



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

ESTUDIO DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR EN EL EDIFICIO NUEVO  
DE FILOSOFÍA Y LETRAS: ANÁLISIS DE CONTAMINANTES Y  
EFECTIVIDAD DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN MECÁNICA

Título en inglés:

A STUDY ON AIR QUALITY IN THE NEW FACULTY OF PHILOSOPHY  
AND LETTERS: ANALYSIS OF POLLUTANTS AND EFFECTIVENESS  
OF THE MECHANICAL VENTILATION SYSTEM

Autora

Alicia Lou Puyo

Directora

Belén Zalba Nonay

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Universidad de Zaragoza-Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2026



## Agradecimientos

A Belén Zalba, mi tutora. Por su presencia constante, por su compromiso y seguimiento durante todo el trabajo. Porque su conocimiento del tema me ha enseñado muchísimo y ha sido de gran ayuda y utilidad a la hora de realizar este TFG.

Al Instituto de investigación de Ingeniería en Aragón (I3A) por la oportunidad que me ha brindado con esta beca para realizar el Trabajo Fin de Grado y porque me ha dado la posibilidad de conocer a muchísimos profesionales del sector.

A Miguel García-Monge, por ayudarme con todas las dudas que me han surgido, por estar siempre disponible y porque su trabajo ha facilitado mucho la realización de este TFG.

A mis amigos porque han estado conmigo durante todo este camino haciéndolo más llevadero y amable y porque no sería nada sin ellos.

A mi familia por apoyarme desde el principio de la carrera y porque siempre se han asegurado de animarme y recordarme de lo que soy capaz.

Y por último a Luleå, al destino y a toda la gente que conocí ahí, por enseñarme tanto sobre la vida y porque me considero la persona más afortunada del mundo por haber podido vivir esa experiencia que me cambió tanto y que llevaré siempre en el corazón.

## Resumen

Siendo conscientes de la importancia de la calidad de aire interior (CAI) para la salud de las personas y para asegurar el confort de quien está ocupando estos espacios interiores se estudia el nuevo edificio remodelado de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar este edificio académico para asegurar que los espacios están correctamente ventilados, que los niveles de contaminantes se mueven dentro de unos límites seguros y que cuando se producen aumentos de concentración de estos el sistema de ventilación es capaz de eliminarlos efectivamente para garantizar la salud y el confort de los estudiantes y trabajadores.

Este TFG se compone de varias fases. Se realizó un primer trabajo de documentación: CAI, salud (apartado 1.1) y ventilación en espacios cerrados (apartado 1.2); y lectura de trabajos previos realizados sobre la materia: Trabajos Fin de Estudios de otros estudiantes sobre contaminantes en edificios (apartado 1). De esta manera se puede contextualizar el problema y trabajar continuando las líneas de estudio de estos compañeros, concretamente de la facultad de Filosofía y Letras (apartado 1.3). Una vez leída la bibliografía respectiva al proyecto del edificio, se continuó recopilando información sobre sistemas de limpieza de aire (LA) y más concretamente de las presentes en Filosofía y Letras (apartado 1.4).

Después de este trabajo de búsqueda, se analizaron los resultados recogidos por los primeros 10 medidores MICA instalados en el edificio de Filosofía y Letras. Se estudiaron contaminantes presentes en el aire como los compuestos orgánicos volátiles totales, formaldehído, materia particulada, y se relacionaron con otros parámetros como el dióxido de carbono, temperatura o humedad.

Los resultados de estos primeros análisis dejaron en claro la conveniencia de instalar nuevos medidores capaces de medir otros contaminantes gaseosos y ubicarlos en espacios más representativos y útiles (apartado 3).

Tras estos primeros estudios se realizaron nuevos análisis con los medidores nuevos instalados capaces de medir dióxido de nitrógeno, ozono y monóxido de carbono enfatizando los problemas asociados al uso de purificadores de aire electrónicos y su posible problemática con la generación de ozono (apartado 4).

Los resultados de los análisis evidenciaron que el sistema de ventilación es insuficiente para la adecuada dilución de contaminantes. Asimismo, se detectó la presencia de ozono y compuestos orgánicos volátiles, probablemente asociados al uso de purificadores de aire electrónicos, contaminantes perjudiciales para la salud. Con estas observaciones se concluyó que no es adecuado reducir la ventilación, ya que el sistema de limpieza de aire solo elimina partículas y potencialmente puede generar contaminantes gaseosos. Por ello, se propone continuar su estudio en futuras líneas de investigación con el fin de prevenir posibles efectos adversos.

Para la realización de este trabajo se ha contado con la ayuda de una beca del Programa IMPULSO del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A).

Trabajo Fin de Grado

En la Figura 1 se representa de manera contextual el esquema resumen del trabajo, donde se muestran los temas tratados por capítulos, la metodología empleada y las conclusiones a las que se ha llegado.

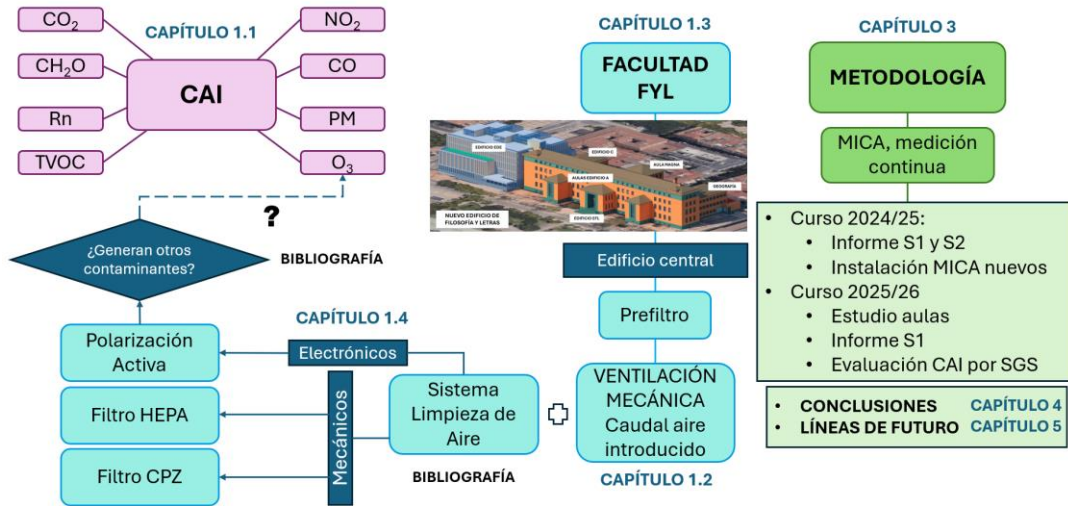


Figura 1. Resumen organización del trabajo. Elaboración propia.

## Tabla de contenidos

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	2
Tabla de contenidos.....	4
Glosario .....	5
Listado de figuras.....	7
Listado de tablas .....	11
Relación con los ODS .....	12
1. Introducción y revisión bibliográfica.....	13
1.1 CAI: Calidad del Aire Interior .....	13
1.2 Ventilación de espacios interiores.....	16
1.3 Situación del edificio .....	18
1.4 Air cleaners .....	20
2. Objetivo.....	24
3. Medición en continuo de CAI .....	24
3.1 Comparación e introducción a los distintos sensores .....	25
3.2 Situación de los sensores en FyL.....	25
3.3 Análisis de datos anteriores al curso 2025/2026 .....	26
3.4 Análisis de mejora de la medición en continuo .....	29
3.5 Análisis de datos del curso 2025/2026 .....	30
3.6 Medición de ozono .....	33
3.7 Evaluación de CAI por SGS .....	34
4. Conclusiones.....	35
5. Líneas de futuro .....	38
Bibliografía .....	39
Anexos .....	42
Anexo I: CAI en el edificio de FyL en el curso 2024/2025 .....	42
Anexo II: Ensayos de análisis de sensores de las aulas.....	57
Anexo III: CAI en el edificio de FyL en el primer semestre del curso 2025/2026 .....	88
Anexo IV: Selección de aulas para el estudio de CAI de SGS.....	102

## Glosario

### C

CADR: “Clean Air Delivery Rate”

CAI: Calidad de Aire Interior

CCD: (ventilación) Continua, Cruzada y Distribuida

CO: monóxido de carbono

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

CPZ: Carbón Activo, Permanganato de potasio, Zeolita

COV/TVOC: Compuestos Orgánicos Volátiles

### E

EDE: Edificio Departamental

EFL: Edificio Central

ESP: Precipitación electrostática

### F

FyL: Filosofía y Letras

### G

GO AQS: Global Open Air Quality Standards

### H

HEPA: “High Efficiency Particulate Air”, Filtro de Aire de Alta Eficacia para Partículas

HVAC: “Heating, Ventilation and Air Conditioning”, Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado

### I

IDA: “Indoor Air”

### L

LA: limpieza de aire

### N

N<sub>2</sub>: nitrógeno

NOx: óxidos de nitrógeno

## Trabajo Fin de Grado

### O

O<sub>3</sub>: ozono

ODA: “Outdoor Air”

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OH: hidróxido

OMS: Organización Mundial de la Salud

### P

PCO: Oxidación catalítica

PM: materia particulada

### R

RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios

Rn: Radón

r: coeficiente de correlación (Pearson)

### S

SOA: “Secondary Organic Aerosols”, Aerosoles orgánicos secundarios

### U

UTA: Unidad de Tratamiento de Aire

## Listado de figuras

Figura 1. Resumen organización del trabajo. Elaboración propia.....	3
Figura 2. ODS relacionados al trabajo .....	12
Figura 3. Adaptado de Campano, M. A., Fernández-Agüera, J., & Sendra, J. J. (Eds.), Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: Estrategias de aplicación práctica (2023, p. 84). .....	13
Figura 4. Análisis sobre calidad de aire interior y ventilación en industria: caso de estudio del sector textil (Gimeno Sobreviela, 2024). Modificación y traducción de Paula Aillón- García (Arquitecta PhD) para el libro Edificios y Salud. Reinventar el hábitat pensando en la salud de las personas.....	15
Figura 5. Bloques de la nueva Facultad de Filosofía y Letras.....	18
Figura 6. Dispositivo de control en cada aula. Pág 73 [4] .....	20
Figura 7. Sistema de filtración por Polarización Activa. Fuente: Aire Limpio (2019, p. 7)...	23
Figura 8. Porcentaje de tiempo por concentración de CO <sub>2</sub> por meses. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	27
Figura 9. Porcentaje de tiempo por concentración de TVOC por sensor. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	27
Figura 10. Porcentaje de tiempo por concentración de CH <sub>2</sub> O por mes del aula A3.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	28
Figura 11. Porcentaje de tiempo por concentración de CH <sub>2</sub> O por mes del aula A2.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	28
Figura 12. Porcentaje de tiempo por concentración de CH <sub>2</sub> O en junio en todo el periodo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	28
Figura 13. Porcentaje de tiempo por concentración de CH <sub>2</sub> O en junio en periodo lectivo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	29
Figura 14. Porcentaje de tiempo por concentración de CO <sub>2</sub> por sensor. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	32
Figura 15. Porcentaje de tiempo por concentración de TVOC por sensor. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	32
Figura 16. Histórico de O <sub>3</sub> del 15 de septiembre al 5 de diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	33
Figura 17. Evolución del CO <sub>2</sub> en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre .....	44
Figura 18. Porcentaje por equipo de concentración de CO <sub>2</sub> por franjas .....	44
Figura 19. Evolución de temperatura en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre .....	45
Figura 20. Evolución de TVOCs en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre .....	45
Figura 21. Porcentaje por equipo de concentración de TVOCs por franjas .....	46
Figura 22. Evolución de formaldehído en los 5 sensores MICA PLUS entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre .....	46
Figura 23. Relación concentración de formaldehído y temperatura para el aula A3.2 .....	47
Figura 24. Relación concentración de formaldehído y humedad para el aula A3.2 .....	47

Figura 25. Evolución de la materia particulada PM1 en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre .....	47
Figura 26. Evolución de CO2 en los 9 sensores entre el 20 de enero y el 9 de mayo .....	49
Figura 27. Porcentaje por equipo de concentración de CO2 por franjas .....	50
Figura 28. Evolución de temperatura en los 9 sensores entre el 20 de enero y el 9 de mayo .....	50
Figura 29. Porcentaje por equipo de concentración de T <sup>a</sup> por franjas.....	51
Figura 30. Evolución de TVOCs en los 10 sensores entre el 20 de enero y el 9 de mayo....	51
Figura 31. Porcentaje por equipo de concentración de TVOCs por franjas .....	52
Figura 32. Evolución de formaldehído en los 5 sensores MICA Plus entre el 20 de enero y el 9 de mayo.....	52
Figura 33. Correlación entre formaldehído y temperatura en el aula A3.2 .....	53
Figura 34. Correlación entre formaldehído y humedad en el aula A3.2 .....	53
Figura 35. Porcentaje de tiempo por concentración de CH2O por mes del aula A3.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	53
Figura 36. Porcentaje de tiempo por concentración de CH2O por mes del aula A2.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	54
Figura 37. Correlación entre CH2O y T <sup>a</sup> para el aula A2.2 en el mes de junio a agosto de 2025.....	54
Figura 38. Porcentaje de tiempo por concentración de CH2O en junio en todo el periodo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	55
Figura 39. Porcentaje de tiempo por concentración de CH2O en junio en horario lectivo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	55
Figura 40. Evolución de PM1 en los 5 sensores MICA Plus entre el 20 de enero y el 9 de mayo .....	56
Figura 41. Histórico CO2 de 10:20 a 12:21 .....	59
Figura 42. Histórico TVOC de 10:20 a 12:21 .....	59
Figura 43. Histórico formaldehído de 10:20 a 12:21 .....	59
Figura 44. Histórico de O3 de 9:01 a 10:38 .....	61
Figura 45. Histórico de CO2 de 9:01 a 10:38. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	61
Figura 46. Histórico CO2 de 8:20 a 10:35.....	63
Figura 47. Histórico TVOC de 8:20 a 10:35.....	63
Figura 48. Histórico formaldehído de 8:20 a 10:35.....	64
Figura 49. Histórico O3 de 8:20 a 10:35.....	64
Figura 50. Histórico de CO2 de 9:08 a 10:08 .....	66
Figura 51. Histórico de TVOC de 9:08 a 10:08 .....	66
Figura 52. Histórico de formaldehído de 9:08 a 10:08 .....	66
Figura 53. Figura 3. Histórico de O3 de 9:08 a 10:08 .....	67
Figura 54. Histórico de CO2 de 9:00 a 9:42 cuando deja de transmitir .....	69
Figura 55. Histórico de temperatura de 9:00 a 9:42 cuando deja de transmitir .....	69
Figura 56. Histórico de formaldehído de 9:00 a 9:42 cuando deja de transmitir.....	69
Figura 57. Histórico de temperatura de 10:29 a 12:27 .....	72
Figura 58. Histórico de CO2 de 10:29 a 12:27 .....	72
Figura 59. Histórico de formaldehído de 10:29 a 12:27 .....	72
Figura 60. Histórico PM de 10:29 a 12:27.....	72



## Trabajo Fin de Grado

Figura 61. Histórico de CO <sub>2</sub> de 8:28 a 10:30 .....	78
Figura 62. Histórico de T <sup>a</sup> de 8:28 a 10:30.....	78
Figura 63. Histórico de TVOC de 8:28 a 10:30 .....	78
Figura 64. Histórico de formaldehído de 8:28 a 10:30 .....	79
Figura 65. Histórico de CO <sub>2</sub> de 8:34 a 10:19 .....	80
Figura 66. Histórico de TVOC de 8:34 a 10:19 .....	81
Figura 67. Histórico de formaldehído de 8:34 a 10:19 .....	81
Figura 68. Histórico de CO <sub>2</sub> de 10:27 a 11:56 .....	83
Figura 69. Histórico de TVOC de 10:27 a 11:56 .....	83
Figura 70. Histórico de formaldehído de 10:27 a 11:56 .....	83
Figura 71. Histórico de NO <sub>2</sub> de 8:56 a 9:36.....	85
Figura 72. Histórico de O <sub>3</sub> de 8:56 a 9:36 .....	85
Figura 73. Relación O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> en el periodo del 14 al 17 de octubre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	86
Figura 74. Histórico de CO <sub>2</sub> de 10:18 a 12:17	Figura 75. Histórico de TVOC de 10:18 a 12:17
88	88
Figura 76. Histórico de formaldehído de 10:18 a 12:17 .....	88
Figura 77. Histórico CO <sub>2</sub> en las aulas seleccionadas. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	89
Figura 78. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CO <sub>2</sub> y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	89
Figura 79. Histórico TVOC en las aulas seleccionadas. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	90
Figura 80. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de TVOC y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	91
Figura 81. Relación Formaldehído-Temperatura en aula A3.2 del 1 de enero de 2025 – 7 de noviembre de 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	91
Figura 82. Relación Formaldehído-Temperatura en aula A2.2 del 1 de enero de 2025 – 7 de noviembre de 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	92
Figura 83. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CH <sub>2</sub> O del A3.2 por mes en 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	92
Figura 84. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CH <sub>2</sub> O del A2.2 por mes en 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	92
Figura 85. Comparación de concentración de CH <sub>2</sub> O para el mes de junio tomando todo el periodo vs únicamente en periodo lectivo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	93
Figura 86. Histórico CH <sub>2</sub> O en las aulas seleccionadas de septiembre a diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García- Monge .....	93
Figura 87. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CH <sub>2</sub> O de septiembre a diciembre y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	93
Figura 88. Histórico de O <sub>3</sub> del 15 de septiembre al 5 de diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	94
Figura 89. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de O <sub>3</sub> y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	95
Figura 90. Relación entre O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> el 4 de septiembre en el aula A3.1. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	96

Trabajo Fin de Grado

Figura 91. Correlación O3 vs NO2 en aula A4.3. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge ..	96
Figura 92. Histórico de NO2 del 15 de septiembre al 5 de diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	96
Figura 93. Histórico de O3 exterior en Zaragoza del 15 de septiembre al de 10 de noviembre .....	97
Figura 94. O3 interior del 15 de septiembre al 10 de noviembre del aula A0.4 y A2.3 respectivamente.....	97
Figura 95. Relación O3 y TVOC aula A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	98
Figura 96. Correlación O3 y CH2O en A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge .....	98
Figura 97. Correlación O3 y PM10 en A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge.....	98
Figura 98. Relación O3 vs Temperatura en A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge ..	99
Figura 99. Histórico O3 del 15 de diciembre al 5 de enero en la sala de colaboradores del I3A. Fuente: MyinBiot .....	100
Figura 100. Histórico de concentración de CO2 en A3.1 el 17 de septiembre .....	100
Figura 101. Histórico de concentración de CO2 en A3.1 el 14 de octubre .....	101
Figura 102. Histórico de concentración de CO2 en A3.1 el 17 de noviembre .....	101
Figura 103. Histórico de concentración de CO2 en A2.2 el 17 de septiembre .....	101
Figura 104. Histórico de concentración de CO2 en A2.2 del 20 al 22 de octubre .....	102
Figura 105. Histórico de concentración de CO2 en A4.2 del 11 al 15 de noviembre .....	102
Figura 106. Histórico de concentración de CO2 en C1.2 del 17 de septiembre .....	102
Figura 107. Plano edificios de la facultad de FyL. Fuente: Planos de la Facultad. <a href="https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad">https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad</a> .....	103
Figura 108. Plano Pabellón A en la planta 3. Fuente: Planos de la Facultad. <a href="https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad">https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad</a> .....	103
Figura 109. Planta 1 del Pabellón A. Fuente: Planos de la Facultad. <a href="https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad">https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad</a> .....	106
Figura 110. Planta 2 del Pabellón A. Fuente: Planos de la Facultad. <a href="https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad">https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad</a> .....	106
Figura 111. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de CO2 en el aula A3.1 y A2.2.....	107
Figura 112. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de CO2 en el aula C1.1 .....	107
Figura 113. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de TVOC y CH2O en el aula A3.1.....	108
Figura 114. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de TVOC y CH2O en el aula C1.1 .....	109
Figura 115. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de TVOC y CH2O en el aula A2.2.....	110

## Listado de tablas

Tabla 1. Valores de límites para los distintos contaminantes presentes en el aire. Elaboración propia a partir de guías de la OMS, GO AQS y la norma UNE-EN 16798.....	16
Tabla 2. Concentración de CO <sub>2</sub> por encima de la concentración en el aire exterior. Fuente: RITE (BOE, 2007, núm. 207, Sección 1, pp. 35931-35984). .....	17
Tabla 3. Clasificación del aire exterior (ODA). Fuente: Universidad de Zaragoza, Unidad Técnica de Construcciones y Energía, & UTE Magén Arquitectos SLP – Ingeniería Torne SL (2020, p. 47).....	19
Tabla 4. Tasa de ventilación por persona relacionado con el IDA .....	19
Tabla 5. Parámetros medidos por cada sistema MICA de la marca inBiot .....	25
Tabla 6. Disposición de los 10 sensores MICA y MICA Plus.....	25
Tabla 7. Registro de fallos de comunicación en los sensores MICA Plus .....	26
Tabla 8. Disposición de los nuevos 6 sensores MICA WELL y MICA Plus .....	30
Tabla 9. Plantilla experimentos análisis aulas FyL.....	31
Tabla 10. Selección de espacios para el estudio en el primer cuatrimestre del curso 2025/2026 .....	31
Tabla 11. Aulas con dispositivos MICA WELL.....	33
Tabla 12. Propuesta de horarios seleccionados para el estudio.....	35
Tabla 13. Resultados de parámetros y contaminantes en el primer cuatrimestre del curso 2024/2025 .....	36
Tabla 14. Resultados de parámetros y contaminantes en el primer cuatrimestre del curso 2025/2026 .....	36
Tabla 15. Resumen de los parámetros más relevantes estudiados el periodo completo de medición .....	37
Tabla 16. Tomado de Informe resumen del análisis de IAQ en Filosofía y Letras. Propuesta de nuevos equipos de monitorización (p. 1), por M. García-Monge, febrero de 2025.....	42
Tabla 17. Descripción, ubicación y uso de los 10 sensores de inBiot instalados en la facultad de FyL .....	42
Tabla 18. Registro fallos de dispositivos MICA Plus en el primer cuatrimestre .....	43
Tabla 19. Selección de espacios para el estudio en el primer cuatrimestre del curso 2025/2026 .....	88
Tabla 20. Aulas con dispositivos MICA WELL.....	94
Tabla 21. Reserva de ocupación y aforo de aulas el 5 de febrero .....	104
Tabla 22. Aulas con resultados más favorables a ser analizadas .....	104
Tabla 23. Horarios de reserva de aulas el 5 de febrero.....	105
Tabla 24. Propuesta de horarios seleccionados para el estudio.....	105
Tabla 25. Resumen estudio aulas considerando el caudal mínimo de aspiración .....	110

## Relación con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron aprobados en 2015 por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas como parte de la Agenda 2030. Estos objetivos representan el compromiso entre naciones para lograr alcanzar el desarrollo sostenible, para ello, es necesario coordinar: el crecimiento económico, la inclusión social y la protección del medio ambiente [1].

Este trabajo está directamente relacionado con los ODS siendo los principales los siguientes:

- **Objetivo 3.** Salud y bienestar: Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades. Las metas relacionadas con el trabajo son:

3.3 Poner fin a las enfermedades transmisibles.

3.9 Reducir el número de muertes y enfermedades causadas por la contaminación del aire.

- **Objetivo 7.** Energía asequible y no contaminante: Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. La meta relacionada con el trabajo es:

7.3 Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.

- **Objetivo 9.** Industria, innovación e infraestructura: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. La meta relacionada con el trabajo es:

9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales.

- **Objetivo 11.** Ciudades y comunidades sostenibles: Lograr que las ciudades sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. La meta relacionada con el trabajo es:

11.6 Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, con especial atención a la calidad del aire.



Figura 2. ODS relacionados al trabajo

# 1. Introducción y revisión bibliográfica

## 1.1 CAI: Calidad del Aire Interior

El término CAI (“calidad de aire interior” o IAQ por sus siglas en inglés) hace referencia a la calidad de aire interior, es decir, a las condiciones del aire dentro de los espacios cerrados y su relación con la salud y el bienestar de las personas. Mantener una buena calidad del aire interior es fundamental para reducir riesgos de enfermedades respiratorias, mejorar el confort y optimizar el rendimiento en entornos académicos, laborales o residenciales.

En los países industrializados la gente pasa entre el 80% y el 90% de su tiempo en espacios interiores realizando actividades de la vida diaria como trabajar, estar en casa o ir a clase entre otros [2] por lo que la calidad del aire interior representa un aspecto de alta relevancia por su relación directa con la salud.

Las emisiones que contribuyen a una mala calidad del aire interior y que aumentan el riesgo de sufrir enfermedades respiratorias son las emisiones químicas, bien procedentes del exterior o bien las generadas o ya presentes en el interior del espacio, y la presencia de humedad y moho en el aire [2].

La calidad de aire interior se ve afectada por dos categorías principales de agentes contaminantes: partículas sólidas (aerosoles) y contaminantes gaseosos.

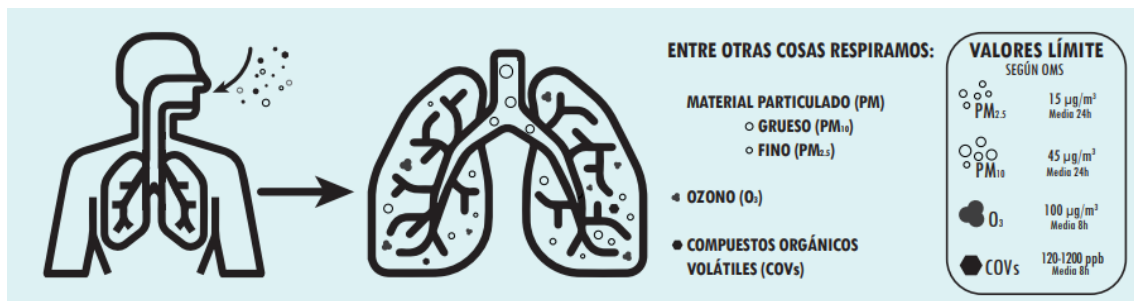


Figura 3. Adaptado de Campano, M. A., Fernández-Agüera, J., & Sendra, J. J. (Eds.), *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: Estrategias de aplicación práctica* (2023, p. 84).

Los aerosoles constituyen una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire y proceden de tres orígenes principales:

1. Fuentes interiores que incluyen las biogénicas y antropogénicas generadas por la propia ocupación y las actividades humanas, como la respiración o el uso de productos. Dentro de este grupo se encuentran diversos contaminantes biológicos, como los microorganismos (bacterias, hongos, predominantemente mohos y virus), y los alérgenos (pelo animal, polen...).
2. Infiltración de la contaminación exterior que se introduce en el edificio procedente de la contaminación atmosférica ambiental.
3. Generación en el interior a partir de la oxidación de gases emitidos tanto del exterior como del interior [9].

## Trabajo Fin de Grado

La materia particulada (PM) constituye uno de los contaminantes atmosféricos más relevantes por sus efectos sobre la salud. Dentro de esta categoría destacan especialmente las partículas menores de 10 micrómetros (PM10) o las PM2,5 capaces de penetrar el sistema respiratorio. Esta materia particulada ha sido clasificada como “cancerígena del Grupo 1” por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC). Su origen es diverso, aunque se relaciona con el tráfico rodado principalmente en las zonas urbanas: combustión de motores, el desgaste de frenos y neumáticos, la suspensión de polvo... Debido a la variedad de fuentes, la composición química de las PM es altamente variable e incluye desde compuestos orgánicos e inorgánicos hasta metales pesados. [14]

Los principales contaminantes gaseosos presentes en el aire derivados de la actividad humana o de procesos ambientales son los siguientes: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV o VOC por sus siglas en inglés), gases geogénicos como el radón (Rn) y ozono (O<sub>3</sub>) [3].

- **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**. Gas asociado principalmente a la combustión y a la ocupación humana, medido en partes por millón (ppm). En el ámbito de la calidad del aire interior no se considera un contaminante en sí mismo, sino que se utiliza habitualmente como gas trazador de contaminantes de origen antropogénico y como indicador del nivel de ventilación y dilución de contaminantes gaseosos en edificios con alta ocupación [3]. El control de su concentración es relevante, ya que valores elevados indican una ventilación insuficiente y, por tanto, una menor dilución del resto de contaminantes presentes en el aire interior. Solo a concentraciones muy elevadas, poco habituales en edificios, el CO<sub>2</sub> puede provocar somnolencia y afectar a la capacidad de concentración y al rendimiento cognitivo [3]. Asimismo, en espacios interiores, la concentración de CO<sub>2</sub> se utiliza como indicador indirecto del riesgo de transmisión de enfermedades respiratorias por vía aérea [36].
- **Monóxido de carbono (CO)**. Contribuye a la formación de gases de efecto invernadero y se trata de un contaminante tóxico con efectos devastadores sobre la salud pudiendo ser incluso letal. Penetra al organismo a través de los pulmones y puede disminuir la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. Como resultado, puede provocar disfunciones en órganos y tejidos, además de dañar el sistema nervioso y cardiovascular, causando fatiga, mareos y dolores de cabeza. [11] [14]
- **Óxidos de nitrógeno (NOx)**. También son precursores de la formación de la capa de ozono. Se trata de compuestos fácilmente oxidables a NO<sub>2</sub> el cual presenta efectos adversos sobre la salud en órganos como el hígado o el bazo, e incluso problemas en el sistema circulatorio e inmunológico, lo que aumenta la susceptibilidad a infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias. [11]
- **Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)**. Se trata de sustancias químicas orgánicas que se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente o presentan una alta volatilidad siendo además un grupo de sustancias en el que se incluyen compuestos con efectos tóxicos o cancerígenos. Son emitidos por el uso

## Trabajo Fin de Grado

de detergentes, pinturas, disolventes, ambientadores emisiones humanas, por materiales en el interior de edificios (muebles, tejidos, plásticos, materiales de construcción) y por reacciones químicas que transforman unos COVs en otros. Entre las familias químicas más importantes de VOC en los ambientes interiores están los hidrocarburos aromáticos, como los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y los **aldehídos** (como el formaldehído, CH<sub>2</sub>O). [2]

- **Radón** (Rn). Se trata de un gas radioactivo natural que se infiltran a través del suelo de los edificios. Es una de las causas del cáncer de pulmón. [12]
- **Ozono** (O<sub>3</sub>). El ozono puede encontrarse en la estratosfera, donde es denominado *ozono bueno* o en la **troposfera** donde se trata de una sustancia oxidante que causa daños a los ecosistemas y seres humanos [2]. Se trata de un compuesto muy inestable con tendencia a reaccionar con otros compuestos del ambiente como los orgánicos volátiles para formar nuevos compuestos más oxidados y partículas, como aldehídos o cetonas. En atmósferas limpias ocurre el ciclo fotolítico del NO<sub>2</sub>, durante el cual el NO<sub>2</sub> absorbe luz solar descomponiéndose, generando radicales O que se unen al O<sub>2</sub> presente en el aire generando O<sub>3</sub> que finalmente es sintetizado por su reacción con el NO generando de nuevo NO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> cerrando así el ciclo sin acumulación de ozono [33]. En cambio, en atmósferas contaminadas como las que pueden darse en ambientes interiores [25], en presencia de hidrocarburos o VOC, el O<sub>3</sub> generado reacciona con estos compuestos produciendo radicales orgánicos que, a su vez, generan aldehídos, compuestos oxigenados y radicales peróxidos, dando lugar a SOA (aerosoles orgánicos secundarios, como formaldehídos y partículas orgánicas ultrafinas) [2]. Estos radicales pueden oxidar NO a NO<sub>2</sub> sin consumir ozono, provocando una acumulación ozono y la producción de contaminantes secundarios [33]. El ozono puede infiltrarse del exterior o ser generado en interiores por el uso de dispositivos eléctricos como pueden ser impresoras láser, fotocopiadoras, purificadores de aire con ionización... [2]

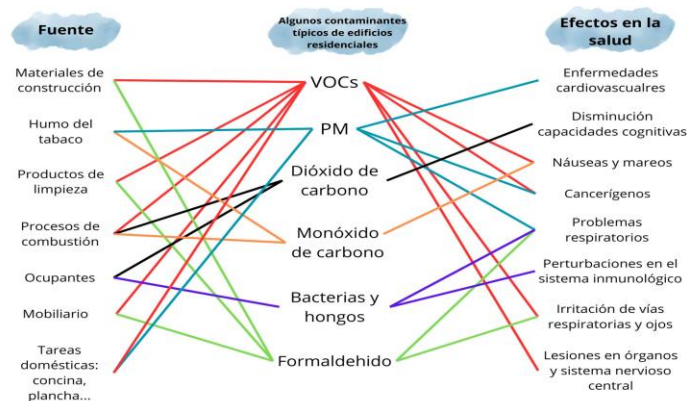


Figura 4. Análisis sobre calidad de aire interior y ventilación en industria: caso de estudio del sector textil (Gimeno Sobreviela, 2024). Modificación y traducción de Paula Aillón-García (Arquitecta PhD) para el libro *Edificios y Salud. Reinventar el hábitat pensando en la salud de las personas*.

A continuación, se presentan en la Tabla 1 los valores de referencia empleados para la evaluación de la calidad del aire interior. Dichos valores no proceden de una única

## Trabajo Fin de Grado

normativa, sino de distintas guías técnicas y marcos normativos internacionales. En particular, se han tomado como referencia las Guías de Calidad del Aire de la OMS para PM, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO y formaldehído [26], los Global Open Air Quality Standards (GO AQS) [20], así como el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [27] y la norma UNE-EN 16798 [28], que emplean el CO<sub>2</sub> como indicador del nivel de ventilación. El objetivo de esta recopilación es disponer de un criterio homogéneo que permita clasificar los niveles de los principales contaminantes en rangos óptimos, aceptables y críticos, facilitando así la interpretación de los resultados obtenidos.

Variable	Valores óptimos	Valores aceptables	Valores críticos
CO <sub>2</sub> (ppm)	400-900 ppm (IDA 1-2)	900-1200 ppm (IDA 3)	>1200 ppm
PM1.0 (µg/m <sup>3</sup> )	< 12 µg/m <sup>3</sup>	12-35 µg/m <sup>3</sup>	> 35 µg/m <sup>3</sup>
PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )			
PM4 (µg/m <sup>3</sup> )			
PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	< 50 µg/m <sup>3</sup>	50-100 µg/m <sup>3</sup>	> 100 µg/m <sup>3</sup>
CO (ppm)	0-9 ppm	9-25 ppm	>25 ppm
NO <sub>2</sub> (ppb)	0-30 ppb	31-100 ppb	>100 ppb
TVOC (index 0-500)	< 100 index	200-400 index	> 400 index
Formaldehído (µg/m <sup>3</sup> )	< 70 µg/m <sup>3</sup>	70-120 µg/m <sup>3</sup>	> 120 µg/m <sup>3</sup>
Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	0-100 Bq/m <sup>3</sup>	101-200 Bq/m <sup>3</sup>	>200 Bq/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub> (ppb)	0-50 ppb	51-100 ppb	>100 ppb

Tabla 1. Valores de límites para los distintos contaminantes presentes en el aire. Elaboración propia a partir de guías de la OMS, GO AQS y la norma UNE-EN 16798.

GO AQS (Global Open Air Quality Standards) es una iniciativa cuyo objetivo es estandarizar la medición mediante criterios accesibles y comparables a nivel global. Impulsada por la comunidad técnica, liderada por Sotirios Papathanasiou y en colaboración con “LoveXAir foundation” buscan facilitar la interpretación de los niveles de contaminantes y democratizar el acceso a estándares de calidad del aire. [10] En la sesión realizada el 3 de julio de 2025, a la que asistí, se establecieron una serie de índices de contaminación para los siguientes parámetros: CO<sub>2</sub>, PM2.5, O<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>2</sub> y Radón [20], que se comparan con otras normativas para establecer los valores de referencia para este trabajo.

El RITE (Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios) “establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene a través de equipos y sistemas de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía” (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s. f.) [21] y en el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, especifican las condiciones que aseguran la habitabilidad de los espacios y que serán explicadas a continuación en este trabajo.

## 1.2 Ventilación de espacios interiores

El RITE (Reglamento de Instalaciones en los Edificios) regula la calidad de aire interior en los edificios en función del tipo de uso y ocupación del espacio, así como el nivel de calidad

## Trabajo Fin de Grado

ambiental deseado. Para cada uno de ellos establece una categoría de calidad del aire interior [13]:

- **IDA 1.** Aire de óptima calidad: hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
- **IDA 2.** Aire de buena calidad: oficinas, residencias, salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y asimilables y piscinas.
- **IDA 3.** Aire de calidad media. Edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte y salas de ordenadores.
- **IDA 4.** Aire de baja calidad.

En espacios interiores la CAI se puede evaluar mediante la concentración de CO<sub>2</sub>. Este parámetro informa de la dilución y renovación que experimenta el aire interior. El RITE establece además los incrementos máximos permitidos sobre la concentración de dióxido de carbono exterior (CO<sub>2</sub>) en función de las categorías de calidad del aire interior (IDA), como muestra la Tabla 2 [13]:

Categoría	Incremento en ppm
IDA 1	350
IDA 2	500
IDA 3	800
IDA 4	1200

Tabla 2. Concentración de CO<sub>2</sub> por encima de la concentración en el aire exterior. Fuente: RITE (BOE, 2007, núm. 207, Sección 1, pp. 35931-35984).

Para asegurar la renovación del aire interior debe existir una ventilación adecuada de los espacios. Este trabajo estudia la ventilación mecánica controlada, sin embargo, la ventilación en espacios interiores puede llevarse a cabo de dos maneras distintas: por ventilación natural o por ventilación mecánica controlada [2].

- Ventilación natural: “el aire se renueva mediante la apertura de ventanas o puertas, así como por la entrada de infiltraciones incontroladas a través de la envolvente. Para que sea efectiva, se recomienda que esta sea CCD: continua en el tiempo, cruzada (apertura de ventanas y puertas en diferentes paramentos) y distribuida en su superficie.” (Campano, Fernández-Agüera, & Sendra, 2023, p.16)
- Ventilación mecánica: “el aire es tanto introducido como extraído del recinto mediante el empleo de un sistema de ventilación que, entre otros elementos, cuenta con ventiladores capaces de vehicular el aire (sistemas de doble flujo). Se recomienda que esta sea continua, con una distribución adecuada de los elementos de impulsión y extracción, y que no tenga zonas donde el aire se acumule y «estanque», impidiendo su renovación.” (Campano, Fernández-Agüera, & Sendra, 2023, p.16 y 17)

La ventilación mecánica controlada es la única capaz de asegurar las medidas exigidas por el RITE (RD 1027/2007, IT 1.1.4.2) [13].

## Trabajo Fin de Grado

El RITE promueve sistemas de doble flujo frente a los sistemas de simple extracción, ya que posibilita la incorporación de sistemas de tratamiento del aire (IT 1.1.4.2). Los sistemas de doble flujo incorporan de forma simultánea admisión mecánica de aire exterior y extracción mecánica del aire interior [2].

La recuperación de calor es obligatoria por el RITE con el objetivo de limitar las pérdidas energéticas asociadas a la ventilación (IT 1.2.4.5), reducir el consumo energético y mejorar el confort térmico. Mediante intercambiadores térmicos, la energía del aire extraído se transfiere al aire exterior sin mezclarse, permitiendo introducir aire atemperado en el espacio interior.

Otro elemento fundamental es el filtrado del aire exterior, exigido por el RITE en función de la calidad del aire exterior y de la calidad del aire interior requerida (IT 1.1.4.2.2) como explica la Tabla 2 y que se trata de una característica que la ventilación natural no puede proporcionar y que resulta clave para la CAI.

Asimismo, la ventilación mecánica permite la modulación del caudal de aire en función de parámetros de CAI, como la concentración de CO<sub>2</sub> u otros contaminantes, adaptando el caudal a la ocupación real del espacio (IT 1.1.4.2).

Finalmente, estos sistemas aseguran una difusión eficaz del aire, evitando el estancamiento y asegurando una renovación homogénea del aire interior. Esta condición tampoco puede garantizarse mediante ventilación natural.

### 1.3 Situación del edificio

La localización de estudio es la nueva facultad de Filosofía y Letras (FyL) de la Universidad de Zaragoza. Esta consta de tres edificios: el nuevo edificio departamental (EDE) completamente reconstruido con una superficie de 8.759 m<sup>2</sup>, el edificio central (EFL) de la Facultad con 11.024 m<sup>2</sup> remodelado en ese mismo proyecto y la Biblioteca María Moliner que no ha sido modificada. El edificio es punto de estudio ya que su reciente remodelación, finalizada en 2023 e inaugurada en marzo de ese mismo año, incluye en su proyecto la instalación de un sistema de tratamiento y limpieza de aire.



Figura 5. Bloques de la nueva Facultad de Filosofía y Letras.

## Trabajo Fin de Grado

El proyecto de edificación se llevó a cabo de manera conjunta por MAGÉN ARQUITECTOS S.L.P e INGENIERÍA TORNÉ S.L. En su informe para la reforma y ampliación de FyL se detalla que el sistema de ventilación y tratamiento de aire instalado incorpora intercambiadores tierra-aire para captar y pretratar el aire exterior antes de su entrada a los climatizadores. Estos intercambiadores aprovechan la temperatura estable del subsuelo, constante alrededor de 15°C a 2 metros de profundidad, para ajustar la temperatura del aire que ingresa en los edificios, enfriándolo en verano y calentándolo en invierno. Se ha implementado en el edificio este sistema para el aire de ventilación debido a su alta ocupación [4].

El aire exterior introducido en el edificio, que se considera de calidad **ODA 2** (Tabla 3) [4], es filtrado antes de ser introducido a los espacios interiores “según un proceso en dos etapas: primero mediante un prefiltro clase G-4 [filtro grueso], con un rendimiento gravimétrico del 90% conforme a la norma EN-779; y posteriormente mediante filtros de alta eficacia clase F-6 o F-7 [filtros finos], con una eficacia opacimétrica entre 60% y 90%” (Universidad de Zaragoza, Unidad Técnica de Construcciones y Energía, & UTE Magén Arquitectos SLP – Ingeniería Torne SL, 2020, p. 47).

Clasificación	Descripción en función de la contaminación del aire exterior
ODA 1	Aire puro que se ensucia sólo temporalmente (por ejemplo polen)
ODA 2	Aire con concentraciones altas de partículas y, o de gases contaminantes
ODA 3	Aire con concentraciones muy altas de gases contaminantes (ODA 3G) y, o de partículas (ODA 3P)

Tabla 3. Clasificación del aire exterior (ODA). Fuente: Universidad de Zaragoza, Unidad Técnica de Construcciones y Energía, & UTE Magén Arquitectos SLP – Ingeniería Torne SL (2020, p. 47).

Además, también se establece que “para ajustar el caudal de aire aportado hasta cada unidad terminal de tratamiento de aire, se instalarán reguladores de caudal de aire constante de sección circular ajustados en fábrica a los valores del proyecto y controlados mediante un actuador mecánico que permite el ajuste del caudal por medios propios sin necesidad de energía externa.” (Universidad de Zaragoza, Unidad Técnica de Construcciones y Energía, & UTE Magén Arquitectos SLP – Ingeniería Torne SL, 2020, p. 58).

Según el RITE, los recintos interiores de uso público clasificados con una categoría de calidad del aire interior **IDA 2** requieren una tasa de ventilación de aire exterior de **12,5 l/s por persona** [11] como muestra la Tabla 4.

Calidad de aire interior (IDA)	Caudal mínimo de aire exterior (l/s por persona)
IDA 1 (Alta calidad)	20
IDA 2 (Buena calidad)	12,5
IDA 3 (Calidad media)	8
IDA 4 (Baja calidad)	Solo recomendado para casos muy controlados

Tabla 4. Tasa de ventilación por persona relacionado con el IDA

## Trabajo Fin de Grado

En cada aula hay ubicado un dispositivo de control (Figura 6) desde el que poder regular tanto la climatización, como luces y persianas. Y que permite visualizar el nivel de CO<sub>2</sub>, entre otros parámetros como la temperatura.



Figura 6. Dispositivo de control en cada aula. Pág 73 [4]

Finalmente, se instalaron únicamente equipos de limpieza de aire “LA” (o “Air Cleaners”, término utilizado en habla inglesa) de la marca **Aire Limpio** en el edificio rehabilitado, excepto en el Aula Magna, por falta de espacio para instalar UTAs completas. Estos equipos no sustituyen a las UTAs, sino que permiten reducir su tamaño al complementar el tratamiento del aire.

Los equipos de LA instalados incorporan un filtro de **Polarización activa V8** con eficiencia del 98% para partículas de 0.3 micras, **filtro Absoluto DOP HEPA H13** 99.97% y **filtro CPZ** [12].

Con esta instalación, se justifica, bajo la normativa ASHRAE 62.1-2019/2022 [38], la reducción del caudal exterior requerido en un 80%. Esta normativa, estadounidense, permite reducir el aire exterior por debajo de los mínimos prescriptivos si se demuestra mediante un balance de masas que la concentración de contaminantes se mantiene baja gracias a la limpieza del aire. Sin embargo, estudios como los de W.J. Fisk advierten que estos sistemas de LA electrónicos eliminan únicamente partículas, pero pueden aumentar los COVs y el CO<sub>2</sub> [39]. Otros autores como H. Destailats H. [40] y Yicheng Zeng [41] señalan además la generación de subproductos nocivos como formaldehído o COVs. Asimismo, la normativa española (RITE) es mucho más rígida y prescriptiva respecto a los caudales mínimos de aire exterior, sin contemplar reducciones del caudal usando purificadores (IT 1.1.4.2.3). Según esta normativa el aire recirculado se considera aire viciado a efectos de cumplimiento de ventilación higiénica mínima (IT 1.1.4.2.4) [11].

Estudiar este sistema de climatización y ventilación, dentro del marco HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), es fundamental para garantizar una adecuada calidad del aire interior en un edificio con alta densidad de ocupación y usos diversos.

## 1.4 Air cleaners

Los sistemas de limpieza de aire son dispositivos destinados a purificar el aire y eliminar contaminantes del aire, tanto sólidos como gaseosos y emplean diferentes tecnologías

## Trabajo Fin de Grado

para conseguirlo. Debido a su cada vez más común presencia en el mercado para su uso en viviendas, oficinas y otros espacios interiores han experimentado un crecimiento tecnológico significativo. Su clasificación puede dividirse en cuatro grupos diferenciados: electrónicos, mecánicos, híbridos y otros. O bien por la naturaleza de la metodología utilizada [9]:

- Filtración (sólidos) y adsorción (gases):
  - **Filtros de uso general para ventilación:** Retienen aerosoles suspendidos en el aire, incluyendo microorganismos, pelo, polen y otros alérgenos.
  - **Filtros de alta eficacia o filtros de aire absolutos EPA, HEPA (High Efficiency Particulate Air), ULPA u otros:** Retienen aerosoles en suspensión, incluyendo los finos y ultrafinos. Son también efectivos con los microorganismos y se han demostrado como altamente eficaces para eliminación de virus.
  - **Filtros de carbón activo:** Adsorben gases contaminantes de muy diversa composición y origen, tanto inorgánicos como orgánicos.
- Inactivación química o fotoquímica de contaminantes y patógenos:
  - **Ionización**
  - **Plasma**
  - **Fotocatálisis**

Los sistemas instalados en el edificio de FyL engloban tecnologías de filtración mecánica (HEPA y CPZ) y de inactivación química electrónica (Polarización Activa). A continuación, se describen los principios de funcionamiento de cada una de estas tecnologías.

La **Polarización Activa**, es un tipo de tecnología de limpieza de aire electrónica. Los dispositivos electrónicos requieren, para maximizar su eficacia, combinar más de un tipo de Air Cleaner electrónico, añadir filtros de carbono para eliminar los VOC o combinar el dispositivo electrónico con un filtro mecánico como el HEPA (High Efficiency Particle Filtration) como es el caso de FyL [15].

### Filtros electrónicos por inactivación química

Algunos de los filtros electrónicos existentes son los siguientes [15]:

- **Generador de iones.** Estos sistemas funcionan mediante un electrodo el cual es alimentado por un voltaje alto que ioniza el aire. La ionización se propaga mediante el mecanismo de avalancha de electrones generando un flujo todavía mayor de portadores de carga, los cuales pueden entonces impartir su carga a las partículas presentes en el aire. Este a su vez favorece la aglomeración de dichas partículas, lo que facilita su posterior eliminación mediante deposición o filtración mecánica [15].
  - Ionización de aguja unipolar o bipolar
  - “Corona discharge” (o descarga de corona)

## Trabajo Fin de Grado

- Generador de plasma

Se trata de limpiadores que pueden producir ozono y que, por tanto, pueden provocar efectos perjudiciales para la salud [29].

- Precipitación electrostática (ESP). Estos sistemas funcionan de una manera similar a los generadores de iones: el voltaje alto se transmite mediante alambres y son los responsables de generar esa atmósfera ionizada. Una vez cargado, el aire ionizado pasa por una serie de placas colectoras, conectadas a un voltaje opuesto y fuerte que actúan como un imán donde las partículas quedan depositadas quedando el aire limpio para salir del dispositivo [15].
- Oxidación catalítica (PCO). Este dispositivo de limpieza de aire emplea la radiación ultravioleta para generar energía suficiente que incida en la superficie de un medio catalizador, como puede ser el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), excitando a los electrones y generando radicales libres: electrones ( $e^-$ ) y huecos ( $h^+$ ). Como resultado se crea un radical hidróxido ( $-\text{OH}$ ) muy oxidante que ataca y rompe las estructuras químicas de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), olores, bacterias y virus que entran en contacto con el catalizador. Si la reacción se completa, los únicos residuos resultantes son el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$ , sustancias inocuas [15].
- Irradiación germicida ultravioleta (UVGI). Estos dispositivos exponen el aire a una radiación con el potencial para inactivar los contaminantes biológicos al dañar sus ácidos nucleicos y proteínas [15].

Según diversos estudios recopilados por ASHRAE, “todos los sistemas de limpieza electrónica presentan riesgos, entre otros, de producción de ozono y otros subproductos de las reacciones” (ASHRAE, 2015, p. 11, traducción propia). Además, “nuestro conocimiento de los riesgos y beneficios en el uso de limpiadores electrónicos está limitado a la literatura disponible, la cual presenta aún importantes vacíos de investigación. La evaluación y cuantificación exhaustivas de los riesgos y la formación de subproductos derivados del uso de purificadores de aire electrónicos en ambientes interiores representa un reto dado que muchos de los subproductos formados suelen depender de la presencia inicial de compuestos reactivos en el aire, especialmente compuestos orgánicos volátiles. Asimismo, el número de subproductos distintos que se forman a partir de la reacción de un solo compuesto puede ascender a cientos, lo que complica la determinación de los posibles efectos de estos subproductos sobre la salud” (Environmental Protection Agency, 2023, pp. 30-32, traducción propia).

El sistema de **Polarización Activa** es de tipo ionización por polarización electrostática [16] y se encarga de eliminar contaminantes sólidos mediante la ionización del aire [17]. Según el fabricante, Aire Limpio, “los filtros de polarización activa se componen de dos pantallas entre las que se encuentra la media filtrante. Aplicando una tensión de 7.000V se genera un campo electrostático activo polarizando tanto las fibras como las partículas que pasan arrastradas por el flujo de aire. Esto produce la atracción electrostática de las partículas a las fibras polarizadas reteniéndolas al paso de aire. Esto permite retener mayor concentración de partículas en medias menos tupidas reduciendo con ello la pérdida de carga” (Aire Limpio, s. f., pág. 2).

## Trabajo Fin de Grado

El sistema emplea tecnología de campo activo para polarizar las fibras del filtro y las partículas que discurren a través de ellas, que una vez polarizadas son atraídas hacia otras partículas y los filtros limpiando así el aire. Los filtros de recogida de contaminantes deben ser cambiados por unos nuevos cuando estos están completos de contaminantes [22].

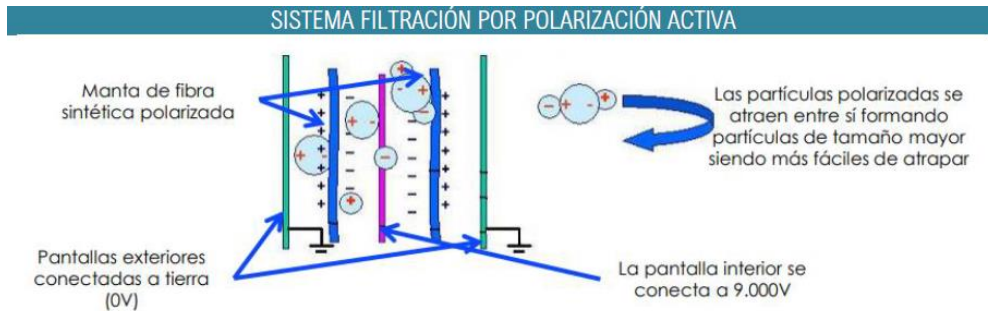


Figura 7. Sistema de filtración por Polarización Activa. Fuente: Aire Limpio (2019, p. 7).

### Filtros mecánicos por filtración

En FyL, el **filtro Absoluto DOP HEPA H13 99.97%** representa uno de los filtros mecánicos de mayor eficiencia. Se trata de un equipo de LA basado en tecnología de filtración, que retienen los aerosoles del aire [9].

Los filtros de alta eficacia (HEPA) poseen una capacidad muy elevada para retener partículas o aerosoles, reteniendo partículas dentro del rango de 0,12 a 0,18 micras y con capacidad filtrante real incluso superior para tamaños de partícula tanto por debajo como por encima de este rango. Sin embargo, la implementación de filtros HEPA genera una pérdida de presión significativa, lo que resulta en un aumento del consumo energético del ventilador y, consecuentemente, en una reducción del caudal volumétrico de aire.

Para garantizar un desempeño adecuado, estos filtros deben cumplir con normativas específicas. Actualmente, las principales regulaciones son la Norma UNE-EN ISO 16890-1:2017 que clasifica y establece la metodología de ensayo para los filtros de ventilación general y la UNE-EN 1822-1:2020 paralelamente que aborda los filtros absolutos (EPA, HEPA y ULPA) [9].

### Filtros mecánicos por adsorción

Para la eliminación de los contaminantes gaseosos, como los compuestos orgánicos volátiles el sistema de limpieza de aire más común es el de Carbón Activo [3]. El sistema de FyL incluye un filtro de Carbón Activo, Permanganato de Potasio y Zeolita (**CPZ**) [18]. El carbón activo es un material natural con millones de agujeros microscópicos que atrae, captura y rompe moléculas de contaminantes gaseosos como contaminantes químicos orgánicos y olores entre otros por el principio de adsorción. El permanganato de potasio es un agente oxidante que destruye químicamente gases como el formaldehído y el amoníaco,

## Trabajo Fin de Grado

que el carbón por sí solo no puede atrapar. La zeolita, por otro lado, se emplea como medio filtrante por su capacidad de intercambio iónico y por su función con tamiza molecular debido a que tiene un tamaño de poro uniforme y tiene una alta eficacia para compuestos orgánicos volátiles (COV) [19].

## 2. Objetivo

Una vez realizada la recopilación bibliográfica, presentada la CAI y planteada y ubicada la situación del edificio de FyL. Se plantea el objetivo de este trabajo.

El edificio, por tratarse de un espacio académico, alberga personas la mayor parte del año, por lo que conviene asegurarse de que los espacios que son ocupados no presentan debido a la concentración de contaminantes en el aire un riesgo para la salud de las personas.

Para ello es indispensable monitorizar en continuo los contaminantes en los espacios interiores. De esta manera se puede estudiar qué contaminantes alcanzan medidas altas y en qué momentos del día o año o debido a qué razones se generan dichas situaciones. Finalmente, con el análisis realizado y llegada a una conclusión sobre ello, tomar medidas para mejorar estos casos.

Además, la realización del trabajo busca alcanzar las siguientes premisas:

1. Relacionar los parámetros medidos para establecer conexiones entre contaminantes.
2. Analizar si el sistema de ventilación y LA instalados en el edificio resultan eficientes y suficientes.
3. Registrar la concentración de ozono y otros posibles contaminantes.
4. Estudiar los sistemas de Aire Limpio, observar si pudieran tratarse de fuentes de producción de ozono.
5. Sensibilizar a la población sobre la importancia de la calidad de aire interior.

## 3. Medición en continuo de CAI

Para medir en continuo se dispone de medidores MICA de la marca inBiot. Los datos registrados por estos dispositivos han sido la base del análisis desarrollado en todo el TFG. En el edificio de FyL se encuentran instalados por distintos espacios (aulas, despachos, seminarios, secretaría...) y en distintas plantas.

### 3.1 Comparación e introducción a los distintos sensores

La marca inBiot comercializa distintos dispositivos para la medición de contaminantes y otros parámetros del aire. En la actualidad la facultad de FyL dispone de tres dispositivos diferentes instalados: MICA, MICA Plus y MICA WELL, siendo respectivamente cada uno una versión más nueva que la anterior. Cada dispositivo mide unos parámetros como se muestra en la Tabla 5 [31].

Parámetros	MICA	MICA Plus	MICA WELL
Temperatura	✓	✓	✓
Humedad relativa	✓	✓	✓
CO2	✓	✓	✓
TVOC	✓	✓	✓
PM 1.0	✗	✓	✓
PM 2.5	✓	✓	✓
PM 4.0	✗	✓	✓
PM 10	✓	✓	✓
Formaldehído	✗	✓	✓
NO2	✗	✗	✓
Ozono	✗	✗	✓
CO	✗	✗	✓

Tabla 5. Parámetros medidos por cada sistema MICA de la marca inBiot

Esta distinción de dispositivos resulta relevante para exponer las capacidades y limitaciones de monitorización en cada etapa del proceso.

### 3.2 Situación de los sensores en FyL

En marzo de 2024 se instalaron los primeros 10 sensores (MICA y MICA Plus) distribuidos en espacios del edificio de FyL entre el nuevo edificio departamental, el renovado edificio central y el edificio de geografía. Estos dispositivos se colocaron en distintas ubicaciones como muestra la Tabla 6 para estudiar el comportamiento de los diferentes espacios.

Sensor	Ubicación	Uso	Aforo
A1.07 (MICA 1)	Edificio A	Sala juntas	-
A1.15 (MICA 2)	Edificio A	Secretaría	-
E2.04 (MICA PLUS 3)	Edificio E	Despacho	-
A3.2 (MICA PLUS 4)	Edificio A	Aula	175
B2.S02 (MICA PLUS 5)	Edificio B	Despacho	-
B3.2 (MICA 6)	Edificio B	Seminario	30
A2.2 (MICA PLUS 7)	Edificio A	Aula	180
A4.2 (MICA 8)	Edificio A	Aula	175
B2.N14 (MICA PLUS 9)	Edificio B	Despacho	-
B1.P05 (MICA 10)	Edificio B	Secretaría	-

Tabla 6. Disposición de los 10 sensores MICA y MICA Plus

Estos dispositivos han estado registrando datos desde marzo de 2024 hasta la actualidad exceptuando periodos de fallos de comunicación en los MICA Plus entre septiembre y noviembre de 2024 como muestra la Tabla 7.

Sensor	Periodo 1 sin comunicación	Periodo 2 sin comunicación
E2.04 (MICA PLUS 3)	4/09/2024 - 14/11/2024	-
A3.2 (MICA PLUS 4)	4/09/2024 - 14/11/2024	-
B2.S02 (MICA PLUS 5)	4/09/2024 - 14/11/2024	-
A2.2 (MICA PLUS 7)	4/09/2024 - 11/09/2024	17/10/2024 – 14/11/2024
B2.N14 (MICA PLUS 9)	4/09/2024 - 11/09/2024	17/10/2024 – 14/11/2024

Tabla 7. Registro de fallos de comunicación en los sensores MICA Plus

El análisis del edificio objeto de este TFG abarca los meses correspondientes al curso académico 2024/2025 y el primer cuatrimestre del curso 2025/2026. Los resultados obtenidos se comparan con los del primer informe elaborado por Miguel García-Monge, “Informe 23”, correspondiente al periodo comprendido entre el 25 de marzo y el 13 de mayo de 2024 [30].

### 3.3 Análisis de datos anteriores al curso 2025/2026

El primer estudio del edificio se realizó a partir de los parámetros recogidos durante el curso 2024/2025 por los primeros 10 dispositivos MICA y MICA Plus mostrados en la Tabla 6. El desarrollo completo de este análisis se encuentra en el Anexo I. Este primer análisis permitió contextualizar la situación del edificio, identificar las posibles problemáticas más comunes asociadas a los parámetros monitorizados y continuar el estudio realizado por Miguel García-Monge plasmado en el Informe 23 [30].

En esta fase, el CO<sub>2</sub> representa junto a los TVOC los parámetros con resultados más desfavorables, especialmente durante el segundo cuatrimestre, ya que se trata de un periodo más largo de estudio probablemente con mayor ocupación en las aulas.

El análisis de CO<sub>2</sub> permitió detectar espacios con concentraciones más altas, como el seminario **B3.2** (MICA 6), superiores a 1000ppm en un **18,3%** del tiempo estudiado como muestra la Figura 8. Porcentaje de tiempo por concentración de CO<sub>2</sub> por meses. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge y alcanzando valores tales como **1343, 1421 o 1464ppm**. También ocurrió en el aula **A3.2** con concentraciones superiores a 1000ppm tales como **1618, 1713 o 1651ppm** (ver Anexo I).

Trabajo Fin de Grado

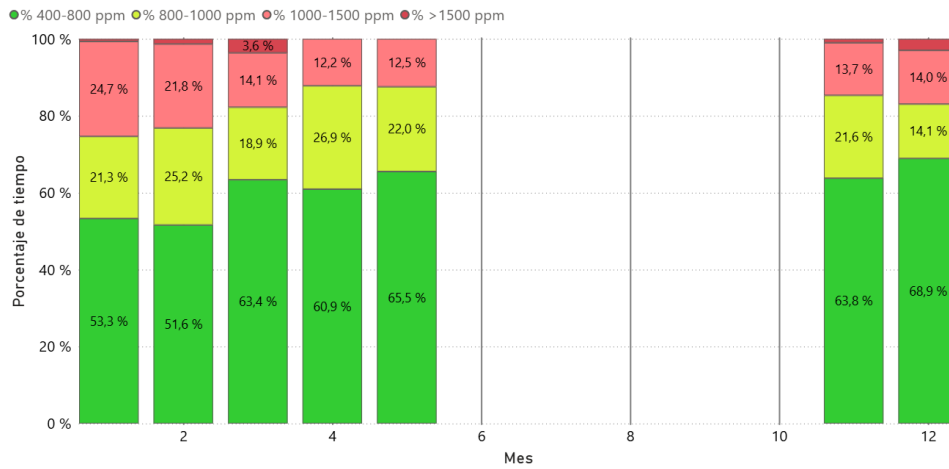


Figura 8. Porcentaje de tiempo por concentración de CO2 por meses. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

De manera similar, el estudio de TVOC mostró que la mayoría de los espacios, entre ellos el aula A4.2, A2.2 y A3.2 y el seminario B3.2, registraron concentraciones superiores al índice 200 en un 42% del tiempo estudiado (Figura 9).

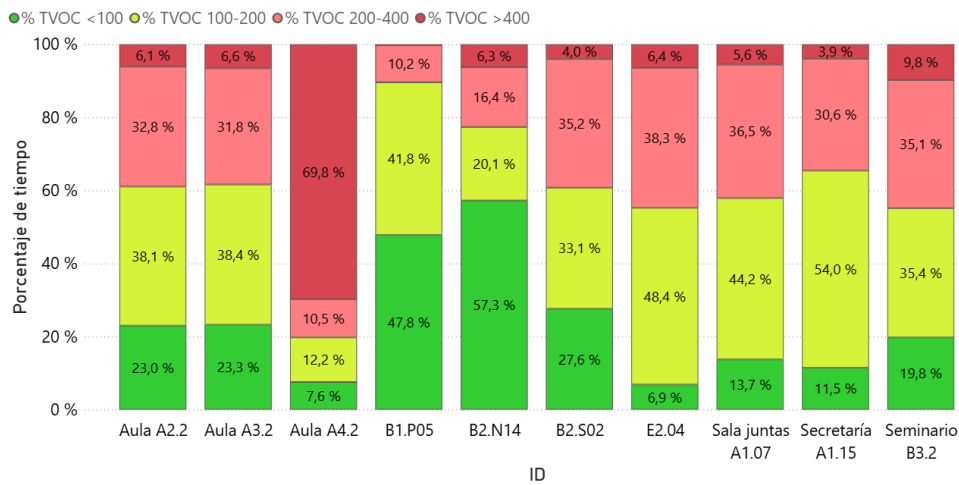


Figura 9. Porcentaje de tiempo por concentración de TVOC por sensor. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

El formaldehído presentó concentraciones bajas exceptuando los meses de más calor, en la que el CH<sub>2</sub>O aumenta especialmente en el aula A3.2 (Figura 10) y A2.2 (Figura 11). Se confirman las conclusiones del Informe 23 [30] de la relación del CH<sub>2</sub>O con la temperatura (ver Anexo I).

Trabajo Fin de Grado

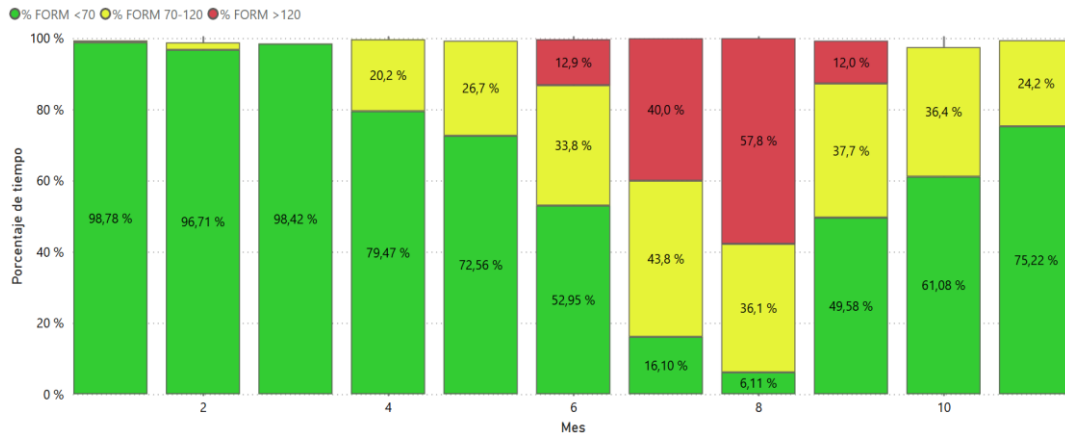


Figura 10. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O por mes del aula A3.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

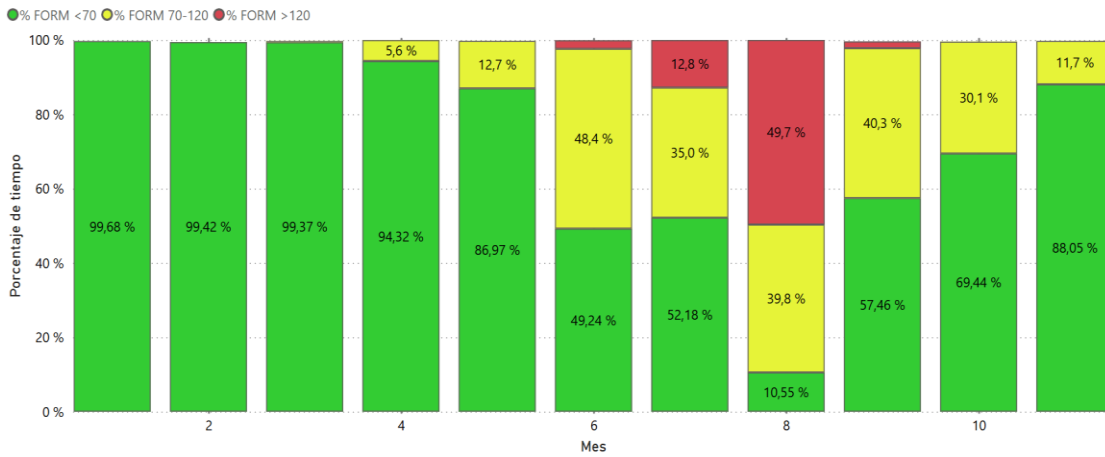


Figura 11. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O por mes del aula A2.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Asimismo, se observó una reducción de las concentraciones de CH<sub>2</sub>O durante los periodos lectivos en los que el sistema de ventilación permanecía en funcionamiento, en comparación con periodos sin ventilación (Figura 12 y Figura 13).

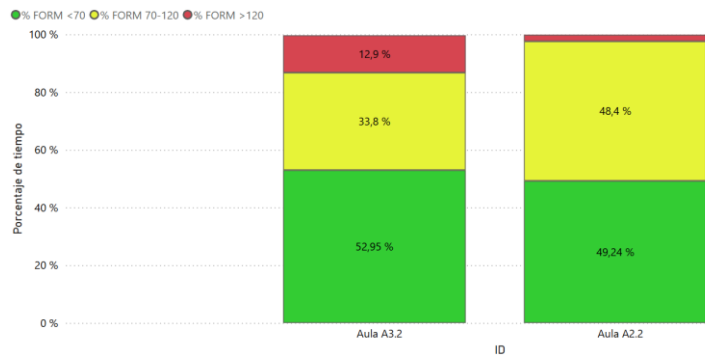


Figura 12. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O en junio en todo el periodo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

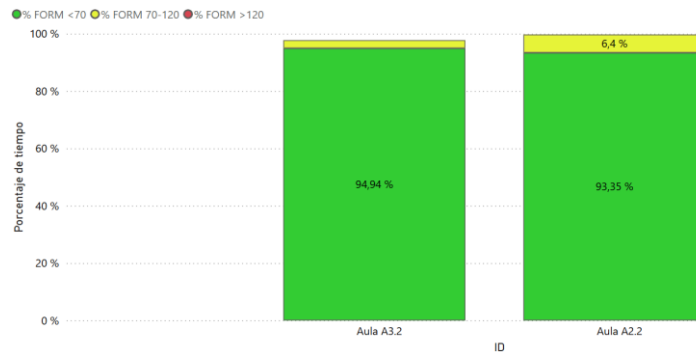


Figura 13. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O en junio en periodo lectivo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

El análisis de la materia particulada mostró concentraciones prácticamente nulas en todo el tiempo medido (ver Anexo I). Es decir, que se trata de un contaminante que se consigue eliminar de manera efectiva con los sistemas de filtración.

Los resultados de este periodo evidencian concentraciones altas de CO<sub>2</sub> y VOCs posiblemente asociados a la reducción en el caudal de ventilación. También se reafirma la relación del CH<sub>2</sub>O con la temperatura y se observa que el sistema de ventilación es capaz de diluirlo. Los contaminantes sólidos sí son eliminados eficazmente por el sistema de limpieza de aire.

### 3.4 Análisis de mejora de la medición en continuo

A partir del Informe 23 [30] y del estudio del curso 2024/2025 se identificaron varias limitaciones, entre ellas una selección poco representativa de los espacios de medición y la ausencia de datos de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO, ya que los dispositivos instalados no permiten monitorizar estos contaminantes.

Para resolver estas limitaciones, en mayo de 2025 se realizó un estudio en conjunto con Miguel García-Monge y Belén Zalba de la situación del edificio con el fin de redefinir las ubicaciones de los dispositivos de medición y ampliar los parámetros analizados. Tras evaluar los espacios disponibles y los resultados previos, se concluyó que las aulas constituían la opción más representativa, al concentrar la mayor actividad según los datos del portal de Reserva de Aulas de la Universidad de Zaragoza, así como los niveles más elevados de ocupación. La selección para ubicar los nuevos sensores priorizó aulas con aforos moderados, altos porcentajes de uso y una distribución en distintas plantas y bloques, incluyendo semisótano, planta calle y las plantas superiores hasta la cuarta [32].

Como resultado de este proceso, se instalaron seis nuevos dispositivos con conexión LoRaWAN (cinco MICA WELL y un MICA Plus) en las ubicaciones recogidas en la Tabla 8. Estos nuevos dispositivos nos permiten evaluar el funcionamiento del sistema de LA instalado, prestando especial atención a la posible aparición de picos de ozono y otros contaminantes y a la identificación de su origen.

ID	Dispositivo	Aforo
Aula A0.4	WELL	32
Aula A1.1	WELL	24
Aula A2.3	WELL	27
Aula A3.1	WELL	80
Aula A4.3	WELL	40
Aula C1.2	Plus	42

Tabla 8. Disposición de los nuevos 6 sensores MICA WELL y MICA Plus

### 3.5 Análisis de datos del curso 2025/2026

Durante el primer cuatrimestre del curso 2025/2026 realicé visitas presenciales a las aulas con nuevos medidores para complementar los datos recogidos con observaciones in situ. Estas observaciones permitieron comprobar el nivel de ocupación, el estado de ventanas y puertas y otras condiciones de contorno como el clima o la calidad de aire exterior. Este trabajo permitió localizar aulas con mayores concentraciones de contaminantes y su relación con posibles causas, además de permitir descartar hipótesis y conocer mejor el edificio y su uso.

Para garantizar la fiabilidad y replicabilidad de los experimentos se diseñó una plantilla que recogiera toda la información necesaria, presentada en la Tabla 9. Algunos ensayos fueron descartados debido a condiciones que alteraban los resultados, como la apertura de ventanas o puertas o fallos de comunicación de los dispositivos. Los resultados completos de los experimentos se recogen en el Anexo II.

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	
<b>ID</b>	Fecha de toma de datos e ID distintivo.
<b>Fecha y versión</b>	Versión X.Y — Fecha de emisión / revisión.
<b>Hora y duración del experimento</b>	
<b>Autor</b>	Nombre.
<b>Resumen</b>	50-150 palabras. Qué se hace, objetivo principal, variables clave.
<b>Objetivos</b>	Objetivo general y objetivos específicos (medibles).
<b>Justificación</b>	Trabajo previo que apoye la realización del experimento.
<b>Alcance y limitaciones</b>	Qué cubre y qué no (variables, rango de temperaturas, ocupación...).
<b>Equipo</b>	Instrumento de medición.
<b>Variables</b>	Contaminantes que estudiar y unidades de estos.
<b>Condiciones de contorno</b>	
<b>Observaciones</b>	Situación de las aulas (ocupación, puertas y ventanas abiertas o cerradas...)

<b>Registro de datos</b>	Formato de archivos, programa de trabajo...
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	Breve comentario de los resultados
<b>Historial de cambios</b>	Especificación de cambios.

Tabla 9. Plantilla experimentos análisis aulas FyL

Para realizar el análisis del primer cuatrimestre del curso 2025/2026 se seleccionan los espacios de interés para tomar resultados teniendo en cuenta los resultados de los informes previos y de los ensayos presenciales. Se tiene en cuenta que el uso del espacio sea alto y la relación entre el aforo y la ocupación también lo sea. Tras esta preselección los espacios que se van a analizar para el primer cuatrimestre del curso 2025/2026 son principalmente aulas como muestra la Tabla 10:

ID	Dispositivo	Aforo
Aula A1.1	Well	24
Sala juntas A1.07	MICA	
Aula A2.2	Plus	180
Aula A3.1	Well	80
Aula A3.2	Plus	175
Aula A4.2	MICA	175
Aula C1.2	Plus	42

Tabla 10. Selección de espacios para el estudio en el primer cuatrimestre del curso 2025/2026

Se estudian los espacios del **15 de septiembre al 5 de diciembre de 2025** (ver Anexo III).

El dióxido de carbono, empleado como indicador de la eficacia de la ventilación y de la tasa de renovación del aire en los espacios analizados, muestra concentraciones elevadas en varias de las aulas monitorizadas como el aula **A3.1** o **C1.2**. Ambas presentan ocupaciones alrededor del 30%, es decir, no especialmente elevadas y sin embargo experimentan máximos repetidos y prolongados en el tiempo que no descienden hasta una vez vaciada el aula (ver Anexo III).

La frecuente ocurrencia de concentraciones superiores a 1000ppm (Figura 14) permitió justificar el estudio de la eficacia del sistema de ventilación y valorar la decisión de reducir el caudal.

## Trabajo Fin de Grado

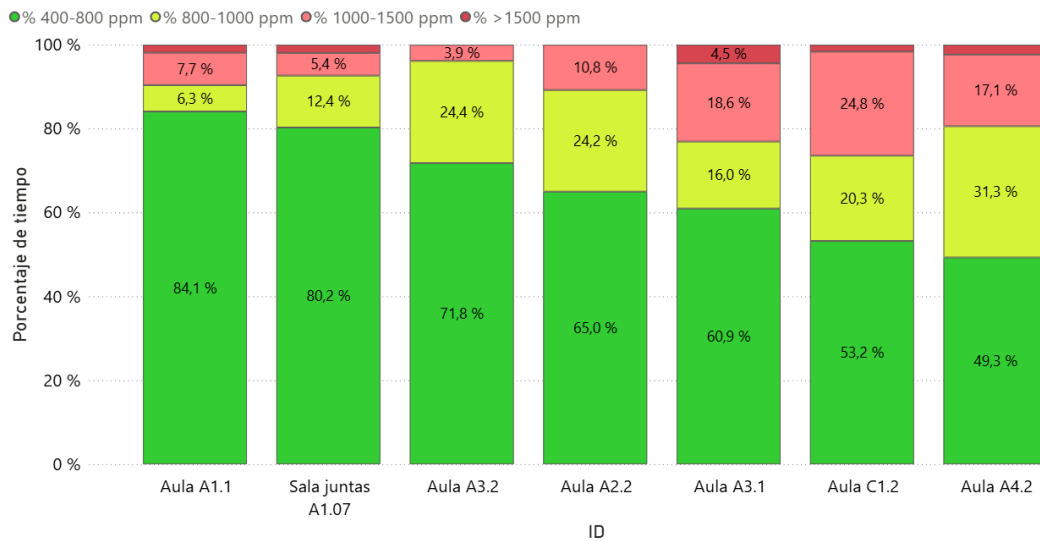


Figura 14. Porcentaje de tiempo por concentración de CO<sub>2</sub> por sensor. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

El CO<sub>2</sub> también se consideró como trazador de contaminantes gaseosos, al igual que los compuestos orgánicos volátiles totales, que representan un indicador general de la presencia de COVs.

Los TVOC fueron los contaminantes gaseosos con concentraciones más altas y sostenidas en el tiempo, volviendo a evidenciar la insuficiente capacidad de dilución. En numerosas ocasiones, se superó el índice recomendado de 400 y todas las aulas independientemente de su aforo u ocupación experimentaron alrededor del 30% del tiempo concentraciones por encima del índice 200 como muestra la Figura 15.

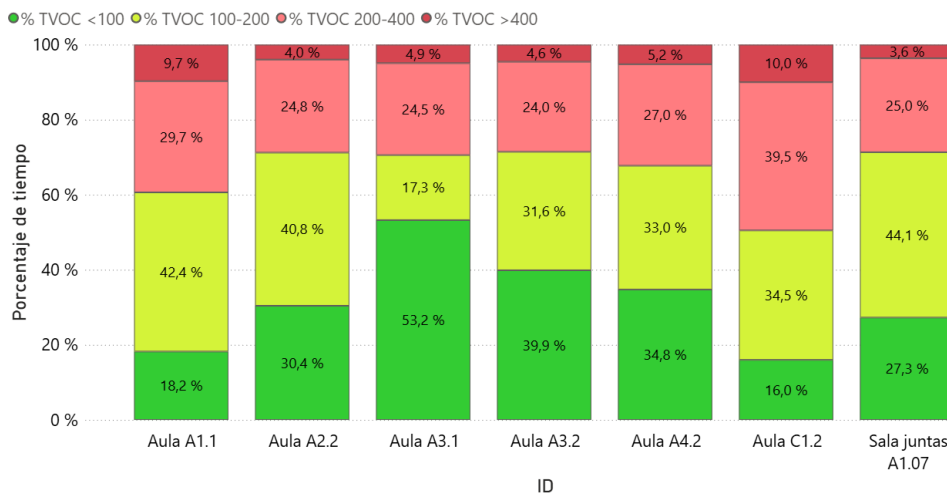


Figura 15. Porcentaje de tiempo por concentración de TVOC por sensor. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Otros contaminantes como el formaldehído, la materia particulada y el CO presentaron concentraciones bajas todo el periodo medido, mientras que el NO<sub>2</sub> sufre momentos de concentraciones más altas no esperadas. Los datos completos de estos contaminantes se encuentran en el Anexo III, y los resultados de este análisis se presentan en el apartado 4 de conclusiones.

### 3.6 Medición de ozono

La medición de ozono en las aulas del edificio rehabilitado se realiza con el objetivo de evaluar si los sistemas de LA electrónicos instalados producen ozono u otros subproductos contaminantes y perjudiciales para la salud.

El ozono se mide en las cinco aulas en las que están instalados los MICA WELL como muestra la Tabla 11. Debido a problemas de conexión por el sistema LoRaWan, los sistemas empiezan a transmitir de manera continua correctamente desde el 15 de septiembre. Por lo tanto, el estudio de este contaminante es desde el **15 de septiembre al 5 de diciembre** (Ver Anexo III).

ID	Dispositivo	Aforo
Aula A0.4	Well	32
Aula A1.1	Well	24
Aula A2.3	Well	27
Aula A3.1	Well	80
Aula A4.3	Well	40

Tabla 11. Aulas con dispositivos MICA WELL

Se esperaba que no ocurrieran picos en ningún caso de ozono en interior, sin embargo, se observan momentos de picos de concentración en varias ocasiones (Figura 16). Alcanzan valores de pico tales como **759ppb** y **743ppb** el 15 de septiembre, de **153ppb** el 18 de septiembre, **139ppb** el 19 de septiembre, **228ppb** el 7 de octubre, **620ppb** el 16 de octubre, o **260ppb** el 4 de diciembre.

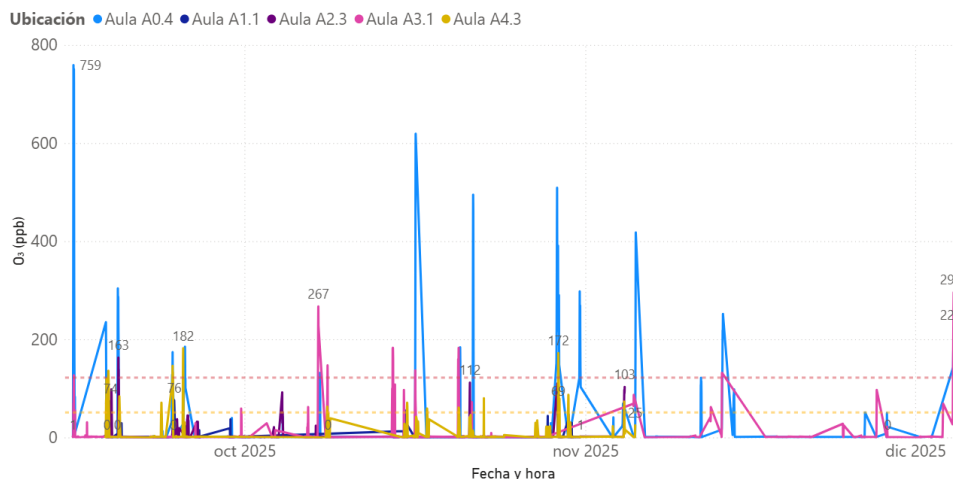


Figura 16. Histórico de O<sub>3</sub> del 15 de septiembre al 5 de diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Esta situación lleva a cuestionarse qué propicia la producción del ozono en el interior o cuál es su origen. Se valoraron las siguientes hipótesis: su relación con el dióxido de nitrógeno a través de reacciones fotoquímicas inducidas por la radiación solar; su posible procedencia del aire exterior; su formación a partir de la transformación de compuestos orgánicos volátiles; su interacción con otros contaminantes presentes en el ambiente interior; la influencia de las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad

## Trabajo Fin de Grado

relativa; y, finalmente, su posible generación asociada al funcionamiento de los sistemas de limpieza de aire (LA).

Tras descartar todas las hipótesis anteriores (ver Anexo III), para analizar si la producción de  $O_3$  por el funcionamiento del sistema de LA es una posibilidad real, se instaló el lunes 15 de diciembre gracias a la beca del Proyecto IMPULSO otro dispositivo MICA Well en el edificio la sala de colaboradores del I3A, en la planta uno del Betancourt. Se trata de un espacio con uso y ocupación de personas y en la que a priori se conoce que no hay sistemas que puedan producir  $O_3$  como los de LA u otros tales como escáneres láser. En caso de no registrarse valores de ozono en la sala, se puede considerar poco probable el fallo en dispositivos MICA WELL para este contaminante y valorar que efectivamente esos picos de  $O_3$  puedan ser producto del sistema de Polarización Activa.

No se produce durante todo el periodo estudiado en el aula del I3A ningún pico de ozono y los valores se encuentran en todo momento por debajo de las 10ppb. Estos resultados sugieren que los sistemas de medición realizan una recogida fiable de este contaminante y dado que el ozono en el interior no procede del exterior se apoya la hipótesis de que el  $O_3$  recogido en las aulas de FyL pueda ser generado por los sistemas de LA por Polarización Activa.

Para terminar de confirmar esta hipótesis se plantea desconectar los sistemas de Polarización Activa y analizar y comparar los valores de contaminantes registrados con los producidos con el sistema LA en funcionamiento. Sin embargo, es un procedimiento al que no tenemos acceso todavía en el momento de redacción de este TFG y se plantea como línea de futuro.

### 3.7 Evaluación de CAI por SGS

El proyecto IMPULSO ha permitido también contratar una revisión de calidad interior a manos de SGS Tecnos, empresa especializada en Inspección, Verificación, Ensayos y Certificación [43]. Este estudio permitirá disponer de mediciones realizadas mediante procedimientos normalizados y equipamiento profesional, comparar los resultados con los medidos por los dispositivos instalados y estudiar los contaminantes analizados por la empresa.

El primer paso de esta fase consistió en reunirse, el 18 de diciembre, con la empresa para obtener información sobre los procedimientos de los ensayos y los equipos y el día en el que se van a realizar los ensayos. En dicha reunión se concretaron los contaminantes analizados por muestreo en laboratorio: COVs, formaldehído y  $NO_2$ . Además, se fijó la fecha de los ensayos para el día 5 de febrero de 8:00 a 19:30.

Una vez conocidos las características técnicas de los ensayos, se procedió a realizar la selección de aulas en las que se realizaría el muestreo. Para ello se tuvo en cuenta la existencia de sistemas de ventilación con LA, la presencia de dispositivos MICA, el nivel de ocupación siguiendo la página de Reserva de Aulas y la viabilidad de realizar los estudios atendiendo a los horarios de clases, el tiempo necesario para realizar el muestreo, el ruido

## Trabajo Fin de Grado

generado por las bombas de aspiración y los periodos de ocupación y vaciado de las aulas. La elección de aulas final es la mostrada en la Tabla 12.

Horario	Aula	Medidor	COMENTARIOS	Toma de muestras
Previo a 12:15	X		Ningún aula se ocupa y posteriormente se queda vacía antes de las 12:15 Pruebas iniciales (salas de estudio)	
12:15-16:15	A3.1	MICA Well	Clase con malos resultados en análisis previos. No vuelve a haber clase hasta las 16:15	Formaldehido 1 VOCs 1 NO <sub>2</sub> 1
12:15 – 15:00	A2.1	---		
14:15	A2.2	MICA Plus	Ocupada todo el día, menos en el descanso de cambio de turno	Opcional si no podemos la opción 2 (Formaldehido 3) (VOCs 3) (NO <sub>2</sub> 3)
16:00-16:45	C1.1	MICA Plus	No vuelve a haber clase hasta las 16:45	Formaldehido 2 VOCs 2 NO <sub>2</sub>
17:45	A1.2	---	Aula de aforo reducido.	
18:45	A3.3	---	Última clase a esa hora	
Vigilar ocupación	A4.1	---	OCUPADA TODO EL DIA ¿?	
Vigilar ocupación	A2.2	MICA	OCUPADA TODO EL DIA ¿?	

Tabla 12. Propuesta de horarios seleccionados para el estudio

Con este análisis se asegura que los espacios de muestreo sean representativos y permitan confirmar la presencia de contaminantes en el aire y comparar con los datos previos de monitorización continua.

Todos los detalles relativos a la realización de dicha selección están expuestos en el Anexo IV. Analizar los resultados se deja como línea de futuro.

## 4. Conclusiones

La realización de este trabajo se puede dividir en varias fases. Se revisó primero la bibliografía referente a calidad de aire interior y su importancia para la salud de las personas. Posteriormente, se leyeron artículos respectivos a la ventilación de espacios interiores. Finalmente, se recabó información sobre los sistemas de limpieza de aire, tanto mecánicos como electrónicos para conocer los dispositivos de análisis y poner en contexto la instalación del edificio de Filosofía y Letras.

El estudio de CAI en el edificio de FyL es reciente y dispone únicamente de los estudios previos de Miguel García-Monge. Es por ello por lo que, tras la lectura del trabajo realizado por Miguel, el desarrollo del trabajo ha requerido un proceso inicial de puesta en marcha, conocimiento y validación de la metodología. Otras limitaciones técnicas como los problemas de conectividad de los dispositivos han dificultado en algunos momentos la medición en continuo. A pesar de ello, el estudio ha permitido valorar el funcionamiento del sistema de ventilación y analizar los contaminantes principales de los espacios interiores de FyL.

## Trabajo Fin de Grado

A continuación, se va a realizar una recopilación de los resultados y conclusiones de los estudios y análisis de este trabajo.

### 1. CAI en aulas del edificio de FyL

Se han estudiado los contaminantes del edificio EFL para analizar la CAI. La Tabla 13 muestra los resultados de los principales parámetros y contaminantes correspondientes al curso 2024/2025, mientras que la Tabla 14 lo hace para las aulas seleccionadas el primer cuatrimestre del curso 2025/2026.

Espacio	% tiempo con CO <sub>2</sub> >1000ppm	% tiempo con TVOC >200	% tiempo con CH <sub>2</sub> O >70ug/m <sup>3</sup>
A2.2	7,9	38,9	0,1
A3.2	12,3	38,4	0,3
A4.2	5,54	80,3	-
A1.07	11,6	42,1	-
A1.15	0	34,5	-
B2.S02	1,5	39,2	0,4
B3.2	18,3	44,9	-
B2.N14	1,5	22,7	0
B1.P05	2,8	10,4	-
E2.04	1,49	44,7	0,1

Tabla 13. Resultados de parámetros y contaminantes en el primer cuatrimestre del curso 2024/2025

Espacio	% tiempo con CO <sub>2</sub> >1000ppm	% tiempo con TVOC >200	% tiempo con CH <sub>2</sub> O >70ug/m <sup>3</sup>	% tiempo con O <sub>3</sub> >51ppb
A1.1	11,99	39,4	0	7,1
A1.07	9,38	35,9	-	-
A2.2	12,55	34,4	0,4	-
A3.1	25,53	29,4	0,9	3,9
A3.2	4,4	36,2	0,2	-
A4.2	22,73	38,6	-	-
C1.2	33,76	49,5	0,1	-
A0.4	-	-	-	12,6
A2.3	-	-	-	6,6
A4.3	-	-	-	3

Tabla 14. Resultados de parámetros y contaminantes en el primer cuatrimestre del curso 2025/2026

La Tabla 15 recoge para cada contaminante las conclusiones resumidas de estudiar estas aulas desde el curso 2024/2025:

- Sistema de ventilación con **insuficiente capacidad de dilución** por la reducción del caudal que queda evidenciado en los valores altos de CO<sub>2</sub> y TVOC. La ventilación no es capaz de renovar el aire interior eficazmente hasta que no se vacían las aulas.
- El **CO<sub>2</sub>** se encuentra **superior a los límites recomendados** en más de un tercio del tiempo para las aulas con mayor ocupación. Las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> aumentan la probabilidad de transmisión de **enfermedades que se contagian por aerosoles**. A mayor valor de CO<sub>2</sub>, mayor proporción de aire que respiramos ya ha sido respirado por otras personas.
- Al igual que con el CO<sub>2</sub>, los **TVOC han sobrepasado los límites** en todas las aulas estudiadas durante un tercio del tiempo.

## Trabajo Fin de Grado

- No se ha podido relacionar los **COVs** con otros parámetros como temperatura, humedad u otros contaminantes.
- El **CH<sub>2</sub>O** es **directamente proporcional a la temperatura** y parece ser producido por los materiales y el mobiliario de las aulas. Cuando la **ventilación** está **activada consigue ser eliminado** en prácticamente su totalidad.
- En todas las aulas se detectan concentraciones de **O<sub>3</sub>** que **superan el límite** establecido. La presencia de ozono en ambientes interiores no es habitual y puede presentar un riesgo para la salud.
- El sistema de filtrado consigue **eliminar eficazmente** los **contaminantes sólidos**. Registrando concentraciones de materia particulada cercanas a 0.
- En ocasiones, la calidad del aire interior de las aulas no alcanza los valores adecuados para asegurar el bienestar y la salud de los ocupantes.

Parámetro	Resumen	Apunte
CO <sub>2</sub>	Se detecta capacidad insuficiente de dilución por escaso caudal de ventilación, especialmente en aulas con alta ocupación.	Continuar seguimiento presencial aulas para controlar y asegurar las condiciones de contorno
TVOC	Alto contenido no esperado de TVOC general. Insuficiente caudal de ventilación para la dilución. Sin relación aparente con O <sub>3</sub> interior.	Seguir analizando las aulas y la relación con otros parámetros. Comprobar causa de alta concentración
CH <sub>2</sub> O	Altamente dependiente de T <sup>a</sup> , concentraciones más altas en meses cálidos. Buena dilución con la ventilación activa, caudal suficiente para la eliminación del contaminante.	
O <sub>3</sub>	Concentraciones altas, situación no esperada en un espacio interior. Probable dependencia con el sistema de Polarización Activa.	Continuar análisis aulas. Confirmar dependencia de O <sub>3</sub> con sistema de Polarización Activa.

Tabla 15. Resumen de los parámetros más relevantes estudiados el periodo completo de medición

## 2. Polarización Activa como sistema de LA

- **Probable productor de ozono** y de otros **contaminantes volátiles** como ya se ha observado en estudios previos de otros limpiadores electrónicos.
- Los sistemas electrónicos únicamente eliminan contaminantes sólidos como la materia particulada. Reducir el caudal basándose en su instalación conlleva una disminución de la capacidad de dilución de contaminantes gaseosos. Esto respalda los estudios que señalan que **no es adecuado justificar reducir el caudal exterior mediante la instalación de sistemas LA**.
- Dado que es posible ventilar y diluir simultáneamente tanto contaminantes sólidos como gaseosos, no resulta aconsejable correr riesgos innecesarios.

## 3. Filtro CPZ como sistema de LA

- No parece lograr eliminar los contaminantes gaseosos como los TVOC. Se deja como línea de futuro el estudio de la vida útil de los filtros instalados, así como el análisis de costes y la verificación de su reemplazo o la existencia de un plan de mantenimiento.

## 5. Líneas de futuro

- Seguir estudiando los contaminantes de FyL. Valorar posibles modificaciones en los espacios donde están conectados los sensores por espacios más adecuados para asegurar una ocupación suficiente y relevante.
- Analizar los valores de  $O_3$  en el interior tanto en los espacios de FyL como en otros sin esos sistemas de limpieza de aire. Acompañar estos estudios de medidores de ozono complementarios a los dispositivos ya instalados para asegurar fiabilidad y rigurosidad en los datos.
- Desconectar los sistemas de Polarización Activa de FyL y medir en esas condiciones para posteriormente comparar los contaminantes con los periodos en los que está activa.
- Estudiar la procedencia de  $NO_2$  en interiores.
- Comprobar que el formaldehído sigue siendo correctamente diluido en espacios más grandes con el caudal de ventilación introducido.
- Comprobar si ocurre un empeoramiento de presencia de contaminantes gaseosos en las aulas por el deterioro del sistema CPZ. Estudiar la vida útil y el coste de mantenimiento de estos filtros y verificar si existe un plan para ello.
- Continuar el estudio iniciado por Sabina Aguirán de subproductos generados por purificadores de aire con iones.
- Comprobar los resultados medidos en las aulas de FyL con las medidas del equipo de SGS.

## Bibliografía

- [1] Naciones Unidas. (s. f.). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] Campano, M. Á., Fernández-Agüera, J., & Sendra, J. J. (Eds.). (2023). *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: Estrategias de aplicación práctica*.
- [3] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (s. f.). *Documentos técnicos de instalaciones en la edificación (DTIE 1.09): Ventilación en edificios terciarios*. ATECYR.
- [4] Universidad de Zaragoza, Unidad Técnica de Construcciones y Energía, & UTE Magén Arquitectos SLP – Ingeniería Torne SL. (2020). *Proyecto de climatización, solar y ventilación: Reforma y ampliación de la Facultad de Filosofía y Letras* (Memoria, versión 1, 02/07/2020).
- [5] “Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica” (pág 18)
- [6] Krull, B., Graham, D., & Lee, C. (2024). *Bipolar ionization: Understanding the difference between theory and practice*. Independent Consultants.
- [7] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (2020). *DTIE 2.07: Las instalaciones de climatización, SARS-CoV-2 y calidad de aire*. ATECYR.
- [8] Afshari, A., Seppänen, O., Olesen, B. W., & Mo, J. (2021, octubre). *Effect of portable gas-phase air cleaners on indoor air quality*.
- [9] Ruiz de Adana, M., Jiménez, E., Jiménez, J. L., Minguillón, M. C., Ballester, J., & Querol, X. (2021, 29 de abril). *Informe del GTM1: Equipos autónomos para la limpieza del aire y sensores para el control de la transmisión de SARS-CoV-2 por aerosoles*. Grupo de Trabajo Multidisciplinar (GTM).
- [10] Papathanasiou, S. (2025, 3 de julio). *GO IAQS Breakpoints – 2nd Session*. GO AQS. Recuperado de <https://goaqs.org/2025/07/03/go-iaqs-breakpoints-2nd-session/>
- [11] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE)* (Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, y sus modificaciones). Gobierno de España.
- [12] FGM Estudios. (2020). *Ficha técnica SIAV AL-25.24G* (Rev. 2016).
- [13] Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 207, 29 de agosto de 2007, pp. 35987–36076. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027>
- [14] BCe, CGATE, & AEICE. (2021). *Edificios y salud: Reinventar el hábitat pensando en las personas*. Woene Estudio. ISBN 978-84-09-33383-7.
- [15] Environmental Protection Agency. (2023). *Air pollutant emissions and possible health effects associated with electronic air cleaners* (Final Report, Agreement No. A23-1321).

## Trabajo Fin de Grado

- [16] Aire Limpio. (s. f.). *Sistema integrado de purificación por polarización activa y por oxidación fotocatalítica*. Recuperado de <https://www.airelimpio.com/calidad-aire/polarizacion-activa-sipap/>
- [17] Aire Limpio. (s. f.). *Polarización activa SIPAP®*. Recuperado de <https://www.airelimpio.com/calidad-aire/polarizacion-activa-sipap/>
- [18] Aire Limpio. (2018, 19 de diciembre). *Tipos de filtros*. Recuperado de <https://www.airelimpio.com/faq-items/tipos-de-filtros/>
- [19] Espinosa Hurtado, E. (2009). *Evaluación de la eficiencia de filtros a base de zeolita y carbón activado para retener microorganismos del aire interno de refrigeradores domésticos*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Centro de Investigaciones Químicas.
- [20] Global Open Air Quality Standards. (2025). *Global Open Air Quality Standards (GO AQS). White paper summary (V1.0)*. <https://www.goaqs.org>
- [21] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *RITE - Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/rite.html>
- [22] Aire Limpio. (2019, octubre). *Sistemas integrados de purificación por polarización activa: SIPAP® V8*.
- [23] inBiot. (2021, agosto). *Compuestos orgánicos volátiles – TVOC*. Recuperado de <https://www.inbiot.es/es/wikinbiot/tvoc>
- [24] Envira. (2020, 18 de junio). *¿Qué es la contaminación por ozono?* Recuperado de <https://envira.es/que-es-la-contaminacion-por-ozono/>
- [25] Gaona Colmán, E. (2013). *Cinética y mecanismos de las reacciones de ozonólisis de una serie de compuestos orgánicos volátiles oxigenados e insaturados (COVOIs) empleando diferentes cámaras de simulación atmosféricas* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Asunción.
- [26] World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [27] España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)* (Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, modificado por el Real Decreto 178/2021). <https://www.boe.es>
- [28] Asociación Española de Normalización. (2019). *UNE-EN 16798-1:2019. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de edificios. Parte 1: Parámetros de ambiente interior para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios*. AENOR.
- [29] ASHRAE. (2015). *ASHRAE position document on filtration and air cleaning*.

## Trabajo Fin de Grado

- [30] García-Monge Rábanos, M. (2024). *Anexo. Caracterización de la inercia térmica y análisis de datos de calidad de aire interior en edificios del sector terciario* (Trabajo Fin de Máster). Universidad de Zaragoza, Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- [31] inBiot Monitoring. (s. f.). *MICA – Monitor inteligente de calidad de aire interior*. inBiot. <https://www.inbiot.es/es/productos/dispositivos-mica/mica>
- [32] García-Monge, M. (2025). *Ubicación sensores v2*
- [33] *Bioy-ciencias*. (2014). **TEMA 10: Contaminación atmosférica** [PDF]. Recuperado de <https://bioy-ciencias.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/10/tema-10-contaminacion3b3n-atmosferica1.pdf>
- [34] Rey Martínez, F. J., Vicente Quiles, P. G., & Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2022). *DTIE 1.09 : ventilación en edificios terciarios*. ATECYR.
- [35] Changes in IAQ caused by corona discharge air cleaner. (2019). *ASHRAE Journal*, septiembre.
- [36] Jimenez, J. L. (2023, 4 de septiembre). *Airborne disease transmission: how it works, why it was misunderstood, and how to fight it* [Ponencia plenaria]. European Aerosol Conference, Málaga, España. Universidad de Colorado, Boulder.
- [37] Martins, C., Teofilo, V., Clemente, M., et al. (2025). *Sources, levels, and determinants of indoor air pollutants in Europe: A systematic review*. *Science of the Total Environment*, 964, 178574.
- [38] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2025). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2025: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. American National Standards Institute.
- [39] Fisk, W. J. (2007, octubre). Can sorbent-based gas phase air cleaning for VOCs substitute for ventilation in commercial buildings?
- [40] Destailats, H., Sleiman, M., & Fisk, W. J. (2014, diciembre). *Evaluation of pollutant emissions from portable air cleaners* (Informe preparado para California Air Resources Board y California Environmental Protection Agency, Research Division).
- [41] Zeng, Y., et al. (2021). *Evaluating a commercially available in-duct bipolar ionization device for pollutant removal and potential byproduct formation*. *Building and Environment*.
- [42] Fisk, W. J., Singer, B. C., & Chan, W. R. (2020). *Association of residential energy efficiency retrofits with indoor environmental quality, comfort, and health: A review of empirical data*. *Building and Environment*, 180, 107067. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107067>
- [43] SGS. (s. f.). *SGS España – Inspección, verificación, ensayos y certificación*. SGS. <https://www.sgs.com/es-es/>

## Anexos

### Anexo I: CAI en el edificio de FyL en el curso 2024/2025

#### Objetivo del estudio y descripción de la instalación

Plasmar la respuesta que está teniendo el sistema de ventilación instalado en el edificio de FyL. Comprobar si la ventilación mecánica es óptima para asegurar la salud en los espacios interiores.

Variable	Valores óptimos	Valores aceptables	Valores críticos
CO <sub>2</sub> (ppm)	400-900 ppm (IDA 1-2)	900-1200 ppm (IDA 3)	>1200 ppm
TVOC (index 0-500)	< 100 index	200-400 index	> 400 index
Formaldehído (µg/m <sup>3</sup> )	< 70 µg/m <sup>3</sup>	70-120 µg/m <sup>3</sup>	> 120 µg/m <sup>3</sup>
PM1.0 (µg/m <sup>3</sup> )	< 12 µg/m <sup>3</sup>	12-35 µg/m <sup>3</sup>	> 35 µg/m <sup>3</sup>
PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )			
PM4 (µg/m <sup>3</sup> )			
PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	< 50 µg/m <sup>3</sup>	50-100 µg/m <sup>3</sup>	> 100 µg/m <sup>3</sup>

Tabla 16. Tomado de Informe resumen del análisis de IAQ en Filosofía y Letras. Propuesta de nuevos equipos de monitorización (p. 1), por M. García-Monge, febrero de 2025.

Para ello se dispone de 10 medidores de la marca inBiot en 10 espacios interiores distintos: 3 en despachos, 3 en aulas, 2 en secretaría, uno en un seminario y uno en una sala de juntas.

El último informe, realizado por Miguel García-Monge, analiza los medidores hasta el final del periodo lectivo con clase del curso 2023/24 que correspondiendo con el calendario académico de Unizar termina el 10 de mayo. Este informe, por lo tanto, plasma los resultados por separado durante el primer y segundo cuatrimestre del curso 2024/2025. El primer cuatrimestre está analizado en el periodo del 18 de noviembre al 13 de diciembre de 2024 mientras que el segundo cuatrimestre se analiza del 20 de enero al 9 de mayo de 2025, de las 8h a las 20h y en los 5 días lectivos entre semana. El último día de cada periodo coincide con la finalización del periodo lectivo con clases.

Se analizan los sensores MICA y MICA Plus instalados hasta la fecha que son los siguientes:

Sensor	Ubicación	Uso
A1.07 (MICA 1)	Edificio A	Sala juntas
A1.15 (MICA 2)	Edificio A	Secretaría
E2.04 (MICA PLUS 3)	Edificio E	Despacho
A3.2 (MICA PLUS 4)	Edificio A	Aula
B2.S02 (MICA PLUS 5)	Edificio B	Despacho
B3.2 (MICA 6)	Edificio B	Seminario
A2.2 (MICA PLUS 7)	Edificio A	Aula
A4.2 (MICA 8)	Edificio A	Aula
B2.N14 (MICA PLUS 9)	Edificio B	Despacho
B1.P05 (MICA 10)	Edificio B	Secretaría

Tabla 17. Descripción, ubicación y uso de los 10 sensores de inBiot instalados en la facultad de FyL

Periodo lectivo del primer cuatrimestre del curso 2024/25. Del 18 de noviembre al 13 de diciembre de 2024

## Análisis de contaminantes

### Consideraciones sobre los datos

A pesar de que el objetivo de este estudio era analizar la situación de los espacios durante todo el primer cuatrimestre del curso escolar, no se dispone de continuidad completa en la recogida de datos de los medidores MICA PLUS, probablemente por fallos de comunicación entre los dispositivos a través de la red LoRaWAN como muestra la Tabla 18.

En concreto, no existen datos registrados desde el 4 de septiembre– primer día lectivo del curso– hasta el 11 de ese mismo mes. Desde esta fecha hasta el 17 de octubre únicamente se registran datos de los MICA 7 y 9 correspondientes al aula A2.2 y B2.N14. Finalmente, vuelve a no haber registro en ninguno de los medidores desde el 17 octubre hasta el 14 de noviembre.

Con el fin de no condicionar los resultados se ha considerado como tiempo de estudio desde el primer periodo en el que comienzan a comunicar correctamente los medidores, es decir el 18 de noviembre, lunes, hasta el final del periodo lectivo de este cuatrimestre, el 13 de diciembre, viernes.

Sensor	Periodo 1 <u>sin</u> comunicación	Periodo 2 <u>sin</u> comunicación
E2.04 (MICA PLUS 3)	4/09/2024 - 14/11/2024	
A3.2 (MICA PLUS 4)	4/09/2024 - 14/11/2024	
B2.S02 (MICA PLUS 5)	4/09/2024 - 14/11/2024	
A2.2 (MICA PLUS 7)	4/09/2024 - 11/09/2024	17/10/2024 – 14/11/2024
B2.N14 (MICA PLUS 9)	4/09/2024 - 11/09/2024	17/10/2024 – 14/11/2024

Tabla 18. Registro fallos de dispositivos MICA Plus en el primer cuatrimestre

## CO<sub>2</sub>

La Figura 17 muestra el histórico del CO<sub>2</sub>. El seminario **B3.2** sobrepasa las 1000ppm en numerosas ocasiones e incluso alcanza y **supera las 1200ppm** llegando a un máximo de **1701ppm el 26 de noviembre**. Se producen también en el aula **A2.2** varios picos que superan el límite de 800ppm superando en varias ocasiones las 1000ppm. Y aunque menos pronunciado, ocurre también en el aula A4.2. En general se producen picos de concentración de CO<sub>2</sub> por encima del límite de 1200ppm exceptuando los espacios correspondientes a los MICA 2, 3, 5 y 9. Es probable que estos cuatro espacios no superen las 800 ppm, ya que se trata de despachos y secretaría, zonas con baja ocupación donde la generación de CO<sub>2</sub> es reducida, por lo que no alcanza niveles más altos como los observados en otras aulas.

## Trabajo Fin de Grado

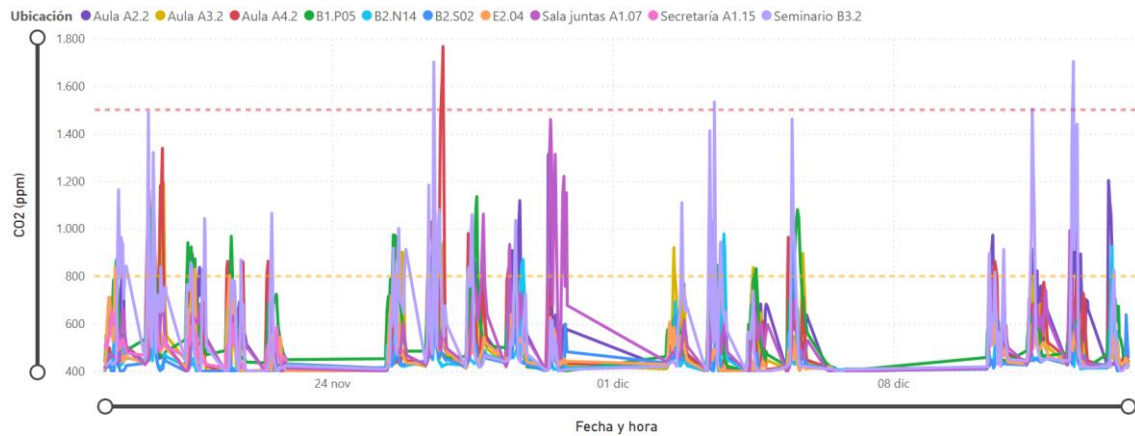


Figura 17. Evolución del CO2 en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre

Contemplando la concentración de CO2 en distintos rangos de contaminación se observan buenos resultados, únicamente en un **1,97%** del tiempo la concentración ha superado las **1000ppm**. Durante el 7,24% del tiempo la concentración de CO2 es superior a 800ppm. El MICA 6 del seminario B3.2 corresponde al espacio de peor calidad de aire en un 15,4% del tiempo medido, en el aula medida con el MICA 7, el A2.2, presenta en un 13,1% del horario valores superiores a 800ppm.



Figura 18. Porcentaje por equipo de concentración de CO2 por franjas

## Temperatura

En la mayoría de espacios y durante la mayor parte de los días la temperatura se instala dentro de los niveles de confort de entre 17 y 27°C produciéndose algún pico de temperatura más alta y baja, pero que representan casos puntuales como en la sala de juntas A1.07 o en el despacho B2.S02.

## Trabajo Fin de Grado

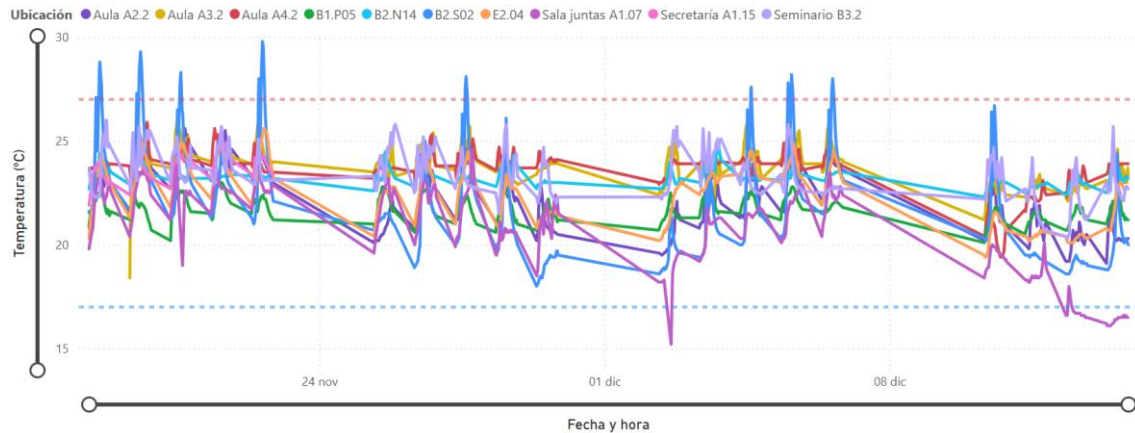


Figura 19. Evolución de temperatura en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre

## TVOCs

La Figura 20 muestra el histórico de valores de TVOC de los 10 medidores. Aunque los medidores no diferencian los distintos compuestos volátiles, observar la concentración total de los mismos sí nos informa de una mala calidad de aire interior. A pesar de que los niveles de CO<sub>2</sub> no son especialmente altos —lo que probablemente se deba a una baja ocupación o a una ventilación aparentemente suficiente—, los datos indican que los contaminantes gaseosos no se eliminan de manera efectiva. Esto se refleja en los elevados valores de compuestos orgánicos volátiles totales, que superan en numerosos casos el índice recomendado de 200 e incluso alcanzan niveles críticos por encima de 400.

En espacios como el despacho **B2.N14** o la secretaría **A1.15**, entre otros, se registran picos que sobrepasan ampliamente el índice 400, alcanzando concentraciones de hasta **2383**. Aunque con valores menos extremos, el seminario B3.2 y el aula A2.2 también superan en varias ocasiones el índice 200, e incluso el 400 hacia finales de diciembre. Se trata de valores no únicamente altos, sino que se prolongan en el tiempo, lo que indica una acumulación sostenida de compuestos volátiles y una escasa renovación del aire. Sería conveniente analizar con mayor detalle la causa de estos resultados, ya que podrían estar relacionados con el sistema de ventilación o con la presencia de fuentes internas de contaminantes.

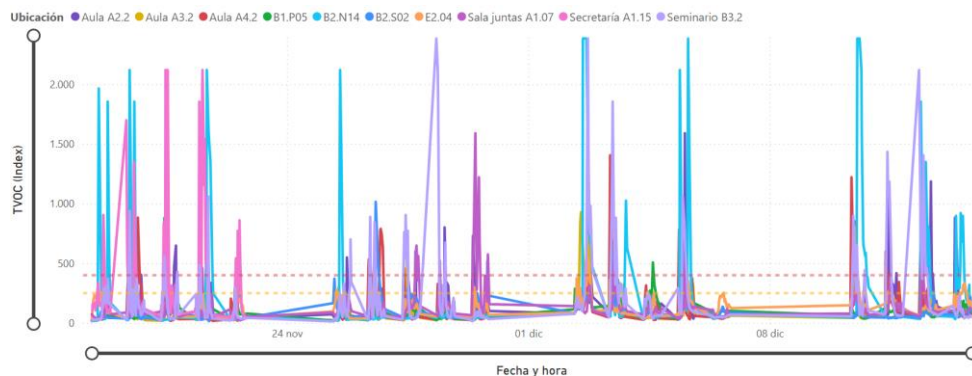


Figura 20. Evolución de TVOCs en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre

## Trabajo Fin de Grado

En el gráfico de barras de la Figura 21 se comprueba que durante el 19,3% del tiempo se ha superado el índice de 200 siendo **superior a 400 un 7,2%** del tiempo. La secretaría **A1.15** representa los peores resultados de volátiles siendo superiores a 200 el **34%** del tiempo y **superiores al índice 400 un 18,5%**. El seminario **B3.2** también concentraciones superiores de 400 un **15,2%** del tiempo y el **B2.N14** el **17,3%** del tiempo.

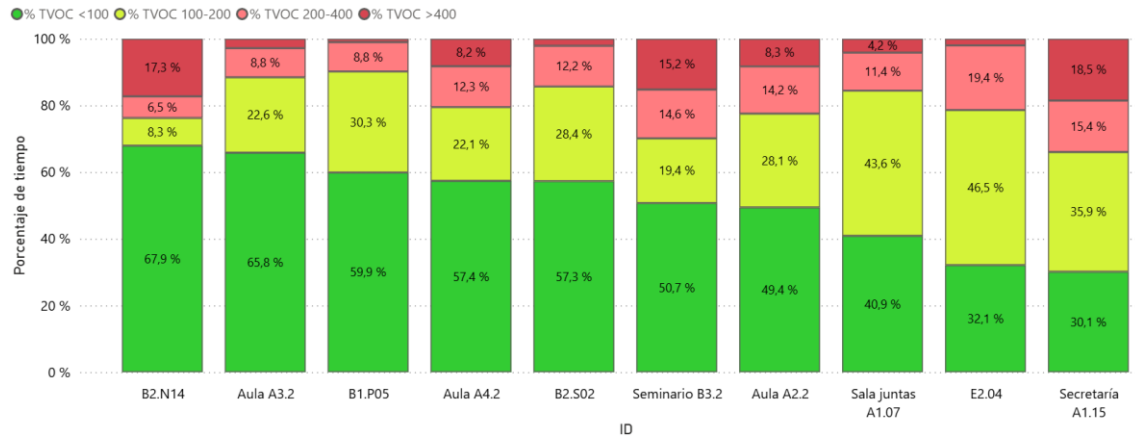


Figura 21. Porcentaje por equipo de concentración de TVOCs por franjas

## Formaldehído

Los resultados medidos de formaldehídos mostrados en la

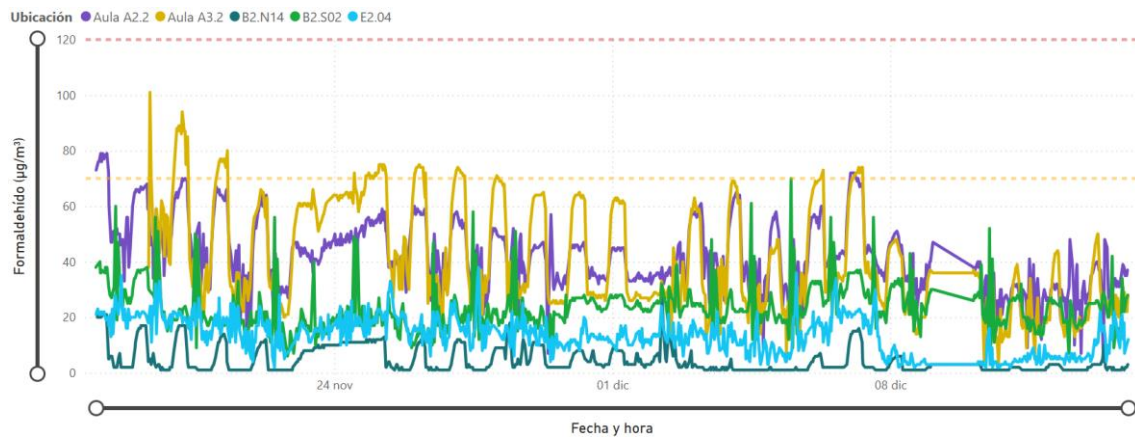


Figura 22 muestran que las concentraciones se mantienen inferiores a los límites de riesgo de  $120 \mu g/m^3$ . El aula A3.2 es la única que supera los  $70 \mu g/m^3$ .

Trabajo Fin de Grado

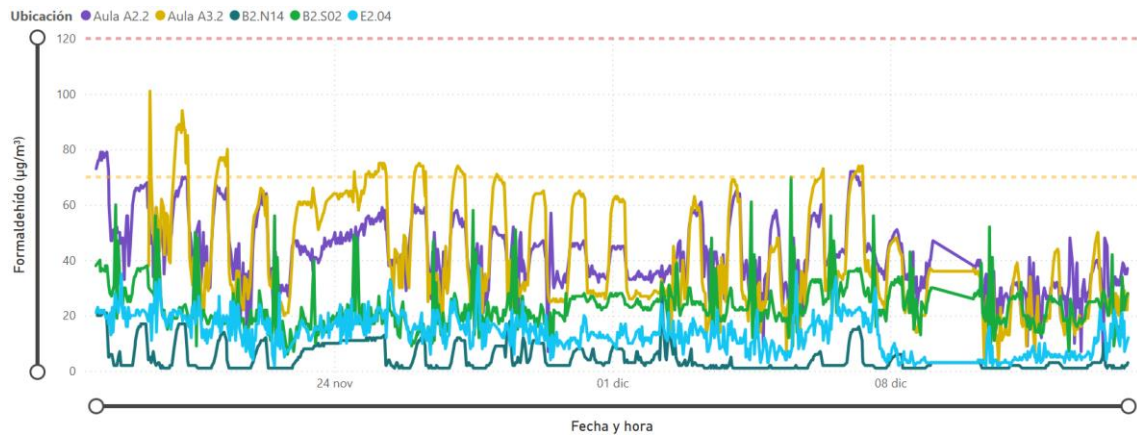


Figura 22. Evolución de formaldehído en los 5 sensores MICA PLUS entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre

En el informe del 25 de marzo al 13 de mayo de 2024 realizado por Miguel Monge-García se observaba una correlación de la temperatura con la concentración de formaldehído y se planteaba la hipótesis de que la producción de este contaminante se favorecía con el aumento de temperatura. Al tratarse esta época de una fría no existe apenas presencia del contaminante y por lo tanto no se puede estudiar la relación con la temperatura como muestra la Figura 23, con la humedad (Figura 24) o con otros parámetros.

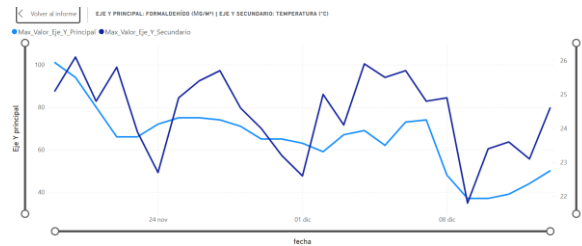


Figura 23. Relación concentración de formaldehído y temperatura para el aula A3.2

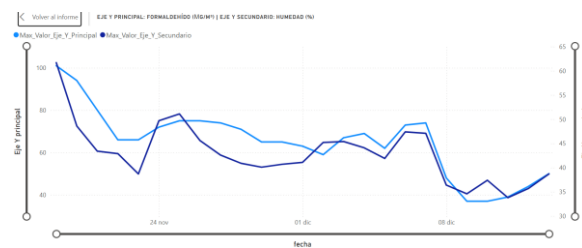


Figura 24. Relación concentración de formaldehído y humedad para el aula A3.2

**Materia particulada**

En general, la concentración de materia particulada es baja sin superar ni acercarse en ningún caso el valor límite de 35 µg/m³ ni de 100 µg/m³ para PM10. Esto puede indicar un correcto funcionamiento de los sistemas de filtración de aire mecánicos encargado de las partículas sólidas.

## PM1

Se adjunta la gráfica de la Figura 25 de partículas de 1  $\mu\text{g}$  puesto que por ser las más pequeñas presentan el riesgo más alto a la salud ya que penetran más fácilmente en el organismo. Como para el resto de materia particulada de tamaños más grandes y como se ha comentado ya, la concentración en el aire es adecuada.

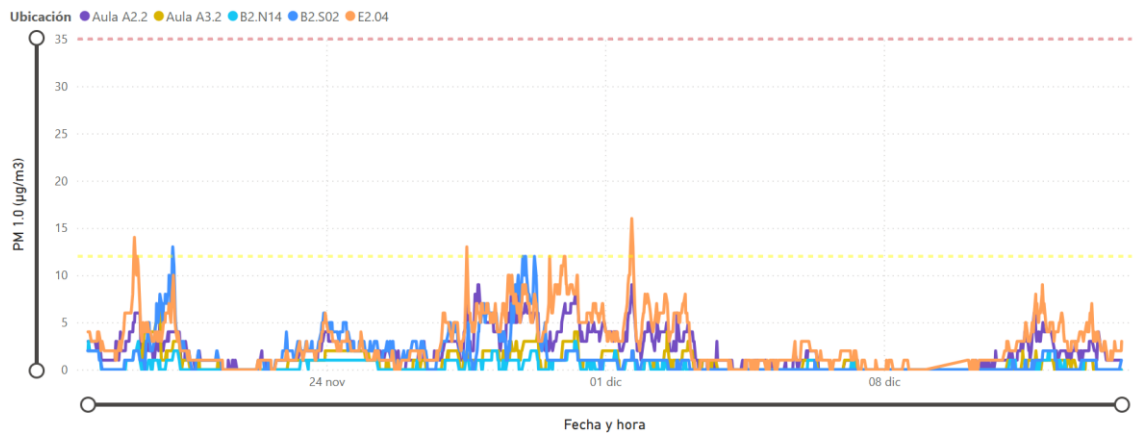


Figura 25. Evolución de la materia particulada PM1 en los 10 sensores entre el 18 de noviembre y el 13 de diciembre

## Conclusiones

En este informe se han analizado y estudiado los resultados recogidos por los 10 medidores MICA y MICA Plus situados en 10 localizaciones diferentes del edificio del Filosofía y Letras durante los 20 días lectivos en los que tanto las comunicaciones de los dispositivos como los sensores funcionaban correctamente.

Aunque es probable que los resultados estén influenciados por una baja ocupación sobre todo de las aulas debida a que el periodo de estudio ocurre en el final del cuatrimestre, coincidiendo con un descenso de participación de alumnos a las clases, sí se confirma que los resultados coinciden con las conclusiones sacadas en el estudio del segundo cuatrimestre del curso 2023/24.

Ayudando las conclusiones del informe 23 del 22 de mayo de 2024, los peores resultados de **CO<sub>2</sub>** se producen durante un **7%** del tiempo en el seminario **B3.2** (MICA 6) registrando concentraciones superiores a las 1000ppm como **1701, 1508 o 1500ppm**. El aula **A2.2** (MICA 7) experimenta picos de valores superiores a 1200ppm como **1479 o 1228ppm**. Aunque en menor medida, coincide de nuevo con las observaciones de dicho informe previo los resultados negativos correspondientes a los espacios medidos por el MICA 8 y MICA 10. Se valora estudiar las condiciones de ventilación y si es suficiente el caudal del aire proporcionado por el sistema de limpieza de aire instalado.

Aunque la temperatura en la mayoría de los espacios se mantiene dentro del rango de confort, se observan picos puntuales de temperaturas tanto superiores como inferiores

## Trabajo Fin de Grado

que indican episodios de desajuste térmico. Estas temperaturas pueden afectar al confort de los ocupantes y muestran una regulación térmica mejorable.

En cuanto a los TVOCs, los índices superiores a 200 se registran durante un 34% del tiempo por el MICA 2, en secretaría, en el seminario B3.2 por el MICA 6 durante un 30% del tiempo, en el despacho B2.N14 (MICA 9) un 23,8% del tiempo y un 21,4% en despacho E2.04 (MICA 3). De nuevo estos resultados coinciden con las conclusiones del informe 23.

El formaldehído también se encuentra en valores estables e inferiores a  $70\mu\text{g}/\text{m}^3$  superado únicamente en el aula A3.2 sin alcanzar los  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ . No se puede demostrar, como sí ocurría en el informe 23, que la producción de estos contaminantes tenga relación con la temperatura.

La materia particulada se mantiene en general dentro de los límites recomendados y los picos experimentados en los espacios B2.S02 y E2.04, aunque puntuales, podrían ser consecuencia de una situación particular en los espacios esos días. No se puede confirmar nada al respecto por no conocer la casuística.

Con estos resultados cabría estudiar, sobre todo, si la ventilación mecánica aportada a las aulas es suficiente para asegurar el confort térmico y una adecuada eliminación de los contaminantes del aire.

Periodo lectivo del segundo cuatrimestre del curso 2024/25. Del 20 de enero al 9 de mayo de 2025

### Análisis de contaminantes

En el segundo cuatrimestre de este año académico se analizan los resultados del **20 de enero al 9 de mayo** de 2025.

#### CO<sub>2</sub>

La Figura 26 muestra el histórico del CO<sub>2</sub>. En contraposición con las observaciones del primer cuatrimestre, en este más espacios sufren concentraciones altas de CO<sub>2</sub>. El seminario **B3.2** presenta en numerosas ocasiones concentraciones por encima de las 1000ppm en valores como **1343, 1421, 1464 o 1455ppm** y teniendo picos que **superan** en numerosos momentos incluso las **1500ppm**. Los valores más altos se encuentran en **1788, 1784 o 1702ppm**. Otra aula que sobrepasa las 1000ppm es el **A3.2** con valores tan altos como **1618, 1713 o 1651ppm** y moviéndose cerca de las 1200ppm como **1307ppm** el 7 de mayo o **1217ppm** el 27 de enero.

Se registran otros picos en el despacho **E2.04** y en la sala de juntas **A1.07** que también superan las 1000ppm. En general exceptuando los espacios correspondientes a los MICA 2, 5, 9 y 10 se producen picos de concentración de CO<sub>2</sub> por encima de los límites considerados óptimos para un espacio cerrado.

## Trabajo Fin de Grado

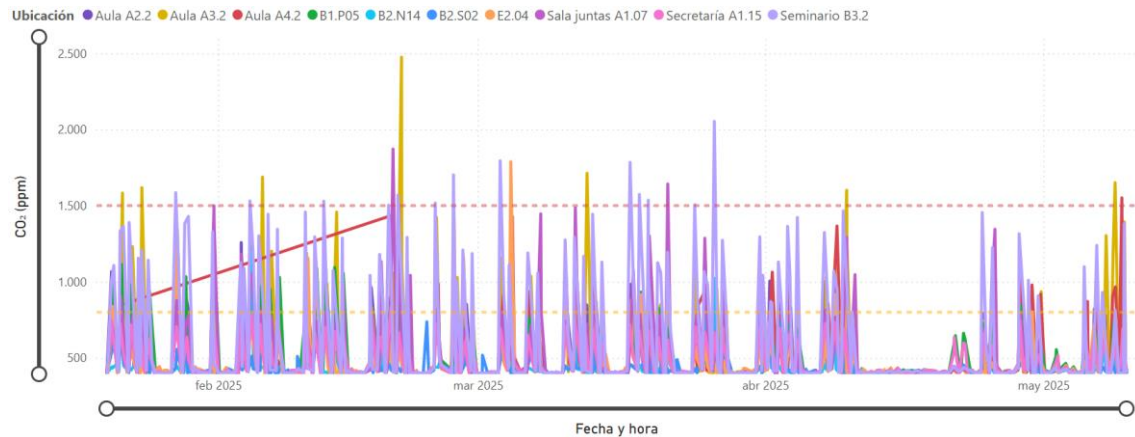


Figura 26. Evolución de CO<sub>2</sub> en los 9 sensores entre el 20 de enero y el 9 de mayo

Sin tener en cuenta los sensores que no alcanzan picos de concentración que sobrepasen las 800ppm (MICA 2, 3, 5 y 9), la concentración de CO<sub>2</sub> en distintos rangos se registra durante el 7,65% del tiempo superior a 800ppm. Teniendo en cuenta los 10 espacios, el porcentaje de tiempo en el que las concentraciones se mueven entre 100 y 1500 es del **2%** y del 0,17% por encima de 1500.

La Figura 27 muestra al seminario **B3.2** como espacio de peor calidad de aire con una concentración **superior a 100ppm** un **7,5%** del tiempo medido. Otras ubicaciones como las aulas A3.2 y A2.2, o la secretaría B1.P05 presentan en alrededor de un 4% del horario valores superiores a 1000ppm.

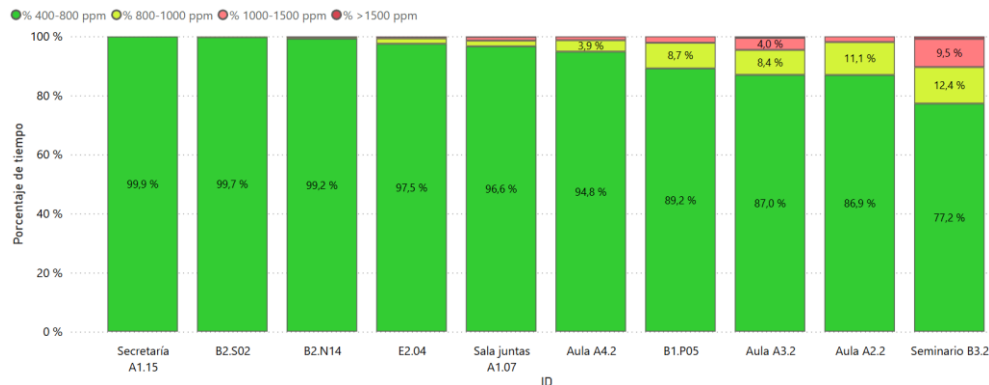


Figura 27. Porcentaje por equipo de concentración de CO<sub>2</sub> por franjas

## Temperatura

A excepción del despacho B2.S02, la mayoría de los espacios y durante la mayor parte de los días la temperatura se instala dentro de los niveles de confort de entre 17 y 27°C como muestra la Figura 28. La única excepción del despacho **B2.S02** produciéndose en numerosas ocasiones un aumento de temperatura por encima de los 27°C recomendados alcanzando incluso los 35°C. Debido a que se trata de temperaturas excesivamente altas,

## Trabajo Fin de Grado

sería recomendable analizar las condiciones del sensor y la sala para comprobar su correcto funcionamiento. Además, habría que visitar ese despacho para descartar que el sensor esté mal ubicado o afectado por carga solar directa o por algún equipo de calefacción.

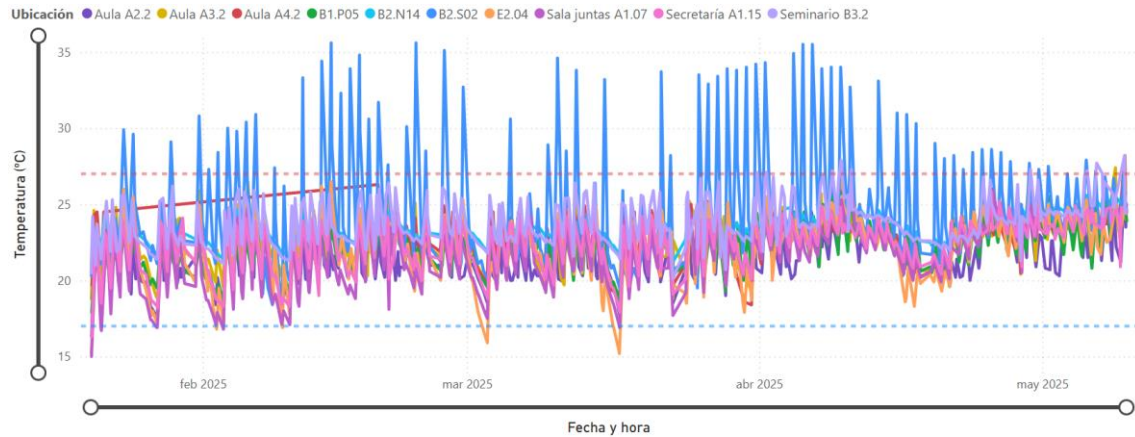


Figura 28. Evolución de temperatura en los 9 sensores entre el 20 de enero y el 9 de mayo

Como se confirma con la Figura 29, durante un 98,6% del tiempo, la mayor parte de este, las temperaturas se encuentran en el rango de confort térmico.

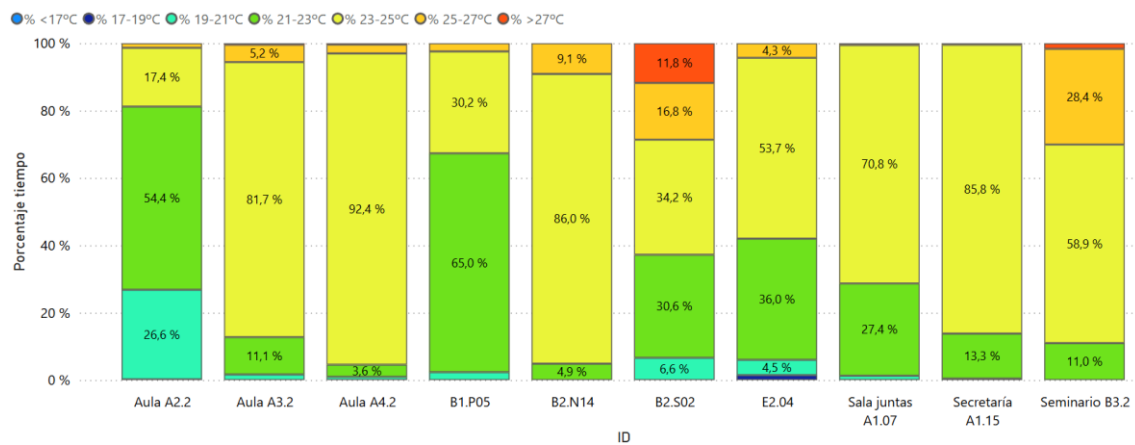


Figura 29. Porcentaje por equipo de concentración de  $T^a$  por franjas

## TVOCs

La Figura 30 muestra el histórico de valores de TVOC de los 9 medidores, los altos niveles de estos contaminantes nos informan de una mala calidad de aire interior. Se supera en la mayor parte del tiempo el valor de índice recomendado de 200 incluso sobrepasándose el índice 400, valor crítico. El **seminario B3.2** representa el espacio con mayor concentración de compuestos volátiles en la mayor parte del tiempo, la sala de juntas **A1.07** y la secretaría **A1.15** también muestran una producción de numerosos picos de volátiles totales que superan con creces el índice 400 alcanzando incluso valores tan altos como 2383. En otras ubicaciones como el despacho B2.N14 o el aula A2.2 la concentración de volátiles no es

## Trabajo Fin de Grado

alta durante todo el tiempo de medición, pero se disparan los valores en cuanto comienza a subir.

En cualquiera de estos casos la situación mostrada en la gráfica debe alertar y es que el índice de contaminantes es en numerosas ocasiones hasta diez veces mayor de lo recomendado.

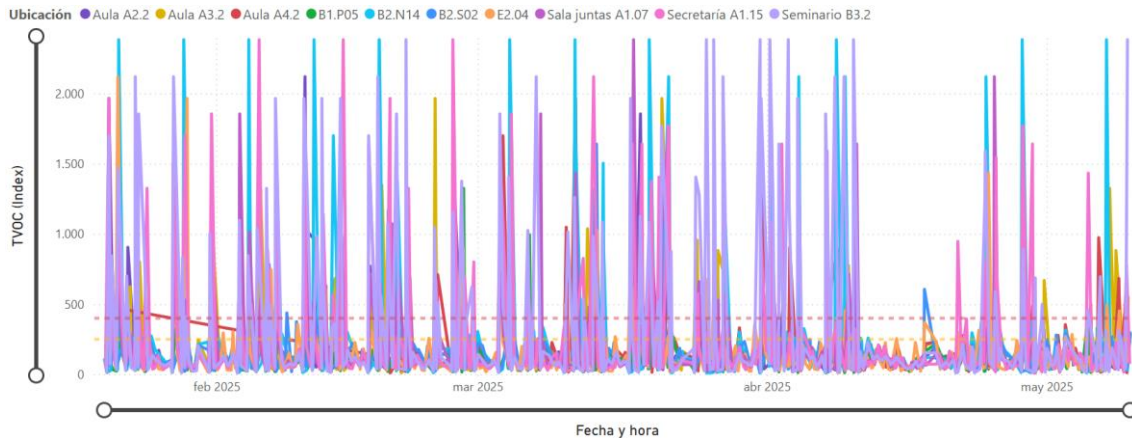


Figura 30. Evolución de TVOCs en los 10 sensores entre el 20 de enero y el 9 de mayo

En el gráfico de barras de la Figura 31 se comprueba que durante el **23,7% del tiempo** se ha **superado el índice de 200** siendo **superior a 400 un 13,2%** del tiempo total estudiado.

El aula **A4.2** presenta los peores resultados de volátiles siendo superiores a 400 en un 53% del tiempo, el seminario **B3.2** en un **19,1%** del tiempo y en otros cuatro espacios: A3.2, A1.15, A2.2 y B2.N14 durante el 12,3%, 10,7%, 9,7% y 9,1% del tiempo respectivamente.

En general son resultados muy elevados y constantes en el tiempo para tratarse de aulas cerradas en las que se permanece periodos de tiempo largos.

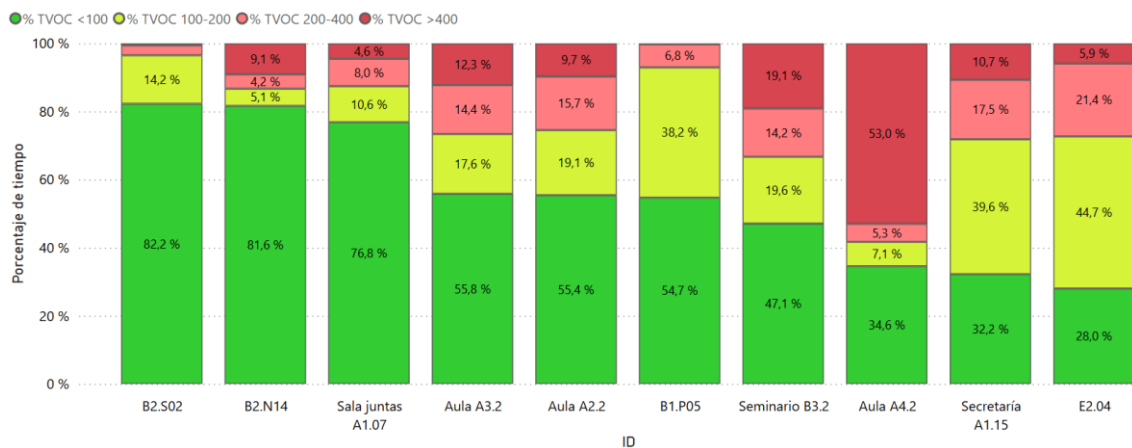


Figura 31. Porcentaje por equipo de concentración de TVOCs por franjas

## Formaldehído

## Trabajo Fin de Grado

En contraposición, los resultados medidos de formaldehído que se muestran en la Figura 32 son positivos ya que salvo en escasas ocasiones puntuales en el aula A3.2 que superan los  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ , los niveles de formaldehído se mantienen por debajo de los  $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

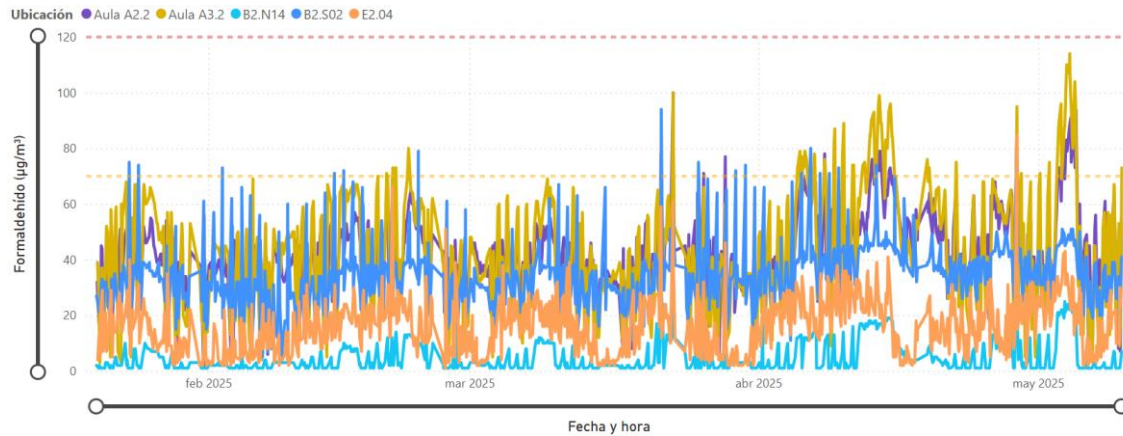


Figura 32. Evolución de formaldehído en los 5 sensores MICA Plus entre el 20 de enero y el 9 de mayo

Para estos meses de estudio no parece existir, como muestra la Figura 33, relación entre la producción de formaldehído y la temperatura. En la gráfica, se relacionan estos dos parámetros para el aula A3.2, la que muestra concentraciones más altas de formaldehído. Sin embargo, la relación aumenta entre el formaldehído y la humedad como plasma la Figura 34, aunque no sea suficiente para concluir como parámetros dependientes el uno del otro.

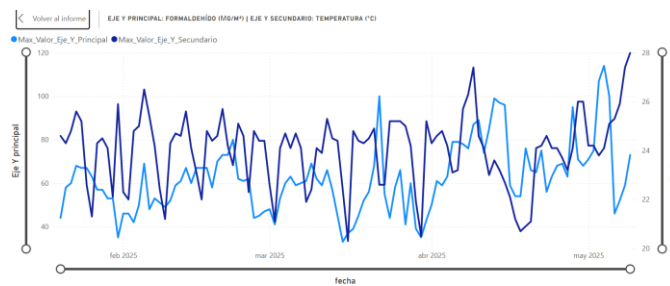


Figura 33. Correlación entre formaldehído y temperatura en el aula A3.2

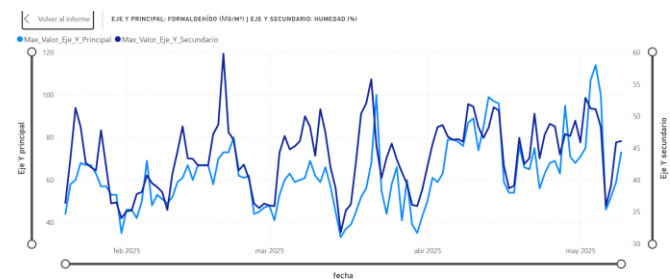


Figura 34. Correlación entre formaldehído y humedad en el aula A3.2

Trabajo Fin de Grado

La concentración de formaldehído comienza a aumentar en el mes de junio, julio y agosto como muestra la Figura 35 y la Figura 36 coincidiendo con las observaciones del Informe 23.

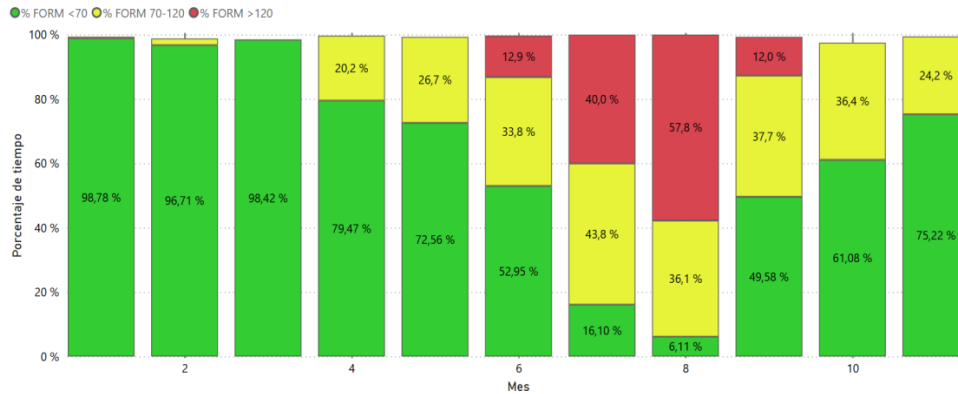


Figura 35. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O por mes del aula A3.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

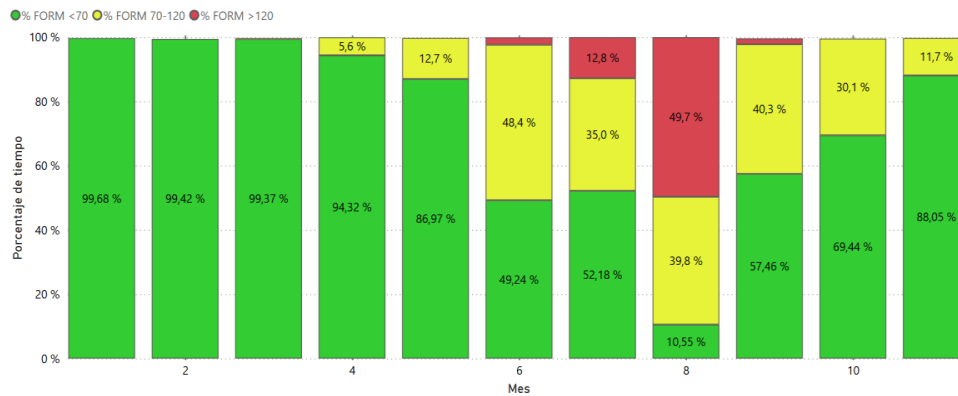


Figura 36. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O por mes del aula A2.2. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Como ya se había observado en el Informe 23, el formaldehído aumenta con la temperatura. La Figura 37 muestra el gráfico de correlación entre el CH<sub>2</sub>O y la temperatura en el aula A2.2 el mes de junio, julio y agosto. El coeficiente de correlación R es alto, de 0,75 y se puede confirmar dicha correlación entre ambos parámetros.

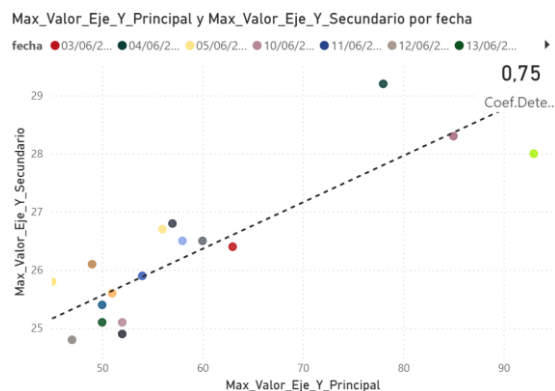


Figura 37. Correlación entre CH<sub>2</sub>O y T<sup>a</sup> para el aula A2.2 en el mes de junio a agosto de 2025

## Trabajo Fin de Grado

Sin embargo, el sistema de ventilación parece ser suficiente para diluir este contaminante. Para el mes de junio en las aulas A3.2 y A2.2 se producen momentos de concentraciones de CH<sub>2</sub>O altas como muestra la Figura 38 que quedan reducidas cuando se estudia para ese mismo mes únicamente el periodo lectivo, de 8h a 20h y de lunes a viernes, tiempo en el que el sistema de ventilación permanece activo como muestra la Figura 39.

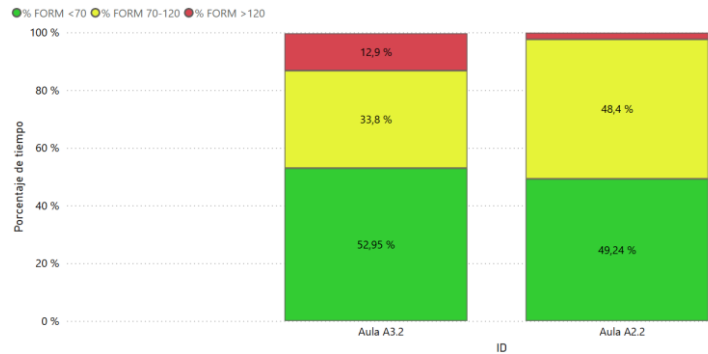


Figura 38. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O en junio en todo el periodo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

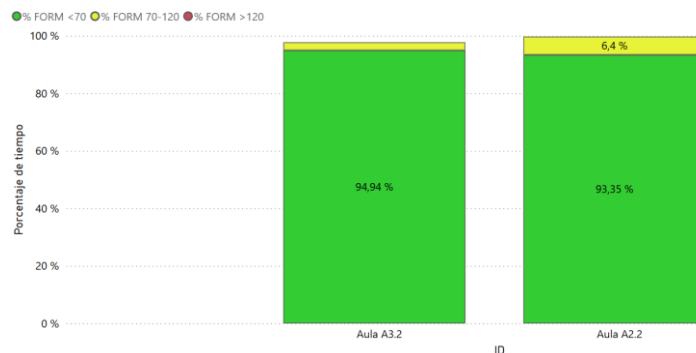


Figura 39. Porcentaje de tiempo por concentración de CH<sub>2</sub>O en junio en horario lectivo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Es decir, estos resultados parecen indicar que el aumento de la temperatura favorece el la emisión de formaldehído de los materiales del interior. Sin embargo, el sistema de ventilación parece limitar su presencia en el aire, bien por la dilución de este o por evitar su generación.

## Materia particulada

En general, la concentración de materia particulada es baja sin superar ni acercarse en ningún caso el valor límite de 35 µg/m<sup>3</sup> ni de 100 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>. Esto puede indicar un correcto funcionamiento del purificador de aire encargado de eliminar las partículas sólidas.

### PM<sub>1</sub>

Se muestra en la Figura 40 la concentración de partículas de 1 µg puesto que por ser las más pequeñas presentan el riesgo más alto a la salud ya que pueden penetrar más

## Trabajo Fin de Grado

fácilmente en el organismo. Como para el resto de materia particulada de tamaños más grandes y como se ha comentado ya, la concentración en el aire en las aulas estudiadas no presenta un problema para la salud.

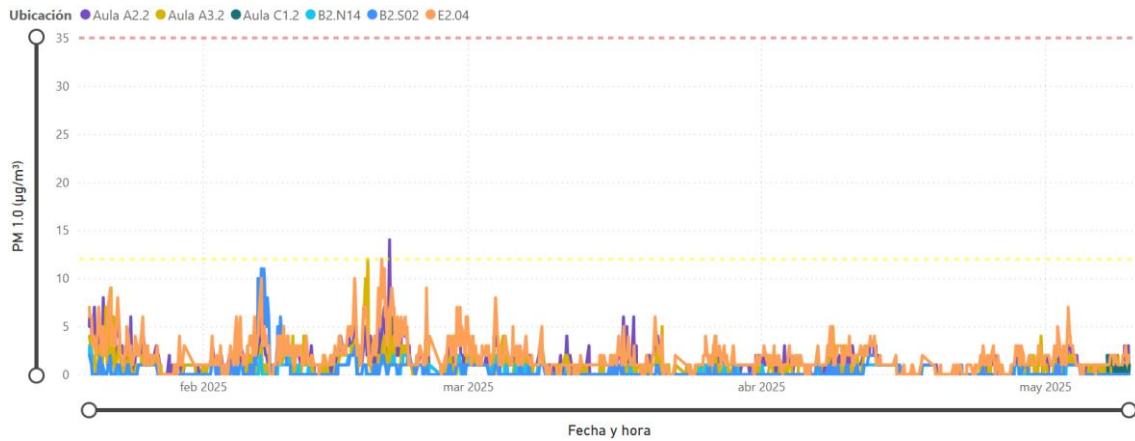


Figura 40. Evolución de PM1 en los 5 sensores MICA Plus entre el 20 de enero y el 9 de mayo

## Conclusiones

En este informe se ha analizado y estudiado los resultados recogidos por los 10 medidores MICA y MICA Plus situados en 10 localizaciones diferentes del edificio del Filosofía y Letras durante el segundo cuatrimestre del curso 2024/25.

Al contrario de lo ocurrido en el informe de finales del primer cuatrimestre de este curso escolar, los niveles de CO<sub>2</sub> presentan más momentos de aumento y de picos, sobre todo en **B3.2** en la que durante el 13,8% del tiempo la concentración es superior a 800ppm y alcanza valores tales como **1343, 1421 o 1464ppm**; también ocurre en el aula **A12.3** con concentraciones superiores a 1000ppm tales como **1618, 1713 o 1651ppm**. Coincidiendo con las conclusiones del informe 23 del 22 de mayo de 2024 y del primer cuatrimestre del curso 2024/25, los peores resultados se producen en el seminario B3.2 (MICA 6). Teniendo en cuenta que el inicio del cuatrimestre suele coincidir con una mayor asistencia a las clases, es razonable que los niveles de dióxido de carbono aumenten, sin embargo, con un correcto sistema de ventilación mecánica se esperaría que esos índices volvieran a bajar y se establecieran en un nivel óptimo para permanecer dentro de ese espacio. Se valora estudiar las condiciones de ventilación y si es suficiente el caudal del aire proporcionado por el sistema de limpieza de aire instalado.

La temperatura se mueve en general dentro de los límites que aseguran el confort térmico y únicamente en el despacho **B2.S02** se superan los 27°C alcanzando incluso los 35°C.

En cuanto a los TVOCs, los **índices superiores a 200** se registran durante un 40,3% del tiempo medido por el MICA 6 en el seminario **B3.2**. También se muestran datos altos de contaminantes de este tipo en secretaría, A1.15 (MICA 2), y la sala de juntas, A1.07 (MICA 1), durante un 34% del tiempo. Aunque en menor medida, el despacho B2.N14 (MICA 9)

## Trabajo Fin de Grado

sufre de concentración alta de volátiles durante el 16% del tiempo de estudio. Los desfavorables resultados medidos por el **MICA 2**, el **MICA 9** y el **MICA 6** coinciden de nuevo con las conclusiones del **informe 23**.

El formaldehído durante el periodo académico se encuentra en valores estables y no alcanzan el límite de  $70\mu\text{m}/\text{m}^3$  el único pico producido en el despacho B2.S02 es un caso puntual que supera los  $50\mu\text{m}/\text{m}^3$ , pero que no alcanza tampoco los  $70\mu\text{m}/\text{m}^3$ .

Los resultados de formaldehído sugieren una dependencia de formación de formaldehído con la temperatura y capacidad del sistema de ventilación de diluirla.

La materia particulada no presenta valores superiores a  $12\mu\text{g}/\text{m}^3$  ni para PM10 los  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  y se mueve entre valores óptimos.

Los resultados de  $\text{CO}_2$  sugieren que el caudal de ventilación mecánica en las aulas podría ser insuficiente para garantizar una adecuada renovación del aire y mantener niveles de confort. En cuanto al formaldehído, aunque sus concentraciones se encuentran muy por debajo de los valores considerados perjudiciales para la salud, conviene analizar si su presencia puede estar relacionada con otros parámetros o condiciones del entorno.

## Anexo II: Ensayos de análisis de sensores de las aulas

### 03/09/25 aula A4.3

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula A4.3
<b>ID</b>	A4.3_030925
<b>Fecha y versión</b>	03_09_25 - V1.1
<b>Hora y duración del experimento</b>	10:30-12:15
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	<p>Se evalúa la calidad del aire en el aula A4.3 con el objetivo de analizar la relación de las condiciones ambientales y de contorno con la producción de contaminantes en el aire. Se monitorizan cinco contaminantes clave: concentración de <math>\text{CO}_2</math> (ppm), formaldehído (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), ozono (ppb), dióxido de nitrógeno (ppb) y materia particulada (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>).</p> <p>Los resultados preliminares muestran valores poco favorables en <math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{O}_3</math> y volátiles principalmente.</p> <p>La información de los medidores se complementa con observaciones directas sobre el estado del aula, la ocupación y otros factores de contorno, con el fin de proporcionar una visión más completa del entorno de estudio.</p>

<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula A4.3 e identificar posibles deficiencias en la ventilación y renovación del aire a partir de los contaminantes medidos.</li> <li>• Medir concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Determinar las concentraciones de formaldehído.</li> <li>• Registrar niveles de materia particulada.</li> <li>• Medir concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Resultados poco favorables en estudios previos del aula de CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y volátiles.
<b>Alcance y limitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No se puede obtener la información del clima ese día por ser muy anterior a la fecha de realización de este informe.</li> </ul>
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.03.210
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>– T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>– Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>– Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>– O<sub>3</sub></li> <li>– NO<sub>2</sub></li> </ul>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 27 personas de un aula de aforo total de 40. Aforo al 68%. Ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusiones del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se vuelven a observar concentraciones altas de CO<sub>2</sub> y volátiles que coinciden con una ocupación alta.</li> <li>– El resto de variables se mantienen dentro de los límites.</li> </ul>
<b>Anexos</b>	Hoja Excel de cálculo.
<b>Historial de cambios</b>	

Las Figura 41y Figura 41 muestran los resultados del dióxido de carbono y volátiles totales respectivamente. Ambos experimentan un aumento progresivo coincidiendo con el avance de la clase. El CO<sub>2</sub> llega a un pico de 2000ppm y los TVOC de índice 462.



## Trabajo Fin de Grado

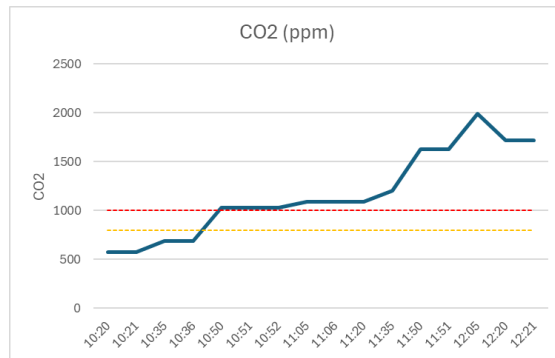


Figura 41. Histórico CO2 de 10:20 a 12:21

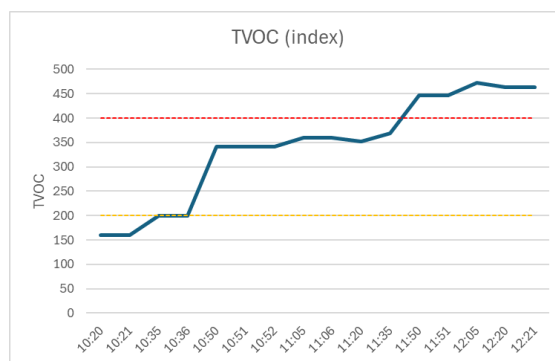


Figura 42. Histórico TVOC de 10:20 a 12:21

El formaldehído, por otro lado y como muestra la Figura 43, no supera los  $30 \mu\text{m}/\text{m}^3$ .

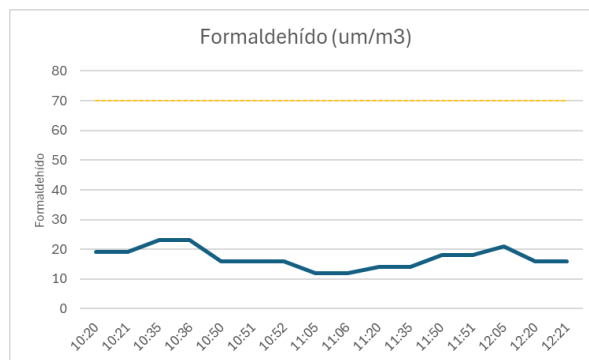


Figura 43. Histórico formaldehído de 10:20 a 12:21

03/09/25 aula A3.1

Campo	Contenido
Título del experimento	Estudio ventilación mecánica aula A3.1
ID	A3.1_030925
Fecha y versión	03_09_25 - V1.1

<b>Hora y duración del experimento</b>	9:00-10:30
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	En el aula A3.1 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Se monitorizan cinco variables: concentración de CO <sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m <sup>3</sup> ), materia particulada (µg/m <sup>3</sup> ) y ozono (ppb). Los resultados obtenidos y estudiados en informes previos evidencian una falta de dilución del dióxido de carbono y la existencia de fuentes de formaldehído, lo que señala deficiencias en la ventilación y posibles riesgos para la salud. La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de ofrecer una visión global del entorno evaluado.
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observar la concentración de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y CO y la posible procedencia.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Comprobar hipótesis de que los contaminantes gaseosos proceden del exterior.
<b>Alcance y limitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se puede obtener la información del clima ese día por ser muy anterior a la fecha de realización de este informe.</li> </ul>
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.02.170
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- O<sub>3</sub> [ppb]</li> </ul>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 28 personas del total de aforo de 80. Aforo al 35%.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se produce un aumento pronunciado de O<sub>3</sub> que alcanza las 152ppb, pero no se puede relacionar definitivamente con ningún otro parámetro medido.</li> <li>- El CO<sub>2</sub> aumenta sin conseguir ser diluido por el sistema de ventilación.</li> </ul>
<b>Historial de cambios</b>	

La concentración de O<sub>3</sub> como muestra la Figura 44 aumentan en la duración de la clase superando las 100ppb y llegando a un pico de 152ppb a las 10:11. El resto de contaminantes gaseosos estudiados (NO<sub>2</sub> y CO) son cercanos a 0 durante todo el periodo por lo que no se puede establecer relación entre ellos. Tampoco se puede relacionar con la temperatura puesto que permanece casi constante en 28°C durante todo el periodo.

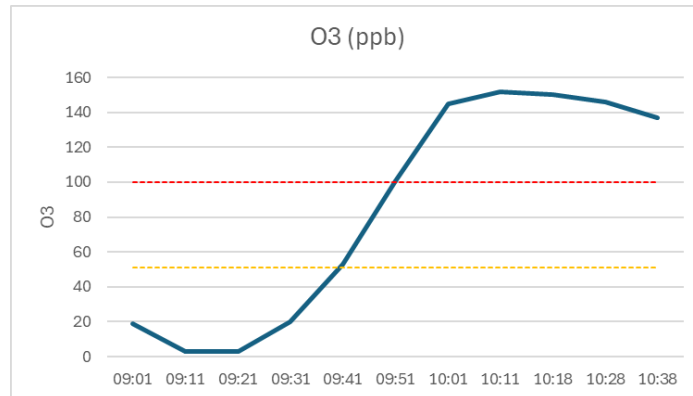


Figura 44. Histórico de O<sub>3</sub> de 9:01 a 10:38

A pesar de contar con una ocupación reducida, la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta como muestra la Figura 45 y no vuelve a bajar hasta la finalización de la clase.

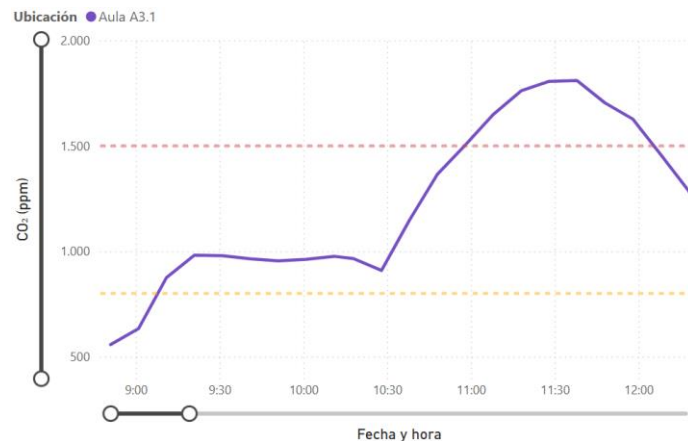


Figura 45. Histórico de CO<sub>2</sub> de 9:01 a 10:38. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

### 04/09/25 aula A4.3

Campo	Contenido
Título del experimento	Estudio ventilación mecánica aula A4.3
ID	A4.3_040925
Fecha y versión	04_09_25 - V1.1
Hora y duración del experimento	8:30-10:22
Autor	Alicia Lou Puyo

<b>Resumen</b>	<p>Se evalúa la calidad del aire en el aula A4.3 con el objetivo de analizar la relación de las condiciones ambientales y de contorno con la producción de contaminantes en el aire. Se monitorizan cinco contaminantes clave: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), ozono (ppb), dióxido de nitrógeno (ppb), CO (ppm) y materia particulada (µg/m<sup>3</sup>).</p> <p>Los resultados preliminares muestran valores poco favorables en CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y volátiles principalmente.</p> <p>La información de los medidores se complementa con observaciones directas sobre el estado del aula, la ocupación y otros factores de contorno, con el fin de proporcionar una visión más completa del entorno de estudio.</p>
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Determinar las concentraciones de formaldehído y TVOC.</li> <li>• Registrar niveles de materia particulada.</li> <li>• Medir concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y CO.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Resultados poco favorables en estudios previos del aula de CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y volátiles.
<b>Alcance y limitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se puede obtener la información del clima ese día por ser muy anterior a la fecha de realización de este informe.</li> </ul>
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.03.210
<b>VARIABLES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- O<sub>3</sub></li> <li>- NO<sub>2</sub></li> </ul>
<b>Observaciones</b>	<p>Ocupación de 27 personas de un aula de aforo total de 40. Aforo al 68%. Ventanas correctamente cerradas.</p>
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusiones del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La concentración de CO<sub>2</sub> es alta en toda la duración de la clase, la ocupación es alta y el sistema de ventilación no es capaz de renovar el aire correctamente.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ni los volátiles totales ni el formaldehído presentan concentraciones altas.</li> <li>- El O<sub>3</sub> presenta concentraciones altas siendo incluso superiores a las 100ppb.</li> </ul>
<b>Anexos</b>	Hoja Excel de cálculo.
<b>Historial de cambios</b>	

La Figura 46, Figura 47, Figura 48 y Figura 49 representan la concentración de CO<sub>2</sub>, TVOC, CH<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub> respectivamente. El aumento de CO<sub>2</sub> comienza a las 8:30 coincidiendo con el inicio de la clase, superando las 800ppm y finalmente las 100ppm y alcanza el valor más alto de 1104ppm a las 10:20, al finalizar la clase. Los compuestos volátiles no alcanzan el índice 200 aunque se acercan a él. El formaldehído mantiene concentraciones muy bajas, rondando los 10um/m<sup>3</sup> y tampoco se acerca al límite de 70. El ozono, por otro lado sufre un aumento constante desde las 9:36 y supera las 100ppb a las 10:20 llegando a las 113ppb.

El resto de los parámetros que mide el sensor (CO, NO<sub>2</sub> y materia particulada) presentan concentraciones muy bajas, cercanas a cero y que por descontado no se acercan a los límites críticos.

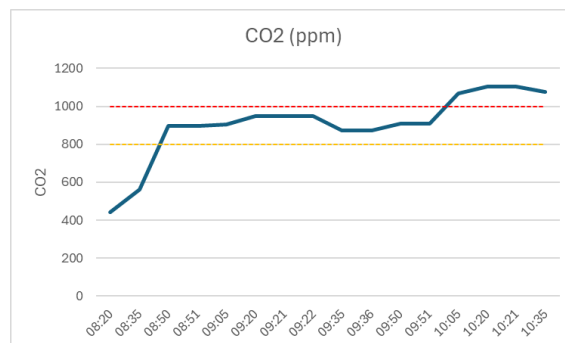


Figura 46. Histórico CO2 de 8:20 a 10:35

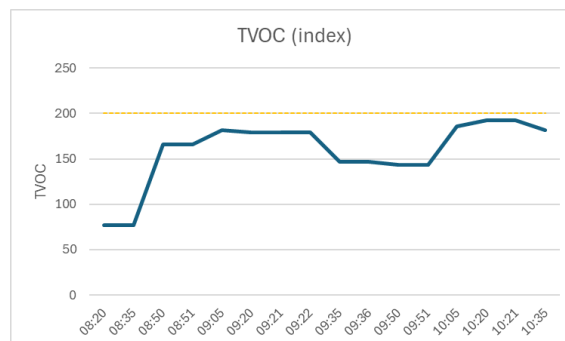


Figura 47. Histórico TVOC de 8:20 a 10:35



## Trabajo Fin de Grado

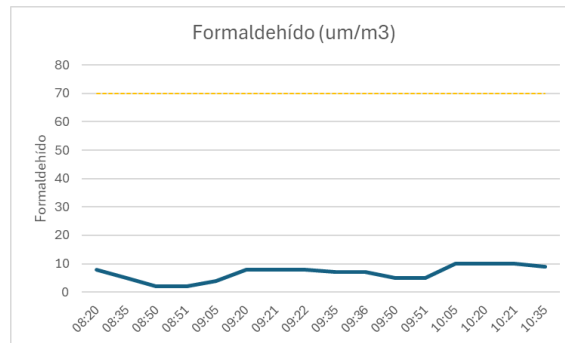


Figura 48. Histórico formaldehído de 8:20 a 10:35

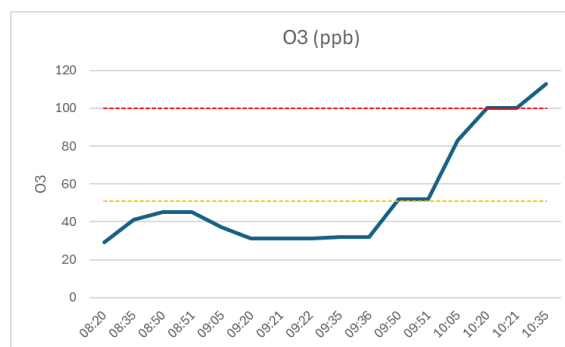


Figura 49. Histórico O3 de 8:20 a 10:35

## 04/09/25 aula A3.1

Campo	Contenido
Título del experimento	Estudio ventilación mecánica aula A3.1
ID	A3.1_040925
Fecha y versión	04_09_25 - V1.1
Hora y duración del experimento	9:00-10:00
Autor	Alicia Lou Puyo
Resumen	En el aula A3.1 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Se monitorizan cinco variables: concentración de CO <sub>2</sub> (ppm), formaldehído (μg/m <sup>3</sup> ), TVOC (index), materia particulada (μg/m <sup>3</sup> ), ozono (ppb), NO <sub>2</sub> (ppb) y CO (ppm). Los resultados obtenidos y estudiados en informes previos evidencian una falta de dilución del dióxido de carbono y la existencia de fuentes de formaldehído, lo que señala deficiencias en la ventilación y posibles riesgos para la

	salud. La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de ofrecer una visión global del entorno evaluado.
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir la concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Observar la concentración de TVOC.</li> <li>• Estudiar la concentración de formaldehído con el fin de identificar la posible presencia de fuentes emisoras en el aula.</li> <li>• Analizar la concentración de ozono, NO<sub>2</sub> y CO.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Falta de dilución de CO <sub>2</sub> y presencia de fuentes de formaldehído, con impacto en la calidad del aire, observados en los estudios previos del aula.
<b>Alcance y limitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El último momento de registro de datos es de las 10:08.</li> <li>- No se puede obtener la información del clima ese día por ser muy anterior a la fecha de realización de este informe.</li> </ul>
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.02.170
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- TVOC[index]</li> <li>- Formaldehído [μg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [μg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- O<sub>3</sub> [ppb]</li> <li>- NO [ppb]</li> <li>- CO [ppm]</li> </ul>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 27 personas del total de aforo de 80. Aforo al 34%. Ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?</a>
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aunque la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta en el transcurso de la clase hasta alcanzar valores que superan el límite de 100ppm no lo hacen de igual manera ni los TVOC ni el CH<sub>2</sub>O que no superan sus respectivos valores límite.</li> <li>- El ozono supera muy por encima la concentración considerada perjudicial.</li> </ul>
<b>Historial de cambios</b>	

## Trabajo Fin de Grado

Como muestra la Figura 50 la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta con el transcurso de la clase, superando las 1000ppm a las 9:38 y siguiendo la tendencia en alza hasta el máximo de 1083ppm al final del periodo medido. La concentración de ozono (Figura 53) es tres veces superior al límite de 100ppb considerado perjudicial para la salud. Se trata de un contaminante que no para de ascender desde el principio del día y que, debido a que el último momento de conexión con el dispositivo son las 10:08 no se puede conocer el comportamiento posterior. Al contrario que lo ocurrido con estos parámetros, los volátiles totales y el formaldehído de la Figura 51 y Figura 52 respectivamente, aunque presentan una tendencia creciente no superan sus límites.

El resto de los parámetros recopilados por el dispositivo presentan valores bajos cercanos a cero.

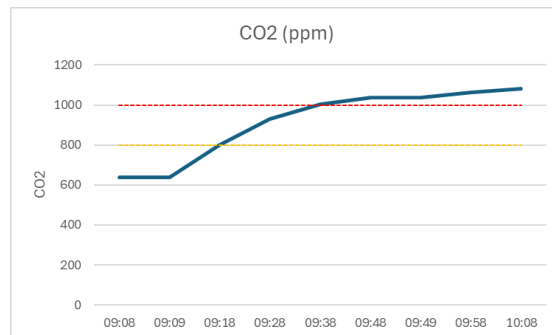


Figura 50. Histórico de CO<sub>2</sub> de 9:08 a 10:08

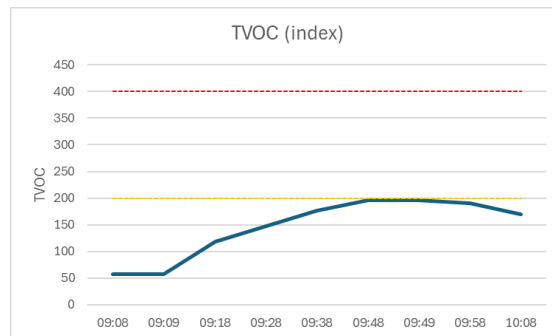


Figura 51. Histórico de TVOC de 9:08 a 10:08

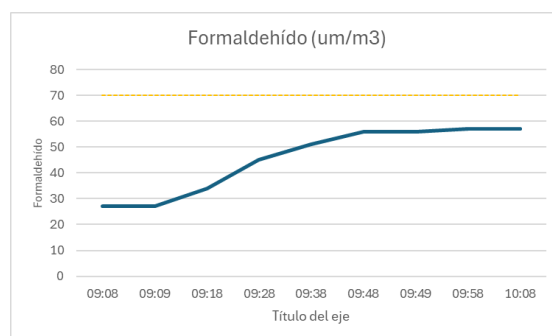


Figura 52. Histórico de formaldehído de 9:08 a 10:08

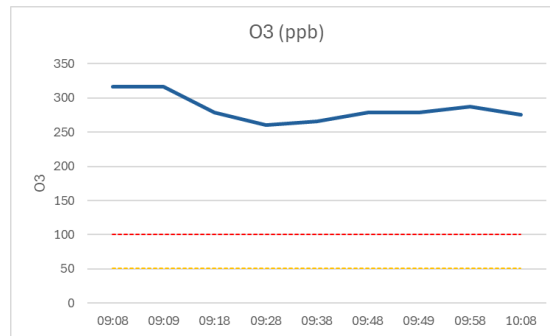



Figura 53. Figura 3. Histórico de O3 de 9:08 a 10:08

### 01/10/25 aula A3.1

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula A3.1
<b>ID</b>	A3.1_011025
<b>Fecha y versión</b>	01_10_25 - V1.2
<b>Hora y duración del experimento</b>	9:25-10:20
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	<p>En el aula A3.1 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Se monitorizan cinco variables clave: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), materia particulada (µg/m<sup>3</sup>) y ozono (ppb). Los resultados preliminares evidencian una falta de dilución del dióxido de carbono y la existencia de fuentes de formaldehído, lo que señala deficiencias en la ventilación y posibles riesgos para la salud. La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de contextualizar los datos obtenidos y ofrecer una visión integral del entorno evaluado.</p>
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula A3.1.</li> <li>• Medir la concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Registrar la temperatura para valorar el confort térmico.</li> <li>• Observar la concentración de formaldehído con el fin de identificar la posible presencia de fuentes emisoras en el aula.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir la materia particulada.</li> <li>• Analizar la concentración de ozono.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Observada en estudios previos falta de dilución de CO <sub>2</sub> y presencia de fuentes de formaldehído, con impacto en la calidad del aire.
<b>Alcance y limitaciones</b>	Limitaciones: el medidor ha dejado de transmitir datos a las 9:42 por lo que no se dispone de registro continuado del aula. Únicamente el dato de que el medidor del sistema mecánico del aula marcaba 1241ppm de CO <sub>2</sub> al final de la sesión.
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.02.170
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- O<sub>3</sub> [ppb]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 14°C Sol Viento: 9km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 23 personas de aforo total de 80. Aforo al 29%. Puertas y ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?</a>
<b>Conclusión de análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aun con un aforo bajo, el nivel de CO<sub>2</sub> comienza a aumentar y la ventilación mecánica no consigue hacer descender.</li> <li>- No se puede concluir con la información recopilada nada sobre un posible foco de formaldehído.</li> </ul>
<b>Anexos</b>	Hoja de cálculo de Excel
<b>Historial de cambios</b>	

La concentración de CO<sub>2</sub> comienza a aumentar coincidiendo con el inicio de la clase a las 9:00. Alrededor de las 9:35 se alcanza las 1000ppm de concentración de dióxido de carbono y continúa subiendo sin activarse el sistema de ventilación. La temperatura supera

## Trabajo Fin de Grado

también los 27°C. El medidor de la ventilación mecánica del aula identificaba también los altos niveles de CO<sub>2</sub>.

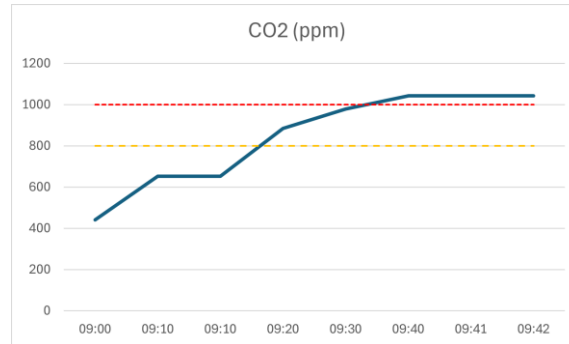


Figura 54. Histórico de CO<sub>2</sub> de 9:00 a 9:42 cuando deja de transmitir

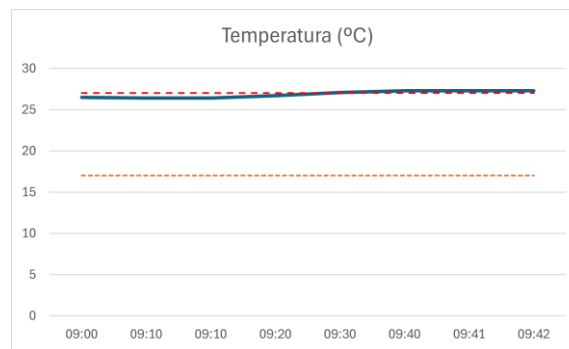


Figura 55. Histórico de temperatura de 9:00 a 9:42 cuando deja de transmitir

Las Figura 54 muestran una tendencia a aumentar del CO<sub>2</sub> que se estabiliza a las 9:42 porque el dispositivo falla y deja de transmitir. Sin embargo, el medidor instalado del aula marca 1241ppm al final de la sesión. También se observa un valor alto de temperatura antes de que el dispositivo falle. Debido al fallo de funcionamiento en el dispositivo MICA, no se puede recopilar más información cuantitativa del aula.

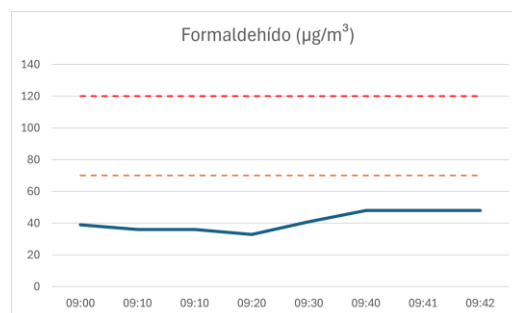


Figura 56. Histórico de formaldehído de 9:00 a 9:42 cuando deja de transmitir


Las mediciones de formaldehído, una de las razones principales por la que se realiza este experimento, permanecen como muestra la Figura 56 durante todo el tiempo medido en un rango adecuado, más bajo del límite nocivo de concentración. Coincide que la ventilación mecánica estuvo activada durante el periodo de medición, lo que podría explicar la ausencia de incrementos en la concentración de formaldehído, ya que se plantea la

## Trabajo Fin de Grado

hipótesis de que la tecnología de polarización activa incorporada en el sistema de ventilación podría ser la responsable de la generación de este tipo de compuesto. Queda como hipótesis para seguir contrastando y analizando este contaminante, así como comprobar si el fallo de activación de la ventilación se repite y en su caso, estudiar qué causas podrían estar originándolo.

### 01/10/25 aula C1.2

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula C1.2
<b>ID</b>	C1.2_011025
<b>Fecha y versión</b>	01_10_25 - V1.2
<b>Hora y duración del experimento</b>	10:31-12:27
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	En el aula C1.2 se evalúa la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y su relación con la ventilación y la dilución del aire. Se monitorizan cuatro contaminantes clave: concentración de CO <sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m <sup>3</sup> ) y materia particulada (µg/m <sup>3</sup> ). Los resultados preliminares muestran valores poco favorables en CO <sub>2</sub> y en partículas en suspensión, lo que indica deficiencias en la renovación del aire interior. La información de los medidores se complementa con observaciones directas sobre el estado del aula, la ocupación y otros factores de contorno, con el fin de proporcionar una visión más completa del entorno de estudio.
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula C1.2.</li> <li>• Medir concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Analizar el confort térmico a través de la temperatura.</li> <li>• Determinar las concentraciones de formaldehído.</li> <li>• Registrar niveles de materia particulada.</li> <li>• Identificar posibles deficiencias en la ventilación y renovación del aire a partir de los contaminantes medidos.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Resultados poco favorables en relación con la concentración de CO <sub>2</sub> y materia

	particulada y por consiguiente con la dilución del aire en estudios previos del aula.
<b>Alcance y limitaciones</b>	
<b>Equipo</b>	MICA Plus. CSF.1235.00.570
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 15°C Sol Viento: 11km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>
<b>Observaciones</b>	<p>Ocupación de 16 personas de un aula de aforo total de 42. Aforo al 38%. Ventanas correctamente cerradas.</p>
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusiones del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El sistema de ventilación consigue mantener niveles adecuados de CO<sub>2</sub>, temperatura, formaldehído y PM.</li> <li>- La baja ocupación puede ser la razón probable de no observarse la falta de dilución del aire interior observado previamente.</li> </ul>
<b>Anexos</b>	Hoja Excel de cálculo.
<b>Historial de cambios</b>	

El sistema de ventilación está conectado desde el inicio de la clase. La temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub> [ppm], formaldehído y materia particulada como muestran la Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60 se mantienen en rangos adecuados. La temperatura parece ascender para sobrepasar el límite de confort térmico, pero no llega a hacerlo coincidiendo su pico con el final de la clase.

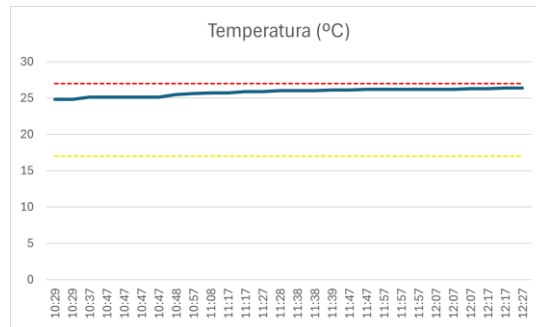


Figura 57. Histórico de temperatura de 10:29 a 12:27

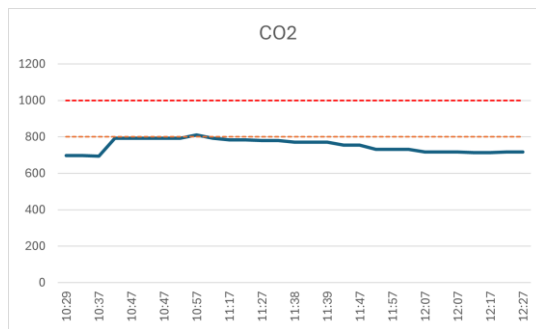


Figura 58. Histórico de CO2 de 10:29 a 12:27

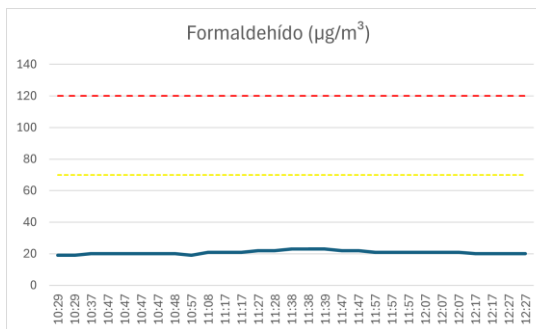


Figura 59. Histórico de formaldehído de 10:29 a 12:27

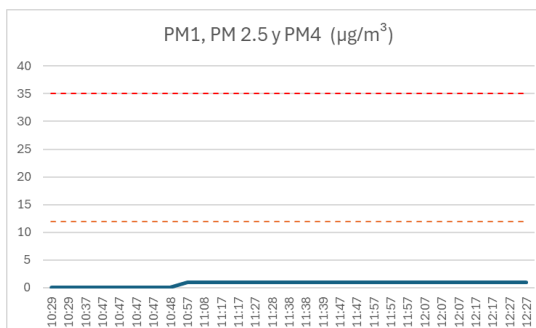



Figura 60. Histórico PM de 10:29 a 12:27




Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula A3.1
<b>ID</b>	A3.1_021025
<b>Fecha y versión</b>	02_10_25 - V1.2
<b>Hora y duración del experimento</b>	8:37-10:20
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	<p>En el aula A3.1 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Se monitorizan cinco variables clave: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), materia particulada (µg/m<sup>3</sup>) y ozono (ppb). Los resultados preliminares evidencian una falta de dilución del dióxido de carbono y la existencia de fuentes de formaldehído, lo que señala deficiencias en la ventilación y posibles riesgos para la salud. La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de contextualizar los datos obtenidos y ofrecer una visión integral del entorno evaluado.</p>
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Evaluar la calidad del aire en el aula A3.1.</li><li>• Medir la concentración de CO<sub>2</sub>.</li><li>• Registrar la temperatura para valorar el confort térmico.</li><li>• Observar la concentración de formaldehído con el fin de identificar la posible presencia de fuentes emisoras en el aula.</li><li>• Analizar la concentración de ozono.</li></ul>
<b>Justificación</b>	Falta de dilución de CO <sub>2</sub> y presencia de fuentes de formaldehído, con impacto en la calidad del aire, observados en los estudios previos del aula.
<b>Alcance y limitaciones</b>	Limitaciones: el medidor dejó de transmitir datos el día anterior a las 9:42 por lo que no se dispone de registro de contaminantes del aula.
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.02.170
<b>VARIABLES</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li><li>- T<sup>a</sup> [°C]</li><li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia particulada [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</li> <li>- <math>\text{O}_3</math> [ppb]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 12°C Sol Viento: 4km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>
<b>Observaciones</b>	<p>Ocupación de 18 personas de aforo total de 80. Aforo del 23%. Al llegar al aula una de las ventanas estaba abierta, ha permanecido abierta toda la noche y se ha cerrado en ese momento. Al llegar la temperatura es excesivamente alta. Puertas y ventanas correctamente cerradas el resto de la clase.</p>
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?</a>
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El sensor del aula registra al final de la clase altos los niveles de <math>\text{CO}_2</math>.</li> </ul>
<b>Historial de cambios</b>	

No se dispone de datos cuantitativos de este experimento debido a un fallo en la transmisión de datos del medidor inBiot al sistema. Sin embargo, se repite la situación observada el día anterior: el sistema de ventilación mecánica no se enciende, aunque la sensación durante la hora y media de clase es de calor y el sensor que controla el sistema mecánico del aula registra una alta concentración de  $\text{CO}_2$ .

### 14/10/25 aula A3.1

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula A3.1
<b>ID</b>	A3.1_141025
<b>Fecha y versión</b>	14_10_25 - V1.1
<b>Hora y duración del experimento</b>	10:30-12:15
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	En el aula A3.1 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Se


	<p>monitorizan cinco variables: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), materia particulada (µg/m<sup>3</sup>) y ozono (ppb). Los resultados obtenidos y estudiados en informes previos evidencian una falta de dilución del dióxido de carbono y la existencia de fuentes de formaldehído, lo que señala deficiencias en la ventilación y posibles riesgos para la salud. La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de ofrecer una visión global del entorno evaluado.</p>
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula A3.1.</li> <li>• Medir la concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Registrar la temperatura para valorar el confort térmico.</li> <li>• Observar la concentración de formaldehído con el fin de identificar la posible presencia de fuentes emisoras en el aula.</li> <li>• Analizar la concentración de ozono.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	<p>Falta de dilución de CO<sub>2</sub> y presencia de fuentes de formaldehído, con impacto en la calidad del aire, observados en los estudios previos del aula.</p>
<b>Alcance y limitaciones</b>	<p>Limitaciones: el medidor dejó de transmitir datos el día anterior a las 9:42 por lo que no se dispone de registro de contaminantes del aula.</p>
<b>Equipo</b>	<p>MICA Well. CSF.1235.02.170</p>
<b>VARIABLES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- O<sub>3</sub> [ppb]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 12°C Sol Viento: 4km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>

<b>Observaciones</b>	Ocupación de 21 personas del total de aforo de 80. Aforo al 26%. La ventilación mecánica no se enciende en todo el periodo.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/?</a>
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	– Registro de altos los niveles de CO <sub>2</sub> y elevada temperatura aun con aforo reducido.
<b>Historial de cambios</b>	

No se dispone de datos cuantitativos de este experimento debido a un fallo en la transmisión de datos del medidor inBiot al sistema. Sin embargo, la sensación durante la hora y media de clase es de calor y el sensor que controla el sistema mecánico del aula registra una alta concentración de CO<sub>2</sub>.

### 14/10/25 aula C1.2

<b>Campo</b>	<b>Contenido</b>
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula C1.2
<b>ID</b>	C1.2_141025
<b>Fecha y versión</b>	14_10_25 - V1.1
<b>Hora y duración del experimento</b>	8:30-10:15
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	En el aula C1.2 se evalúa la calidad del aire con el objetivo de comprobar el funcionamiento de la ventilación y la dilución del aire. Se monitorizan cuatro contaminantes: concentración de CO <sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m <sup>3</sup> ) y materia particulada (µg/m <sup>3</sup> ). Los resultados de informes previos muestran valores poco favorables en CO <sub>2</sub> y en partículas en suspensión, lo que indica deficiencias en la renovación del aire interior. La información del medidor del aula se complementa con observaciones directas sobre el estado del aula, la ocupación y otros factores de contorno para tener una visión completa.
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula C1.2.</li> <li>• Medir concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Analizar el confort térmico a través de la temperatura.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar las concentraciones de formaldehído.</li> <li>• Registrar los TVOC.</li> <li>• Registrar niveles de materia particulada.</li> <li>• Identificar posibles deficiencias en la ventilación y renovación del aire a partir de los contaminantes medidos.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Resultados poco favorables en relación con la concentración de CO <sub>2</sub> y materia particulada y por consiguiente con la dilución del aire en informes previos.
<b>Alcance y limitaciones</b>	
<b>Equipo</b>	MICA Plus. CSF.1235.00.570
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- TVOC [índice]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 16°C Nuboso Viento: 3km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 20 personas del total de aforo de 42. Aforo al 47%. Ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusiones del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de CO<sub>2</sub> alta que no se consigue disminuir durante toda la duración de la clase.</li> <li>- Índice alto de TVOCs que únicamente baja al terminar la clase.</li> <li>- No ocurre ni se consigue localizar la razón de la falta de dilución del aire interior observado previamente.</li> <li>- Se observa que cuando la ocupación es alta el sistema de ventilación no tiene capacidad suficiente para diluir el aire ni</li> </ul>

	regular correctamente la temperatura.
<b>Anexos</b>	Hoja Excel de cálculo.
<b>Historial de cambios</b>	

La Figura 61, Figura 62 y Figura 63 muestran niveles con tendencia a aumentar durante el periodo de clase de los parámetros medidos que se estabilizan una vez superan los límites recomendados. La Figura 64 registra que, al contrario, el formaldehído es bajo y no alcanza los 50ug/m<sup>3</sup>.

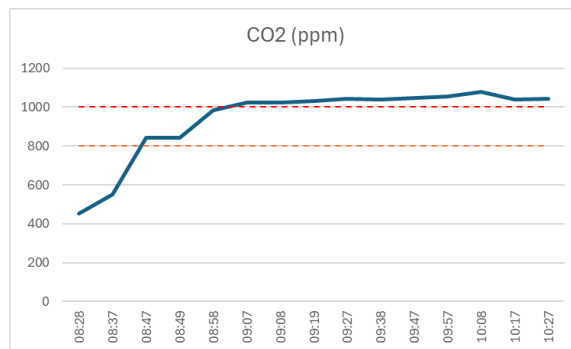


Figura 61. Histórico de CO2 de 8:28 a 10:30

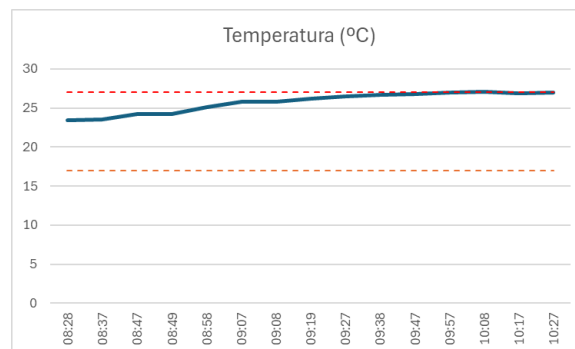


Figura 62. Histórico de Tª de 8:28 a 10:30

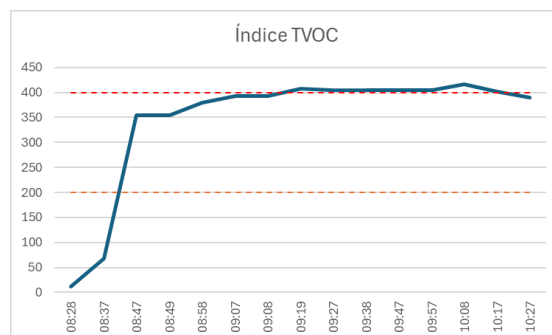


Figura 63. Histórico de TVOC de 8:28 a 10:30

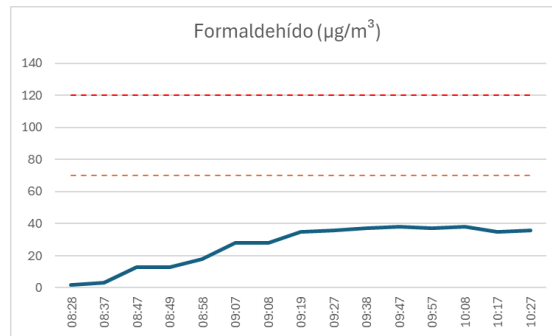



Figura 64. Histórico de formaldehído de 8:28 a 10:30

## 06/11/25 aula A3.2

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula A3.2
<b>ID</b>	A3.2_061125
<b>Fecha y versión</b>	06_11_25 - V1.1
<b>Hora y duración del experimento</b>	8:30 – 10:15
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	<p>En el aula A3.2 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Se monitorizan cinco variables: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), TVOCs (index) y materia particulada (µg/m<sup>3</sup>).</p> <p>La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de ofrecer una visión global del entorno evaluado.</p>
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula A3.2.</li> <li>• Medir la concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Analizar la cantidad de volátiles totales.</li> <li>• Contabilizar la presencia de formaldehído.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	En este cuatrimestre se han superado las 1000ppm de CO <sub>2</sub> en localizadas ocasiones y el índice 400 de TVOCs a menudo.
<b>Alcance y limitaciones</b>	
<b>Equipo</b>	MICA 4 Plus.
<b>Variables</b>	– CO <sub>2</sub> [ppm]

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TVOC [índice]</li> <li>- Formaldehído [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	Temperatura exterior: 14°C Sol Viento: 7km/h 
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 28 personas del total de aforo de 172. Aforo al 16%. Ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Excel de recopilación de datos "inbiot_data".
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los valores de todos los contaminantes estudiados están dentro de los límites recomendados.</li> </ul>
<b>Historial de cambios</b>	

La Figura 65, Figura 66 y Figura 67 representan la concentración de  $\text{CO}_2$ , TVOC y  $\text{CH}_2\text{O}$  respectivamente. Se observa que todos los parámetros se encuentran por debajo de sus respectivos límites. Dado que el porcentaje de ocupación no es muy alto, el aula, que es grande, no experimenta una concentración alta de  $\text{CO}_2$ . Tampoco son altos los índices de volátiles totales ni formaldehído. No se encuentra tampoco correlación en el momento de aumento de volátiles con ningún otro parámetro.

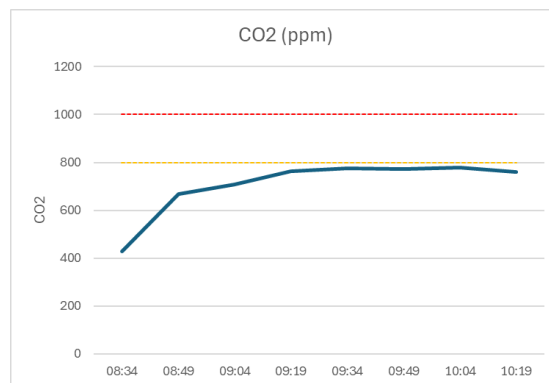


Figura 65. Histórico de  $\text{CO}_2$  de 8:34 a 10:19

Trabajo Fin de Grado

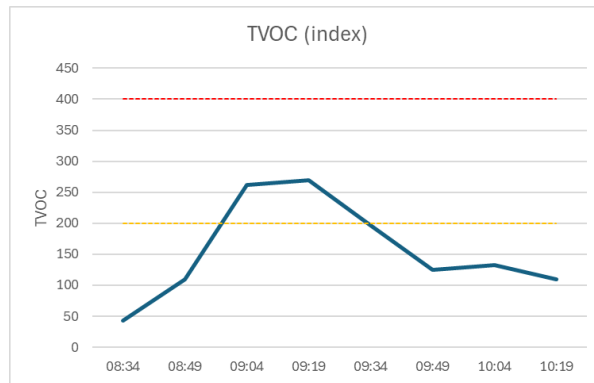


Figura 66. Histórico de TVOC de 8:34 a 10:19

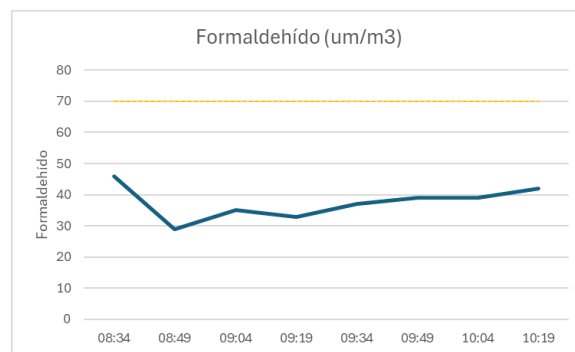



Figura 67. Histórico de formaldehído de 8:34 a 10:19

06/11/25 aula C1.2

Campo	Contenido
Título del experimento	Estudio ventilación mecánica aula C1.2
ID	C1.2_061125
Fecha y versión	06_11_25 - V1.1
Hora y duración del experimento	10:31-12:15
Autor	Alicia Lou Puyo
Resumen	<p>En el aula C1.2 se evalúa la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y su relación con la ventilación y la dilución del aire. Se monitorizan cinco contaminantes clave: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), TVOC (index) y materia particulada (µg/m<sup>3</sup>).</p> <p>Los resultados preliminares muestran valores poco favorables en CO<sub>2</sub> y TVOC mayoritariamente.</p> <p>La información de los medidores se complementa con observaciones directas</p>

	sobre el estado del aula, la ocupación y otros factores de contorno, con el fin de proporcionar una visión más completa del entorno de estudio.
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la calidad del aire en el aula C1.2.</li> <li>• Medir concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Estudiar niveles de TVOC.</li> <li>• Determinar las concentraciones de formaldehído.</li> <li>• Registrar niveles de materia particulada.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Resultados poco favorables en relación con la concentración de CO <sub>2</sub> y compuestos volátiles totales en periodos previos.
<b>Alcance y limitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se dejan de recibir datos recopilados a las 11:56 por lo que no se tiene registro de los últimos 15 minutos de clase.</li> </ul>
<b>Equipo</b>	MICA Plus. CSF.1235.00.570
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- T<sup>a</sup> [°C]</li> <li>- TVOC [index]</li> <li>- Formaldehído [µg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Materia particulada [µg/m<sup>3</sup>]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 13°C Sol Viento: 16km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 12 personas de un aula de aforo total de 42. Aforo al 29%. Ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusiones del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los niveles de CO<sub>2</sub> siguen una tendencia creciente durante la duración de la clase superando las 1000ppm.</li> <li>- Los TVOC también aumentan superando el índice 200, pero sin alcanzar los 400.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– En el tiempo medido la concentración de <math>\text{CH}_2\text{O}</math> no alcanza el nivel crítico de <math>70\mu\text{m}^3</math>.</li> </ul>
<b>Anexos</b>	Hoja Excel de cálculo.
<b>Historial de cambios</b>	

La Figura 58 muestra el progresivo aumento de  $\text{CO}_2$  coincidiendo con el avance de la clase y que alcanza un valor máximo de 1061ppm a las 11:56. En la Figura 59 se muestra el registro de TVOC que supera el índice 200 a las 10:45 y se encuentra por encima de ese límite durante toda la clase, pero que no alcanza el índice 400.

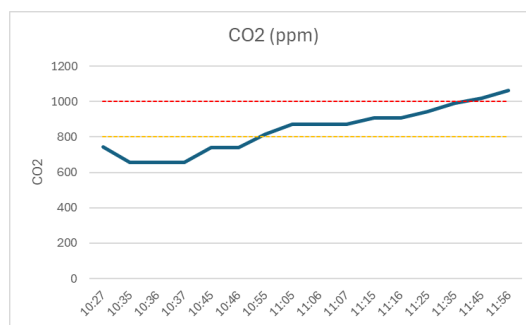


Figura 68. Histórico de  $\text{CO}_2$  de 10:27 a 11:56

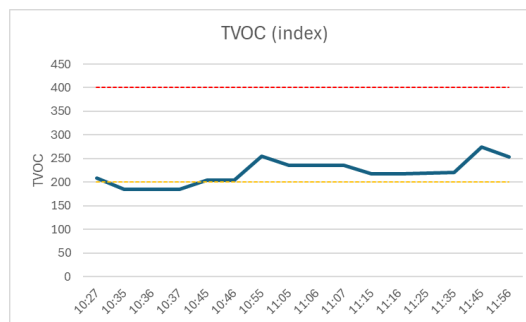


Figura 69. Histórico de TVOC de 10:27 a 11:56

Finalmente, la Figura 60 muestra que la concentración de formaldehído es baja, manteniéndose muy por debajo de los  $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

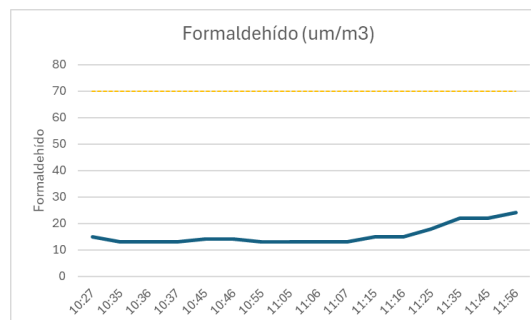



Figura 70. Histórico de formaldehído de 10:27 a 11:56



Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula A3.1
<b>ID</b>	A3.1_061125
<b>Fecha y versión</b>	06_11_25 - V1.1
<b>Hora y duración del experimento</b>	8:55 – 10:15
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	<p>En el aula A3.1 se lleva a cabo un estudio de la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y la presencia de contaminantes interiores. Como las ventanas permanecen abiertas no se activa la ventilación mecánica, pero se monitorizan todas las variables: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), temperatura (°C), formaldehído (µg/m<sup>3</sup>), materia particulada (µg/m<sup>3</sup>), ozono (ppb), dióxido de nitrógeno (ppb) y monóxido de carbono (ppb). Se estudian los resultados de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> para buscar posibles orígenes de estos. La información instrumental se complementa con observaciones sobre las condiciones del aula y su ocupación, con el fin de ofrecer una visión global del entorno evaluado.</p>
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Estudiar si la presencia de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en interiores puede provenir del aire exterior.</li></ul>
<b>Justificación</b>	No se puede analizar el sistema de ventilación porque no se activa con las ventanas abiertas, pero se trata de una buena ocasión para estudiar la presencia de NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> en el aire y su procedencia.
<b>Alcance y limitaciones</b>	
<b>Equipo</b>	MICA Well. CSF.1235.02.170
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>O<sub>3</sub> [ppb]</li><li>NO<sub>2</sub></li></ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 14°C Sol Viento: 7km/h NO<sub>2</sub> en el aire: 1,78ppb</p> 

	Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 15 personas del total de aforo de 80. Aforo al 19%. Ventanas abiertas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a> ?
<b>Conclusión del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Por su baja concentración no se puede concluir nada sobre los contaminantes NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> ni la relación entre ellos</li> </ul>
<b>Historial de cambios</b>	

Debido a que las ventanas están abiertas no se conecta la ventilación mecánica, pero se puede ver el resultado de ozono y dióxido de nitrógeno para comprobar la hipótesis de que estos contaminantes gaseosos proceden del exterior. En este caso las concentraciones son tan bajas que no han subido de 1ppb para ninguno de los dos contaminantes como muestran las Figura 71y Figura 72.

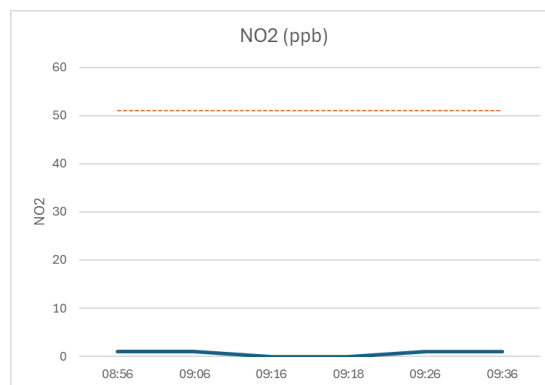


Figura 71. Histórico de NO2 de 8:56 a 9:36

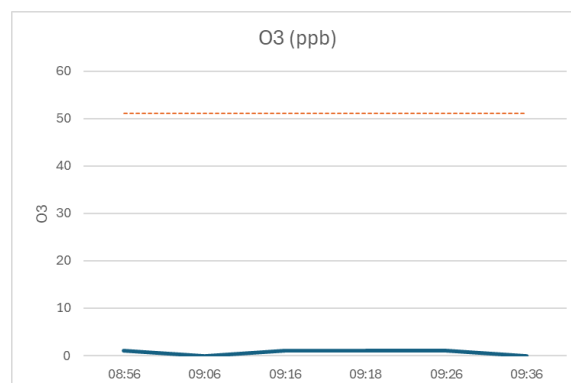


Figura 72. Histórico de O3 de 8:56 a 9:36

En otros periodos medidos como muestra la Figura 73 parece haber cierta coincidencia entre la subida del ozono y la del dióxido de nitrógeno. Sin embargo, para este periodo tan corto y con valores tan bajos no se puede concluir que dichos contaminantes entren por las ventanas abiertas o que estén correlacionados entre ellos.

Trabajo Fin de Grado

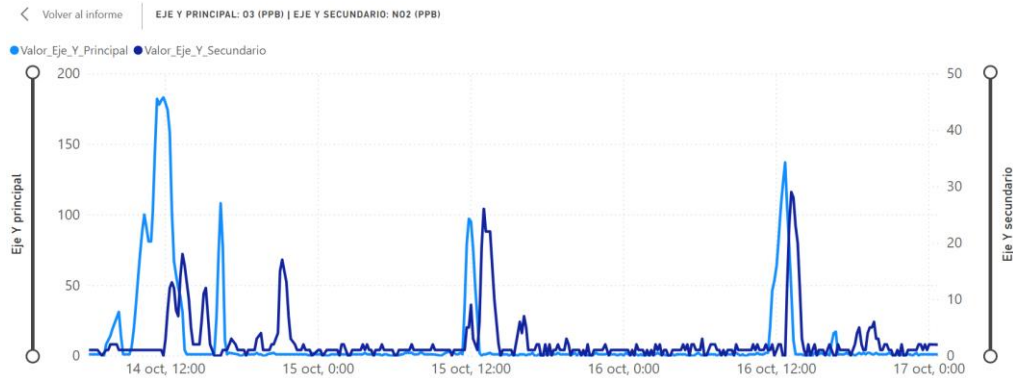



Figura 73. Relación O3 y NO2 en el periodo del 14 al 17 de octubre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

07/11/25 aula C1.2

Campo	Contenido
<b>Título del experimento</b>	Estudio ventilación mecánica aula C1.2
<b>ID</b>	C1.2_071125
<b>Fecha y versión</b>	07_11_25 - V1.1
<b>Hora y duración del experimento</b>	10:27-12:15
<b>Autor</b>	Alicia Lou Puyo
<b>Resumen</b>	En el aula C1.2 se evalúa la calidad del aire con el objetivo de analizar las condiciones ambientales y su relación con la ventilación y la dilución del aire. Se monitorizan cuatro contaminantes clave: concentración de CO <sub>2</sub> (ppm), TVOC (index), formaldehído (µg/m <sup>3</sup> ) y materia particulada (µg/m <sup>3</sup> ). Los resultados preliminares muestran valores poco favorables en CO <sub>2</sub> y en partículas en suspensión, lo que indica deficiencias en la renovación del aire interior. La información de los medidores se complementa con observaciones directas sobre el estado del aula, la ocupación y otros factores de contorno, con el fin de proporcionar una visión más completa del entorno de estudio.
<b>Objetivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir concentración de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Determinar las concentraciones de formaldehído.</li> <li>• Registrar niveles de materia particulada.</li> <li>• Medir la concentración de TVOC.</li> </ul>
<b>Justificación</b>	Resultados poco favorables en relación con la concentración de CO2 y materia

	particulada y por consiguiente con la dilución del aire en estudios previos del aula.
<b>Alcance y limitaciones</b>	
<b>Equipo</b>	MICA Plus. CSF.1235.00.570
<b>Variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> [ppm]</li> <li>- Formaldehído [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</li> <li>- TVOC [index]</li> <li>- Materia particulada [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</li> </ul>
<b>Condiciones de contorno</b>	<p>Temperatura exterior: 11°C Nublado Viento: 11km/h</p>  <p>Fuente: <a href="https://www.eltiempo.es/zaragoza.html">https://www.eltiempo.es/zaragoza.html</a></p>
<b>Observaciones</b>	Ocupación de 22 personas de un aula de aforo total de 42. Aforo al 52%. Ventanas correctamente cerradas.
<b>Registro de datos</b>	Superset de IAQ. Link: <a href="https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/">https://vsen-sup.unizar.es/superset/dashboard/IAQ/</a>
<b>Conclusiones del análisis de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El CO<sub>2</sub> y TVOC aumentan por encima de sus límites.</li> <li>- Los tres parámetros experimentan un comportamiento similar en el tiempo, creciendo alrededor de las 10:36.</li> </ul>
<b>Anexos</b>	Hoja Excel de cálculo.
<b>Historial de cambios</b>	

Como se observa en las figuras, las concentraciones de CO<sub>2</sub>, TVOC y formaldehído aumentan de forma simultánea a partir de las 10:36. El CO<sub>2</sub> supera las 1000 ppm, alcanzando un pico en 1090ppm, mientras que el TVOC sobrepasa su límite de 400. El formaldehído también presenta un incremento notable, con un máximo cercano a 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tras alcanzar los picos alrededor de las 11:06, los tres parámetros comienzan a descender gradualmente. Este comportamiento creciente coincidente podría indicar un periodo con el sistema de ventilación apagado o insuficiente.

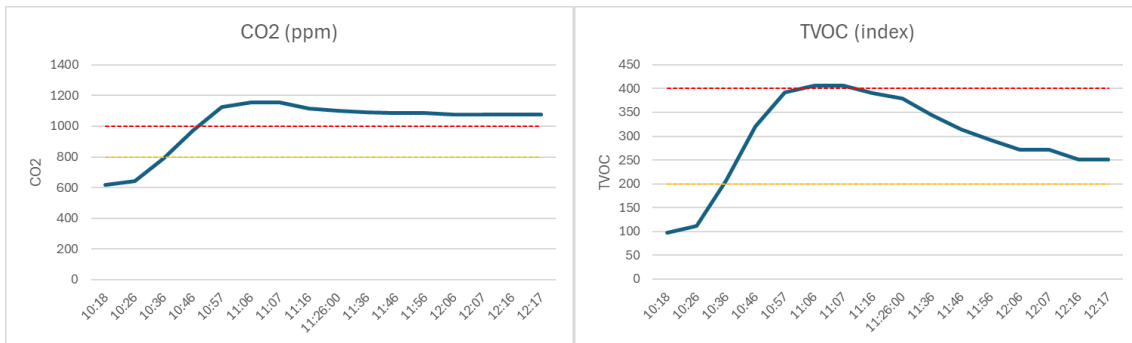


Figura 74. Histórico de CO2 de 10:18 a 12:17

Figura 75. Histórico de TVOC de 10:18 a 12:17

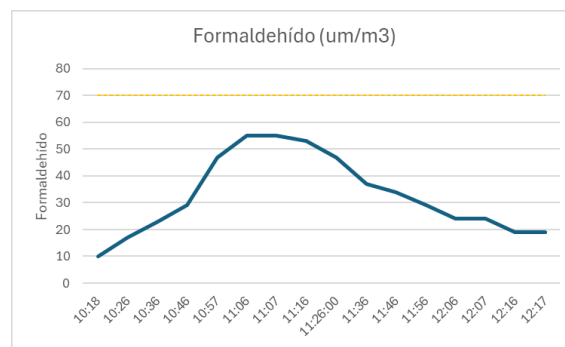


Figura 76. Histórico de formaldehído de 10:18 a 12:17

## Anexo III: CAI en el edificio de FyL en el primer semestre del curso 2025/2026

Con los datos del Informe 23 [30], del análisis del curso 2024/2025 y de la recogida de datos del primer cuatrimestre del curso 2025/2026 se seleccionan los espacios de interés para tomar resultados en este periodo de estudio. Se tiene en cuenta que el uso del espacio sea alto y la relación entre el aforo y la ocupación también lo sea. Tras esta preselección los espacios que se van a analizar para el primer cuatrimestre del curso 2025/2026 son principalmente aulas como muestra la Tabla 19:

ID	Dispositivo	Aforo
Aula A1.1	Well	24
Sala juntas A1.07	MICA	
Aula A2.2	Plus	180
Aula A3.1	Well	80
Aula A3.2	Plus	175
Aula A4.2	MICA	175
Aula C1.2	Plus	42

Tabla 19. Selección de espacios para el estudio en el primer cuatrimestre del curso 2025/2026

Se estudian los espacios del **15 de septiembre al 5 de diciembre de 2025**.

## Dióxido de carbono

Las concentraciones de CO<sub>2</sub> son elevadas en general, superando en numerosos casos las 1000ppm o incluso las 1500ppm, sobre todo en el aula A3.1 y C1.2. Entre las aulas estudiadas, durante un 18% del tiempo.

El aula **A3.1** se trata de un aula de uso alto, alberga clases durante la mayoría del horario lectivo, y con ocupación alrededor del 30%, es decir, no especialmente altas. Sin embargo, supera en diversos casos las 2500ppm en concentración de CO<sub>2</sub>. En septiembre con **2511ppm**, octubre con un valor máximo de **2323ppm**, noviembre de **2640ppm** y en diciembre de **2300ppm**. Es decir, son picos repetidos en el tiempo y prolongados. No es hasta que se vacía el aula (bien en intercambios y mayoritariamente en el parón del mediodía de cambio de horario de mañana a tarde) que la ventilación es capaz de descender y estabilizar estos valores altos de concentración.

Ocurre de manera similar en el aula **C1.2**, aula que, aunque de menor tamaño, alberga clases en la mayoría de su horario y presenta ocupaciones iguales o superiores al 40%. Sufre casos de picos de CO<sub>2</sub> en todos los meses de estudio, con valores tan altos como **3045ppm, 1702ppm, 1545ppm, 1715ppm**.

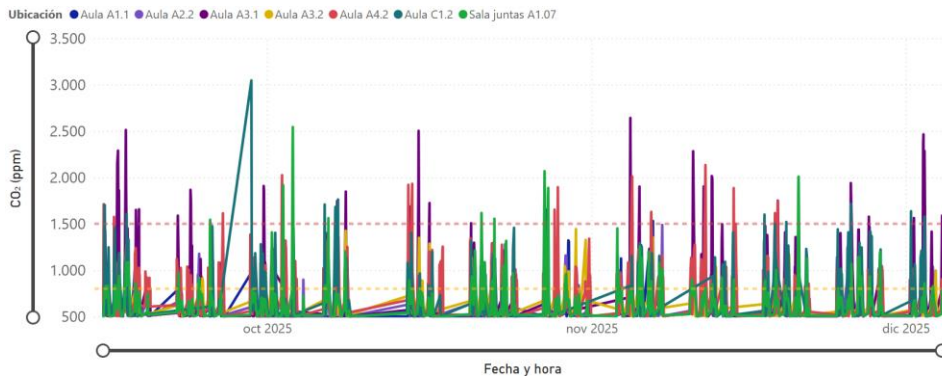


Figura 77. Histórico CO<sub>2</sub> en las aulas seleccionadas. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

De manera muy parecida ocurre, como muestra la Figura 78, con el aula A4.2, e incluso la A1.1 la cual aun tratándose de un aula con poco uso, cuando sí está siendo ocupada sufre picos altos de CO<sub>2</sub>.

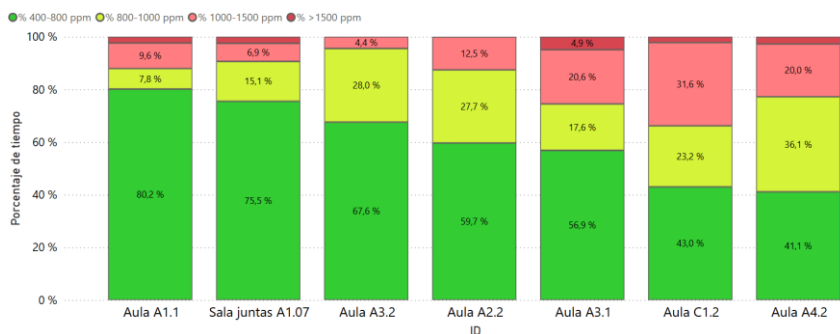


Figura 78. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CO<sub>2</sub> y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

## Trabajo Fin de Grado

La razón de esta incapacidad o insuficiencia de renovación responde a la reducción aplicada en el caudal de aire de ventilación que se menciona en el proyecto de construcción. Si el caudal se reduce, disminuye la tasa de renovación de aire filtrado. El parámetro más importante para evaluar la eficacia de un equipo LA no es simplemente la eficacia del filtro, sino el resultado conjunto del caudal de aire y la eficacia de filtrado. En el caso de estudio queda demostrado que aunque la materia particulada se elimina de manera efectiva, el caudal de ventilación, y por tanto el nivel de dilución para contaminantes gaseosos no es suficiente. Es decir, el filtrado mecánico y electrónico responsable de retener las partículas sólidas realiza esa función correctamente, pero no alcanza los niveles esperados de dilución del aire interior como reflejan las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes gaseosos que se van a detallar a continuación.

## TVOC

Los TVOC medidos por los sensores se trata de compuestos volátiles orgánicos totales y sirven como indicador de referencia de la presencia de COVs en el aire interior. No especifican los volátiles medidos, sino que nos informan de que están presentes en el aire [23].

Se tratan de los contaminantes con concentraciones más altas y sostenidas en el tiempo de todos los recogidos por los sensores y vuelven a ser indicadores de una incapacidad por parte del sistema de ventilación de diluir los contaminantes gaseosos del aire interior respirado. El índice 400 recomendado como límite se alcanza y supera.

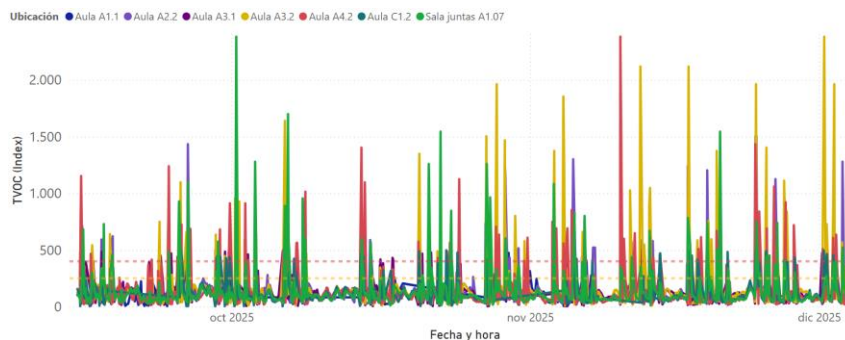


Figura 79. Histórico TVOC en las aulas seleccionadas. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Durante un 11,3% del tiempo las concentraciones superan el índice 400 y en más de un 36% se encuentran superiores al índice 200. Como muestra la Figura 80, todos los espacios sin excepción de aforo u ocupación presentan un alto contenido en volátiles totales durante gran parte del horario lectivo. Se trata de un problema que reafirma el error que representa haber reducido el caudal de aire de ventilación de las aulas.

Trabajo Fin de Grado

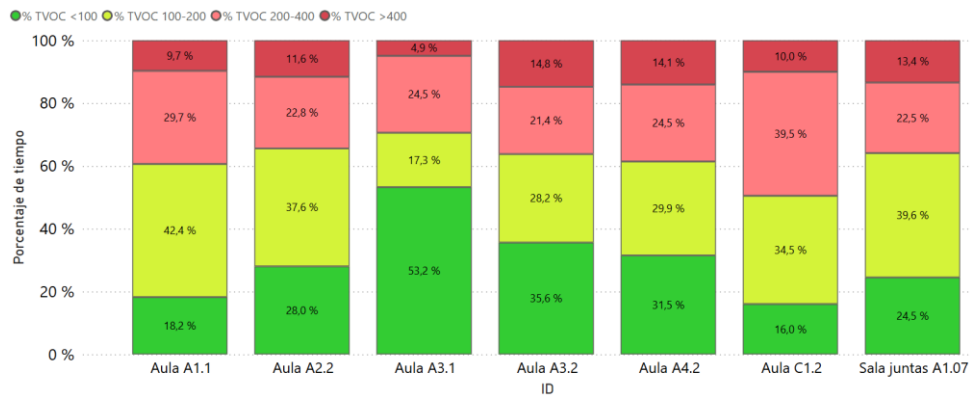


Figura 80. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de TVOC y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

**Formaldehído**

El formaldehído se trata de un contaminante volátil orgánico del grupo de hidrocarburos aromáticos. Su principal fuente de emisión en interiores procede de materiales de fabricación como pinturas, adhesivos, revestimientos de pared, etc. y de productos tales como cosméticos, cremas o telas entre otros. También puede originar de un producto intermedio formado durante la degradación química de otros COV al emplear purificadores electrónicos. Al tratarse de una especie reactiva, el formaldehído puede ser producido y perdido simultáneamente durante el funcionamiento del sistema LA electrónico, indicando las mediciones solo el resultado global de estos procesos competitivos [15]. Su generación es directamente proporcional a la temperatura como ya se planteó en el Informe 23 [30] de Miguel García-Monge y se confirma con los estudios realizados del curso 2024/2025 (Figura 21 y 22) con coeficientes de regresión de 0,68 y 0,77 confirmando una relación fuerte.

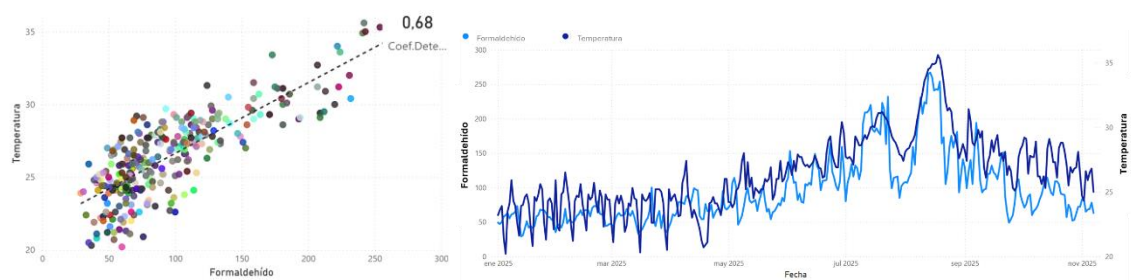


Figura 81. Relación Formaldehído-Temperatura en aula A3.2 del 1 de enero de 2025 – 7 de noviembre de 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Trabajo Fin de Grado

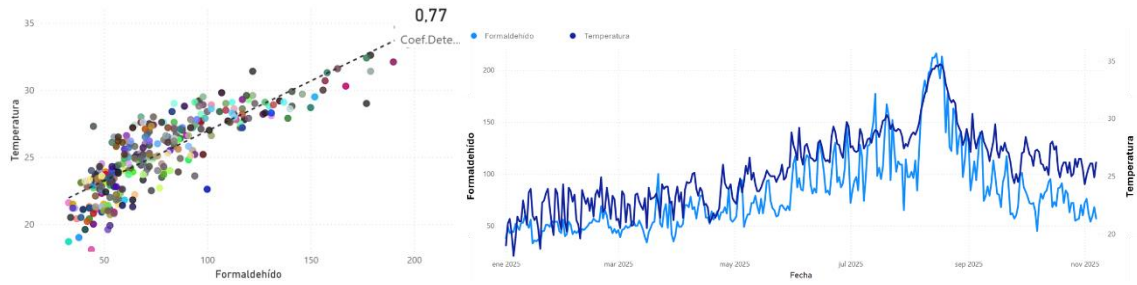


Figura 82. Relación Formaldehído-Temperatura en aula A2.2 del 1 de enero de 2025 – 7 de noviembre de 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Como muestran las figuras para el aula A3.2 (Figura 83) y A2.2 (Figura 84) respectivamente, son los meses de más calor en los que las concentraciones de formaldehído son más altas, superando incluso el 50% del tiempo una concentración superior a 120ug/m<sup>3</sup>. Se ha observado que el sistema de ventilación sí es capaz de mitigar estas concentraciones elevadas, comparando los resultados para el mes de junio de estas dos aulas, el tiempo en el que la concentración de CH<sub>2</sub>O es superior al límite 120 desciende coincidiendo con las horas lectivas en las cuales la ventilación está activada (Figura 85).

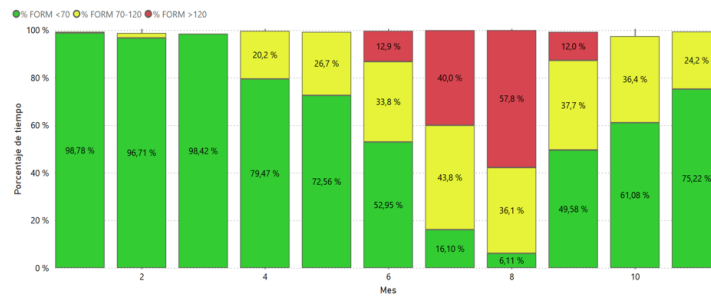


Figura 83. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CH<sub>2</sub>O del A3.2 por mes en 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

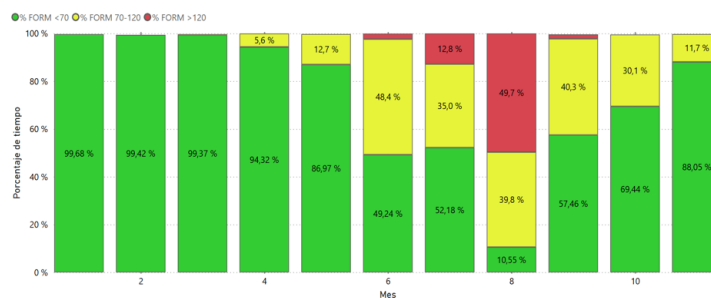


Figura 84. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CH<sub>2</sub>O del A2.2 por mes en 2025. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Trabajo Fin de Grado

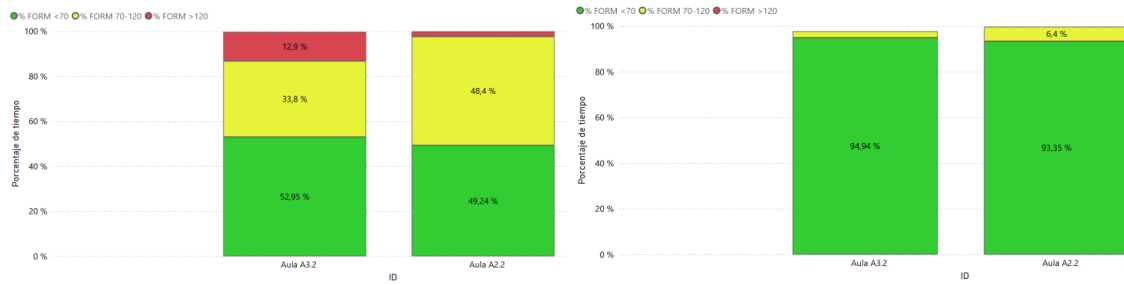


Figura 85. Comparación de concentración de CH2O para el mes de junio tomando todo el periodo vs únicamente en periodo lectivo. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

A pesar de ello, el sistema recoge momentos de concentraciones que superan los  $70\text{um}/\text{m}^3$  durante un 18,3% del tiempo e incluso picos puntuales superiores al límite de  $120\text{um}/\text{m}^3$  para las aulas medidas este cuatrimestre. En la Figura 86 se puede observar que aunque los últimos dos meses la concentración se encuentra en su mayoría por debajo de  $70\text{um}/\text{m}^3$ , en los primeros dos ocurren máximos más frecuentes en las aulas A2.2, A3.2 y A3.1 como refleja la Figura 87.

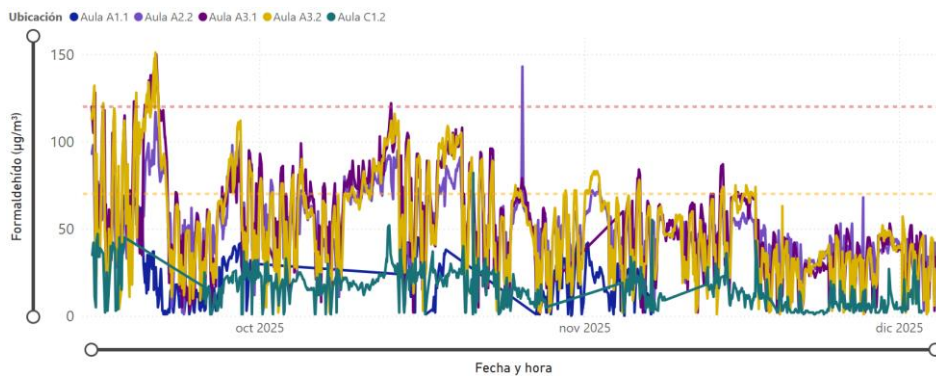


Figura 86. Histórico CH2O en las aulas seleccionadas de septiembre a diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

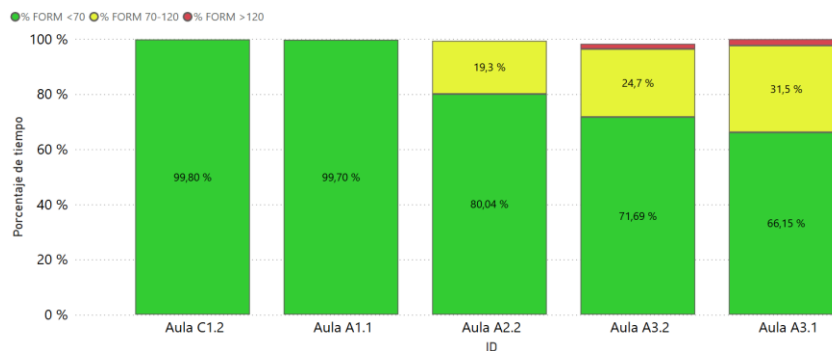


Figura 87. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de CH2O de septiembre a diciembre y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

## Trabajo Fin de Grado

El ozono se mide en las cinco aulas en las que están instalados los MICA WELL como muestra la Tabla 20. Debido a problemas de conexión por el sistema LoRaWan, los sistemas empiezan a transmitir de manera continua correctamente desde el 15 de septiembre. Por lo tanto, el estudio de este contaminante es desde el **15 de septiembre al 5 de diciembre**.

ID	Dispositivo	Aforo
Aula A0.4	Well	32
Aula A1.1	Well	24
Aula A2.3	Well	27
Aula A3.1	Well	80
Aula A4.3	Well	40

Tabla 20. Aulas con dispositivos MICA WELL

Se esperaría que no ocurrieran picos en ningún caso de ozono en interior, sin embargo, se observan momentos de picos de concentración en varias ocasiones (Figura 88). Alcanzan valores de pico tales como **759ppb y 743ppb** el 15 de septiembre, de **153ppb** el 18 de septiembre, **139ppb** el 19 de septiembre, **228ppb** el 7 de octubre, **620ppb** el 16 de octubre, o **260ppb** el 4 de diciembre.

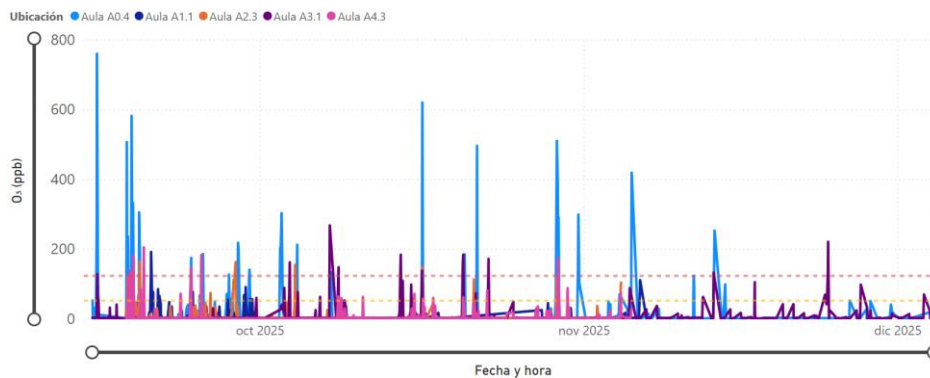


Figura 88. Histórico de O<sub>3</sub> del 15 de septiembre al 5 de diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Estas situaciones se dan en distintos espacios. Como se observa en la Figura 88 y se confirma en la Figura 89, el aula A0.4, que se trata de una sala de ordenadores del semisótano del edificio A sufre el mayor número de picos representando concentraciones superiores a 51ppb en casi el 13% del tiempo. Debido a que se trata de un contaminante altamente nocivo, tener concentraciones incluso en el nivel de 51ppb puede ser peligroso para la salud.

## Trabajo Fin de Grado

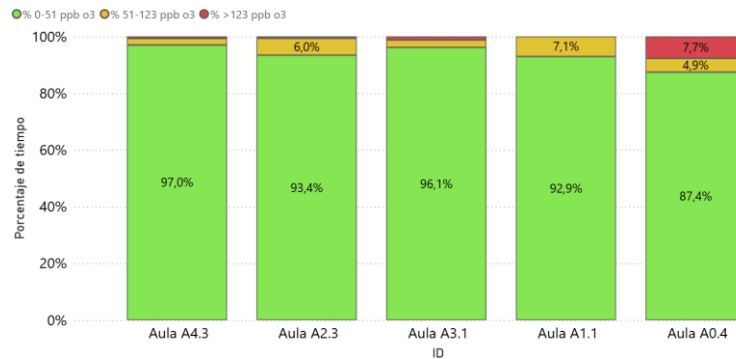


Figura 89. Porcentaje del tiempo por franjas de concentración de O<sub>3</sub> y por espacio. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Esta situación lleva a cuestionarse qué propicia la producción del ozono en el interior o cuál es su origen. Se valoraron varias hipótesis:

- Relación con NO<sub>2</sub> por la reacción NO<sub>2</sub> + luz solar → O<sub>3</sub>
- Procedencia del exterior.
- Transformación en compuestos volátiles.
- Relación con otros contaminantes.
- Relación con T<sup>a</sup> o humedad.
- Producción en los sistemas de LA.

### Relación con NO<sub>2</sub>

A nivel troposférico, el O<sub>3</sub> puede formarse por la reacción fotoquímica de diversos compuestos, denominados precursores, en presencia de luz solar. Una de las principales sustancias que pueden originar ozono son los óxidos de nitrógeno, que reaccionan con compuestos volátiles. Estas reacciones ocurren con mayor facilidad en condiciones de altas temperaturas y ambientes secos, es por ellos por lo que en los primeros meses del periodo de estudio podrían darse estas situaciones. [24]

Sin embargo, de acuerdo con las mediciones ambientales del ayuntamiento de Zaragoza del aire exterior no hay días de concentraciones altas de NO<sub>2</sub>. Si esta reacción se estuviese dando en el interior de las aulas facilitado por tener las ventanas abiertas y coincidiendo con un día muy soleado, debería bajar la concentración de volátiles cuando estos reaccionan con el NO<sub>2</sub>, sin embargo, esto tampoco ocurre.

La Figura 90 compara la concentración de O<sub>3</sub> con NO<sub>2</sub> en un momento de pico de ozono en el aula A3.1 para comprobar si existe relación entre ambos parámetros. La Figura 31 muestra un coeficiente de regresión entre ambos contaminantes en el aula A4.3 de 0,32, que siendo el más alto de entre las cinco aulas sigue siendo demasiado bajo para confirmar una dependencia entre ellos. Como muestran las Figura 90 y Figura 91, no parece existir correlación entre estos dos parámetros en el interior.

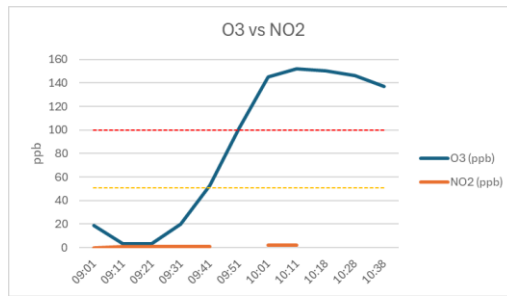


Figura 90. Relación entre O3 y NO2 el 4 de septiembre en el aula A3.1. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

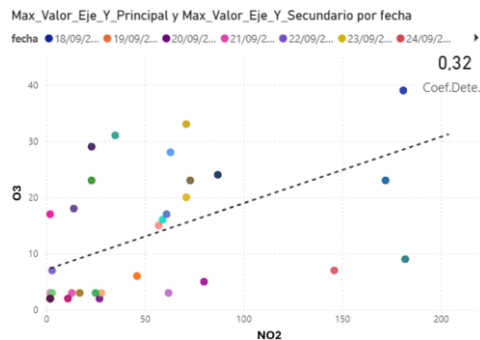


Figura 91. Correlación O3 vs NO2 en aula A4.3. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Sin embargo, puntualmente se registran concentraciones elevadas de NO<sub>2</sub> interior en el tiempo medido como muestra la Figura 92, especialmente en el aula A2.3. Es un suceso no esperado que se plantea como línea de futuro.

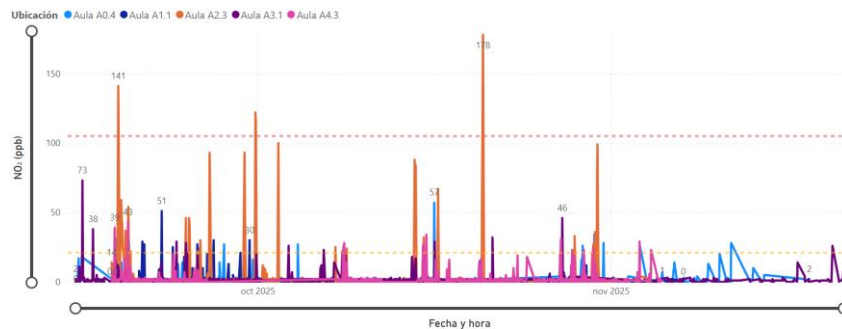


Figura 92. Histórico de NO2 del 15 de septiembre al 5 de diciembre. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

### Procedencia del exterior

Tomando de nuevo los datos del Ayuntamiento de Zaragoza sobre calidad de aire exterior se plantea como hipótesis que el origen del ozono interior reside en la concentración exterior pudiendo registrarse en las aulas porque este gas se filtra desde el exterior.

Se toman medidas exteriores desde el mes de septiembre hasta el de octubre (Figura 93) y se comparan con las interiores en ese mismo periodo para las distintas aulas (Figura 94). Se observa que los picos no coinciden y que los niveles de concentración son mucho menores en el exterior, con órdenes hasta 50ppb, que en el interior, con picos superiores a

## Trabajo Fin de Grado

las 500ppb, por lo que se plantea que los registros de los dispositivos de O<sub>3</sub> deben de estar generados en el interior.

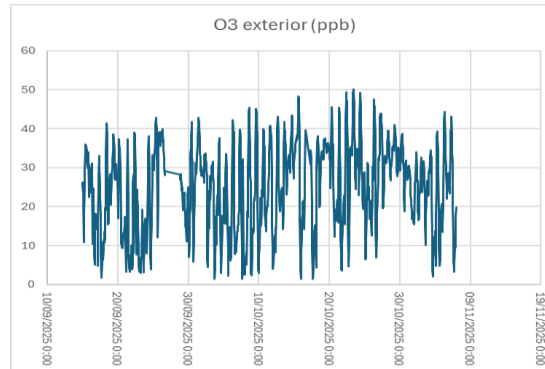


Figura 93. Histórico de O<sub>3</sub> exterior en Zaragoza del 15 de septiembre al de 10 de noviembre

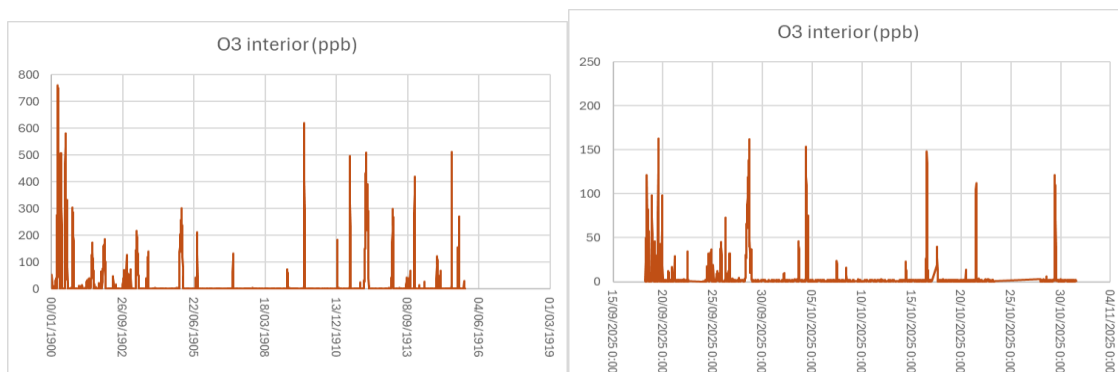


Figura 94. O<sub>3</sub> interior del 15 de septiembre al 10 de noviembre del aula A0.4 y A2.3 respectivamente

### Transformación en compuestos volátiles

El O<sub>3</sub> se trata de un compuesto muy inestable con tendencia a reaccionar con otros compuestos del ambiente como los compuestos volátiles para formar nuevos compuestos más oxidados y partículas, como aldehídos o cetonas. Se trata de una reacción común en el aire interior con atmósferas contaminadas por presencia de presencia de hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles [25].

Sin embargo, los momentos de aumento de O<sub>3</sub> no parecen preceder a un aumento de TVOC como muestra la Figura 95 y tampoco hay correlación entre los momentos de concentración máxima de O<sub>3</sub> y formaldehído (Figura 96).

Trabajo Fin de Grado

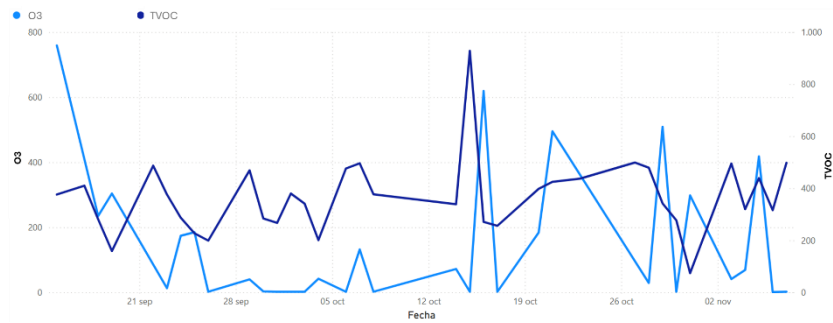


Figura 95. Relación O3 y TVOC aula A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

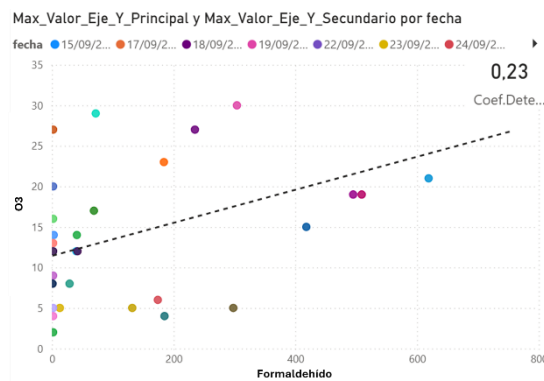


Figura 96. Correlación O3 y CH2O en A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Relación con otros contaminantes o parámetros

Todas las figuras muestran las correlaciones para los contaminantes en el aula A0.4, se elige esa aula porque es la que presenta más momentos de concentración alta de ozono. No existe correlación del O<sub>3</sub> con ninguno del resto de contaminantes medidos en el interior, siendo el valor de r más alto, de 0,15, para la materia particulada de 10µg/m<sup>3</sup>.

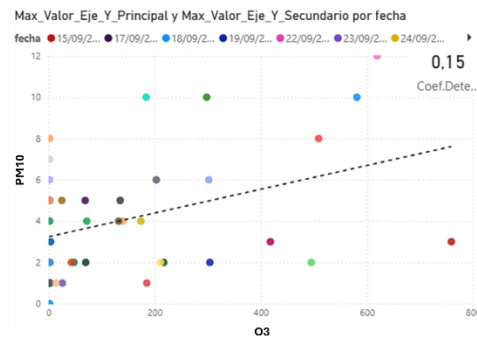


Figura 97. Correlación O3 y PM10 en A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

Tampoco existe correlación con ambos la temperatura (Figura 98), CO<sub>2</sub>, ni la humedad.

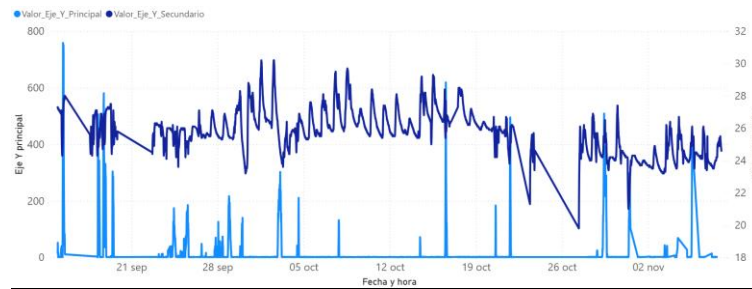


Figura 98. Relación O<sub>3</sub> vs Temperatura en A0.4. Fuente: PowerBi Miguel García-Monge

### Producción en los sistemas de LA

La hipótesis final planteada una vez refutadas todas las anteriores es que, efectivamente, el O<sub>3</sub> se esté produciendo en el interior en concreto en los procesos del sistema de LA de Polarización Activa y siendo introducido en las aulas por medio de la ventilación mecánica.

Estudiar los sistemas de filtrado electrónico y en concreto los productos de Aire Limpio® es una tarea complicada y no existe transparencia en cuanto al proceso de ionizado en sus filtros electrónicos y a los posibles contaminantes secundarios producidos. "De hecho, así como los beneficios sobre la salud de una adecuada están respaldados por una extensa literatura, la evidencia disponible sobre el uso de purificadores de aire, aun creciente, es muy limitada [29]. Por esta razón, a la hora de considerar la instalación de estos sistemas debe tenerse presente en todo momento trabajar como complemento y no en detrimento de la ventilación."

Para analizar si es una posibilidad real, se instaló el lunes 15 de diciembre gracias a la beca del Proyecto IMPULSO otro dispositivo MICA Well en el edificio la sala de colaboradores del I3A, en la planta uno del Betancourt. Se trata de un espacio con uso y ocupación de personas y en la que se conoce que no hay sistemas que puedan producir O<sub>3</sub> como los de LA u otros tales como escáneres láser. Si no se registran valores de ozono en la sala, se puede rechazar toda opción de fallo en el sistema de medición de este contaminante en los dispositivos MICA Well y valorar que efectivamente esos picos de O<sub>3</sub> sean producto del sistema de Polarización Activa.

Como muestra la Figura 99, no se produce durante todo el periodo estudiado ningún pico de ozono. Los valores se encuentran en todo momento por debajo de las 10ppb. Se verifica con esto que los sistemas de medición realizan una recogida fiable de este contaminante y dado que el ozono en el interior no procede del exterior se reafirma la hipótesis de que el O<sub>3</sub> recogido en las aulas de FyL pueda ser generado por los sistemas de LA por polarización activa.

## Trabajo Fin de Grado

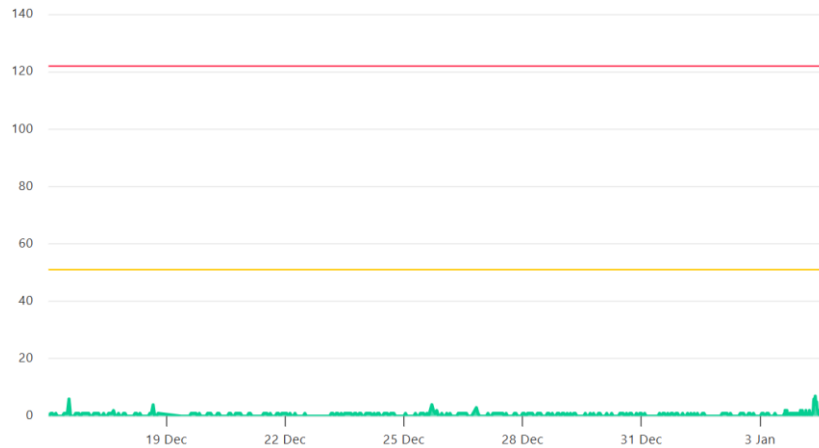


Figura 99. Histórico O3 del 15 de diciembre al 5 de enero en la sala de colaboradores del I3A. Fuente: MyinBiot

Para terminar de confirmar esta hipótesis se plantea desconectar los sistemas de Polarización Activa y analizar y comparar los valores de contaminantes registrados con los producidos con el sistema LA en funcionamiento. Sin embargo, es un procedimiento al que no tenemos acceso todavía en el momento de redacción de este TFG y se plantea como línea de futuro.

## Conclusiones

1. El caudal de aire de ventilación (reducido a 1/5) tiene como consecuencia concentraciones de CO<sub>2</sub> elevadas que el sistema de ventilación mecánica no logra mitigar ni reducir de forma efectiva tras su activación.

Las altas concentraciones de dióxido de carbono se alcanzan al comenzar el horario lectivo: comienza a aumentar la concentración superando las 1000ppm y 1500ppm y en ocasiones incluso las 3000ppm como en la Figura 100 sin estabilizarse y descendiendo únicamente cuando se vacía el aula. Esta situación se observa en aulas como la A3.1 el 17 de septiembre, 14 de octubre y 17 de noviembre como muestran la Figura 100, Figura 101 y Figura 102 respectivamente.

### EJEMPLOS:

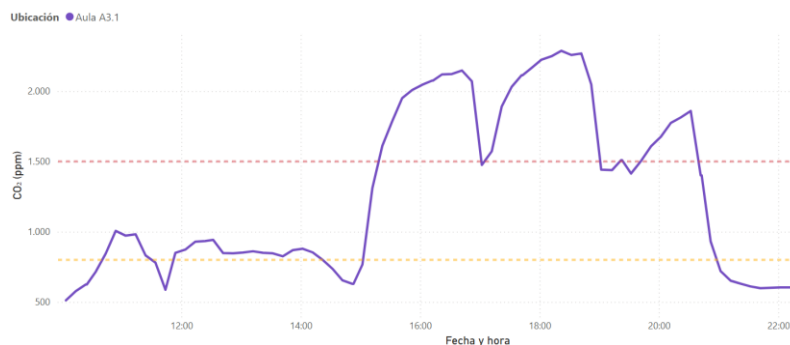


Figura 100. Histórico de concentración de CO2 en A3.1 el 17 de septiembre

Trabajo Fin de Grado

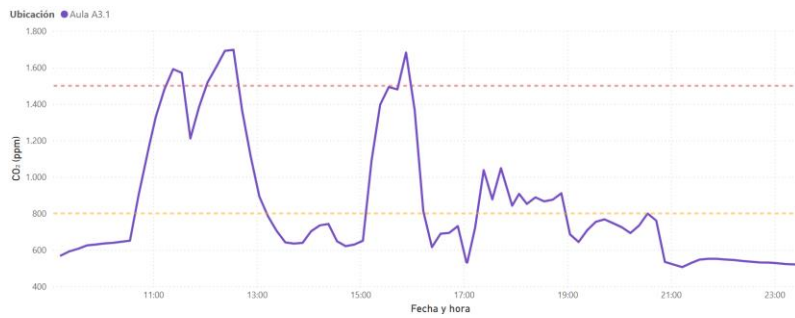


Figura 101. Histórico de concentración de CO2 en A3.1 el 14 de octubre

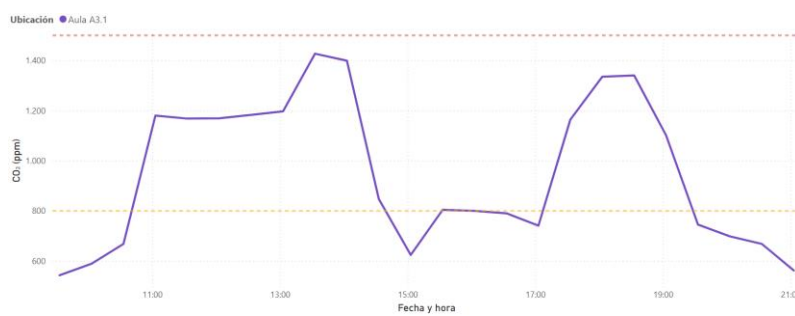


Figura 102. Histórico de concentración de CO2 en A3.1 el 17 de noviembre

Ocurre en otras aulas caracterizadas por presentar una ocupación promedio cercana al 50% la mayor parte del tiempo que son utilizadas que el sistema de ventilación no proporciona la dilución necesaria del aire interior. Así ocurre en la A2.2 en septiembre y octubre como queda representado en las Figura 103 y Figura 104, así como en la A4.2 del 11 al 15 de noviembre (Figura 105) y en el C1.2 el 17 de septiembre (Figura 106).

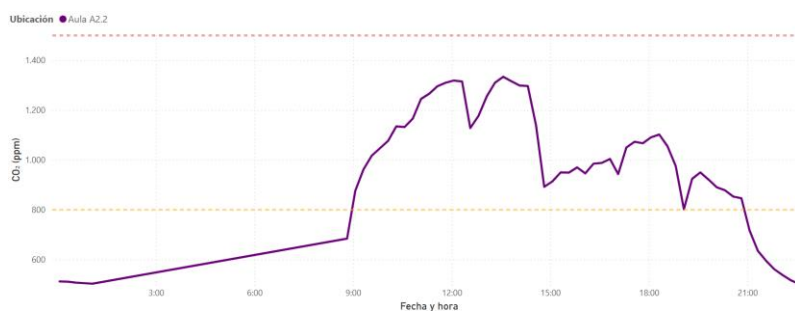


Figura 103. Histórico de concentración de CO2 en A2.2 el 17 de septiembre

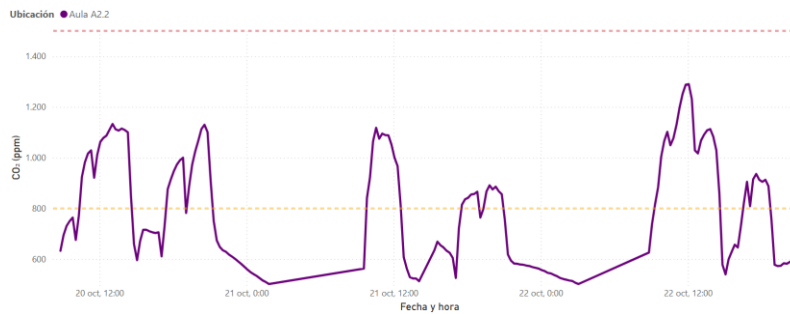


Figura 104. Histórico de concentración de CO2 en A2.2 del 20 al 22 de octubre



Figura 105. Histórico de concentración de CO2 en A4.2 del 11 al 15 de noviembre



Figura 106. Histórico de concentración de CO2 en C1.2 del 17 de septiembre

2. En relación con el sistema de Limpieza de Aire instalado, los registros actuales parecen relacionar los picos que ocurren de O<sub>3</sub> y con la polarización activa al descartarse las posibilidades de que el contaminante procediera del exterior, se generara al reaccionar con otros compuestos o la luz o se tratara de un error de medición.

## Anexo IV: Selección de aulas para el estudio de CAI de SGS

Se acuerda con el equipo de SGS realizar la revisión el jueves 5 de febrero de 2026.

## Trabajo Fin de Grado

Para seleccionar las aulas que van a ser analizadas estudiamos las mejores opciones atendiendo a la página de Reserva de Aulas. Nos centramos en las aulas del edificio rehabilitado (Pabellón A) en las que el aire se introduce mediante el sistema de LA instalado y en las que tenemos dispositivos MICA midiendo en continuo. Estas condiciones las cumplen las aulas A y C.

No se tienen en cuenta para la selección las aulas D por no disponer de sistema de LA y tampoco se incluyen las aulas E por no disponer de estudios previos que permitan estimar su nivel de ocupación, así como por no contar con dispositivos de medición instalados que nos hayan permitido medir los contaminantes.

Por último, se descarta el edificio departamental (Pabellón B) por no disponer de sistema de LA y porque los registros obtenidos mediante los dispositivos MICA muestran niveles adecuados de CO<sub>2</sub>.



Figura 107. Plano edificios de la facultad de FyL. Fuente: Planos de la Facultad. <https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad>

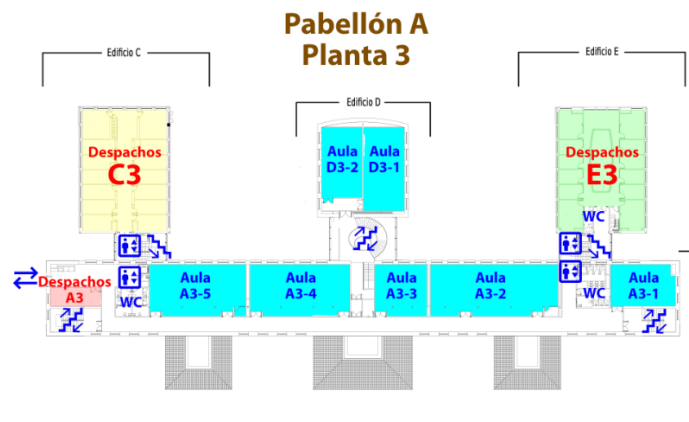


Figura 108. Plano Pabellón A en la planta 3. Fuente: Planos de la Facultad. <https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad>

La Tabla 21 muestra, para las aulas no destinadas a informática del edificio A, el porcentaje del día durante el cual han sido reservadas y, por tanto, estarán ocupadas para impartir clase. Se muestra el aforo de cada espacio tanto entre paréntesis seguido al nombre del aula como en la tercera columna. Se ha marcado por colores cada uno de los dos parámetros, siendo el rojo oscuro la opción menos favorable y el verde la más favorable. Para seleccionar esta leyenda se tiene en cuenta que nos interesan aulas con mayor reserva y con aforos bajos. El alto porcentaje de reserva obligará a depender en mayor medida del sistema de ventilación para diluir contaminantes puesto que hay menos tiempo en el que se vacían las aulas mientras que los aforos bajos son más probables de llenar y por lo tanto estar ante una situación de ocupación alta del aula.

Aula	Porcentaje ocupación	Aforo
A1-2 (24)	30%	24
A2-1 (80)	90%	80
A2-2 (180)	100%	180
A2-4 (140)	80%	140
A2-5 (100)	30%	100
A3-1 (80)	60%	80
A3-2 (175)	90%	175
A3-3 (40)	80%	40
A3-4 (140)	70%	140
A3-5 (120)	90%	120
A4-1 (48)	100%	48
A4-2 (175)	60%	175
A4-3 (40)	20%	40
A4-4 (160)	100%	160
C1-1 (42)	90%	42
C1-2 (42)	70%	42
A4-5 (130)	70%	130

Tabla 21. Reserva de ocupación y aforo de aulas el 5 de febrero

También se valora elegir espacios con dispositivos MICA ya instalados para poder comparar los resultados de ambos sistemas de medición. Siguiendo este primer criterio las aulas que representan las seis mejores opciones para medir son las mostradas en la Tabla 22. Se remarca en rosa las aulas con dispositivos MICA instalados.

Aula	Aforo
A4-1	48
A2-1	80
A3-3	40
C1-1	42
A3-1	80
A2-2	180

Tabla 22. Aulas con resultados más favorables a ser analizadas

Según el fabricante, los procedimientos requieren los siguientes tiempos mínimos de muestreo:

- COVs: 1-6 L a 0,05 L/min: 20-120 min
- Formaldehído: 1-15L a 0,5 L/min: 2-30 min
- Dióxido de Nitrógeno: 1,5-6L a 0,05 L/min: 30-120 min

El descanso entre una clase y la siguiente es de máximo 15 minutos y el tiempo mínimo de muestreo para el contaminante que más tiempo requiere (el NO<sub>2</sub>) según las indicaciones del fabricante es de 30 minutos. Además, las bombas de aspiración producen mucho ruido al funcionar por lo que se debe priorizar horarios con las aulas vacías. Si se va a analizar mientras está ocurriendo la clase se debe valorar reducir el caudal de aspiración para reducir el ruido.

En la Tabla 23 se pueden observar los horarios entre los que está reservada cada aula donde un “1” representa que el aula ha sido reservada y un “0” que no lo ha sido. Se

## Trabajo Fin de Grado

recuerda que entre las 14:15 y las 15:00 las aulas están vacías por ser el descanso de cambio de turnos de mañana y tarde.

Aula	HORARIOS									
	8:30-8:45	9:00-10:15	10:30-12:15	12:30-14:15	15:00-16:00	16:15-16:45	17:00-17:45	18:00-18:45	19:00-19:45	19:45-20:45
A1-2 (24)	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
A2-1 (80)	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
A2-2 (180)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A2-4 (140)	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
A2-5 (100)	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
A3-1 (80)	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
A3-2 (175)	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
A3-3 (40)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
A3-4 (140)	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
A3-5 (120)	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
A4-1 (48)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A4-2 (175)	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
A4-3 (40)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
A4-4 (160)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C1-1 (42)	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
C1-2 (42)	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
A4-5 (130)	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
	65%	71%	82%	41%	76%	76%	88%	88%	71%	65%

Tabla 23. Horarios de reserva de aulas el 5 de febrero

Se contratan finalmente dos jornadas y entre las cuales se van a recoger 4 muestras de cada uno de los tres contaminantes estudiados (NO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>O y VOCs), 2 de cada contaminante en cada jornada.

Conociendo estos datos, la información del fabricante y sabiendo que la medición se realizará de **8:00 a 19:30**, en la Tabla 24 se presenta el horario propuesto de estudio de las aulas. Debido a la dependencia con los horarios de clases, el aula A2.1 y A4.1 no pueden ser planteadas para analizar.

Horario	Aula	Medidor	COMENTARIOS	Toma de muestras
Previo a 12:15	X		Ningún aula se ocupa y posteriormente se queda vacía antes de las 12:15  pruebas iniciales (salas de estudio)	
12:15-16:15	A3.1	MICA Well	Clase con malos resultados en análisis previos. No vuelve a haber clase hasta las 16:15	Formaldehído 1 VOCs 1 NO <sub>2</sub> 1
12:15 – 15:00	A2.1	---		
14:15	A2-2	MICA Plus	Ocupada todo el día, menos en el descanso de cambio de turno	Opcional si no podemos la opción 2 (Formaldehído 3) (VOCs 3) (NO <sub>2</sub> 3)
16:00-16:45	C1.1	MICA Plus	No vuelve a haber clase hasta las 16:45	Formaldehído 2 VOCs 2 NO <sub>2</sub>
17:45	A1.2	---	Aula de aforo reducido.	
18:45	A3.3	---	Última clase a esa hora	
Vigilar ocupación	A4.1	---	OCUPADA TODO EL DIA ¿?	
Vigilar ocupación	A 2-2	MICA	OCUPADA TODO EL DIA ¿?	

Tabla 24. Propuesta de horarios seleccionados para el estudio

En las siguientes imágenes se recuadran las tres aulas seleccionadas para ser analizadas.

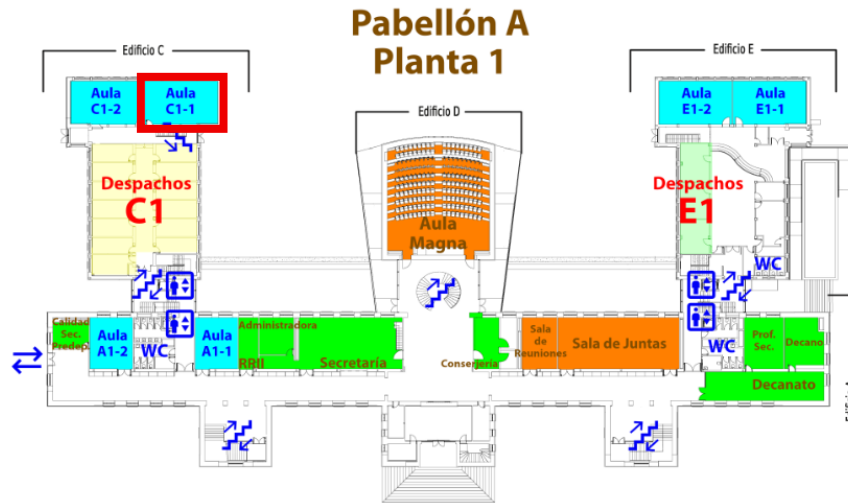


Figura 109. Planta 1 del Pabellón A. Fuente: Planos de la Facultad. <https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad>

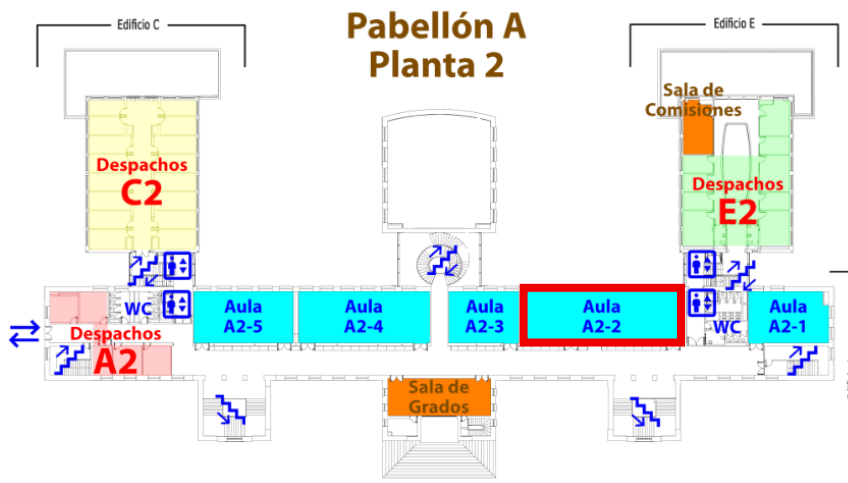


Figura 110. Planta 2 del Pabellón A. Fuente: Planos de la Facultad. <https://fyl.unizar.es/planos-de-la-facultad>

A continuación, para las aulas planteadas para ser analizadas (A3.1, A2.2 y C1.1) se presentan las concentraciones de TVOC y  $\text{CH}_2\text{O}$  por rangos y sus órdenes de magnitud. Todas las figuras estudian el periodo del 15 de septiembre al 5 de diciembre de 2025 de lunes a viernes y de 8h a 20h, es decir, en horario lectivo.

Los porcentajes de tiempo de  $\text{CO}_2$  informan de la renovación del aire interior y nos sirven como trazador de otros contaminantes. Así se muestran en la Figura 111 y en la Figura 112.

## Trabajo Fin de Grado

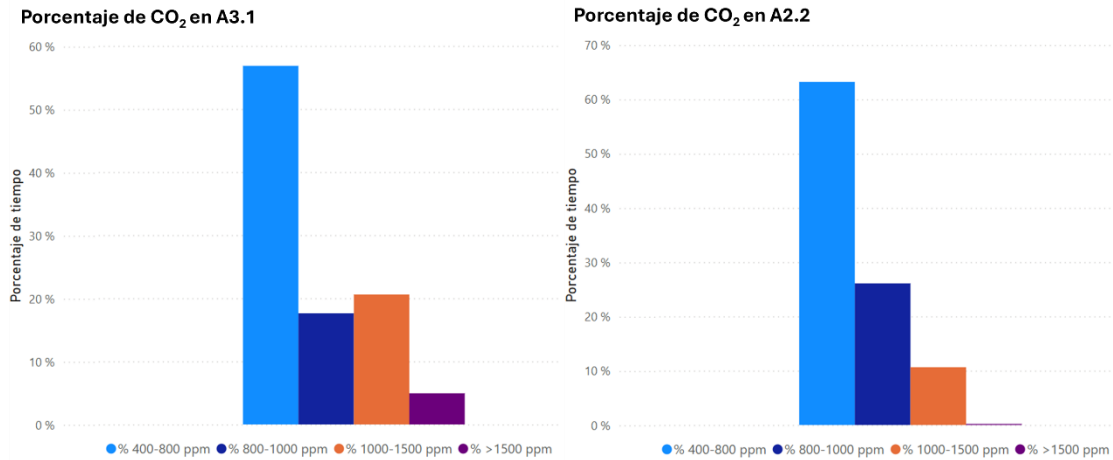


Figura 111. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de CO<sub>2</sub> en el aula A3.1 y A2.2

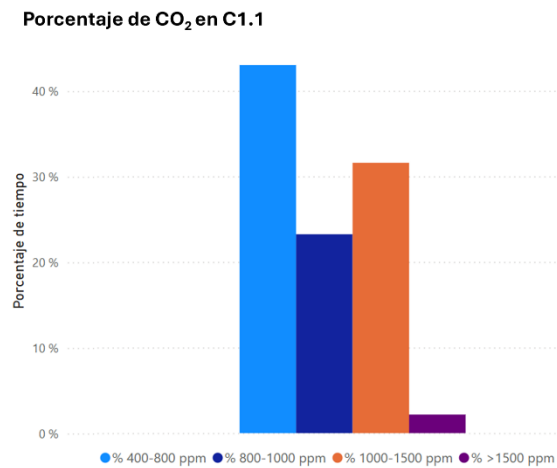


Figura 112. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de CO<sub>2</sub> en el aula C1.1

Se recuerdan como ya se ha expuesto con anterioridad, según la última información recibida por SGS, los tiempos de medición de los tres contaminantes estudiados:

- COVs: 1-6 L a 0,05 L/min: 20-120 min
- Formaldehído: 1-15L a 0,5 L/min: 2-30 min
- Dióxido de Nitrógeno: 1,5-6L a 0,05 L/min: 30-120 min

El aula A3.1 experimenta picos de **NO<sub>2</sub>** aunque no de manera habitual ni con permanencia en el tiempo por lo que no se puede asegurar que el aire examinado se vaya a encontrar por encima del límite de cuantificación del laboratorio (3ug según el último correo). Esto implica que de manera probable se necesite **aspirar aire para alcanzar el volumen máximo** de 6L, es decir, un proceso de **120 minutos** o cercano a ese tiempo para asegurar poder encontrar compuesto suficiente.

Por otro lado, las concentraciones de **TVOC** mostradas en la Figura 113 indican una concentración alta de este contaminante en el aire en gran parte del tiempo, por lo que

## Trabajo Fin de Grado

**cabría esperar no necesitar de los 120 minutos** para alcanzar el límite de cuantificación del laboratorio. Sin embargo, la concentración del  $\text{CH}_2\text{O}$  mostrada en la Figura 113 parece indicar que **ni siquiera midiendo los 30 minutos** completos para aspirar el máximo de 15L se va a registrar **presencia de este contaminante**.

Para este aula no hay problema en el tiempo de medición ya que se la han asignado, en principio, cuatro horas de medición en el horario de 12:15 a 16:15. Se puede **aspirar** sin problemas durante **120 minutos**.

Sin embargo, como comentario personal quiero apuntar que según se ha observado en todos los análisis previos hechos hasta la fecha, el sistema de ventilación es capaz de diluir el aire una vez el aula queda desocupada, por lo que la presencia de contaminantes en el aire aspirado para el análisis puede ser notablemente más baja que la registrada durante los periodos de ocupación.

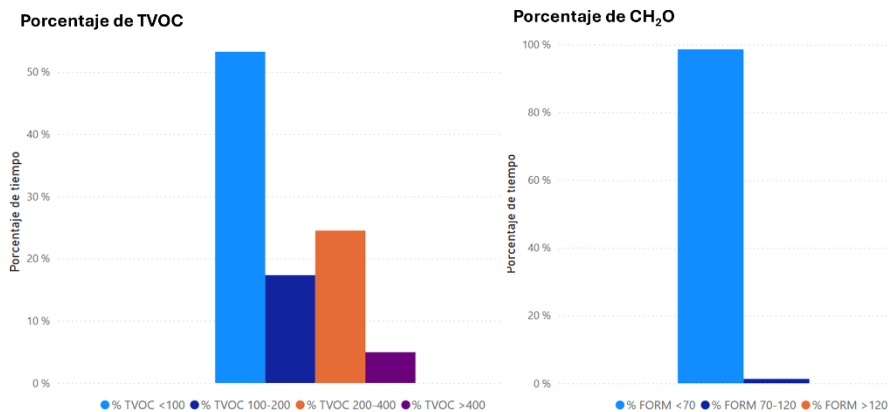


Figura 113. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de TVOC y  $\text{CH}_2\text{O}$  en el aula A3.1

Para el aula C1.1 no hay registros de dióxido de nitrógeno todavía. Sin embargo, cabría esperar unos resultados de  $\text{NO}_2$  similares a los registrados en el A3.1 y por lo tanto, necesitar del tiempo total de análisis para recoger el caudal máximo de aire. Es decir, **120 minutos**.

Sin embargo, la Figura 114 muestra una presencia similar de TVOC y el  $\text{CH}_2\text{O}$  a la del aula A3.1. Según las gráficas de la Figura 114, muy probablemente la medición de los **TVOC** no requiera aspirar el máximo de 6L, por lo tanto, **no necesite analizar los 120 minutos**. Al contrario, el **formaldehído** requeriría del **tiempo completo de medición (30 minutos)** para alcanzar los 15L aspirados y aun así, no se podría asegurar según los datos que tenemos hasta ahora, la presencia del contaminante en el aire aspirado.

En resumen, para este aula lo más probable es que se necesiten **120 minutos** de medición si se quieren recoger todos los contaminantes. Sin embargo, **se dispone únicamente de 60 minutos**, en el horario asignado de 16:00-17:00. La empresa propone evaluar la posibilidad de medir los restantes 60 minutos durante la clase. Esta medición, si es plausible realizarla por tener un nivel de ruido aceptable podría beneficiar el análisis por disponer de aire contaminado en presencia de ocupación.

## Trabajo Fin de Grado

Como comentario personal, si esta es una opción a tener en cuenta, recomendaría empezar el análisis una hora antes y realizarlo de 15:00-17:00. De esta manera es probable aspirar aire en los momentos de picos más altos. Además, no coincidiría con el análisis del aula A3.1 porque esta solo necesita 2 horas de aspiración y puede acabarse a las 14:15. Si el desplazamiento del equipamiento técnico puede realizarse en 45 minutos, se puede plantear este horario para la clase C1.1.

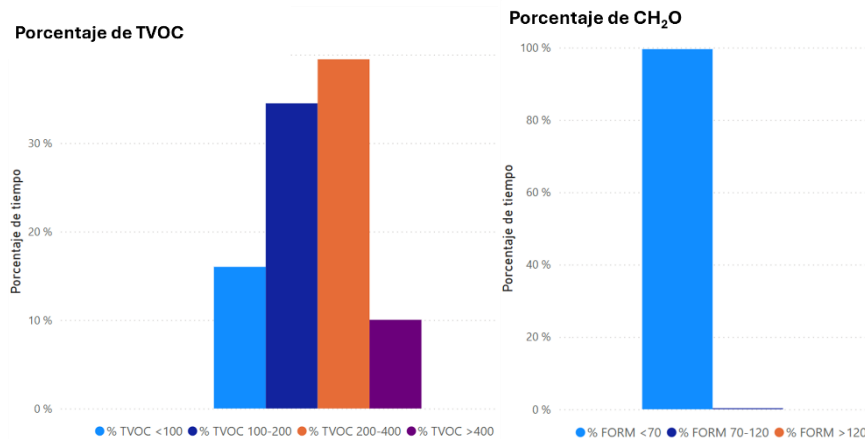


Figura 114. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de TVOC y CH<sub>2</sub>O en el aula C1.1

Por último, se plantea el aula A2.2 como plan B si alguna de las dos aulas propuestas como primeras opciones no pueden ser analizadas.

Para este aula tampoco hay registros de NO<sub>2</sub> todavía. Sin embargo, cabría esperar unos resultados de NO<sub>2</sub> similares a los registrados en el A3.1 y por lo tanto, necesitar del tiempo total de análisis para recoger el caudal máximo de aire. Es decir, **120 minutos**.

Por otro lado, se puede asumir gracias a la Figura 115 un comportamiento similar al aula A3.1 para los TVOC y el CH<sub>2</sub>O. Según las gráficas de la Figura 115, muy probablemente la medición de los **TVOC** no requiera aspirar el máximo de 6L, por lo tanto, **no necesite analizar los 120 minutos**. Al contrario, el **formaldehído** requeriría del **tiempo completo de medición (30 minutos)** para alcanzar los 15L aspirados y aun así, no se podría asegurar según los datos que tenemos hasta ahora, la presencia del contaminante en el aire a analizar.

Por lo tanto, para este aula se requieren **120 minutos de medición** si se quieren analizar los tres contaminantes. Según el horario del día 5 de febrero esto no es una opción si se quiere tener el aula sin ocupación dado que tiene reserva durante todo el día. La mejor opción, teniendo en cuenta únicamente periodos sin ocupación, sería medir durante 45 minutos de 14:15 a 15:00 en el cambio de turno.

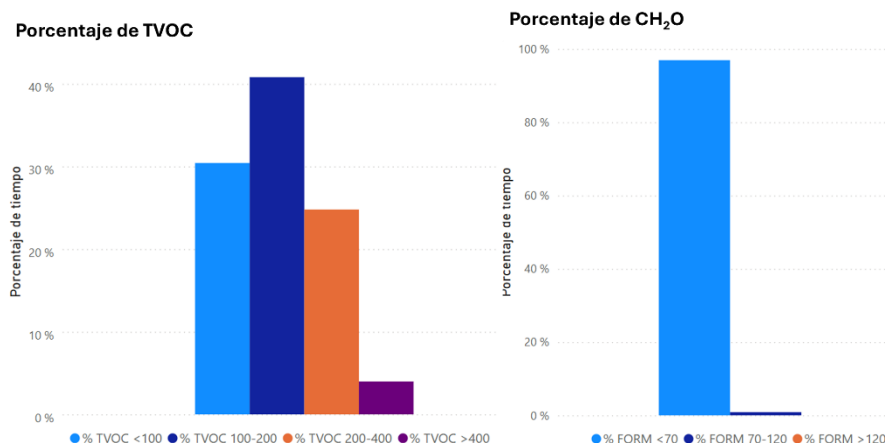


Figura 115. Porcentajes de tiempo para cada rango de concentración de TVOC y CH<sub>2</sub>O en el aula A2.2

Como comentario adicional y teniendo en cuenta que se prevé tener baja concentración de formaldehído y dióxido de nitrógeno en cualquiera de las aulas, se espera necesitar de una medición de 120 minutos si se quieren analizar los tres contaminantes. Bajo estas condiciones y asegurando tener el aula vacía, se puede plantear como opción analizar el aula A1.2 en horario de 17:45 a 19:30, hora de finalización del contrato de SGS de medición. Aunque el tiempo de estudio sería 15 minutos más corto de lo requerido por el caudal mínimo, lo que implicaría aspirar 5,25L en vez de 6L, puede plantearse como una opción de mayor utilidad que el aula A2.2.

La Tabla 25 recoge en resumen para las tres aulas consideradas para el estudio, sus horarios preseleccionados, los requerimientos mínimos de caudal y las propuestas personales si alguna de las opciones no pudiera realizarse. En verde están marcados los horarios que cumplen el tiempo mínimo de aspiración requerido mientras que en rojo están aquellas que no lo alcanzan.

Aula	Horario asignado	Propuesta cambio horario	Caudal mínimo COVs (tiempo correspondiente)	Caudal mínimo CH <sub>2</sub> O (tiempo correspondiente)	Caudal mínimo NO <sub>2</sub> (tiempo correspondiente)
A3.1	12:15-16:15 (240mins)	12:15-14:45 (150mins)	<6L (<120mins)	15L (30mins)	6L (120mins)
C1.1	16:00-17:00 (60mins)	15:00-17:00 (120mins)	<6L (<120mins)	15L (30mins)	6L (120mins)
A2.2 opción B	14:15-15:00 (45mins)	Sin opción	<6L (<120mins)	15L (30mins)	6L (120mins)
A1.2 opción C		17:45-19:30 (105mins)	<6L (<120mins)	15L (30mins)	6L (120mins)

Tabla 25. Resumen estudio aulas considerando el caudal mínimo de aspiración