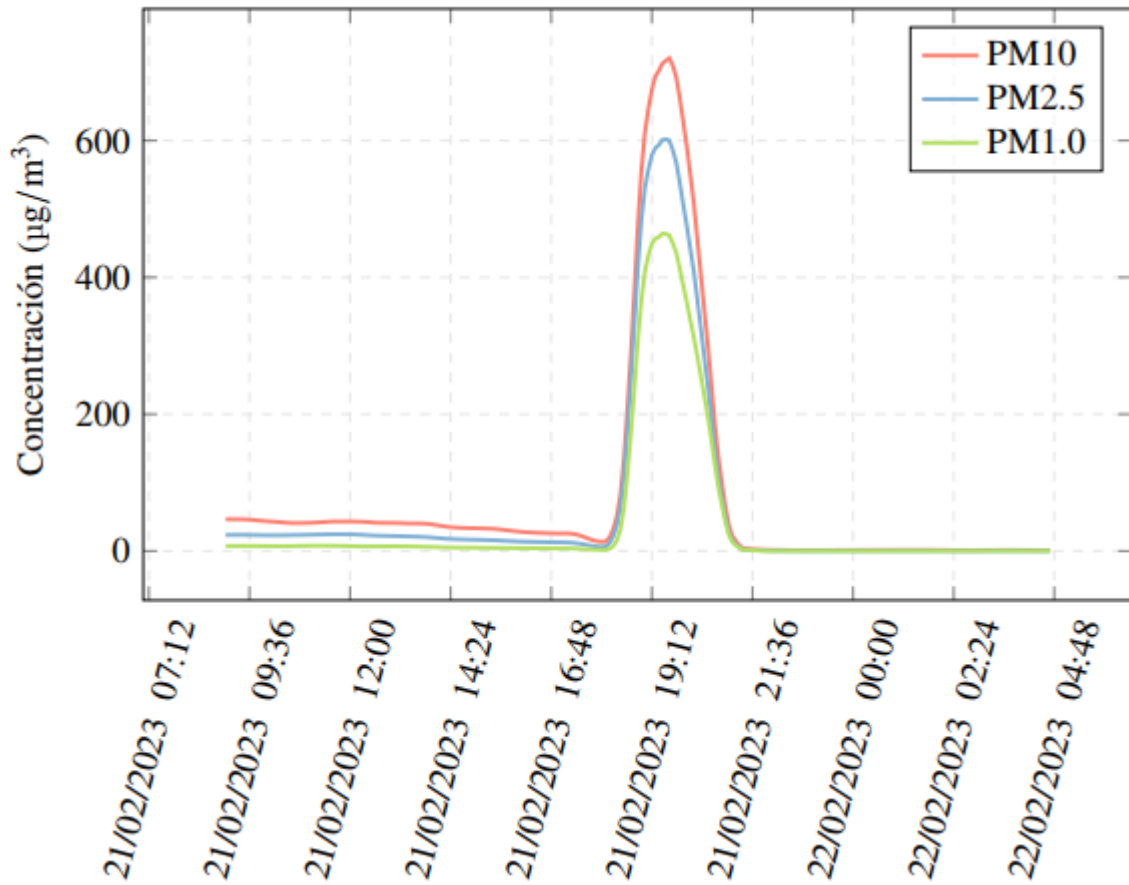


Figura A3-13 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

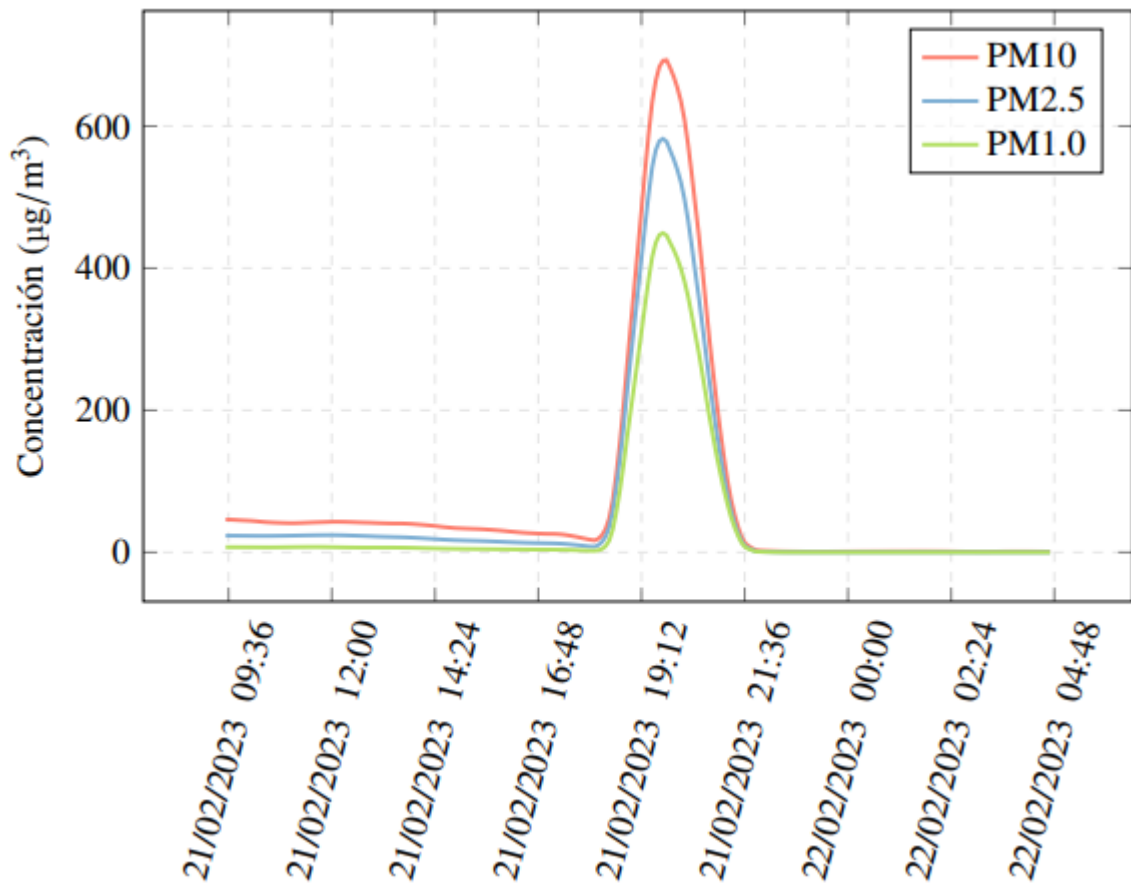


Figura A3-14 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (21 de febrero) en el balcón del Isaac Peral.

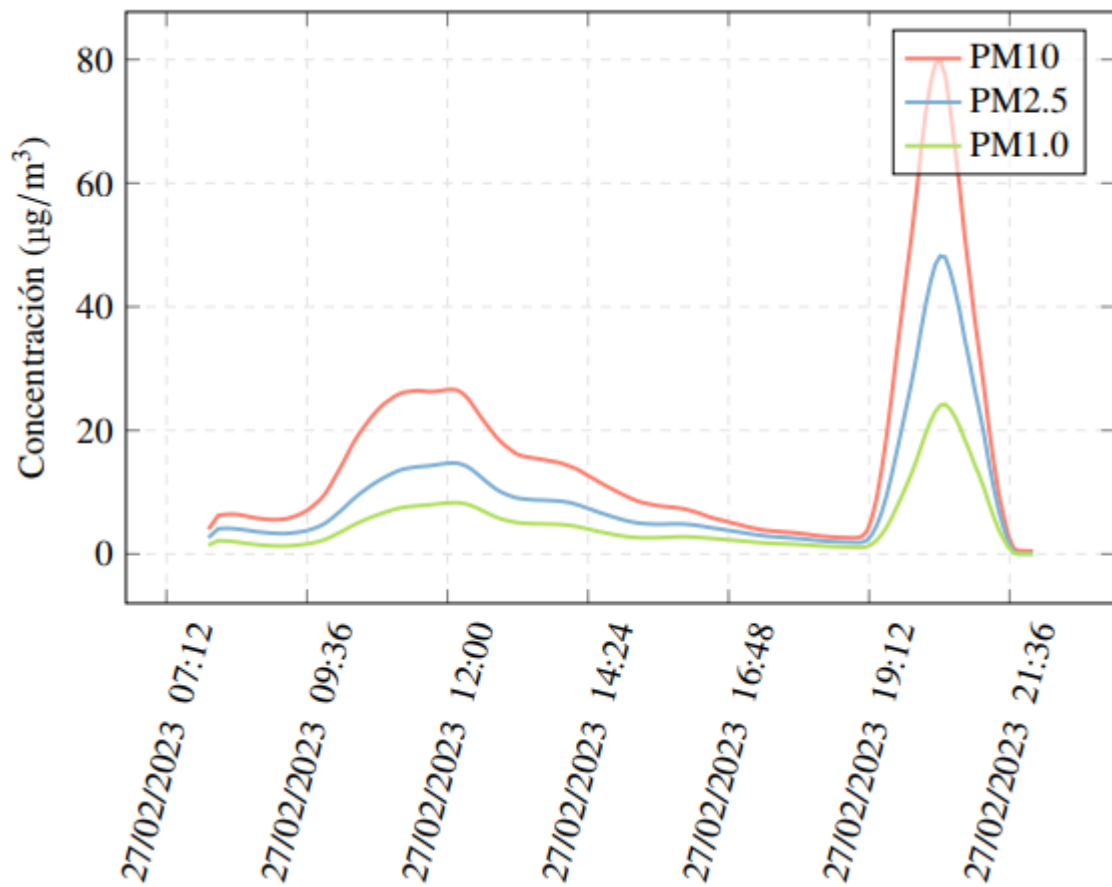


Figura A3-15 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (27 de febrero) en la cantina de marinería.

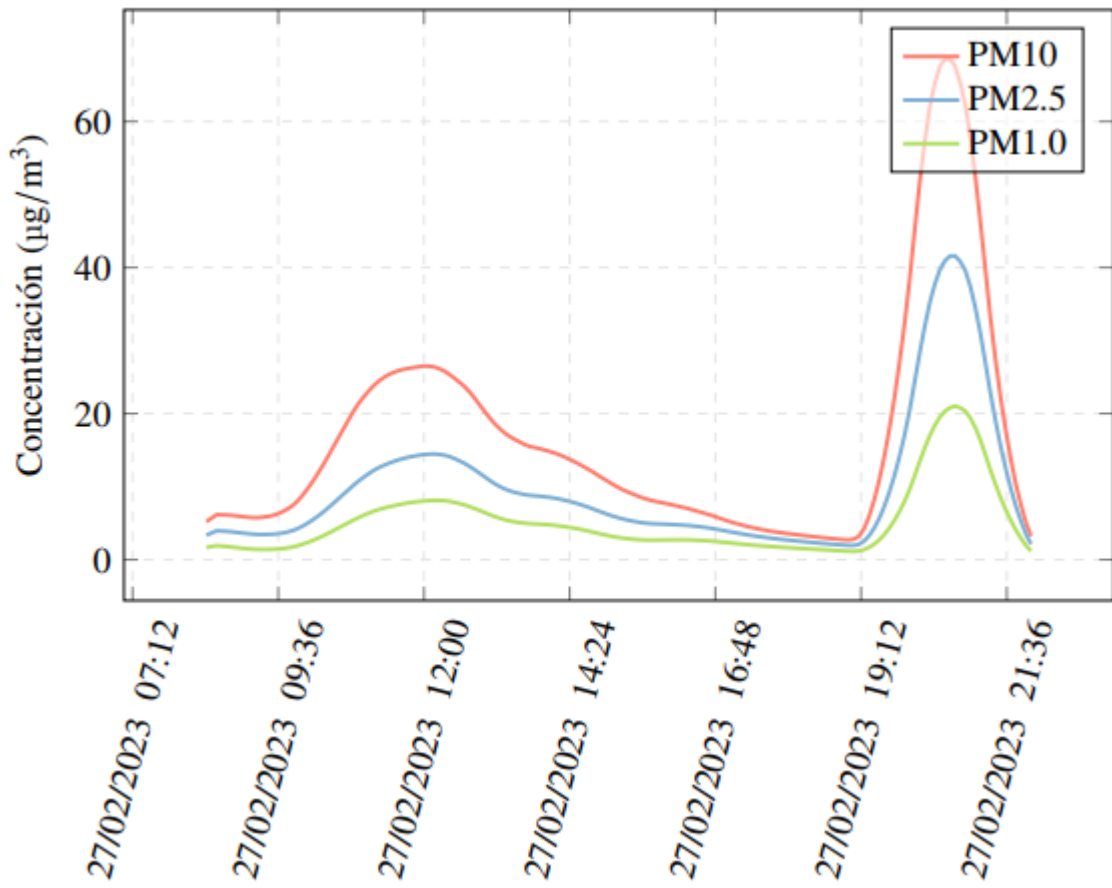


Figura A3-16 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (27 de febrero) en la cantina de marinería.

A3.9 2 de marzo 2023

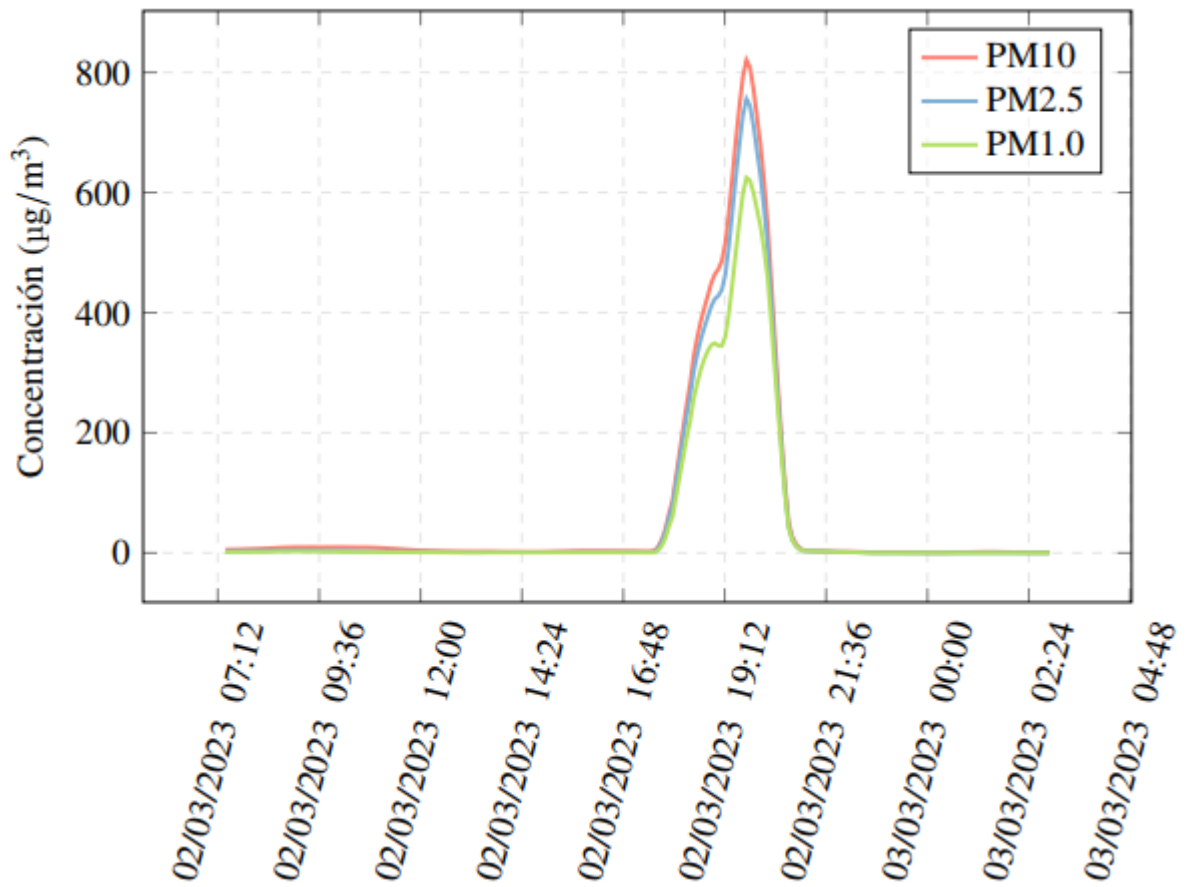


Figura A3-17 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (2 de marzo) en la puerta de Carlos I.

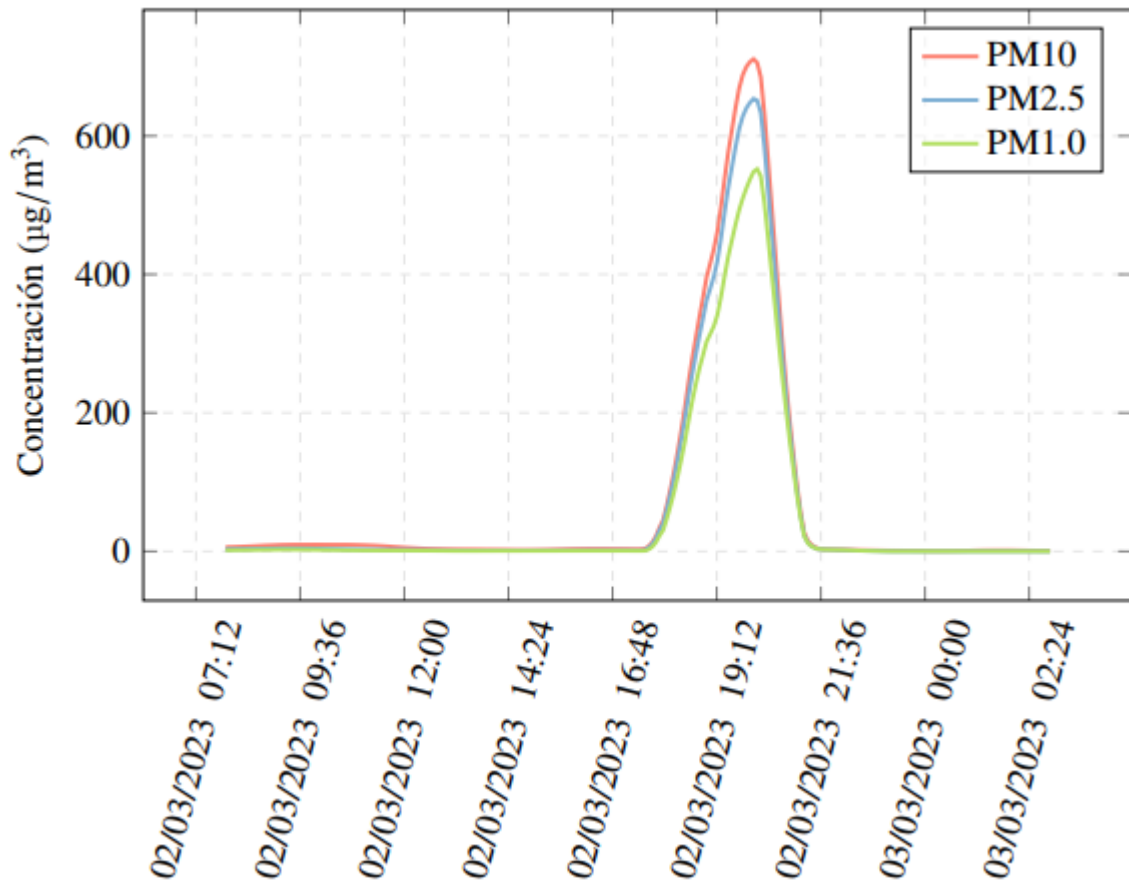


Figura A3-18 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (2 de marzo) en la puerta de Carlos I.

A3.10 13 de marzo 2023

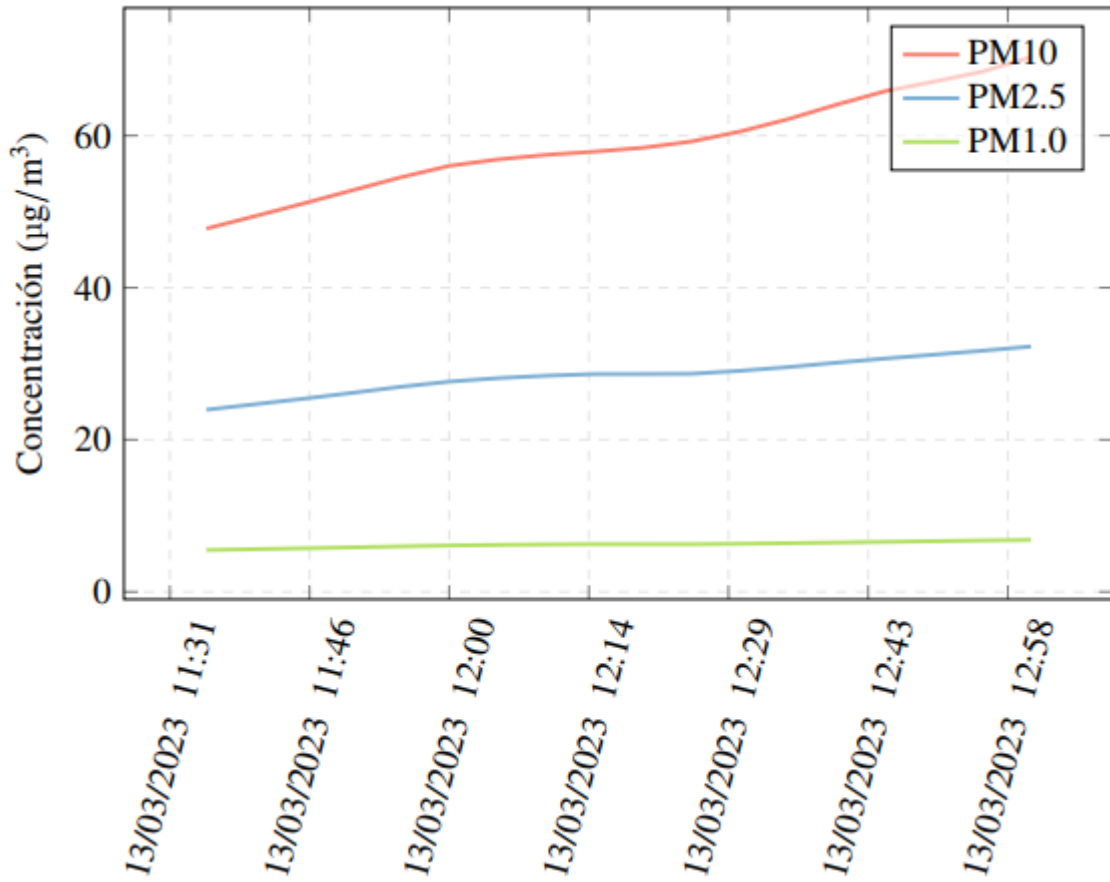


Figura A3-19 Niveles de partículas en suspensión, media 30 minutos (13 de marzo) en la lancha de instrucción.

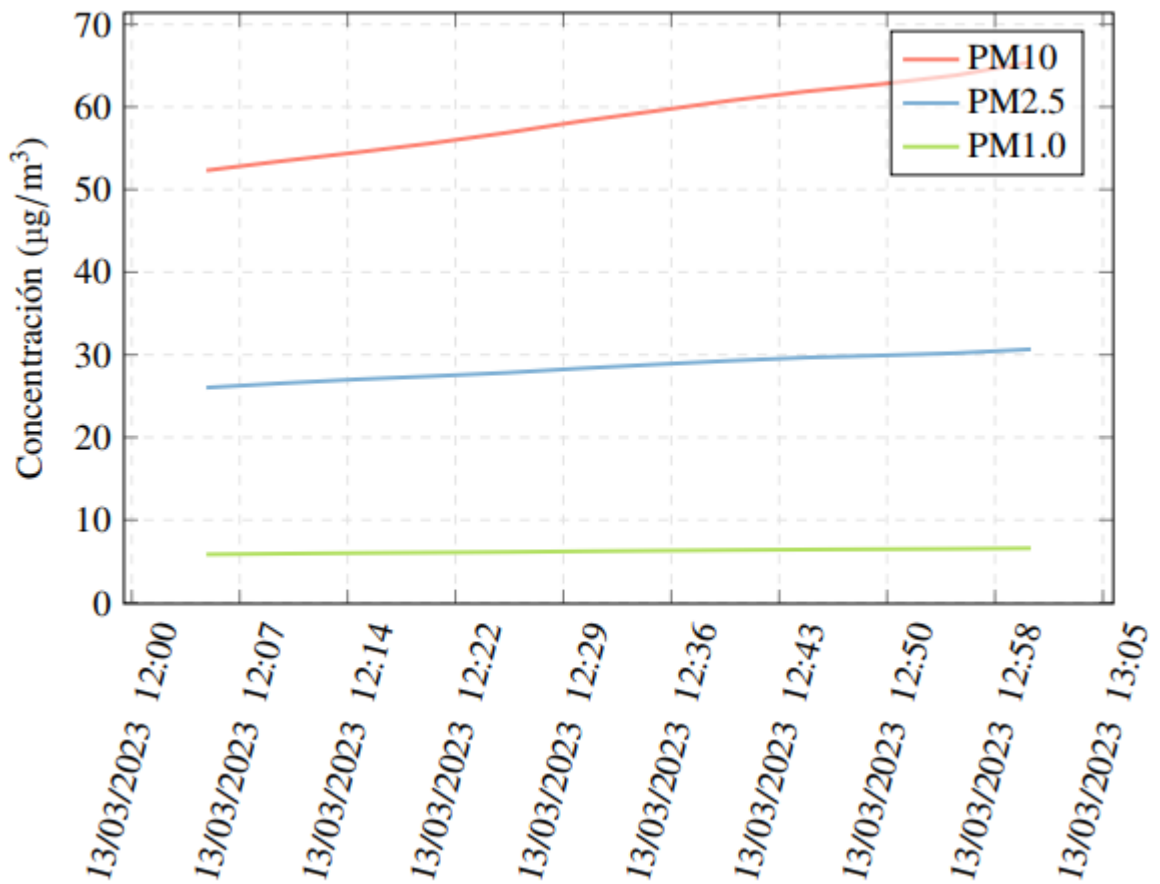


Figura A3-20 Niveles de partículas en suspensión, media 1 hora (13 de marzo) en la lancha de instrucción.