



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de variables ambientales en un buque

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Javier Cervera Sáenz de Santa María

DIRECTORES: Alicia Vázquez Carpentier

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de variables ambientales en un buque

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado analiza el comportamiento de las variables ambientales en el puente del patrullero Corvo Mariño, enfocándose en la concentración de CO₂ como indicador clave de la calidad del aire y la ocupación. El estudio, basado en datos reales registrados entre julio de 2024 y mayo de 2025, emplea técnicas de análisis estadístico para identificar patrones de ventilación y habitabilidad en este espacio confinado.

La investigación demuestra una correlación directa entre el número de dispositivos detectados (como aproximación a la tripulación) y el incremento de CO₂. Los resultados revelan que las mayores acumulaciones ocurren durante la noche y en invierno, debido a que la tripulación cierra las ventanas para mantener el confort térmico frente a las bajas temperaturas exteriores, limitando la ventilación natural. Estos episodios elevan frecuentemente los niveles de CO₂ por encima de los 1000 ppm, umbral asociado a la aparición de somnolencia y menor rendimiento cognitivo.

Para garantizar condiciones óptimas, se estima las tasas de generación de gas y se propone una recomendación operativa clara: realizar una ventilación completa del compartimento durante 10 minutos cada 2 horas. En conclusión, este trabajo caracteriza la dinámica ambiental del buque y sienta las bases para futuras herramientas de gestión de la calidad del aire en entornos marítimos.

PALABRAS CLAVE

Calidad del aire interior; CO₂; análisis estadístico; ventilación; ocupación.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría empezar agradeciendo a mi familia por su apoyo incondicional. A mi padre y a mi madre por ser modelos a seguir tanto en la vida cotidiana como en la vida profesional. También agradecer el apoyo de mis siete hermanos, en particular, agradezco a mi hermano Manuel su orientación en la elección del presente trabajo y a mi hermano Santiago el apoyo mutuo brindado a lo largo de estos años.

Asimismo, quisiera agradecer a mi tutora Alicia Vázquez Carpentier por su guía y supervisión durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, así como al CC Pedro Carrasco por su colaboración como enlace con la Guardia Civil. Del mismo modo, expreso mi agradecimiento a el CAP Manuel Serrano Ruiz y a todo el personal de la tripulación de la patrullera *Corvo Mariño* por su disposición y ayuda a la hora de facilitar los datos necesarios para la realización del estudio.

Agradecer, por último, pero no menos importante a todos mis compañeros de promoción, los cuales considero amigos, haciendo hincapié en los más cercanos, junto con los que he podido crecer durante estos cinco años de formación profesional.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Contexto y motivación	9
1.2 Objetivos y metodología	10
1.2.1 Objetivo	10
1.2.2 Metodología.....	11
1.3 Estructura del trabajo	11
2 Estado del arte	13
2.1 El aire	13
2.1.1 Composición del aire	13
2.2 La calidad del aire	14
2.2.1 La calidad del aire en exteriores	14
2.2.2 La calidad del aire en interiores.....	15
2.2.3 Factores que afectan a la calidad del aire	16
2.2.4 La ventilación	17
2.3 Problemas de salud derivados de la mala calidad del aire	19
2.3.1 Impacto en la efectividad laboral.....	20
2.4 Normativa en buques	20
2.5 Medición de CO ₂	20
2.5.1 Dispositivo de medición AirQMonitor	21
2.6 Formulas a emplear en el análisis de datos	22
2.6.1 Media aritmética	22
2.6.2 Regresión lineal simple.....	22
2.6.3 Regresión lineal múltiple	23
2.6.4 Coeficiente de correlación de Pearson.....	23
2.6.5 Volumen efectivo de un compartimento.....	24
2.6.6 Variación de concentración de CO ₂	24
2.6.7 Tasa de incremento de la concentración de CO ₂	24
2.6.8 Conversión de ppm a volumen de CO ₂	24
2.6.9 Tasa de generación volumétrica de CO ₂	25
3 Desarrollo del TFG.....	26
3.1 Descripción del buque y zona de estudio.....	26

3.2 Sistema de monitorización ambiental	29
3.2.1 Ubicación del dispositivo de monitorización y contexto.....	29
3.3 Adquisición de datos.....	30
3.4 Tratamiento y limpieza de datos	31
3.5 Metodología de análisis de los datos.....	34
3.5.1 Análisis inicial mediante regresión lineal múltiple	34
3.5.2 Análisis exploratorio mediante representación gráfica.....	34
3.5.3 Análisis detallado de periodos representativos.....	36
3.5.4 Análisis del comportamiento del CO ₂ en función de las condiciones operativas.....	37
3.5.5 Análisis de correlación entre variables	37
3.5.6 Influencia de la temperatura exterior en la concentración de CO ₂	38
3.5.7 Modelización mediante regresión lineal	40
3.6 Cálculo acumulación del CO ₂	40
3.6.1 Estimación del volumen interior del puente	40
3.7 Estimación de generación por dispositivo	43
4 Resultados / Validación / Prueba.....	47
4.1 Evolución temporal de las variables ambientales.	47
4.2 Relación entre ocupación y concentración CO ₂	49
4.3 Influencia de la ventilación en la acumulación de CO ₂	54
4.4 Relación entre la temperatura del sensor y la concentración de CO ₂	55
4.5 Relación entre la temperatura exterior y la concentración de CO ₂	60
4.6 Análisis de episodios de acumulación de CO ₂ en el puente de gobierno.....	70
4.6.1 Análisis gráfico de los diferentes episodios.....	70
4.6.2 Comportamiento general de las concentraciones de CO ₂	78
4.6.3 Evidencia de episodios de ventilación	78
4.6.4 Análisis de las tasas de generación	79
4.6.5 Comparación con valores fisiológicos de producción de CO ₂	79
4.6.6 Variación estacional de las concentraciones máximas	80
4.6.7 Comportamiento nocturno y ocupación del puente	80
4.6.8 Selección de los tramos utilizados	80
4.6.9 Incrementos rápidos de la concentración.....	80
4.6.10 Influencia del volumen del puente de gobierno.....	81
4.6.11 Tiempo de exposición a concentraciones elevadas de CO ₂	81
4.6.12 Recomendación de ventilación	82
4.7 Discusión de los resultados	83
5 Conclusiones y líneas futuras	85

5.1 Conclusiones	85
5.2 Líneas futuras	86
6 Bibliografía.....	88
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	91
6.1 Implicaciones sociales y de salud	91
6.2 Implicaciones ambientales	91
6.3 Implicaciones económicas y operativas	91
6.4 Consideraciones de los criterios de la memoria.....	92
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	93
Anexo III: Declaración de uso de inteligencia artificial.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Composición volumétrica del aire seco	13
Figura 2-2 Factores de los que depende la contaminación atmosférica [8]	14
Figura 2-3 Resumen de la evaluación de la calidad del aire en 2024 por contaminante [12]	15
Figura 2-4 Plan de Control de calidad del aire en interiores [15]	16
Figura 2-5 Tipos de contaminantes [17].....	17
Figura 2-6 Ventilación en interiores [19]	17
Figura 2-7 Efectos del síndrome del edificio enfermo [25]	19
Figura 2-8 Efectos del CO ₂ en interiores [27]	20
Figura 2-9 Dispositivo de medida AirQMonitor	21
Figura 3-1 Foto aérea ENM donde se muestra la patrullera Corvo Mariño rodeada en rojo [31] ...	26
Figura 3-2 Plano lancha corvo Mariño	27
Figura 3-3 Puente de la patrullera Corvo Mariño.....	28
Figura 3-4 Cubierta inferior Corvo Mariño.....	28
Figura 3-5 Ubicación AirQMonitor	30
Figura 3-6 Número de datos mensuales	32
Figura 3-7 Variación de numero de dispositivos en el mes de octubre.....	33
Figura 3-8 Variación ppm de CO ₂ semana del 21 al 28 de octubre	33
Figura 3-9 Gráfica variable de dispositivos en el mes de julio	35
Figura 3-10 Gráfica CO ₂ y temperatura mes de julio normalizada	35
Figura 3-11 Gráfica CO ₂ y Dispositivos mes de julio normalizada	36
Figura 3-12 Gráfica CO ₂ y Humedad mes de julio normalizado	36
Figura 3-13 Gráfica CO ₂ y dispositivos en Julio sin relación subida CO ₂ y Dispositivos	37
Figura 3-14 Gráfica Temperatura sensor y temperatura exterior	38
Figura 3-15 Figura 3-16 Gráfica normalizada CO ₂ y temperatura exterior en octubre.....	39
Figura 3-17 Gráfica normalizada temperatura sensor, temperatura exterior y CO ₂ en octubre	40
Figura 3-18 Croquis del puente a partir de los planos.....	41
Figura 3-19 Variación CO ₂	45
Figura 3-20 Cálculo concentración de CO ₂	45
Figura 4-1 Gráfica evolución ppm de CO ₂ mes de octubre.....	48
Figura 4-2 Gráfica de variación de dispositivos en el mes de octubre.....	48
Figura 4-3 Gráfica CO ₂ y Dispositivos en octubre normalizada	49
Figura 4-4 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de agosto normalizada	50
Figura 4-5 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de octubre normalizada	50
Figura 4-6 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de noviembre normalizada	51

Figura 4-7 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de diciembre normalizada	51
Figura 4-8 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de julio normalizada	52
Figura 4-9 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de enero normalizada.....	53
Figura 4-10 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de febrero normalizada.....	53
Figura 4-11 Gráfica CO ₂ y dispositivos mes de marzo normalizada	54
Figura 4-12 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en julio normalizada	56
Figura 4-13 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en agosto normalizada	56
Figura 4-14 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en septiembre normalizada.....	57
Figura 4-15 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en octubre normalizada	57
Figura 4-16 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en noviembre normalizada	58
Figura 4-17 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en diciembre normalizada	58
Figura 4-18 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en enero normalizada.....	59
Figura 4-19 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en febrero normalizada.....	59
Figura 4-20 Gráfica Temperatura del sensor y CO ₂ en marzo normalizada	60
Figura 4-21 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en julio normalizada.....	61
Figura 4-22 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en agosto normalizada.....	62
Figura 4-23 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en septiembre normalizada.....	63
Figura 4-24 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en octubre normalizada	64
Figura 4-25 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en noviembre normalizada	65
Figura 4-26 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en diciembre normalizada	66
Figura 4-27 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en enero normalizada	67
Figura 4-28 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en febrero normalizada.....	68
Figura 4-29 Gráfica Temperatura exterior y CO ₂ en marzo normalizada	69
Figura 4-30 Gráfica variación CO ₂ 28-29 de junio	70
Figura 4-31 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO ₂ del 28-29 de junio.....	70
Figura 4-32 Gráfica variación CO ₂ 7-8 de agosto	71
Figura 4-33 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO ₂ del 7-8 de agosto	71
Figura 4-34 Gráfica variación CO ₂ 3-4 de septiembre	72
Figura 4-35 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO ₂ del 3-4 de septiembre	72
Figura 4-36 Gráfica variación CO ₂ 22-23 de octubre.....	73
Figura 4-37 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO ₂ del 22-23 de octubre.....	73
Figura 4-38 Gráfica variación CO ₂ 23-24 de noviembre	74
Figura 4-39 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO ₂ del 23-24 de noviembre.....	74
Figura 4-40 Gráfica variación CO ₂ 23-24 de diciembre.....	75
Figura 4-41 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO ₂ del 23-24 de diciembre.....	75
Figura 4-42 Gráfica variación CO ₂ 1-2 de enero.....	76

Figura 4-43 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 1-2 de enero 76

Figura 4-44 Gráfica variación CO₂ 11-12 de febrero 77

Figura 4-45 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 11-12 de febrero 77

Figura 4-46 Gráfica variación CO₂ 1-2 de marzo.....77

Figura 4-47 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 1-2 de marzo 78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados regresión lineal múltiple	34
Tabla 2 Tiempo que tarda en subir el CO ₂ en el mes agosto con Pearson	52
Tabla 3 Correlación de Pearson en julio	54
Tabla 4 Correlaciones julio	61
Tabla 5 Correlaciones agosto	62
Tabla 6 Correlaciones septiembre	63
Tabla 7 Correlaciones octubre.....	64
Tabla 8 Correlaciones noviembre.....	65
Tabla 9 Correlaciones diciembre.....	66
Tabla 10 Correlaciones enero.....	67
Tabla 11 Correlaciones febrero	68
Tabla 12 Correlaciones Marzo	69
Tabla 13 Tiempo de exposición a concentraciones de CO ₂ superiores a 1000 ppm en el puente de gobierno	81
Tabla 14 Acumulación CO ₂ con ventilación recomendada.....	82

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

La calidad del aire interior constituye un factor fundamental para el bienestar, la salud y el rendimiento de las personas que desarrollan su actividad en espacios cerrados. En las últimas décadas ha aumentado el interés por el estudio de las condiciones ambientales en interiores, especialmente en entornos donde la ventilación puede ser limitada y la renovación de aire depende de factores operativos o de diseño del espacio.

Entre los diferentes indicadores utilizados para evaluar la calidad del aire interior, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) se emplea habitualmente como un parámetro representativo del nivel de ventilación de un recinto ocupado. El CO_2 se genera de forma natural como resultado de la respiración humana, por lo que su concentración en un espacio cerrado tiende a aumentar cuando la ventilación es insuficiente en relación con el número de ocupantes. Por este motivo, el seguimiento de la concentración de CO_2 se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada para analizar el comportamiento de la ventilación en espacios interiores y detectar posibles episodios de acumulación de aire viciado.

En espacios de volumen reducido o con escasa renovación de aire, la acumulación de CO_2 puede producirse con relativa rapidez. Aunque las concentraciones habituales en interiores no suelen alcanzar niveles peligrosos desde el punto de vista toxicológico, sí pueden afectar al confort y al rendimiento cognitivo de los ocupantes cuando superan determinados valores. Diversos estudios han puesto de manifiesto que concentraciones elevadas de CO_2 pueden influir en la capacidad de toma de decisiones y en el rendimiento laboral en entornos cerrados, lo que resulta especialmente relevante en ámbitos donde la atención y la capacidad operativa son críticas [1].

Este tipo de situaciones se da con frecuencia en espacios confinados o semi-confinados, como edificios, vehículos, aeronaves o embarcaciones, donde las condiciones de ventilación pueden variar considerablemente a lo largo del tiempo. En el caso particular de los buques y embarcaciones, los espacios interiores suelen presentar volúmenes relativamente reducidos y una ventilación dependiente de la apertura de puertas, ventanas o sistemas específicos de renovación de aire. Además, las condiciones meteorológicas o las necesidades operativas pueden limitar en determinados momentos la ventilación natural de estos compartimentos.

En este contexto, el estudio de la calidad del aire interior en embarcaciones resulta de especial interés, ya que la tripulación puede permanecer durante largos periodos de tiempo en espacios cerrados mientras desarrolla sus funciones. Analizar la evolución de variables ambientales como la concentración de CO_2 , la temperatura o la humedad permite comprender mejor el comportamiento de estos espacios desde el punto de vista de la ventilación y la habitabilidad.

En el ámbito del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar de Marín, diversos trabajos recientes han abordado el estudio de las condiciones ambientales en embarcaciones. En particular, el trabajo de fin de grado realizado por Pablo Crevillén Hernández analizó la calidad ambiental en el interior del patrullero “Tabarca” de la Armada Española mediante la monitorización de variables como la concentración de CO₂, la temperatura y la humedad relativa en diferentes compartimentos del buque durante un periodo de treinta días [2]. A partir del análisis de más de treinta mil registros obtenidos mediante sensores instalados en el interior del buque, dicho estudio evaluó si las condiciones ambientales cumplían con los valores recomendados por la normativa vigente y propuso posibles mejoras para optimizar la ventilación y la calidad ambiental de los espacios analizados.

De forma complementaria, investigaciones más recientes desarrolladas en el entorno del CUD-ENM han abordado el análisis y la predicción de las concentraciones de CO₂ en embarcaciones mediante técnicas avanzadas de modelización basadas en series temporales y redes neuronales. Estos trabajos han demostrado la utilidad de los sensores ambientales y del análisis de datos para comprender el comportamiento de la calidad del aire en espacios marítimos cerrados y mejorar las condiciones de trabajo de la tripulación [1].

El presente trabajo se desarrolla siguiendo esta línea de investigación, ampliando el estudio de la calidad ambiental en embarcaciones mediante el análisis de las condiciones registradas en el puente de gobierno de una lancha patrullera de la Guardia Civil. Para ello se dispone de un conjunto de datos obtenidos mediante sensores instalados en el interior del puente, que registran de forma periódica variables como la concentración de dióxido de carbono, la temperatura interior, la humedad relativa y el número de dispositivos detectados en el compartimento, este último utilizado como estimación del número de personas presentes.

A diferencia de estudios anteriores realizados en periodos de tiempo más limitados, en este caso se dispone de una serie temporal extensa que abarca varios meses de mediciones, lo que permite analizar con mayor detalle la evolución temporal de la concentración de CO₂ y su relación con la ocupación del compartimento y con las condiciones ambientales exteriores.

El análisis de estos datos permite estudiar el comportamiento de la ventilación natural del puente de la embarcación, identificar episodios de acumulación de CO₂ y estimar la tasa de generación del gas asociada a la presencia de personas en el interior del compartimento. De este modo, el trabajo pretende aportar una caracterización detallada del comportamiento de la calidad del aire interior en el puente de la embarcación analizada, contribuyendo a mejorar el conocimiento sobre las condiciones de habitabilidad en este tipo de espacios.

1.2 Objetivos y metodología

1.2.1 Objetivo

El objetivo general del presente trabajo es analizar el comportamiento de la calidad del aire interior en el puente de gobierno de una lancha patrullera mediante el estudio de la evolución de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y su relación con diferentes variables ambientales y de ocupación.

El análisis de esta variable permite evaluar de forma indirecta las condiciones de ventilación del compartimento, ya que el CO₂ se genera principalmente como consecuencia de la respiración humana y su acumulación en espacios cerrados depende en gran medida del volumen del recinto, del número de ocupantes y de la tasa de renovación del aire.

A partir de este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la evolución temporal de la concentración de CO₂ en el interior del puente de la embarcación a lo largo del periodo de estudio.
- Estudiar la relación entre la concentración de CO₂ y el número de dispositivos detectados en el compartimento, utilizados como aproximación al número de personas presentes.

- Evaluar la relación entre la concentración de CO₂ y diferentes variables ambientales, como la temperatura interior, la humedad relativa o las condiciones meteorológicas exteriores.
- Identificar episodios de acumulación de CO₂ en el interior del puente y analizar su evolución temporal.
- Estimar la tasa de generación de CO₂ asociada a la presencia de personas en el compartimento a partir de la variación de la concentración del gas y del volumen estimado del espacio analizado.
- Interpretar los resultados obtenidos con el fin de comprender el comportamiento de la ventilación natural del compartimento y las condiciones de calidad del aire interior.

1.2.2 Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados se ha seguido una metodología basada en el análisis de datos ambientales registrados mediante sensores instalados en el interior de la embarcación.

En primer lugar, se dispone de un conjunto de datos obtenidos mediante dispositivos de monitorización ambiental instalados en el puente de la lancha, capaces de registrar de forma periódica variables como la concentración de CO₂, la temperatura interior, la humedad relativa y el número de dispositivos detectados en el entorno. Estos datos han sido almacenados con una resolución temporal durante un periodo prolongado de tiempo, lo que permite analizar la evolución de las condiciones ambientales en el compartimento.

Adicionalmente, se han incorporado datos meteorológicos exteriores, como la temperatura y el viento, obtenidos a partir de registros procedentes de estaciones meteorológicas cercanas. La inclusión de estas variables permite estudiar posibles relaciones entre las condiciones ambientales exteriores y el comportamiento de la ventilación natural del compartimento.

Una vez recopilados los datos, se ha procedido a su tratamiento y análisis mediante herramientas de cálculo y análisis estadístico. En primer lugar, se ha realizado una fase de preprocesamiento de los datos con el objetivo de detectar posibles valores anómalos, periodos sin registro y errores asociados a la adquisición de los datos.

Posteriormente, se han realizado diferentes análisis estadísticos y representaciones gráficas para estudiar la evolución temporal de la concentración de CO₂ y su relación con las variables consideradas. Entre estos análisis se incluyen el cálculo de estadísticas básicas, el estudio de correlaciones entre variables y la representación de series temporales para identificar patrones de comportamiento.

Además, se han seleccionado distintos episodios representativos de acumulación de CO₂ con el fin de analizar con mayor detalle la evolución del gas en el interior del compartimento. A partir de estos episodios se ha estimado la tasa de generación de CO₂ asociada a la presencia de personas en el interior del puente, utilizando para ello el volumen estimado del compartimento y la variación de la concentración del gas a lo largo del tiempo.

Finalmente, los resultados obtenidos se han interpretado teniendo en cuenta las características del espacio analizado, las condiciones de ocupación del puente y las posibles situaciones de ventilación natural derivadas de la apertura de puertas o ventanas.

1.3 Estructura del trabajo

El presente trabajo se organiza en varios capítulos que describen de forma progresiva el desarrollo del estudio realizado.

En el Capítulo 1 se presenta el contexto del trabajo, la motivación del estudio y los objetivos que se persiguen, así como una descripción general de la metodología empleada.

El Capítulo 2 recoge los principales fundamentos teóricos relacionados con la calidad del aire y su evaluación en espacios interiores.

En el Capítulo 3 se describe la metodología de adquisición y tratamiento de los datos. En él se detallan las variables analizadas, el origen de los datos utilizados, el proceso de limpieza y preparación del conjunto de datos y los métodos empleados para su análisis. También describe las características de la embarcación objeto de estudio y, en particular, la disposición del puente de gobierno donde se han realizado las mediciones y se presenta una estimación del volumen del compartimento analizado, necesaria para el cálculo de la tasa de generación de CO₂.

El Capítulo 4 recoge los resultados obtenidos a partir del análisis de los datos. En este capítulo se estudia la evolución temporal de la concentración de CO₂, su relación con el número de dispositivos detectados y con diferentes variables ambientales, así como distintos episodios representativos de acumulación de CO₂ en el interior del puente. Finalmente, se realiza una discusión de los resultados obtenidos.

Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones principales del trabajo y se proponen posibles líneas de trabajo futuro relacionadas con el estudio de la calidad del aire interior en embarcaciones.

2 ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo recoge los principales fundamentos teóricos relacionados con la calidad del aire y su evaluación en espacios interiores. Se describen la composición del aire, los factores que influyen en la calidad ambiental y el papel de la ventilación en el control de contaminantes. Asimismo, se introduce el dióxido de carbono (CO_2) como indicador de ventilación y se presentan los sistemas de medición y las herramientas matemáticas empleadas en el análisis de los datos.

2.1 El aire

El aire atmosférico es una mezcla homogénea de gases que constituye la envoltura gaseosa de la Tierra y resulta esencial para el mantenimiento de la vida. En condiciones estándar y en capas bajas de la atmósfera (troposfera), su composición puede considerarse relativamente constante debido a los procesos de mezcla y circulación atmosférica [3].

2.1.1 Composición del aire

En términos volumétricos, aproximadamente el 78 % del aire seco está compuesto por nitrógeno (N_2) y un 20,9 % por oxígeno (O_2) [4]. El porcentaje restante está formado principalmente por argón (Ar), con una fracción cercana al 0,93 %, y dióxido de carbono (CO_2), cuya concentración media actual supera las 400 partes por millón (ppm), equivalente a aproximadamente un 0,04 % en volumen. Además, existen otros gases en proporciones traza, tales como neón, helio, metano, criptón, hidrógeno y ozono, presentes en concentraciones inferiores al 0,01 % [5]. La figura 2-1 muestra estos porcentajes en un gráfico para observar la proporción entre ellos.

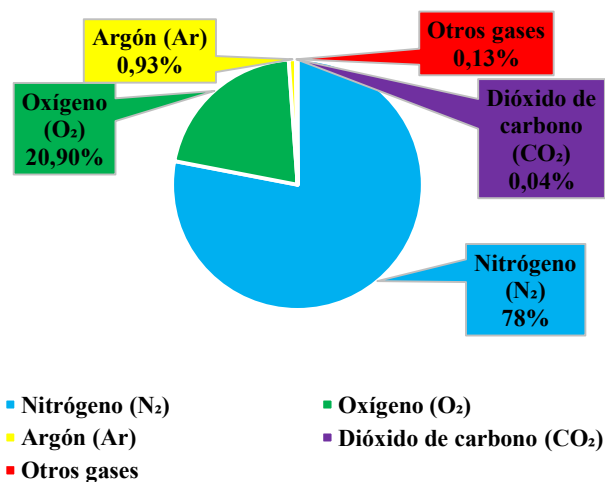


Figura 2-1 Composición volumétrica del aire seco

A diferencia de los componentes mayoritarios, el vapor de agua presenta una concentración altamente variable, que puede oscilar entre el 1 % y el 4 % en función de la temperatura, presión y condiciones meteorológicas. Esta variabilidad introduce modificaciones significativas en las propiedades termodinámicas del aire y en los procesos de intercambio de calor y masa.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la composición del aire en las capas bajas de la atmósfera se mantiene relativamente estable gracias al equilibrio dinámico de los ciclos biogeoquímicos, especialmente el ciclo del carbono y el ciclo del oxígeno. El dióxido de carbono desempeña un papel fundamental en el ciclo del carbono, participando en procesos naturales como la respiración celular, la descomposición de materia orgánica y la fotosíntesis. Sin embargo, las actividades antropogénicas, particularmente la combustión de combustibles fósiles, han provocado un incremento sostenido de su concentración atmosférica desde la Revolución Industrial [6].

Aunque la composición básica del aire no determina por sí sola su calidad ambiental, cualquier alteración significativa en la proporción de sus componentes, o la incorporación de sustancias ajenas a su composición natural, puede afectar tanto al equilibrio atmosférico como a la salud humana. En este sentido, el estudio del dióxido de carbono adquiere relevancia no solo por su papel en el cambio climático, sino también por su utilidad como indicador indirecto de ventilación en espacios interiores ocupados [5].

2.2 La calidad del aire

La calidad del aire se define como el grado en el que la composición atmosférica se mantiene dentro de unos niveles que no generan efectos adversos significativos sobre la salud humana, los ecosistemas ni los materiales. Su evaluación se basa en la medición de contaminantes específicos cuya concentración puede variar en función de factores naturales y antropogénicos.

2.2.1 La calidad del aire en exteriores

Los niveles de contaminación exterior dependen de múltiples factores, como se ve en la figura 2-2 entre ellos están las emisiones industriales y vehiculares, las condiciones meteorológicas como el viento y la estabilidad atmosférica, la geografía y topografía y los procesos fotoquímicos.

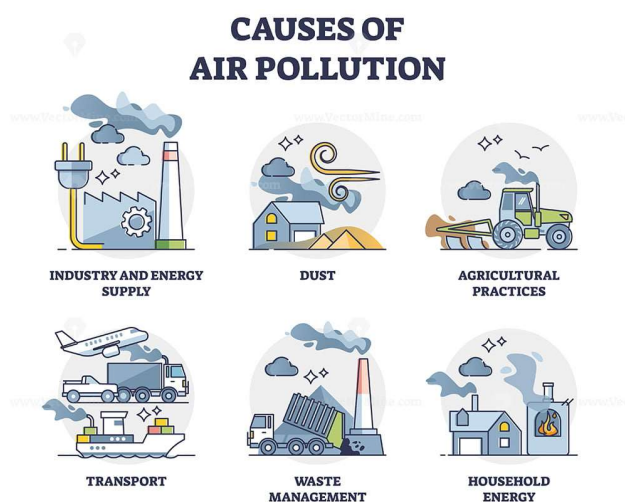


Figura 2-2 Factores de los que depende la contaminación atmosférica [8]

La contaminación atmosférica exterior constituye uno de los principales riesgos ambientales para la salud pública a escala global. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición prolongada a contaminantes como material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono troposférico (O_3) y dióxido de azufre (SO_2) está asociada a un aumento significativo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón [9].

El material particulado fino (PM_{2.5}) es considerado el contaminante con mayor impacto sanitario, debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio e incluso alcanzar el torrente sanguíneo. La OMS estima que millones de muertes prematuras anuales están relacionadas con la exposición a contaminación atmosférica exterior, especialmente en regiones urbanas con elevada densidad de tráfico e industria.

En España, la evaluación y gestión de la calidad del aire se apoya en un marco normativo específico cuyo objetivo es evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos de la contaminación atmosférica. En este sentido, la Ley 34/2007 establece las bases de la prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica, y el Real Decreto 102/2011 desarrolla el marco para la mejora de la calidad del aire, incluyendo criterios de evaluación, objetivos y obligaciones de planificación cuando se superan determinados valores de referencia para contaminantes regulados [10].

En la práctica, la calidad del aire exterior se evalúa mediante redes de vigilancia y modelos de estimación que permiten cuantificar concentraciones y tendencias de contaminantes clave. Los informes anuales de Evaluación de la calidad del aire en España elaborados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) proporcionan una visión consolidada de los niveles medidos, la distribución espacial y el cumplimiento de los valores objetivo y límites aplicables [11].

En la Figura 2-3 se presenta de forma gráfica el resultado de la evaluación de la calidad del aire en España correspondiente al año 2024 para diferentes contaminantes. Esta representación permite visualizar de manera sintética el grado de cumplimiento de los valores límite y objetivos establecidos en la normativa vigente para las distintas zonas de calidad del aire del territorio nacional. En estas gráficas, los colores representan la situación de las distintas zonas de calidad del aire respecto a los valores límite u objetivos establecidos para cada contaminante. El color rojo indica las zonas donde se superan dichos valores, el color verde aquellas en las que se cumplen los límites establecidos, y el color amarillo las zonas donde inicialmente se superan los valores límite de partículas, pero dejan de hacerlo tras descontar las contribuciones debidas a aportes naturales.

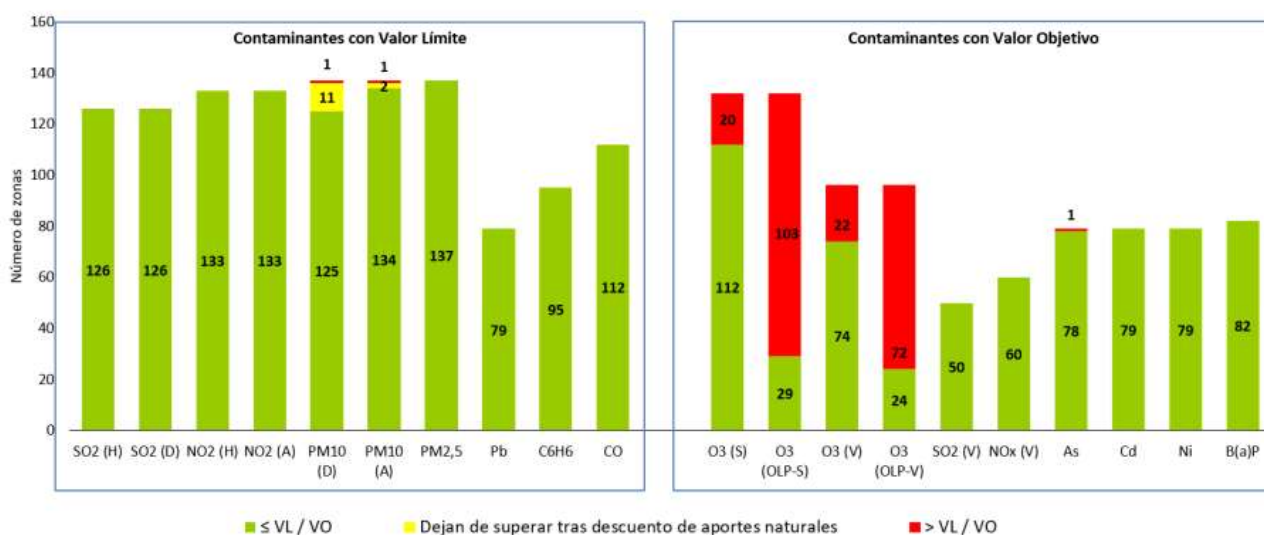


Figura 2-3 Resumen de la evaluación de la calidad del aire en 2024 por contaminante [12]

2.2.2 La calidad del aire en interiores

La calidad del aire interior (CAI) se refiere al estado del aire en espacios cerrados o semipermeables en relación con la salud, el confort y el rendimiento de sus ocupantes. Dado que las personas pasan gran

parte de su tiempo en interiores, la calidad del aire en estos espacios condiciona no solo el bienestar fisiológico, sino también la eficacia y seguridad en el desarrollo de actividades laborales o de otra índole.

En España, la CAI ha cobrado especial atención tanto desde la perspectiva de salud pública como de prevención de riesgos laborales, aunque carece de un límite cuantitativo universal legalmente sancionable, existiendo directrices técnicas y recomendaciones basadas en evidencias científicas y normas técnicas. Entre las principales fuentes de tóxicos en interiores se encuentran la respiración humana (CO_2 y bioefluentes), los materiales de construcción, los productos de limpieza utilizados, los equipos electrónicos y la infiltración de contaminantes exteriores [13].

La CAI se ve afectada por una combinación de fuentes contaminantes internas y por la efectividad de la ventilación. Entre los contaminantes interiores comunes se encuentran gases, partículas en suspensión, compuestos orgánicos volátiles y aerosoles biológicos, cuya concentración puede superar con frecuencia la del aire exterior debido a la falta de renovación de aire adecuada. Por ello, el control de la ventilación y la correcta operación, mantenimiento y diseño de los sistemas de climatización y ventilación constituyen herramientas clave para reducir la presencia de contaminantes interiores [14].

En el ámbito normativo español, la norma UNE 171330 establece criterios para el diagnóstico y gestión de la calidad ambiental interior, definiendo procedimientos de inspección y evaluación como los que se muestran en la siguiente figura [15]:

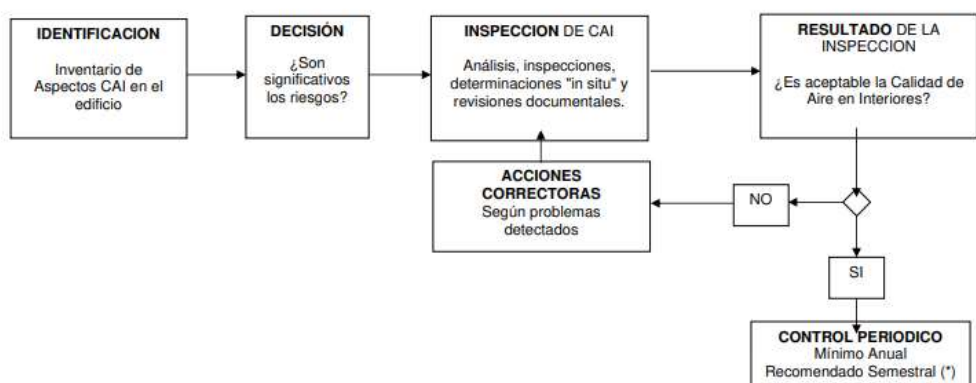


Figura 2-4 Plan de Control de calidad del aire en interiores [15]

2.2.3 Factores que afectan a la calidad del aire

La calidad del aire, tanto en exteriores como en interiores, está condicionada por una combinación de factores físicos, químicos, biológicos y antropogénicos que determinan la concentración y dispersión de contaminantes.

Desde el punto de vista químico, los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en primarios y secundarios como se ve en la figura 2-5. Los contaminantes primarios son aquellos emitidos directamente a la atmósfera desde una fuente identificable, como ocurre con el dióxido de nitrógeno (NO_2) procedente del tráfico rodado, el dióxido de azufre (SO_2) derivado de procesos industriales o el material particulado generado por combustión. Por el contrario, los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera mediante reacciones químicas entre contaminantes primarios, siendo el ozono troposférico (O_3) uno de los ejemplos más representativos [16].

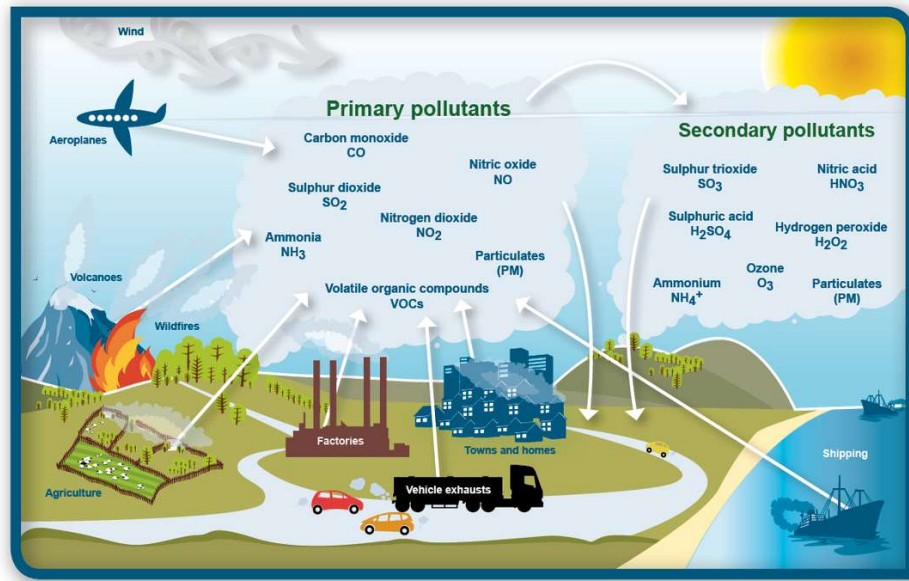


Figura 2-5 Tipos de contaminantes [17]

En espacios interiores, las fuentes generadoras de contaminantes son múltiples y diversas: la respiración humana (principal fuente de CO₂), los materiales de construcción, los productos de limpieza, los equipos electrónicos y otros procesos que emiten compuestos químicos o partículas. En particular, el dióxido de carbono (CO₂) se acumula con la presencia humana y puede servir como indicador de ventilación insuficiente cuando sus niveles exceden ciertos umbrales, lo que se ha observado en estudios españoles donde más del 50 % de viviendas con ventilación natural presentan niveles de CO₂ superiores a los criterios de calidad interior normativos [18].

2.2.4 La ventilación

La ventilación constituye el mecanismo principal de control de contaminantes en espacios interiores. Su función es diluir y evacuar las sustancias generadas en el interior mediante la introducción de aire exterior. En la figura 2-6 vemos el proceso de la ventilación.

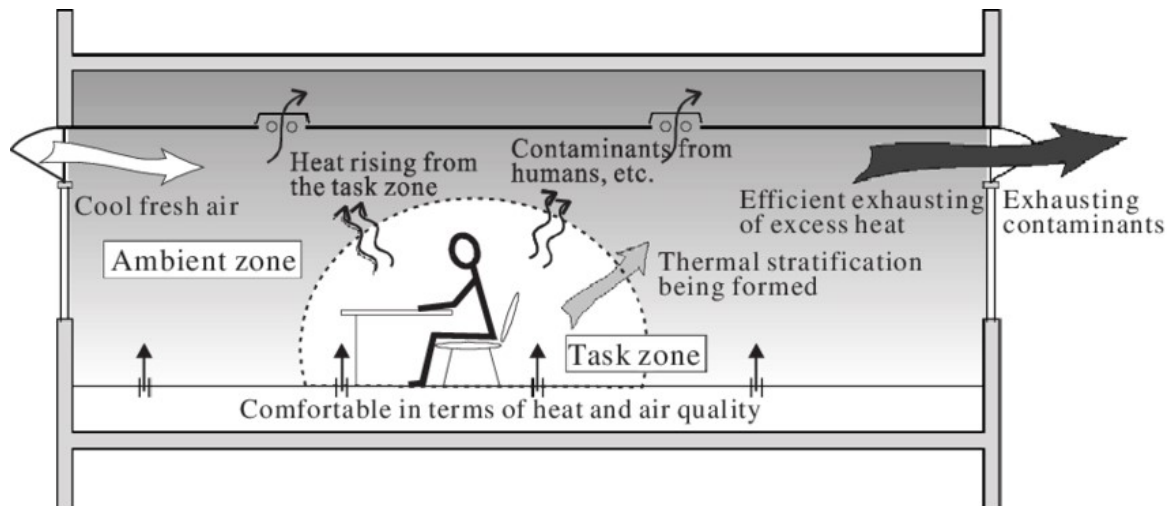


Figura 2-6 Ventilación en interiores [19]

Desde el punto de vista técnico, la ventilación puede clasificarse en ventilación natural la cual se basa en la apertura de huecos y diferencias de presión, ventilación mecánica basada mediante sistemas forzados de impulsión y extracción y ventilación híbrida la cual es la combinación de las dos citadas anteriormente.

La ventilación natural o mecánica es el principal mecanismo para diluir y evacuar contaminantes en espacios interiores. La literatura técnica y guías de salud ambiental españolas recomiendan una ventilación eficiente con el objetivo de mantener niveles de CO₂ bajos y reducir la acumulación de otras sustancias potencialmente nocivas. Por ejemplo, se aconseja ventilar las estancias mediante apertura de ventanas de manera periódica para favorecer la renovación de aire y disminuir la concentración de contaminantes [20].

En España, la ventilación de espacios interiores no se regula mediante un único estándar específico de calidad del aire, sino que forma parte de un marco normativo más amplio en materia de prevención de riesgos laborales, instalaciones y calidad ambiental interior. A nivel general, la obligatoriedad de garantizar condiciones ambientales que no supongan un riesgo para la salud de las personas trabajadoras está establecida en el Real Decreto 486/1997, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. En su artículo 7 se dispone que “la exposición a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no deberá suponer un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores”, debiendo ajustarse las condiciones termohigrométricas y de ventilación a lo establecido en sus anexos específicos cuando existan riesgos asociados a las condiciones ambientales [21].

Aunque el Real Decreto 486/1997 no fija directamente límites cuantitativos de contaminantes tales como CO₂, sí introduce el marco general de obligación empresarial de garantizar condiciones ambientales adecuadas, lo cual se traduce en la necesidad de ventilación cuando existan acumulaciones de contaminantes en recintos cerrados. Este principio es complementado por el Real Decreto 1027/2007 [20], por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). En su articulado se establece que las instalaciones térmicas deben “permitir mantener una calidad de aire interior aceptable en los locales ocupados por personas, aportando un caudal suficiente de aire exterior y garantizando la extracción y expulsión del aire viciado”.

En la práctica técnica, se consideran niveles de CO₂ por encima de 1000 ppm como umbral indicativo de ventilación insuficiente, lo cual alienta acciones correctivas como la mejora de la renovación de aire o el incremento de caudales de ventilación. Sin embargo, esta recomendación no es una obligación normativa directa en la regulación española, sino una mejor práctica técnica basada en criterios de salud ambiental y desempeño de ocupantes recogidos en guías técnicas de calidad de aire interior [23].

Diversos estudios epidemiológicos han demostrado que un aumento moderado en la tasa de ventilación puede reducir la prevalencia de síntomas asociados al denominado “síndrome del edificio enfermo” como se puede ver en la figura 2-7, así como disminuir la probabilidad de transmisión aérea de enfermedades respiratorias. No obstante, la relación entre ventilación y salud presenta un carácter multifactorial, ya que intervienen variables como la distribución del flujo de aire, la mezcla efectiva en el recinto y la intensidad de las fuentes emisoras [24]. En la siguiente figura se muestran los principales síntomas del “síndrome del edificio enfermo”.



Figura 2-7 Efectos del síndrome del edificio enfermo [25]

En este contexto, el seguimiento de la concentración de CO_2 se emplea como aproximación indirecta al grado de ventilación, debido a que su acumulación en interiores ocupados por humanos se encuentra directamente ligado con la tasa de renovación de aire.

2.3 Problemas de salud derivados de la mala calidad del aire

La exposición a una mala calidad del aire, tanto en exteriores como en interiores, se asocia con un aumento del riesgo de efectos adversos sobre la salud. En el caso del aire exterior, la evidencia científica relaciona la exposición a contaminantes (principalmente material particulado, NO_2 y O_3) con incrementos en morbilidad y mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias, incluso a niveles bajos de exposición. En España, el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) ha difundido resultados que vinculan la contaminación atmosférica con aumentos relevantes de ingresos hospitalarios urgentes, destacando mecanismos fisiopatológicos como inflamación sistémica y estrés oxidativo [26].

En ambientes interiores no industriales (oficinas, edificios públicos, centros educativos, etc.), el Ministerio de Sanidad enmarca la Calidad de Ambientes Interiores (CAI) como un determinante de salud que depende de múltiples factores: fuentes contaminantes, sistemas de climatización/ventilación, patrones de flujo de aire, ocupantes y condiciones de confort, entre otros. Además, subraya que mantener una CAI aceptable es importante no solo para la salud y la comodidad, sino también para la productividad [13].

Desde la perspectiva de prevención laboral, el INSST describe que una mala calidad del aire interior puede manifestarse mediante síntomas agudos (irritación ocular, nasal y faríngea; tos; opresión torácica; cefalea; somnolencia; mareo; dificultad para concentrarse; y alteraciones cutáneas), pudiendo evolucionar hacia problemas más persistentes cuando la exposición se prolonga o cuando existen fuentes relevantes de contaminantes (químicos o biológicos) y ventilación insuficiente [14]. En la siguiente figura podemos ver los efectos de la concentración de CO_2 en un compartimento.

Figura 2-8 Efectos del CO₂ en interiores [27]

De forma complementaria, guías de sanidad ambiental en España (por ejemplo, la Comunidad de Madrid) advierten que la permanencia prolongada en espacios cerrados con contaminantes químicos (p. ej., CO, formaldehído), biológicos (bacterias, virus, ácaros, mohos) o partículas puede ocasionar efectos nocivos sobre la salud, especialmente en edificios con condiciones operativas inadecuadas de ventilación y recirculación de aire [28].

2.3.1 Impacto en la efectividad laboral

En el ámbito de los lugares de trabajo, la CAI tiene implicaciones organizacionales directas. El INSST señala que una mala calidad del aire interior no solo puede afectar a la persona (síntomas y malestar), sino también a la organización, asociándose con estrés, absentismo y pérdida de productividad. Asimismo, el propio INSST destaca que una buena calidad ambiental interior contribuye a mejorar el clima laboral, incrementar la productividad y disminuir el absentismo [14].

En coherencia con ello, el Ministerio de Sanidad también incluye explícitamente la productividad como uno de los motivos por los que resulta “extremadamente importante” mantener una CAI aceptable en edificios no industriales [13].

2.4 Normativa en buques

Habiendo nombrado anteriormente normativas las cuales hacen referencia a la calidad del aire en espacios interiores de edificios, ya más explícitamente podemos recurrir a otras normativas que regulan la calidad del aire en interiores de barcos.

Entre ellas, En España, se hace referencia a esto mismo con el Instrumento de Ratificación del Convenio sobre el trabajo marítimo, 2006, hecho en Ginebra el 23 de febrero de 2006. En su Título 3, regula las condiciones de alojamiento y espaciamiento. En cuanto a ventilación y aire exige que los espacios de alojamiento tengan ventilación adecuada para mantener el aire en condiciones satisfactorias y facilitar el movimiento del aire en cualquier condición meteorológica y en cuanto control de temperatura obliga a que los buques (excepto los que navegan en climas templados) tengan sistemas de calefacción y aire acondicionado [29].

2.5 Medición de CO₂

Un dispositivo de medición de dióxido de carbono (CO₂) es un instrumento diseñado para determinar la concentración de este gas en el aire, generalmente expresada en partes por millón (ppm). Su función

principal es cuantificar de manera continua o puntual la presencia de CO₂ en un determinado espacio, permitiendo evaluar las condiciones ambientales y el grado de renovación del aire.

En entornos interiores ocupados, la principal fuente de CO₂ es la respiración humana. Por este motivo, la concentración de este gas se emplea habitualmente como indicador indirecto de ventilación y ocupación, ya que su acumulación en un recinto cerrado suele estar asociada a una insuficiente renovación de aire. Cuando los niveles de CO₂ aumentan de forma sostenida, puede inferirse que la ventilación no es adecuada para la carga de ocupación existente.

2.5.1 Dispositivo de medición AirQMonitor

Para llevar a cabo la monitorización ambiental se ha utilizado un sistema de medición basado en sensores de dióxido de carbono (CO₂), temperatura y humedad que permite obtener lecturas continuas y cuantificables de estos parámetros ambientales críticos. El elemento central de este sistema es un módulo de sensor específico diseñado para aplicaciones de calidad del aire interior, que combina tecnología de detección de gases con compensación de temperatura y humedad, proporcionando datos fiables para su análisis estadístico y ambiental. En la figura 2-9 podemos observar los datos que nos proporciona y como se pueden visualizar en el momento.

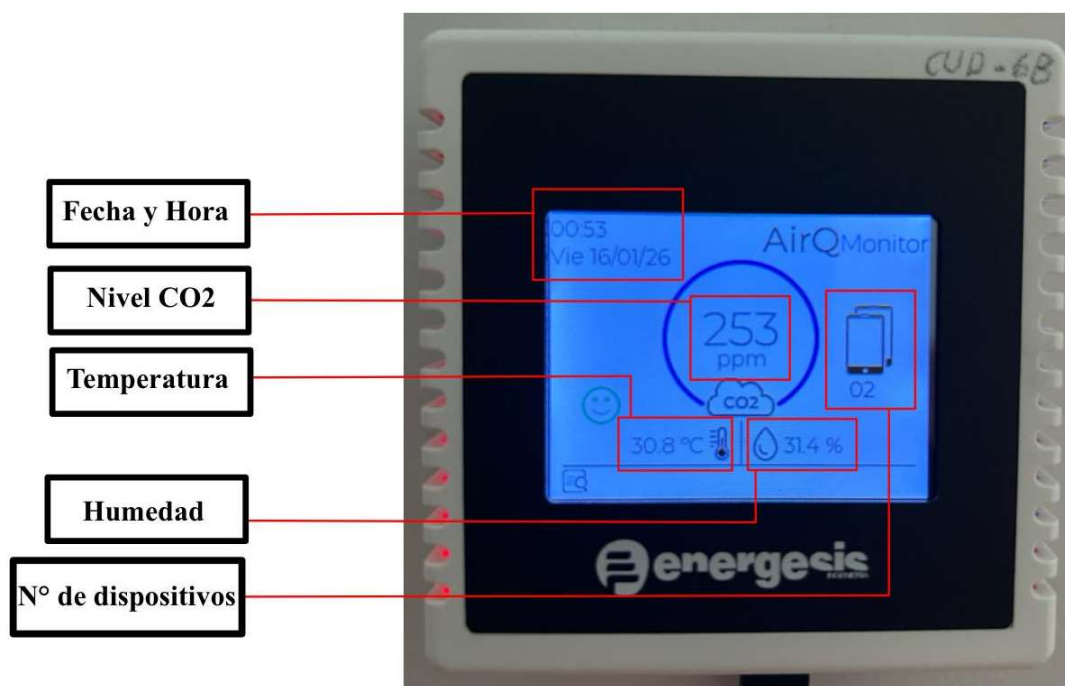


Figura 2-9 Dispositivo de medida AirQMonitor

El dispositivo utilizado para la obtención de las series temporales de datos ambientales está integrado alrededor del sensor SCD30 Air Quality Sensors Module, un módulo basado en la tecnología de medición NDIR (Non-Dispersive Infrared) para dióxido de carbono, desarrollado por la empresa Sensirion. Esta tecnología mide la concentración de CO₂ en el aire a partir de la absorción de radiación infrarroja por las moléculas de CO₂, lo que permite lecturas directas de concentración en unidades de partes por millón (ppm) sin necesidad de interpretaciones indirectas. La técnica NDIR es el estándar habitual en aplicaciones de calidad de aire debido a su estabilidad, precisión y baja interferencia de otros gases (Sensirion SCD30 Datasheet, 2020).

El módulo SCD30 integra no solo el sensor de CO₂, sino también sensores de temperatura, humedad relativa y dispositivos móviles, lo que lo convierte en un dispositivo adecuado para caracterizar de forma completa las condiciones ambientales de espacios interiores. El uso de un sensor integrado facilita la

corrección de la medida de CO₂ frente a variaciones térmicas y de humedad, mejorando la consistencia de los datos recopilados. Las especificaciones principales del sensor incluyen:

- Rango de medición de dióxido de carbono: desde aproximadamente 400 ppm hasta 10 000 ppm, cubriendo así ampliamente los rangos típicos de interiores ocupados.
- Precisión nominal: $\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ de la lectura})$ en el rango 400-10 000 ppm, lo que proporciona una fiabilidad adecuada para aplicaciones de control ambiental en espacios ocupados.
- Tiempo de respuesta: rápido ($< 30 \text{ s}$ para alcanzar el 63 % de una variación abrupta), permitiendo una resolución temporal apropiada para el análisis de series temporales.
- Tecnología integrada: compensación interna de temperatura y humedad, con interfaz digital I²C o UART para la adquisición de datos. (Sensirion SCD30 Datasheet, 2020) [30].

El módulo sensor se ha integrado en un registrador de datos específico en el proyecto de campo a bordo, que permite la adquisición y almacenamiento continuo de lecturas ambientales. Esta configuración se basa en las capacidades del sensor SCD30 para proporcionar datos de CO₂, temperatura y humedad a intervalos regulares, que luego son sincronizados con marcas de tiempo para su análisis temporal. La elección de este sensor responde a su combinación de precisión, estabilidad y compatibilidad con sistemas de registro automatizados, lo cual es crucial para generar un conjunto de datos robusto y de calidad para el análisis estadístico en el TFG.

El empleo de este tipo de sensores con tecnología NDIR ha sido ampliamente validado en trabajos científicos y técnicos sobre medición de calidad del aire interior, siendo capaces de proporcionar medidas repetibles y estables en condiciones ambientales típicas de espacios cerrados con ocupación humana.

2.6 Formulas a emplear en el análisis de datos

En el presente trabajo se emplean distintas expresiones matemáticas y estadísticas para analizar la evolución de la concentración de CO₂ en el interior del puente de gobierno, así como su relación con la ocupación del compartimento y con diferentes variables ambientales. A continuación, se recogen las principales ecuaciones utilizadas a lo largo del estudio.

2.6.1 Media aritmética

La media aritmética se utilizará para resumir conjuntos de datos y, en particular, para agrupar valores dentro de intervalos temporales o rangos de análisis. La expresión general de la media esta denotada por la siguiente formula (1):

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

donde:

- $\bar{x}$ es la media aritmética del conjunto de datos.
- x_i representa cada uno de los valores observados.
- n es el número total de observaciones.

2.6.2 Regresión lineal simple

La regresión lineal simple se emplea para modelar la relación entre una variable dependiente "y" y una única variable independiente "x". Su expresión general esta denotada por la siguiente formula (2):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2)$$

donde:

- y es la variable dependiente.
- x es la variable independiente.
- β_0 es la ordenada en el origen.
- β_1 es la pendiente de la recta.
- ε es el término de error.

2.6.3 Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple permite modelar una variable dependiente en función de varias variables explicativas. Su expresión general esta denotada por la siguiente formula (3):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

donde:

- y es la variable dependiente.
- $x_1, x_2, \dots, x_k$ son las variables independientes.
- β_0 es la ordenada en el origen.
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son los coeficientes asociados a cada variable.
- ε es el término de error del modelo.

2.6.4 Coeficiente de correlación de Pearson

Para cuantificar la relación lineal entre dos variables se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson.

La expresión esta denotada por la siguiente formula (4):

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4)$$

de forma equivalente (4):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

donde:

- r es el coeficiente de correlación de Pearson,
- x_i e y_i son los valores observados de las variables X e Y ,
- $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son las medias de ambas variables,
- σ_X y σ_Y son sus desviaciones estándar.

El coeficiente toma valores entre -1 y 1 , de modo que:

- $r \approx 1$ indica una relación lineal directa fuerte.
- $r \approx -1$ indica una relación lineal inversa fuerte.
- $r \approx 0$ indica ausencia de relación lineal aparente.

2.6.5 Volumen efectivo de un compartimento

El volumen de aire efectivo disponible en el puente se obtendrá con la siguiente formula (6), restando al volumen geométrico total el volumen ocupado por los elementos interiores:

$$V_{aire} = V_{total} - V_{ocupado} \quad (6)$$

2.6.6 Variación de concentración de CO_2

Para determinar el incremento de concentración de CO_2 utilizaremos la siguiente formula (7) en un determinado intervalo temporal se empleará la diferencia entre la concentración final y la inicial:

$$\Delta C = C_f - C_i \quad (7)$$

donde:

- C_i es la concentración inicial de CO_2 , en ppm.
- C_f es la concentración final de CO_2 , en ppm.

Esta magnitud permite cuantificar el aumento total de CO_2 durante el tramo analizado.

2.6.7 Tasa de incremento de la concentración de CO_2

La tasa de incremento de la concentración de CO_2 por dispositivo y por hora se calculó mediante la siguiente formula (8):

$$g_{ppm} = \frac{C_f - C_i}{\Delta t \cdot N} \quad (8)$$

donde:

- g_{ppm} es la tasa de incremento de concentración de CO_2 , en ppm/(dispositivo·h).
- C_i es la concentración inicial de CO_2 , en ppm.
- C_f es la concentración final de CO_2 , en ppm.
- Δt es la duración del intervalo analizado, en horas.
- N es el número medio de dispositivos detectados durante ese intervalo.

Esta expresión es la que se empleará en la estimación de generación por dispositivo.

2.6.8 Conversión de ppm a volumen de CO_2

Dado que la concentración de CO_2 en ppm representa una fracción volumétrica, el volumen de CO_2 asociado a una variación de concentración se calculó mediante la siguiente formula (9):

$$\Delta V_{CO_2} = V \cdot \frac{\Delta C}{10^6} \quad (9)$$

donde:

- ΔV_{CO_2} es el volumen de CO_2 generado.
- V es el volumen del recinto, en m^3 .
- ΔC es la variación de concentración, en ppm.

Esta expresión permite transformar una variación de concentración en una magnitud física en volumen.

2.6.9 Tasa de generación volumétrica de CO_2

La tasa de generación de CO_2 por dispositivo se obtiene a partir del volumen del recinto y de la variación de concentración mediante la siguiente formula (10):

$$G = \frac{V \cdot \Delta C \cdot 0.001}{\Delta t \cdot N} \quad (10)$$

donde:

- G es la tasa de generación de CO_2 , en $L/(h \cdot \text{dispositivo})$.
- V es el volumen de aire efectivo del puente, en m^3 .
- ΔC es la variación de concentración de CO_2 , en ppm.
- Δt es el tiempo transcurrido, en horas.
- N es el número medio de dispositivos detectados.

Esta ecuación la utilizaremos para transformar la pendiente de acumulación en una tasa de generación volumétrica.

3 DESARROLLO DEL TFG

Con respecto a el Instrumento de Ratificación del Convenio sobre el trabajo marítimo, 2006, en su título 3 el cual hacer referencia a los alojamientos y servicios de esparcimiento, declara que todo miembro deberá velar por que en los buques que enarbolen su pabellón se faciliten y mantengan alojamientos e instalaciones de esparcimiento decentes para la gente de mar que trabaja o vive a bordo, o ambas cosas, conformes con la promoción de la salud y el bienestar de la gente de mar.

Por ello, para el desarrollo de este TFG, se ha decidido estudiar la lancha patrullera M-31 Corvo Mariño, centrándose en el análisis de variables ambientales registradas a bordo del patrullero de la Guardia Civil Corvo Mariño, embarcación destinada a tareas de vigilancia marítima, control de fronteras, protección del medio marino y apoyo a operaciones de seguridad en aguas jurisdiccionales españolas.

3.1 Descripción del buque y zona de estudio

Esta lancha tiene como puerto base la Escuela Naval Militar, como se puede ver en la siguiente figura y está destinada a tareas de vigilancia marítima, control de fronteras, protección del medio marino y apoyo a operaciones de seguridad en aguas jurisdiccionales españolas, realizando sus funciones a lo largo de las Rías Baixas. Fue construida y botada en el año 2006 cumpliendo este año sus veinte aniversarios desde su botadura. Esta tiene una manga de 4,9 metros y una eslora de 18 metros. Tiene dos motores de 1000 CV alcanzando velocidades de hasta 30 nudos, lo que la hace ideal para sus funciones. Está tripulada por una dotación de siete personas pudiendo hacer navegaciones de más de 24 horas.



Figura 3-1 Foto  rea ENM donde se muestra la patrullera Corvo Mariño rodeada en rojo [31]

La embarcación se encuentra estructurada en dos cubiertas principales, distribuidas funcionalmente para albergar las áreas de navegación, habitabilidad y maquinaria. En la siguiente figura podemos ver los planos de la embarcación:

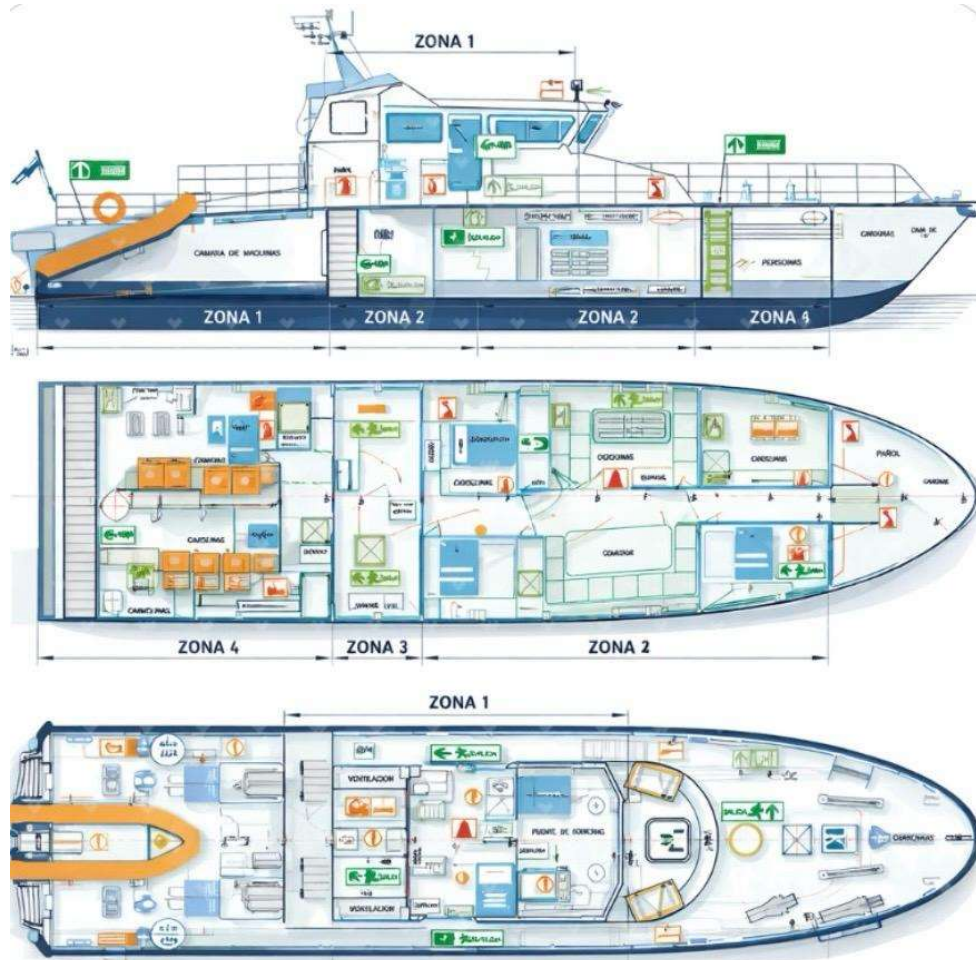


Figura 3-2 Plano lancha corvo Mariño

En la cubierta principal se encuentra el puente de gobierno, situado aproximadamente en la zona central de la embarcación. Este espacio se encuentra cubierto y dispone de dos accesos laterales, ubicados respectivamente en babor y estribor. En la parte posterior del puente se localiza la toldilla, correspondiente a la zona de popa de la cubierta principal, que se encuentra al descubierto. En esta zona se disponen dos compuertas: una de ellas, tipo trampilla, que permite el acceso directo a la cámara de máquinas, y otra que da acceso a un pequeño pañol situado inmediatamente a popa del puente. A continuación, se muestra en la figura 3-3 la disposición del puente.



Figura 3-3 Puente de la patrullera Corvo Mariño

En la zona de proa de la cubierta principal se encuentra el castillo, donde se ubica una trampilla que alberga el sistema de fondeo, incluyendo la cadena del ancla. Asimismo, en esta zona se localizan las embarcaciones salvavidas y un pequeño pañol destinado al almacenamiento de cabuyería.

Desde el interior del puente de gobierno se accede, mediante una escalera, a la cubierta inferior, donde se sitúan los espacios destinados a la habitabilidad y servicios de la embarcación. Al descender se encuentra una camareta de habitabilidad equipada con tres literas. Más hacia proa se accede directamente a la cocina, que además dispone de una mesa que cumple la función de comedor para la dotación.

En la zona de popa de la cubierta inferior, justo después de descender la escalera, se encuentra una compuerta que permite el acceso a los tanques de combustible de la embarcación. A continuación, se dispone otra compuerta que conduce a la sala de máquinas, donde se alojan los dos motores principales de la lancha. Esta es, además, la única zona de la embarcación que dispone de ventilación mecánica.

En dirección a proa desde la cocina se encuentra otra camareta de habitabilidad, equipada con cuatro literas, y un sanitario situado inmediatamente antes del acceso a dicha camareta como se puede ver en la figura 3-4.



Figura 3-4 Cubierta inferior Corvo Mariño

Esta disposición espacial determina la distribución de los espacios interiores donde se desarrollan las actividades habituales de la dotación y, por tanto, constituye un elemento relevante para el análisis de las condiciones ambientales y de ventilación a bordo.

Durante el desarrollo de sus misiones, el personal embarcado permanece en estos espacios interiores durante periodos prolongados de tiempo, lo que convierte a estos entornos en espacios potencialmente sensibles desde el punto de vista de la calidad del aire interior. A diferencia de edificios en tierra firme, las embarcaciones presentan particularidades operativas que pueden influir en las condiciones ambientales interiores, tales como la limitada disponibilidad de volumen interior, la variabilidad de las condiciones meteorológicas exteriores y la dependencia de sistemas de ventilación específicos.

En este contexto, el análisis de parámetros ambientales como la concentración de dióxido de carbono (CO_2), la temperatura y la humedad relativa permite evaluar las condiciones de habitabilidad y ventilación en los espacios interiores del buque. La monitorización de estas variables proporciona información relevante para comprender la evolución temporal de la calidad del aire y su posible relación con factores como la ocupación o las condiciones de operación de la embarcación.

3.2 Sistema de monitorización ambiental

Para la obtención de los datos ambientales analizados en el presente trabajo se empleó un sistema de monitorización basado en sensores destinados a la medición de parámetros relacionados con la calidad del aire interior. El dispositivo instalado a bordo permite registrar de forma continua distintas variables ambientales relevantes para evaluar las condiciones de habitabilidad y ventilación en los espacios interiores de la embarcación.

El sistema de monitorización incorpora sensores capaces de medir la concentración de dióxido de carbono (CO_2), la temperatura del aire, la humedad relativa y el número de dispositivos electrónicos detectados en el entorno, este último parámetro utilizado como estimación indirecta de la ocupación del espacio por parte de la tripulación. La medición de estas variables permite caracterizar el comportamiento del ambiente interior y analizar su evolución temporal en relación con la presencia de personas y las condiciones de ventilación.

La medición de la concentración de CO_2 se realiza mediante sensores basados en tecnología NDIR (Non-Dispersive Infrared), ampliamente utilizada en aplicaciones de monitorización de calidad del aire interior debido a su elevada precisión y estabilidad. Este tipo de sensores determina la concentración del gas a partir de la absorción de radiación infrarroja en longitudes de onda específicas características del dióxido de carbono.

El sistema se configuró para registrar los datos ambientales de forma automática a intervalos de tiempo variables comprendidos entre uno y tres minutos, lo que permite obtener una resolución temporal suficientemente alta para analizar la evolución de las variables a lo largo del tiempo y detectar cambios asociados a variaciones en la ocupación o en las condiciones de ventilación del espacio.

Los datos registrados por el dispositivo se almacenan en formato digital junto con la correspondiente marca temporal (timestamp), lo que permite posteriormente realizar un tratamiento estadístico y un análisis temporal de las variables medidas. Esta metodología de monitorización continua resulta especialmente adecuada para el estudio de la dinámica de la calidad del aire en espacios interiores ocupados.

3.2.1 Ubicación del dispositivo de monitorización y contexto

El dispositivo de monitorización ambiental se instaló en el interior del puente de gobierno, en la zona de popa y situado en una posición elevada respecto al nivel del suelo. La elección de esta ubicación responde a la necesidad de registrar las condiciones ambientales en uno de los espacios de mayor actividad operativa de la embarcación, donde la tripulación permanece durante periodos prolongados durante las labores de navegación y patrullaje. A continuación, se muestra en la figura 3-5 donde se encontraba dicho dispositivo.



Figura 3-5 Ubicación AirQMonitor

El puente de gobierno se encuentra directamente conectado con la cocina y el comedor, situados en la cubierta inferior, mediante una escalera interior que comunica ambos espacios. Cabe destacar que no existe una puerta que separe el puente del área de cocina/comedor, lo que facilita el intercambio de aire entre ambas zonas. Como consecuencia, durante las actividades de cocina pueden generarse concentraciones adicionales de dióxido de carbono que tienden a ascender hacia el puente, donde se encuentra instalado el sensor.

El puente dispone de tres ventanas practicables, dos situadas en la parte de proa -una a babor y otra a estribor- y una adicional situada en la zona de popa. Estas ventanas permiten la ventilación natural del espacio, aunque su apertura o cierre depende de la decisión de la tripulación en función de las condiciones meteorológicas o del confort térmico. En determinadas situaciones, especialmente durante la navegación nocturna o en condiciones de bajas temperaturas, las ventanas permanecen cerradas, lo que puede favorecer la acumulación de dióxido de carbono en el interior del puente debido a una menor renovación del aire.

Durante las labores habituales de patrullaje, las puertas exteriores de la embarcación permanecen normalmente cerradas, abriéndose únicamente durante determinadas operaciones, como inspecciones a pesqueros u otras embarcaciones. Este comportamiento operativo condiciona el grado de ventilación natural del puente y, por tanto, influye en la evolución de las variables ambientales registradas.

La embarcación cuenta con una dotación habitual de cinco tripulantes, cuya presencia constituye la principal fuente de generación de dióxido de carbono en los espacios interiores del buque. Este factor resulta especialmente relevante para el análisis de la relación entre ocupación, ventilación y concentración de CO₂ a bordo.

3.3 Adquisición de datos

El conjunto de datos utilizado en el presente trabajo procede del sistema de monitorización ambiental instalado a bordo del patrullero Corvo Mariño, descrito en el apartado anterior. Este sistema registra de

forma automática diversas variables ambientales relacionadas con la calidad del aire interior en los espacios habitables de la embarcación.

El periodo de adquisición de datos analizado comprende desde el 1 de julio de 2024 hasta el 1 de mayo de 2025, lo que permite disponer de una serie temporal extensa que incluye diferentes condiciones operativas, meteorológicas y de ocupación a bordo.

El dispositivo de monitorización registra de manera continua las siguientes variables ambientales:

- Concentración de dióxido de carbono (CO₂), expresada en partes por millón (ppm).
- Temperatura del aire, expresada en grados Celsius (°C).
- Humedad relativa, expresada en porcentaje (%).
- Número de dispositivos detectados, utilizado como indicador aproximado de la ocupación del espacio por parte de la tripulación.

Las mediciones se registran con una frecuencia temporal variable, con intervalos entre mediciones comprendidos aproximadamente entre uno y tres minutos. Esta resolución temporal permite capturar con suficiente detalle la evolución de las condiciones ambientales a lo largo del tiempo, incluyendo variaciones rápidas asociadas a cambios en la ocupación del espacio, a la apertura o cierre de ventanas o puertas, o a las actividades desarrolladas a bordo.

Cada registro incluye una marca temporal (timestamp) que permite ordenar cronológicamente las mediciones y realizar posteriormente análisis de tipo temporal y estadístico.

Con el objetivo de complementar el análisis de las condiciones ambientales interiores, se incorporaron también datos meteorológicos externos, concretamente la velocidad del viento y dirección del viento. Estos datos presentan una frecuencia horaria y fueron obtenidos a través del servicio meteorológico MeteoGalicia, organismo público responsable de la monitorización meteorológica en la comunidad autónoma de Galicia.

La integración de los datos ambientales interiores con la información meteorológica exterior permite explorar posibles relaciones entre las condiciones atmosféricas externas y la evolución de las variables registradas en el interior de la embarcación.

El conjunto de datos resultante constituye la base sobre la que se desarrollan los análisis estadísticos y las representaciones gráficas presentadas en los capítulos posteriores de este trabajo.

Debe tenerse en cuenta que el análisis se basa en datos obtenidos en condiciones reales de operación, por lo que variables como la apertura de puertas y ventanas o los cambios en la ocupación del puente no pueden controlarse completamente. Estas circunstancias introducen cierta incertidumbre en la estimación de las tasas de generación de CO₂, aunque al mismo tiempo permiten analizar el comportamiento del sistema en condiciones representativas de su funcionamiento habitual.

3.4 Tratamiento y limpieza de datos

Una vez obtenidos los registros procedentes del sistema de monitorización ambiental, se procedió al tratamiento y preparación del conjunto de datos con el objetivo de facilitar su análisis posterior y garantizar la consistencia de la información utilizada en el estudio.

En primer lugar, los datos fueron descargados mediante una plataforma web que permitía obtener los registros correspondientes a todo el periodo de medición en un único archivo. Posteriormente, con el fin de mejorar la organización y el manejo del conjunto de datos, estos se dividieron por meses, generando así diferentes conjuntos de datos mensuales. Esta separación permitió trabajar con archivos más manejables y facilitar la identificación de posibles irregularidades en las mediciones.

Una vez estructurados los datos a escala mensual, se llevó a cabo un análisis estadístico preliminar con el objetivo de cuantificar el número de registros disponibles en cada mes. Este análisis puso de

manifiesto la existencia de variaciones significativas en la cantidad de datos, atribuibles no solo a las diferencias en el número de días de cada mes, sino también a interrupciones en la adquisición de información debidas a fallos en el sensor o en el sistema de registro. Como consecuencia, se identificaron periodos sin datos que, en algunos casos, abarcan varios días e incluso semanas completas. Tras este análisis, se decidió excluir el mes de abril del estudio, debido a la escasez de datos representativos y a la posterior confirmación por parte de la tripulación de la embarcación de que, durante los días en los que se registraron mediciones, no se encontraba en navegación. A continuación, se presenta la gráfica correspondiente al número de registros por mes, donde se aprecian variaciones notables, especialmente en los meses de marzo y abril.

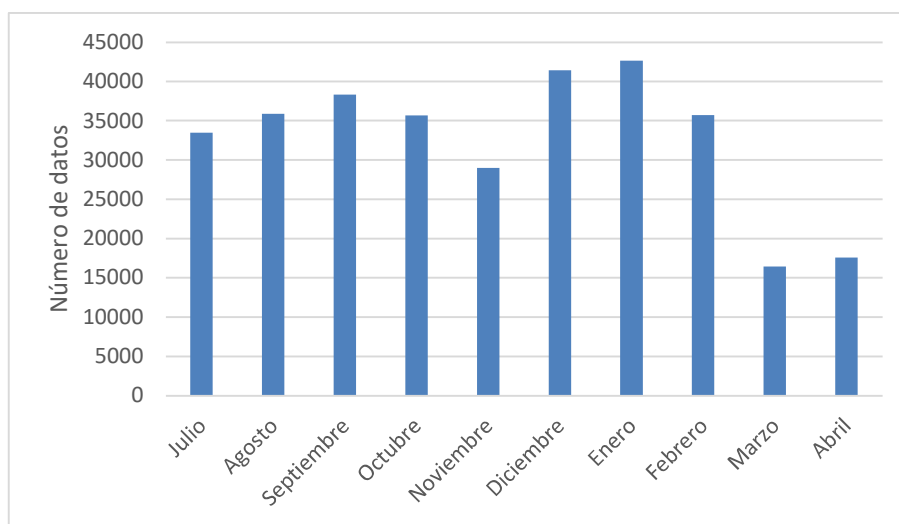


Figura 3-6 Número de datos mensuales

Ante esta situación, se estableció un criterio metodológico para la selección de los periodos de análisis. Para cada mes se identificaron aquellas semanas que presentaban simultáneamente un mayor número de registros disponibles y una mayor variación en el número de dispositivos detectados. Este último parámetro se utilizó como indicador indirecto de la actividad de la embarcación, ya que una mayor variación en el número de dispositivos suele asociarse con periodos en los que el buque se encontraba navegando y la tripulación desarrollaba sus funciones habituales. A continuación, se muestra un ejemplo de la variación de dispositivos en el mes de octubre.

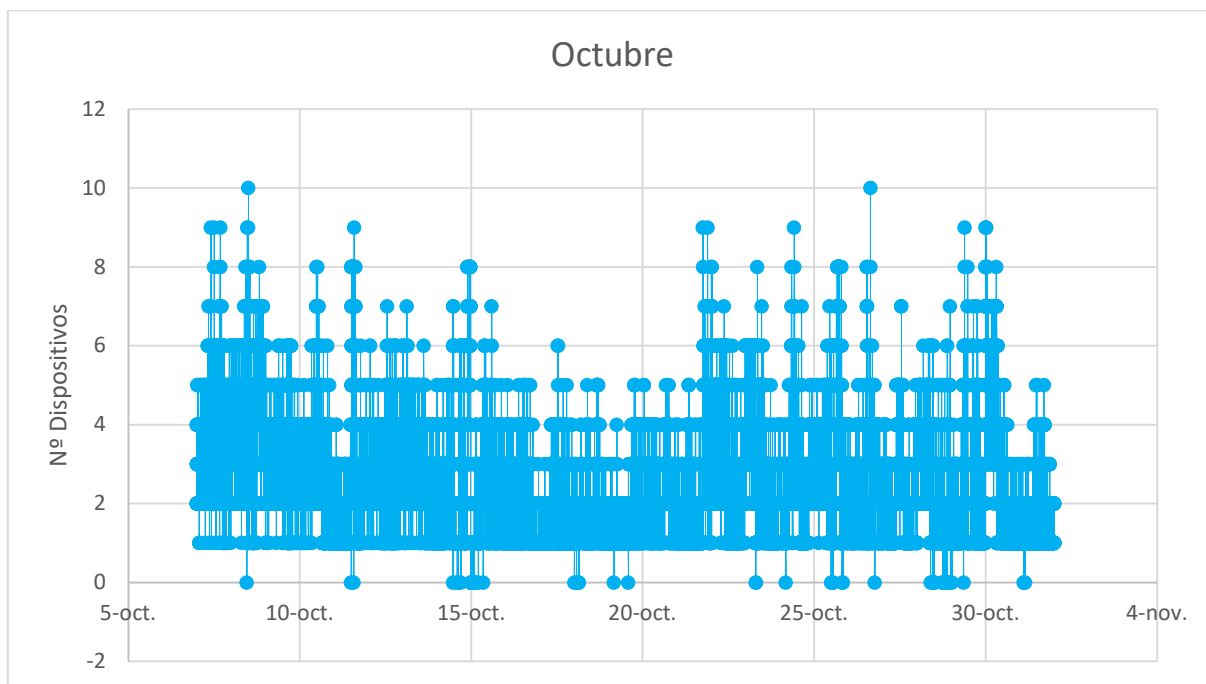


Figura 3-7 Variación de numero de dispositivos en el mes de octubre

Una vez seleccionadas las semanas más características de cada mes, se realizó un análisis más detallado dentro de cada una de ellas, identificando los días que presentaban mayores variaciones en la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Estos días se consideraron especialmente relevantes para el estudio, ya que reflejan con mayor claridad la influencia de factores como la ocupación, las actividades desarrolladas a bordo o las condiciones de ventilación. A continuación, se muestra un ejemplo de la variación de CO_2 en el mes de octubre, viendo la importancia de escoger así los espacios con más variación de CO_2 .

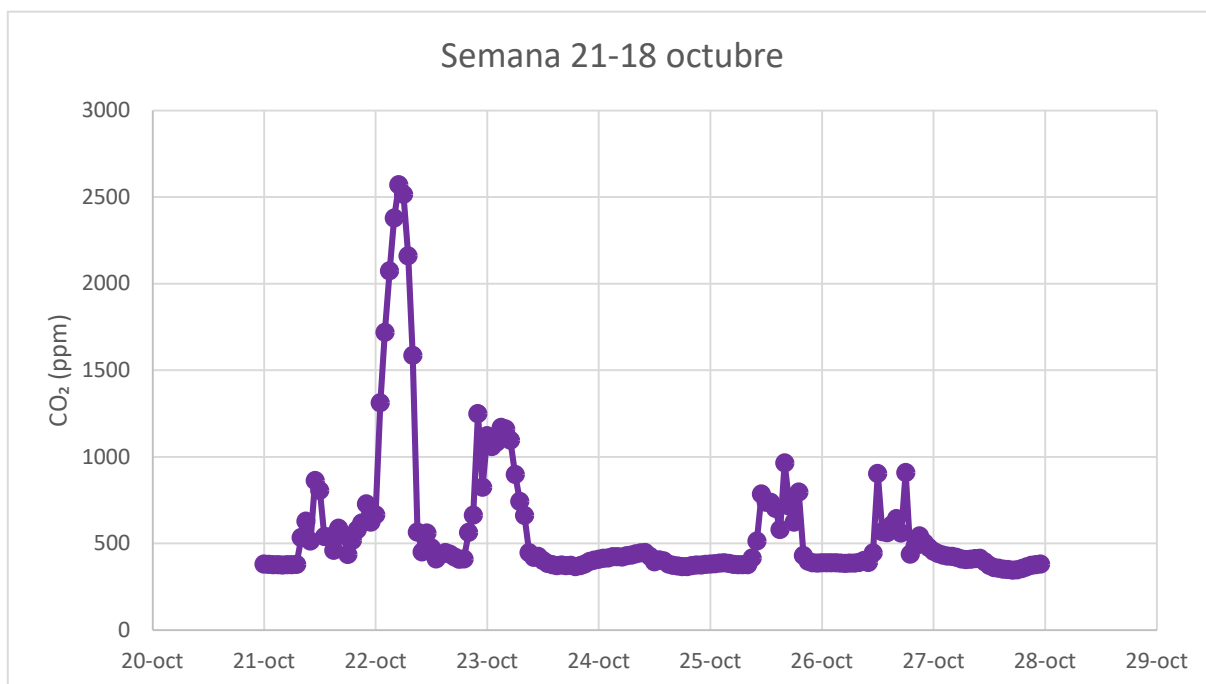


Figura 3-8 Variación ppm de CO_2 semana del 21 al 28 de octubre

Con el fin de validar las actividades de los periodos seleccionados, se consultó a personal de la Guardia Civil para confirmar si durante las semanas y días identificados el buque había estado efectivamente realizando labores de navegación o patrullaje. Debido a la naturaleza confidencial de las operaciones de la embarcación, no fue posible disponer de un registro detallado de todas las salidas al mar; sin embargo, se pudo verificar que los periodos seleccionados correspondían con intervalos en los que la embarcación se encontraba operativa.

Una vez realizado este proceso de selección y validación, se procedió al análisis detallado de los datos correspondientes a los periodos identificados, constituyendo estos la base principal del estudio presentado en los capítulos posteriores.

3.5 Metodología de análisis de los datos

Una vez realizado el proceso de adquisición y preparación de los datos, descrito en los apartados anteriores, se procedió al análisis de la información con el objetivo de identificar relaciones entre las variables ambientales registradas y comprender el comportamiento de la concentración de dióxido de carbono en el interior de la embarcación.

3.5.1 *Análisis inicial mediante regresión lineal múltiple*

En una primera fase del análisis se intentó modelar el comportamiento de la concentración de dióxido de carbono mediante una regresión lineal múltiple, considerando como variables independientes las registradas por el sensor ambiental y los datos meteorológicos disponibles. En concreto, se incluyeron en el modelo las siguientes variables:

- Temperatura interior
- Humedad relativa
- Número de dispositivos detectados
- Velocidad y dirección del viento

El objetivo de este análisis era evaluar si existía una relación estadística directa entre estas variables y la concentración de CO₂. Esta regresión nos dio los resultados de la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,164
R ² ajustado	0,027

Tabla 1 Resultados regresión lineal múltiple

Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron un coeficiente de determinación (R²) muy bajo, lo que indicaba que el modelo tenía un escaso poder explicativo y predictivo. Este resultado sugería que la concentración de CO₂ en el interior de la embarcación no podía explicarse adecuadamente mediante una relación lineal simple con el conjunto de variables consideradas.

Ante esta situación, se decidió replantear la estrategia de análisis y adoptar un enfoque más exploratorio basado en la representación gráfica de los datos.

3.5.2 *Análisis exploratorio mediante representación gráfica*

Con el fin de comprender mejor el comportamiento de las variables registradas, se realizó un análisis visual de los datos mediante la elaboración de diferentes representaciones gráficas.

En primer lugar, se elaboró una gráfica que mostraba la variación del número de dispositivos detectados a lo largo de cada mes. Esta representación permitió identificar aquellas semanas en las que la embarcación había estado previsiblemente realizando labores de navegación, ya que en estos periodos

se observaban variaciones más significativas en el número de dispositivos. Por ejemplo, en la siguiente figura 3-9 se muestra la gráfica de variación de dispositivos en el mes de julio, también pudiendo ver un fallo en el sensor durante unos días por razones desconocidas.

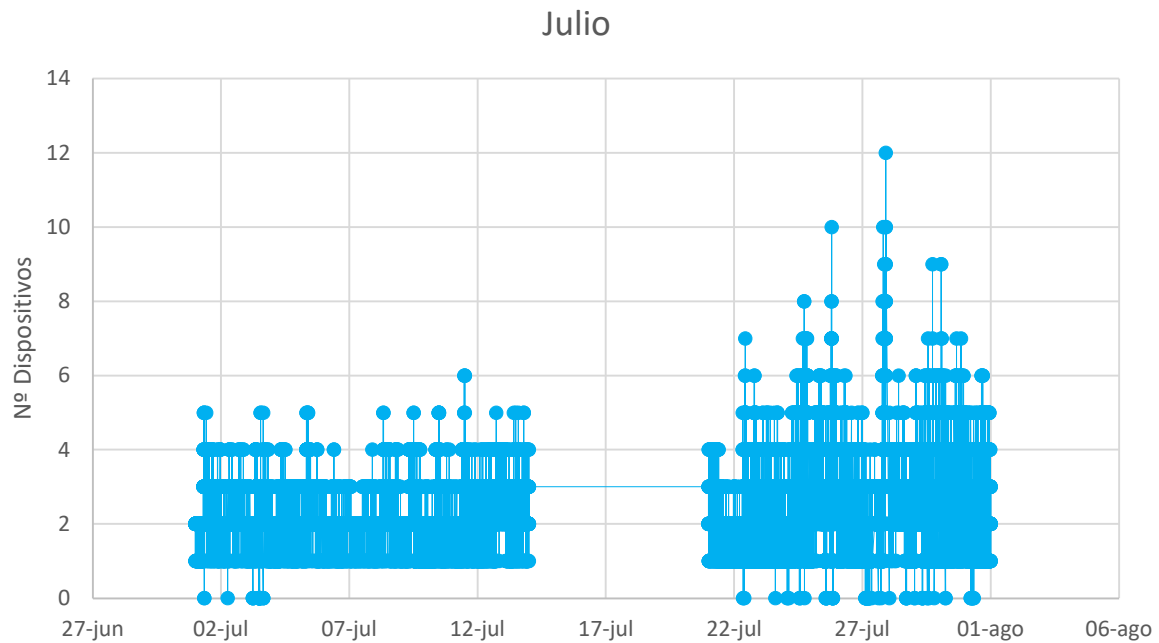


Figura 3-9 Gráfica variable de dispositivos en el mes de julio

Una vez identificadas las semanas más características de cada mes, se realizó un análisis general de estas mediante la elaboración de tres tipos de gráficas:

- Variación de temperatura frente a CO₂

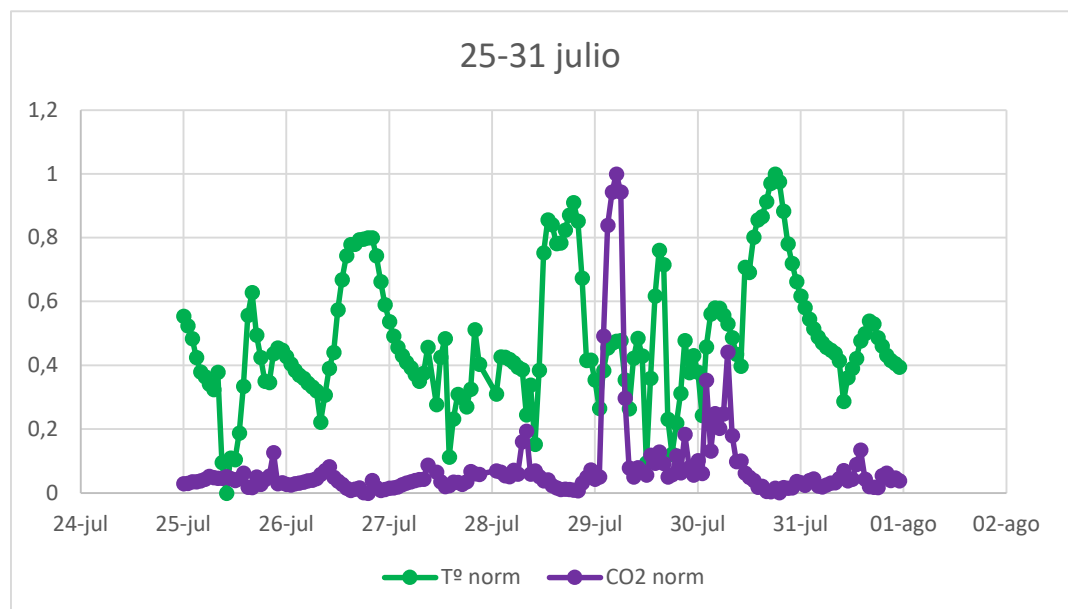


Figura 3-10 Gráfica CO₂ y temperatura mes de julio normalizada

- Variación de número de dispositivos frente a CO₂

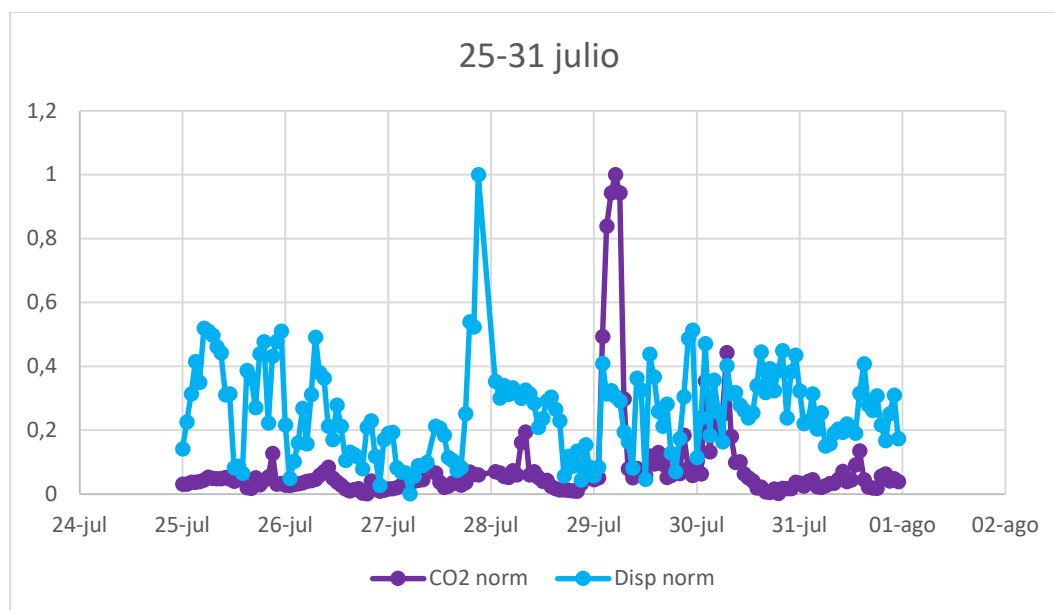


Figura 3-11 Gráfica CO₂ y Dispositivos mes de julio normalizada

- Variación de humedad relativa frente a CO₂

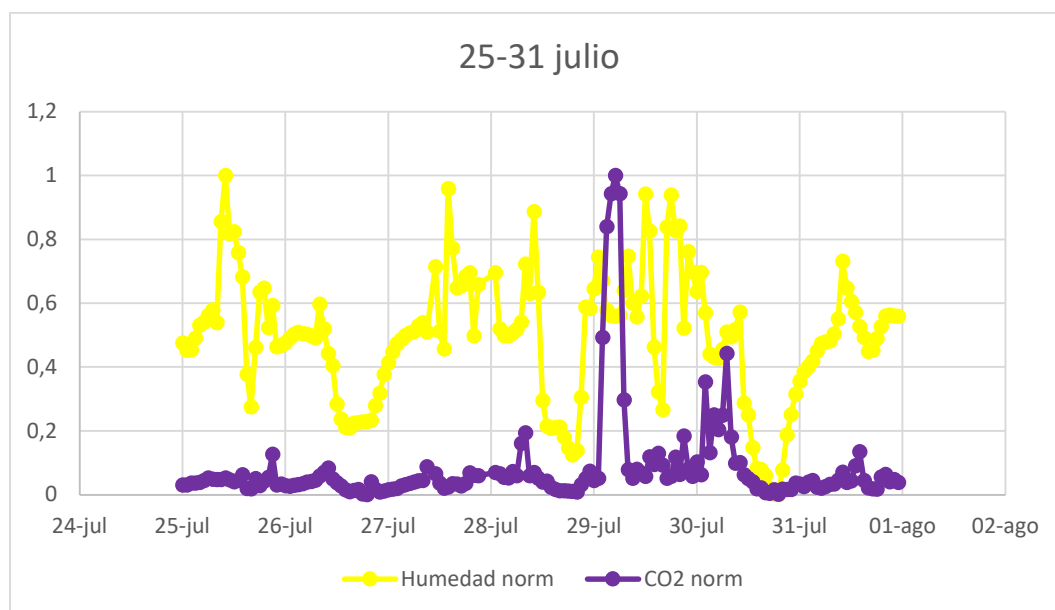


Figura 3-12 Gráfica CO₂ y Humedad mes de julio normalizado

A partir de estas representaciones se identificaron los picos más significativos en el número de dispositivos, interpretados como periodos de mayor actividad de la tripulación a bordo. Estos intervalos se consideraron especialmente relevantes para el estudio de la evolución de la concentración de CO₂.

3.5.3 Análisis detallado de periodos representativos

Tras identificar las semanas con mayor actividad operativa, se procedió a realizar un análisis más detallado a nivel diario. Para ello, se aislaron los datos correspondientes a los días con mayores variaciones en la concentración de CO₂, repitiendo el mismo tipo de análisis gráfico utilizado previamente.

Este enfoque permitió observar con mayor claridad los picos de concentración de CO₂, así como su relación con el número de dispositivos detectados. En esta fase se confirmó que, en muchos casos, existía

una relación directa entre el número de dispositivos y la concentración de CO₂, lo cual resulta coherente al considerar que la respiración humana constituye una de las principales fuentes de generación de dióxido de carbono en espacios interiores.

No obstante, también se identificaron situaciones en las que la concentración de CO₂ aumentaba de forma significativa sin que existiera un incremento notable en el número de dispositivos como se muestra en la siguiente gráfica.

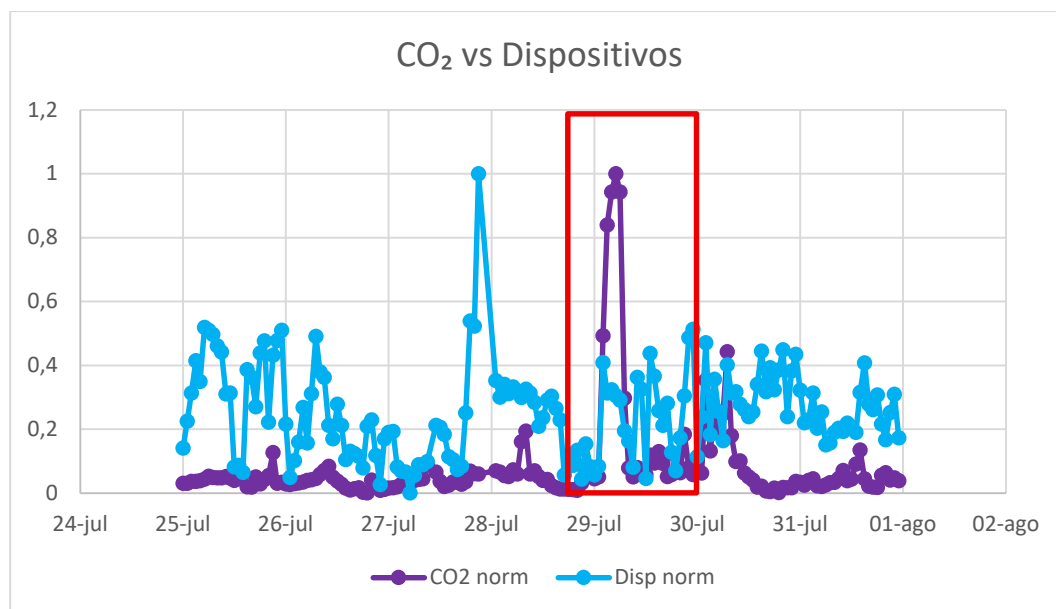


Figura 3-13 Gráfica CO₂ y dispositivos en Julio sin relación subida CO₂ y Dispositivos

Este comportamiento puso de manifiesto el carácter acumulativo del CO₂ en espacios con ventilación limitada, donde el gas puede concentrarse progresivamente incluso en presencia de un número reducido de personas.

3.5.4 Análisis del comportamiento del CO₂ en función de las condiciones operativas

Durante el análisis de los datos diarios se observó que muchos de los picos de concentración de CO₂ se producían durante periodos nocturnos, coincidiendo con descensos en la temperatura exterior. Esto se puede ver en la figura 3-9, donde el pico de CO₂ se produce en un periodo nocturno.

A raíz de esta observación, se consultó a la tripulación de la embarcación acerca de sus hábitos operativos relacionados con la ventilación del puente de gobierno. Los tripulantes confirmaron que, durante las horas nocturnas, especialmente cuando las temperaturas exteriores son bajas, las ventanas del puente suelen permanecer cerradas por motivos de confort térmico.

Esta práctica reduce significativamente la ventilación natural del espacio, favoreciendo la acumulación de dióxido de carbono en el interior del puente, lo que proporciona una explicación operativa coherente con los patrones observados en los datos.

3.5.5 Análisis de correlación entre variables

Con el fin de cuantificar la relación entre las variables analizadas, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson entre la concentración de CO₂ y el número de dispositivos detectados.

En numerosos casos se obtuvieron coeficientes de correlación cercanos a 1, lo que indica una fuerte correlación positiva entre ambas variables. Este resultado confirma que el aumento en el número de personas presentes en el puente se traduce generalmente en un incremento de la concentración de dióxido de carbono.

Sin embargo, también se identificaron situaciones en las que la correlación entre ambas variables era significativamente menor, evidenciando que la acumulación de CO₂ no depende exclusivamente del número de ocupantes, sino también de otros factores como la ventilación o las condiciones ambientales exteriores.

3.5.6 Influencia de la temperatura exterior en la concentración de CO₂

Durante el análisis preliminar de los datos registrados por el sistema de monitorización se observó un comportamiento particular en la variable correspondiente a la temperatura medida por el sensor, que representa la temperatura del aire en el interior del puente de gobierno.

En condiciones habituales, y considerando únicamente factores meteorológicos, sería esperable que los valores mínimos de temperatura se produjeran durante la madrugada, coincidiendo con el periodo nocturno en el que la temperatura exterior alcanza generalmente sus valores más bajos. Sin embargo, el análisis de las series temporales mostró que los mínimos de temperatura registrados por el sensor no siempre coincidían con estos intervalos temporales, presentando en muchos casos variaciones que no seguían el patrón típico de la evolución diaria de la temperatura atmosférica.

Este comportamiento puede explicarse por la ubicación del sensor en el interior del compartimento, concretamente en el puente de gobierno de la embarcación. Al tratarse de un espacio cerrado, la temperatura registrada no depende únicamente de las condiciones meteorológicas exteriores, sino también de otros factores internos como la presencia de la tripulación, el funcionamiento de equipos electrónicos, las actividades desarrolladas a bordo o la apertura y cierre de ventanas y puertas. Estos elementos generan un aislamiento en el interior del compartimento, lo que provoca que la temperatura interior no siga necesariamente la misma evolución que la temperatura exterior como podemos ver en la siguiente gráfica, donde la temperatura interior durante la madrugada es casi diez grados más calurosa que en el exterior.

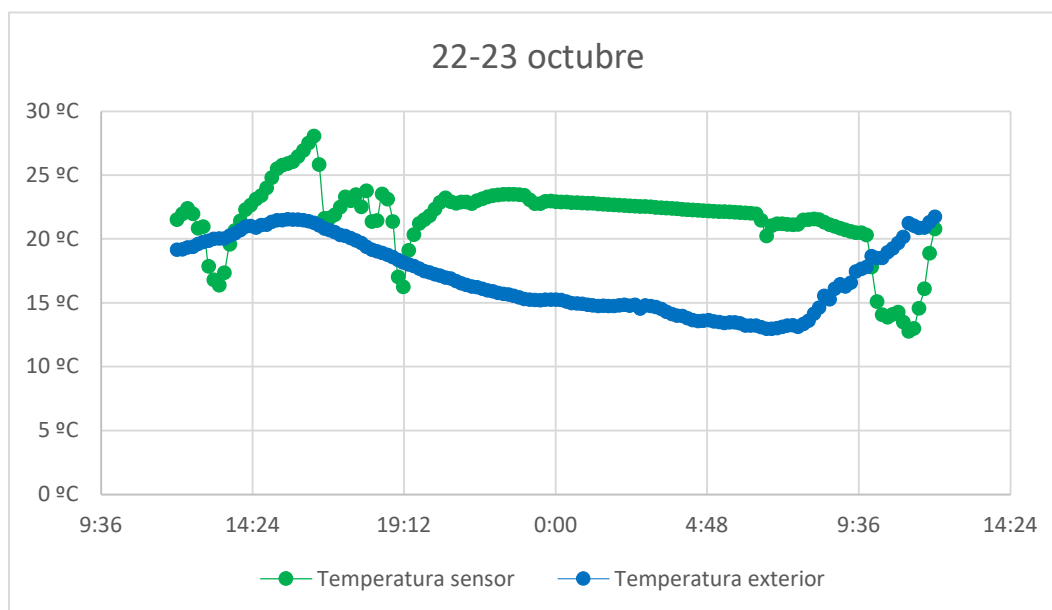


Figura 3-14 Gráfica Temperatura sensor y temperatura exterior

Debido a esta circunstancia, se consideró que la temperatura medida por el sensor no resultaba completamente representativa para analizar ciertos fenómenos relacionados con la ventilación del espacio, especialmente aquellos vinculados al comportamiento de la tripulación en relación con la apertura o cierre de las ventanas del puente.

A partir de las observaciones anteriores, se planteó la hipótesis de que la temperatura exterior podría influir indirectamente en la concentración de CO_2 , al condicionar el comportamiento de la tripulación en relación con la ventilación del puente.

Para evaluar esta hipótesis se incorporaron al análisis datos meteorológicos adicionales obtenidos a través del servicio MeteoGalicia [33], concretamente registros de temperatura exterior con una frecuencia temporal de diez minutos.

Se seleccionaron intervalos temporales representativos de actividad a bordo y se elaboraron gráficas comparativas entre temperatura exterior y concentración de CO_2 . El análisis visual de estas representaciones reveló una relación clara entre ambas variables, observándose que cuando la temperatura exterior aumenta, la concentración de CO_2 tiende a disminuir, mientras que descensos en la temperatura exterior suelen coincidir con incrementos en la concentración de CO_2 , como se muestra en la siguiente figura:

En esta grafica el valor máximo del CO_2 y de la temperatura exterior es de 1300 ppm y 22°C .

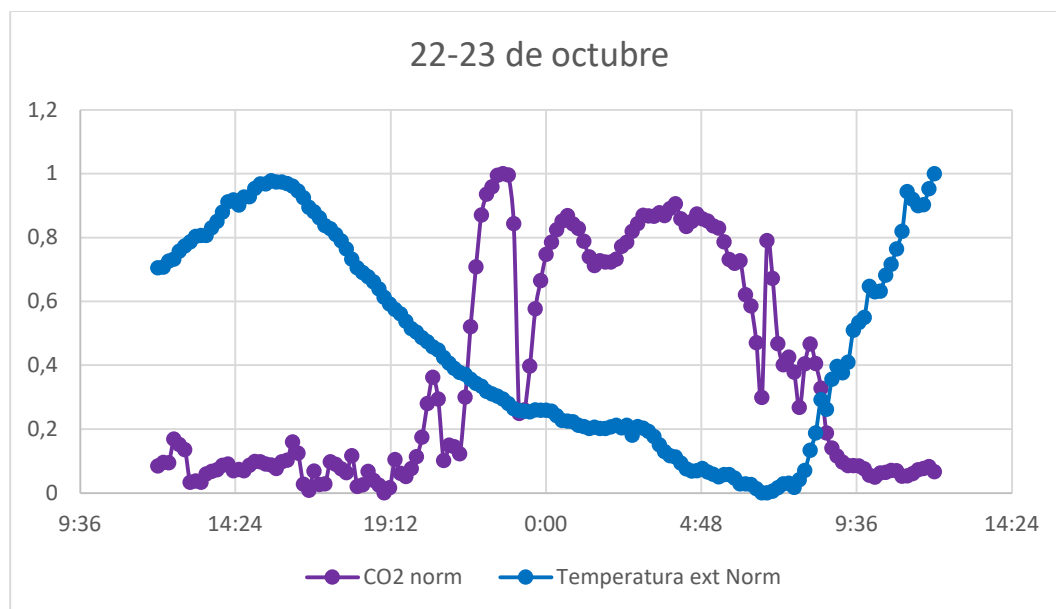


Figura 3-15 Figura 3-16 Gráfica normalizada CO_2 y temperatura exterior en octubre

Posteriormente, se añadió a esta gráfica la temperatura interior, donde pudimos observar que por la noche cuando la temperatura interior se mantiene estable, la cantidad de CO_2 asciende, mostrando esa acumulación de CO_2 como se ve en la siguiente gráfica:

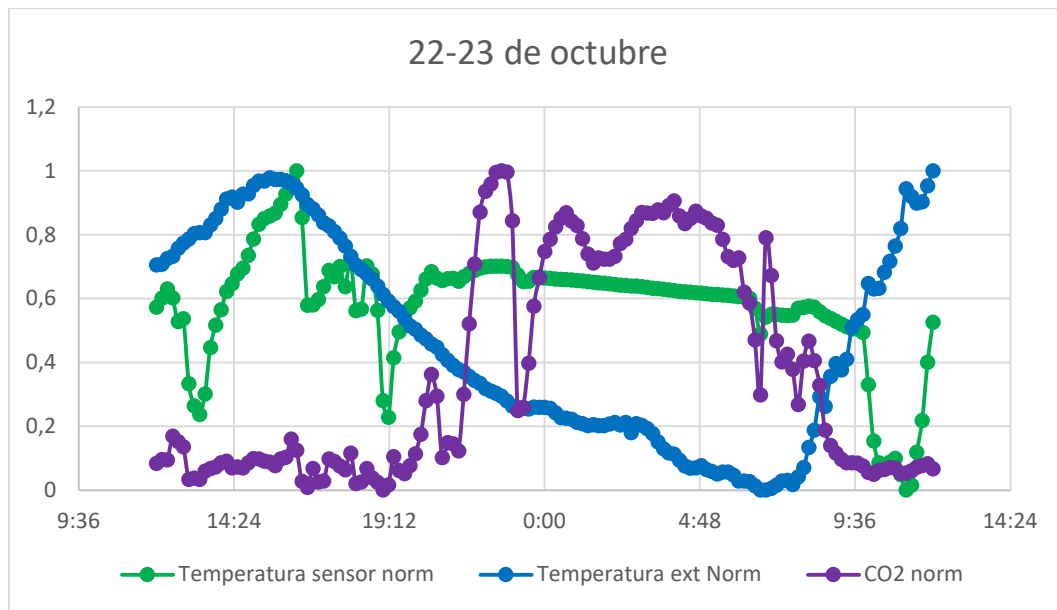


Figura 3-17 Gráfica normalizada temperatura sensor, temperatura exterior y CO₂ en octubre

3.5.7 Modelización mediante regresión lineal

Finalmente, se aplicó nuevamente un modelo de regresión lineal, esta vez considerando la temperatura exterior como variable independiente frente a la concentración de CO₂.

Los resultados obtenidos mostraron un coeficiente de determinación (R^2) cercano a 1 en algunos intervalos analizados, lo que indica una fuerte capacidad explicativa del modelo en estos casos. De forma complementaria, se calculó nuevamente el coeficiente de correlación de Pearson, obteniéndose valores negativos cercanos a -1, lo que confirma la existencia de una correlación inversa significativa entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂.

Estos resultados sugieren que la temperatura exterior puede actuar como un factor indirecto que influye en la acumulación de CO₂ en el interior del puente, al modificar las condiciones de ventilación del espacio.

3.6 Cálculo acumulación del CO₂

Con el fin de disponer de una estimación del volumen de aire contenido en el puente de gobierno, necesaria para interpretar la acumulación de CO₂ en su interior, se llevó a cabo una aproximación geométrica a partir de mediciones tomadas *in situ*, apoyadas en los planos generales de la embarcación y en fotografías del interior del recinto.

3.6.1 Estimación del volumen interior del puente

A partir de las medidas obtenidas directamente sobre la embarcación, el puente de gobierno se aproximó inicialmente mediante un volumen prismático definido por sus dimensiones máximas interiores. Las dimensiones consideradas fueron las siguientes:

- longitud interior aproximada: $L = 3,2$ m.
- anchura máxima interior aproximada: $B = 3,0$ m.
- altura interior máxima aproximada: $H = 2,0$ m.

Si se considerase el puente como un prisma rectangular perfecto, el volumen envolvente máximo vendría dado por:

$$V = L \cdot B \cdot H \quad (11)$$

Por lo tanto, con las medidas tomadas:

$$V_0 = 3,2 \cdot 3,0 \cdot 2,0 = 19,2 \text{ m}^3$$

Este valor representa un volumen teórico máximo, pero no se corresponde exactamente con la geometría real del puente, ya que el recinto presenta irregularidades tanto en planta como en alzado. En concreto, se observan chaflanes laterales en la planta del puente y una reducción de volumen en la parte de proa debida a la inclinación del parabrisas.

La planta del puente no es estrictamente rectangular, sino que presenta varios chaflanes en sus extremos. A partir del croquis realizado y del análisis del plano, que se observan en las siguientes figuras, dichos recortes se aproximaron como triángulos rectángulos.

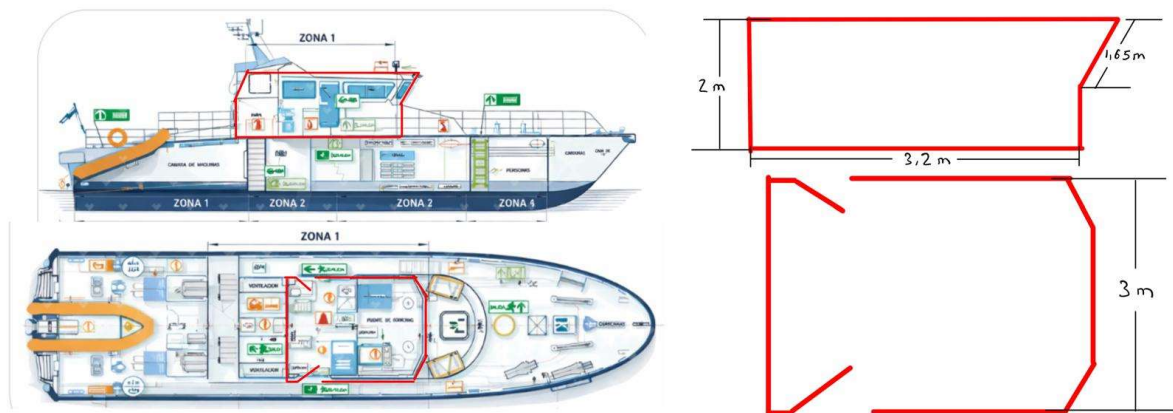


Figura 3-18 Croquis del puente a partir de los planos

En la zona de popa se consideraron dos chaflanes de pequeñas dimensiones, aproximados mediante dos triángulos rectángulos de base y altura iguales a 0,30 m. El área total eliminada por estos dos recortes es:

$$A_{popa} = 2 \cdot \frac{0,3 \cdot 0,3}{2} = 0,09 \text{ m}^2 \quad (12)$$

En la zona de proa se consideraron dos chaflanes de mayor tamaño, aproximados mediante dos triángulos rectángulos de base 0,55 m y altura 0,45 m. El área total eliminada en esta zona es:

$$A_{proa} = 2 \cdot \frac{0,55 \cdot 0,45}{2} = 0,2475 \text{ m}^2 \quad (13)$$

La superficie total descontada en planta resulta:

$$A_{chaflanes} = A_{popa} + A_{proa} = 0,09 + 0,2475 = 0,3375 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Para transformar esta corrección superficial en una corrección volumétrica, se consideró una altura media representativa de 1,8 m en las zonas afectadas. De este modo, el volumen descontado por los chaflanes es:

$$V_{chaflanes} = 0,3375 \cdot 1,8 = 0,6075 \text{ m}^3$$

En el alzado lateral del puente se observa que la zona de proa no mantiene la altura completa del recinto, ya que el parabrisas introduce una superficie inclinada que reduce el volumen interior útil. Esta reducción se aproximó mediante una cuña prismática triangular.

Para ello se adoptaron las siguientes dimensiones aproximadas:

- longitud horizontal afectada: 0,65 m.
- reducción de altura: 0,80 m.
- anchura media afectada: 2,4 m.

El volumen de esta cuña se calculó como:

$$V_{cuña} = \frac{0,65 \cdot 0,8}{2} \cdot 2,4 = 0,624 \text{ m}^3 \quad (15)$$

El volumen geométrico bruto del puente se obtuvo restando al volumen prismático inicial las dos correcciones anteriores, correspondientes a los recortes en planta y a la inclinación de la zona de proa:

$$V_{bruto} = V_0 - V_{chaflandes} - V_{cuña} \quad (16)$$

$$V_{bruto} = 19,2 - 0,6075 - 0,624 = 17,9685 \text{ m}^3$$

Por tanto, el volumen geométrico bruto del puente de gobierno se estimó en:

$$V_{bruto} \approx 18,0 \text{ m}^3$$

Aunque el volumen geométrico bruto describe el tamaño interno del recinto, no todo él se encuentra disponible para la mezcla del aire, ya que una parte está ocupada por mobiliario, equipos de control, asientos y otros elementos fijos presentes en el puente. Con el objetivo de obtener una estimación más realista del volumen de aire efectivo, se realizó una aproximación del volumen desplazado por los principales elementos interiores observados en las fotografías tomadas *in situ*.

La consola principal situada en la zona de proa se aproximó mediante un paralelepípedo de dimensiones tomadas con metro:

- longitud: 1,20 m.
- fondo: 0,55 m.
- altura: 1,10 m.

Su volumen estimado es:

$$V_{consola} = 1,20 \cdot 0,55 \cdot 1,10 = 0,726 \text{ m}^3 \quad (17)$$

Se consideró además el elemento central visible en el puente, aproximado mediante un prisma rectangular de dimensiones:

- longitud: 0,70 m.
- anchura: 0,45 m.
- altura: 0,75 m.

El volumen resultante es:

$$V_{mesa} = 0,70 \cdot 0,45 \cdot 0,75 = 0,236 \text{ m}^3 \quad (18)$$

En el interior del puente se hay cinco asientos. En este caso no resulta adecuado aproximar cada uno como un sólido macizo completo, ya que presentan huecos y geometría irregular. Por ello se adoptó un volumen equivalente medio de $0,12 \text{ m}^3$ por asiento, valor razonable para este tipo de mobiliario.

Así, el volumen total ocupado por los asientos se estimó como:

$$V_{asientos} = 5 \cdot 0,12 = 0,60 \text{ m}^3 \quad (19)$$

También podemos ver dos columnas cilíndricas de apoyo, de diámetro aproximado $0,08 \text{ m}$ y altura $2,0 \text{ m}$. El volumen de una columna se calculó mediante la expresión:

$$V = \pi r^2 h \quad (20)$$

Siendo $r=0,04 \text{ m}$ y $h=2 \text{ m}$, por lo que:

$$V \approx \pi \cdot 0,04^2 \cdot 2 = 0,010 \text{ m}^3$$

y para las dos columnas:

$$V_{columnas} \approx 0,02 \text{ m}^3$$

Para contemplar además pequeños elementos secundarios, como paneles, cajones, pasamanos y otros equipos auxiliares, se consideró una corrección adicional de $0,20 \text{ m}^3$.

El volumen total ocupado por los elementos interiores se obtuvo sumando todas las contribuciones anteriores:

$$V_{ocupado} = 0,726 + 0,648 + 0,236 + 0,60 + 0,02 + 0,20 = 2,43 \text{ m}^3$$

Por tanto, se estimó que el volumen de aire efectivamente disponible en el interior del puente de gobierno es aproximadamente:

$$V_{aire} \approx 15,5 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta el carácter aproximado de algunas de las hipótesis geométricas adoptadas, debido a la incapacidad de medir todo correctamente, este resultado puede expresarse de forma prudente como un intervalo comprendido entre 15 y 16 m^3 .

Para el análisis de la acumulación de CO_2 en el interior del puente, el parámetro más representativo no es el volumen geométrico bruto del recinto, sino el volumen de aire efectivo, ya que este representa de forma más adecuada el espacio realmente disponible para la mezcla y renovación del aire interior. En consecuencia, en los cálculos posteriores relacionados con la evolución de la concentración de CO_2 se adoptó como valor de referencia un volumen interior de aproximadamente $15,5 \text{ m}^3$.

3.7 Estimación de generación por dispositivo

Una vez estimado el volumen de aire efectivo del puente de gobierno, se procedió al cálculo de la tasa de generación de CO_2 asociada a la ocupación del compartimento. Este parámetro resulta de interés, ya que permite cuantificar la rapidez con la que aumenta la concentración de CO_2 en el interior del puente en función del número de dispositivos detectados, considerando que en este estudio un dispositivo se asimila a una persona presente en el recinto.

Para ello, se analizaron las gráficas temporales de concentración de CO_2 y se seleccionaron aquellos intervalos en los que la señal presentaba un incremento acusado y aproximadamente continuo. La selección de estos tramos se realizó de forma manual sobre la evolución temporal del CO_2 , identificando periodos en los que el aumento de concentración podía asociarse principalmente a la ocupación del puente, evitando en la medida de lo posible intervalos afectados por descensos bruscos de concentración o por episodios puntuales de ventilación.

En primer lugar, para cada tramo seleccionado se calculó la tasa de incremento de la concentración de CO₂ por dispositivo y por hora, expresada en ppm/(dispositivo·h). Para ello se empleó la expresión:

$$gppm = \frac{(C_f - C_i)}{\Delta t \cdot N} \quad (21)$$

donde:

- C_i es la concentración inicial de CO₂ en el tramo considerado, en ppm.
- C_f es la concentración final de CO₂, en ppm.
- Δt es la duración del tramo, en horas.
- N es el número medio de dispositivos durante dicho intervalo.

Esta expresión proporciona una medida directa de la velocidad de crecimiento de la concentración de CO₂ en el aire interior, normalizada respecto al número de ocupantes estimados.

Dado que la concentración en ppm depende del volumen del recinto, se realizó además la conversión a una magnitud físicamente más representativa: la tasa de generación volumétrica de CO₂ por dispositivo, expresada en L/(h·dispositivo).

Partiendo del volumen de aire efectivo del puente de gobierno, previamente estimado en:

$$V = 15,5 \text{ m}^3$$

y teniendo en cuenta que una variación de 1 ppm equivale a una fracción volumétrica de 10⁻⁶, el volumen de CO₂ generado en un intervalo dado puede obtenerse a partir de la variación de concentración mediante:

$$\Delta V_{CO_2} = V \cdot \frac{\Delta C}{10^6} \quad (22)$$

Si se expresa el resultado en litros, la tasa de generación de CO₂ por dispositivo y por hora viene dada por:

$$G = \frac{V \cdot \Delta C \cdot 1000}{10^6 \cdot \Delta t \cdot N} \quad (23)$$

que puede simplificarse como:

$$G = \frac{V \cdot \Delta C \cdot 0,001}{\Delta t \cdot N}$$

donde:

- G es la tasa de generación de CO₂ en L/(h·dispositivo).
- $\Delta C = C_f - C_i$ es el incremento de concentración en ppm.

De forma adicional, el mismo resultado puede expresarse en m³/(h·dispositivo), aunque para la interpretación física resulta más intuitivo trabajar en litros por hora y dispositivo.

Para aplicar este procedimiento, la curva de evolución del CO₂ se dividió en varios tramos de crecimiento claramente diferenciados. En cada uno de ellos se identificaron:

- la concentración inicial y final de CO₂.
- la hora de inicio y final del tramo.
- el número medio de dispositivos presentes.

A partir de estos valores se calcularon, para cada intervalo, tanto la tasa de incremento de concentración en ppm/(dispositivo·h) como la tasa de generación volumétrica en L/(h·dispositivo).

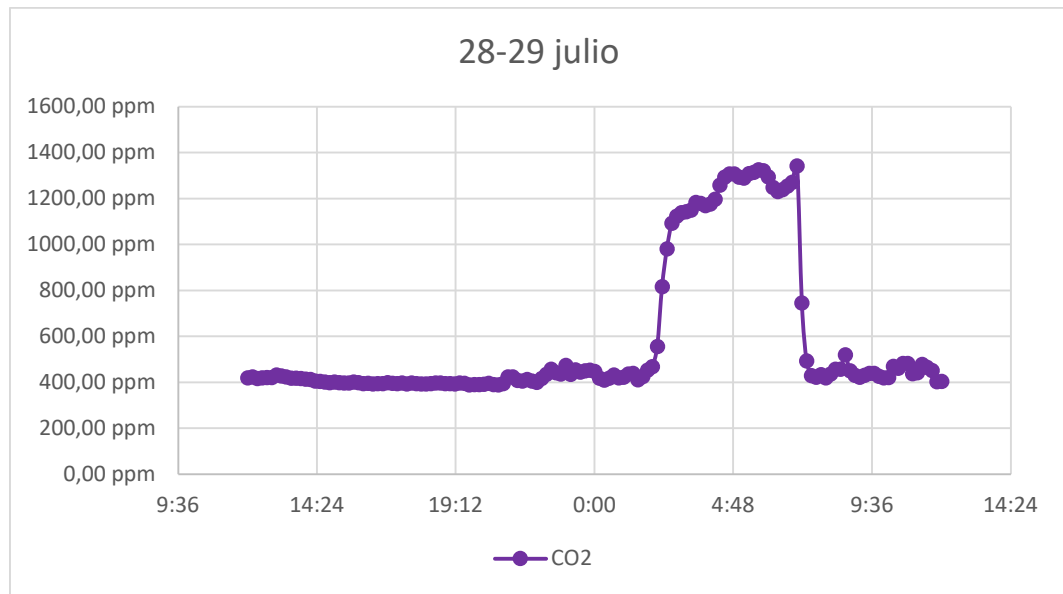


Figura 3-19 Variación CO₂

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial= 410,5	1,666666667	157,8427046	443,538	0,10194008	0,286451625
	CO2 final= 1149,73					
	Tiempo inicial= 0,0625					
	Tiempo final= 0,131944444					
2º tramo:	Dispositivos= 2,81	1	48,4	137,94	0,031258333	0,08908625
	CO2 inicial= 1169,5					
	CO2 final= 1307,44					
	Tiempo inicial= 0,159722222					
3er tramo:	Tiempo final= 0,201388889	0,666666667	62,96697248	167,4	0,04066617	0,1081125
	Dispositivos= 2,85					
	CO2 inicial= 1229,9					
	CO2 final= 1341,5					
	Tiempo inicial= 0,263888889					
	Tiempo final= 0,291666667					
	Dispositivos= 2,658536585					

Figura 3-20 Cálculo concentración de CO₂

En el ejemplo representado, correspondiente a un episodio nocturno de acumulación de CO₂ en el puente, se seleccionaron tres tramos de crecimiento diferenciados:

- un primer tramo de incremento rápido de la concentración.
- un segundo tramo de crecimiento más moderado.
- y un tercer tramo final con incremento menor pero todavía positivo.

Los resultados obtenidos muestran que la tasa de generación calculada no es constante en todos los tramos, sino que presenta cierta variabilidad. Esta variación puede deberse a varios factores, entre ellos:

- cambios en la ocupación efectiva del recinto.
- diferencias en el grado de mezcla del aire interior.
- pequeñas infiltraciones o episodios de ventilación no completamente apreciables en la señal.
- o la propia incertidumbre asociada a la selección manual de los intervalos.

Por tanto, los valores obtenidos deben interpretarse como una estimación aparente de la tasa de generación de CO₂ bajo condiciones reales de operación del puente, y no como una tasa metabólica exacta en condiciones ideales de laboratorio.

Adicionalmente, se incluyó una segunda estimación de la tasa de generación de CO₂ considerando un único ocupante en el puente de gobierno. Esta aproximación se incorporó tras consultar con la

tripulación de la Guardia Civil, quienes indicaron que, durante los periodos nocturnos, cuando la embarcación no se encuentra en navegación, lo habitual es que únicamente permanezca una persona en el puente.

Dado a lo mencionado en el anterior apartado y que el número de dispositivos detectados por el sistema puede presentar ciertas imprecisiones en algunos momentos, se consideró oportuno calcular una columna adicional suponiendo una ocupación constante de una sola persona. De esta forma, se obtiene una estimación alternativa de la tasa de generación de CO₂ que permite contrastar los resultados obtenidos a partir de los datos de dispositivos registrados y evaluar la posible influencia de errores en la detección de ocupantes.

Este procedimiento se consideró adecuado para el presente trabajo, ya que permite relacionar directamente la acumulación observada de CO₂ con la ocupación del compartimento, utilizando exclusivamente variables medidas en operación real. Además, la conversión de la pendiente de concentración a unidades de volumen generado por dispositivo permite comparar distintos tramos temporales de forma más coherente, al incorporar explícitamente el volumen interior del recinto.

En consecuencia, la tasa de generación de CO₂ por dispositivo se utilizó como parámetro complementario para caracterizar la dinámica de acumulación del gas en el puente de gobierno y para apoyar la interpretación de los episodios de aumento rápido de concentración observados en las series temporales analizadas.

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos a partir del análisis de los datos registrados en el puente de la embarcación durante el periodo comprendido entre julio de 2024 y mayo de 2025. Para ello se analizan las relaciones entre la concentración de CO₂, la ocupación del compartimento, las condiciones ambientales interiores y las condiciones meteorológicas exteriores.

4.1 Evolución temporal de las variables ambientales.

El análisis de los datos registrados por el sistema de monitorización permitió observar la evolución temporal de las variables ambientales medidas a bordo del patrullero Corvo Mariño. Entre estas variables destacan la concentración de dióxido de carbono (CO₂), la temperatura del aire, la humedad relativa y el número de dispositivos detectados.

La representación temporal de estas variables permitió identificar periodos de mayor actividad a bordo, caracterizados por variaciones significativas en el número de dispositivos detectados. Estos periodos se interpretan como intervalos en los que la embarcación se encontraba realizando labores de navegación o patrullaje.

En estas situaciones se observa que la concentración de CO₂ presenta variaciones más pronunciadas, con incrementos que coinciden generalmente con los momentos de mayor ocupación del puente de gobierno. Este comportamiento resulta coherente con el hecho de que la respiración humana constituye una de las principales fuentes de generación de dióxido de carbono en espacios interiores.

A continuación, mostraremos la evolución de las variables en el mes de octubre para así entender el desarrollo del trabajo.

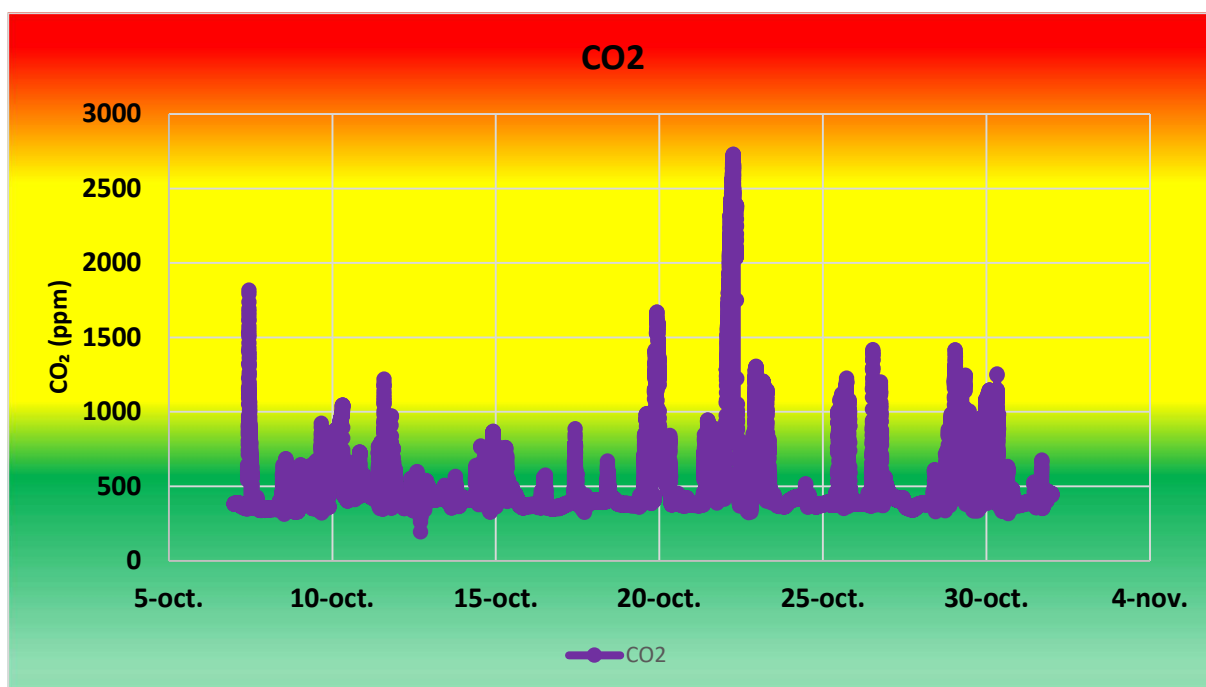


Figura 4-1 Gráfica evolución ppm de CO₂ mes de octubre

La Figura 4-1 muestra la evolución temporal de la concentración de dióxido de carbono registrada por el sistema de monitorización a bordo del patrullero durante el mes de octubre. Como puede observarse, la concentración de CO₂ presenta variaciones significativas a lo largo del tiempo, con episodios de incremento asociados a periodos de actividad en el interior del puente de gobierno. Estas variaciones reflejan el carácter dinámico de la calidad del aire en espacios interiores ocupados, donde la concentración del gas depende tanto de la generación por parte de los ocupantes como de las condiciones de ventilación existentes. En este gráfico además podemos ver la separación de colores en el fondo la cual indica a partir de que niveles el CO₂ empieza a poder afectar al cuerpo con sensación de somnolencia (1000-2500 ppm), y a partir de que niveles empieza a ser perjudicial para la salud (>2500ppm).

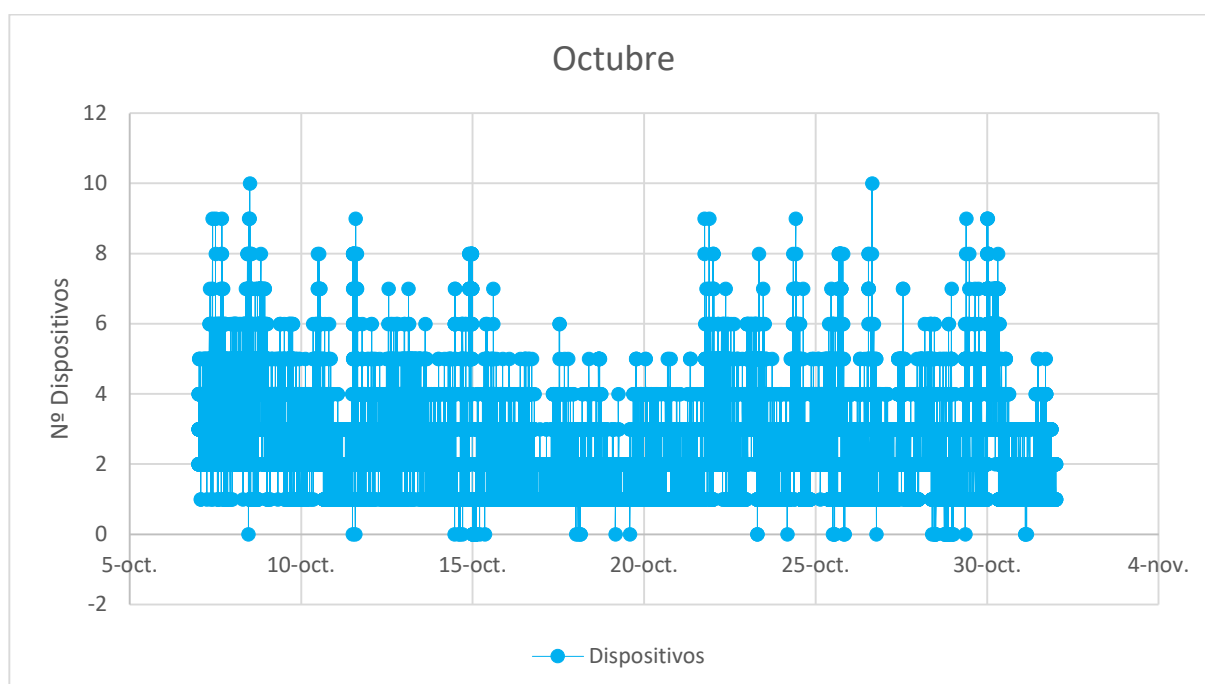


Figura 4-2 Gráfica de variación de dispositivos en el mes de octubre

La Figura 4-2 representa la evolución temporal del número de dispositivos detectados por el sistema de monitorización, utilizado como aproximación al nivel de ocupación del puente. En la gráfica se observan variaciones significativas en determinados periodos, lo que indica momentos de mayor presencia de tripulación a bordo. Estos intervalos se interpretan como periodos en los que la embarcación se encontraba realizando labores operativas. La mayoría del tiempo, como podemos observar, hay uno o más dispositivos a bordo, significando que la tripulación se puede haber dejado dispositivos que transmitan una señal encendidos en la patrullera.

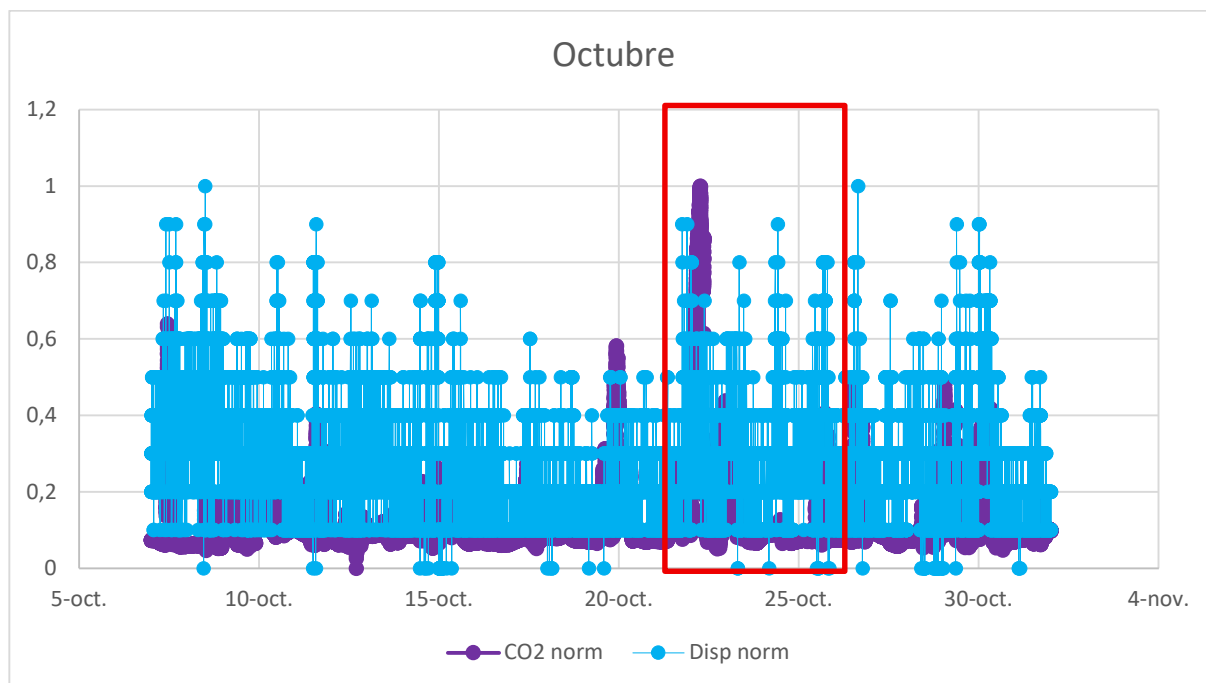


Figura 4-3 Gráfica CO₂ y Dispositivos en octubre normalizada

Con la Figura 4-3 podemos ver la gráfica de evolución de la concentración de CO₂ y del número de dispositivos detectados. En ciertos intervalos, como el señalado con un cuadrado en rojo, se observa que los incrementos en la concentración de dióxido de carbono coinciden en algunos puntos con aumentos en el número de dispositivos, lo que sugiere una relación directa entre la presencia de ocupantes y la generación de CO₂.

4.2 Relación entre ocupación y concentración CO₂

Con el objetivo de analizar la relación entre la ocupación del espacio y la concentración de dióxido de carbono, se representaron gráficamente ambas variables para los periodos seleccionados de mayor actividad a bordo.

En las siguientes gráficas se muestra la relación entre ambas variables para diferentes periodos analizados. En esta representación se observa que, en numerosos intervalos temporales, los incrementos en el número de dispositivos coinciden con aumentos en la concentración de CO₂.

En esta gráfica de la figura 4-4 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 1500 ppm y 9 dispositivos.

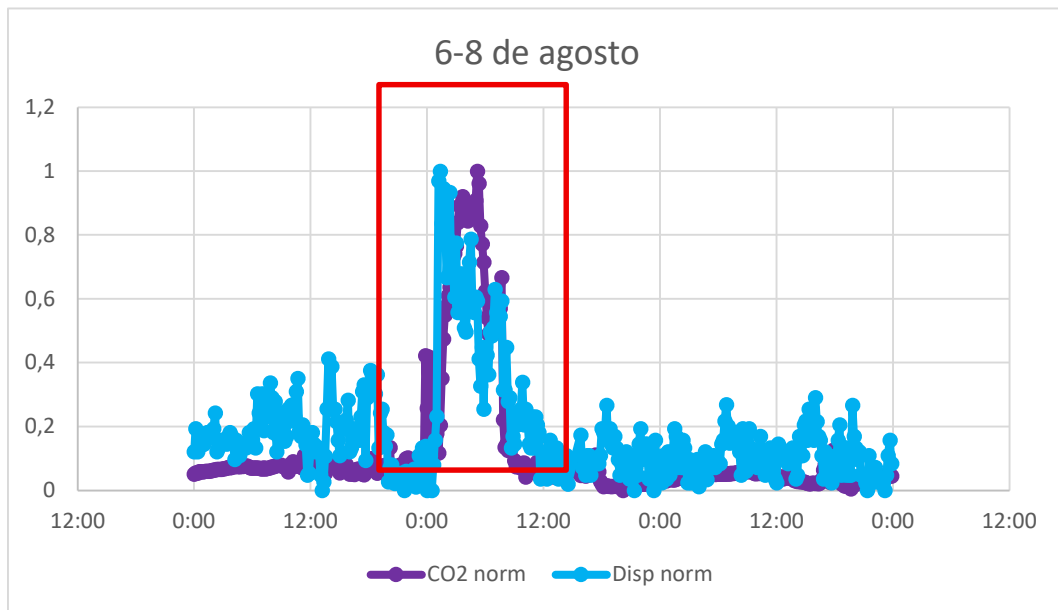


Figura 4-4 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de agosto normalizada

En esta gráfica de la figura 4-5 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 2700 ppm y 6 dispositivos.

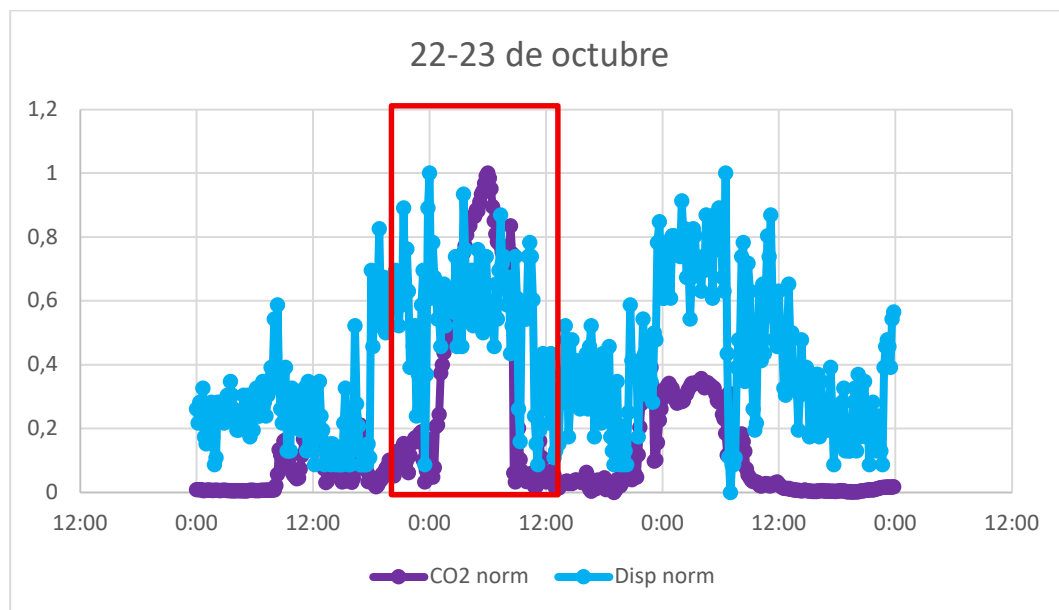


Figura 4-5 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de octubre normalizada

En esta gráfica de la figura 4-6 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 850 ppm y 5 dispositivos.

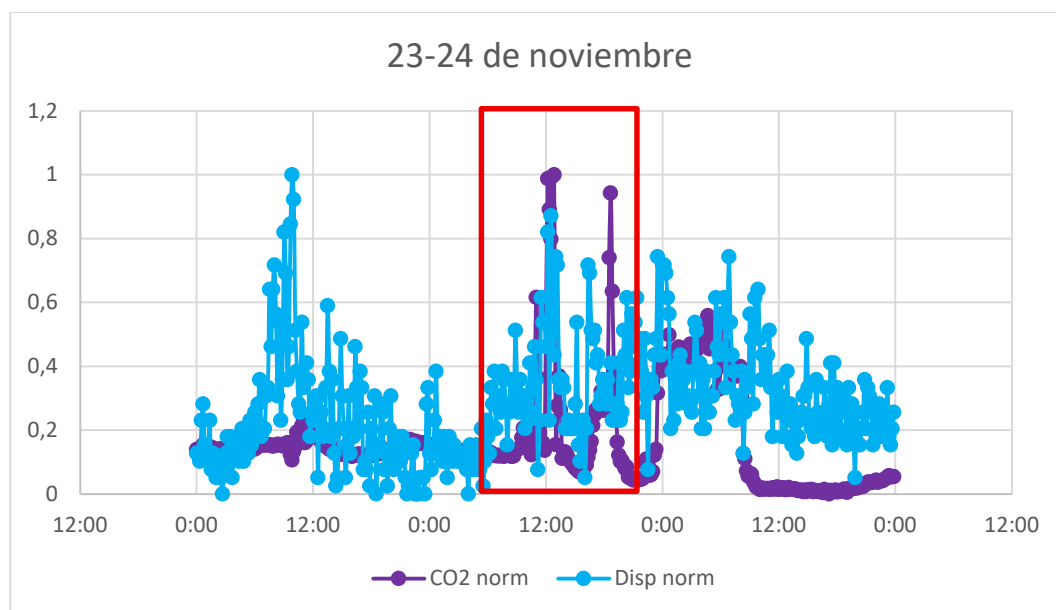


Figura 4-6 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de noviembre normalizada

En esta gráfica de la figura 4-7 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 2500 ppm y 8 dispositivos.

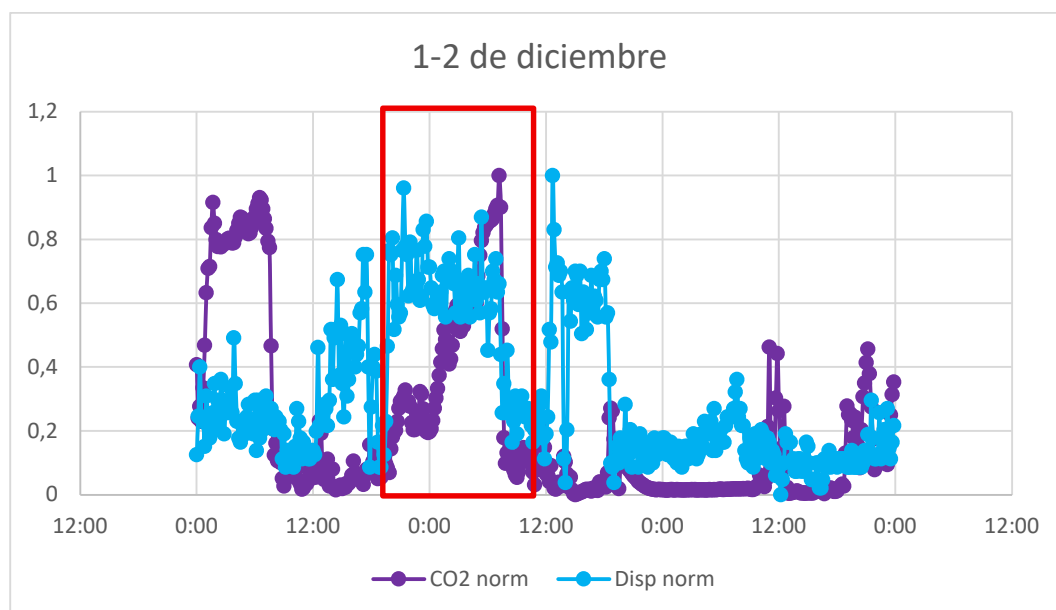


Figura 4-7 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de diciembre normalizada

Los resultados muestran que, en muchos casos, existe una relación directa entre el número de dispositivos detectados y la concentración de CO₂. Cuando aumenta el número de dispositivos -utilizado como estimación indirecta del número de personas presentes- se observa un incremento en la concentración de dióxido de carbono.

Pese a que gráficamente se podía ver relación, para cuantificar esta relación se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables. Hay periodos analizados donde se obtuvieron valores de correlación positivos elevados, en algunos casos cercanos a 1, lo que indica la existencia de una fuerte relación directa entre el número de dispositivos detectados y la concentración de CO₂.

Este comportamiento puede observarse claramente en el mes de agosto. Además de aplicar la correlación directa entre las variables, se realizó también un análisis considerando un desfase temporal

entre ellas. El objetivo fue estudiar el desplazamiento de la concentración de CO₂ con respecto al incremento en el número de dispositivos, ya que el aumento de CO₂ no se produce de forma inmediata tras el incremento de ocupación. De este modo, se pudo estimar el tiempo que transcurre desde el aumento de dispositivos hasta que se observa un incremento en la concentración de CO₂.

Desplazamiento (mins)	Correlación
0	0,739
+2	0,772
+4	0,776
+8	0,729
+16	0,587
+32	0,139

Tabla 2 Tiempo que tarda en subir el CO₂ en el mes agosto con Pearson

Observando los resultados de las correlaciones, podemos determinar que, pasados cuatro minutos, es cuando mayor es el nivel de correlación, es decir, cuando más relación hay entre el CO₂ y el número de dispositivos, pudiendo afirmar que hay relación matemática entre ambas variables y que el CO₂ tiene un componente acumulativo con el tiempo.

Este comportamiento confirma que la presencia de la tripulación constituye una fuente significativa de generación de CO₂ en el interior del puente de gobierno. Sin embargo, también se identificaron situaciones en las que la concentración de CO₂ aumentaba sin que se produjera un incremento significativo en el número de dispositivos detectados como podemos ver en las siguientes gráficas.

En está gráfica de la figura 4-8 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 1350 ppm y 9 dispositivos.

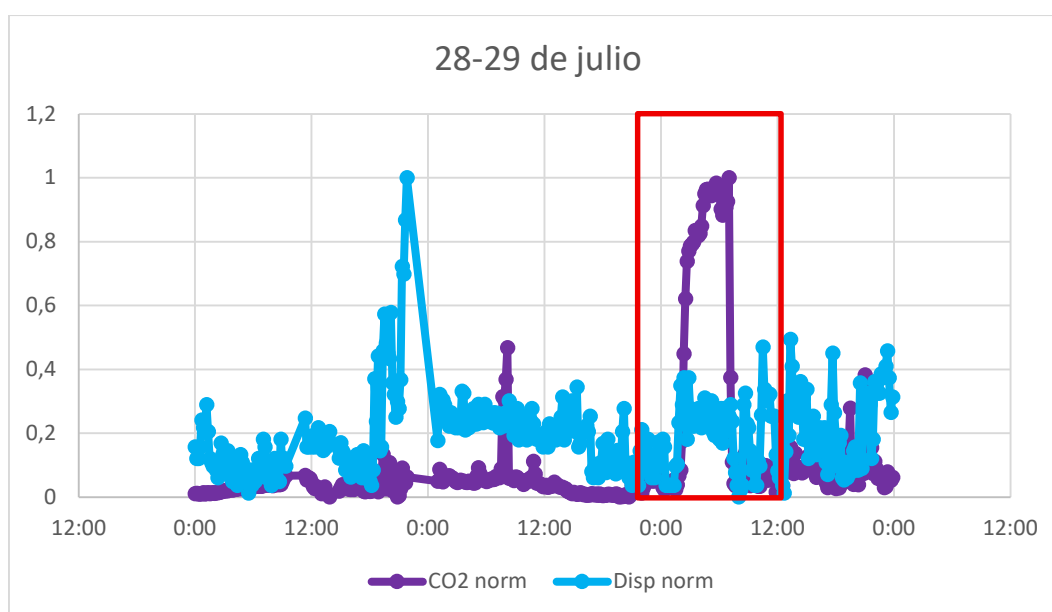


Figura 4-8 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de julio normalizada

En está gráfica de la figura 4-9 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 3200 ppm y 9 dispositivos.

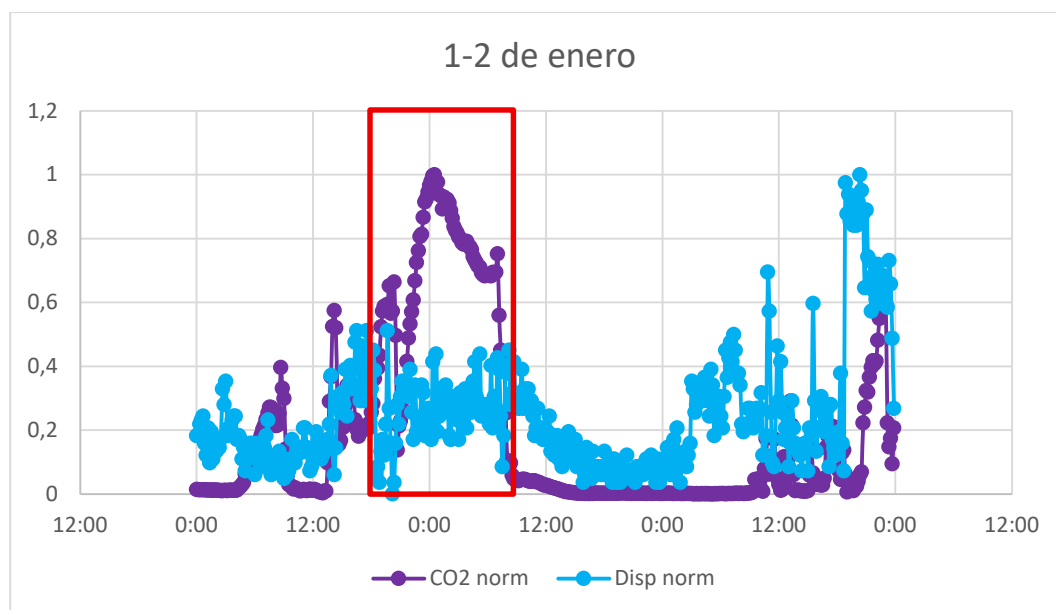


Figura 4-9 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de enero normalizada

En está gráfica de la figura 4-10 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 4250 ppm y 5 dispositivos.

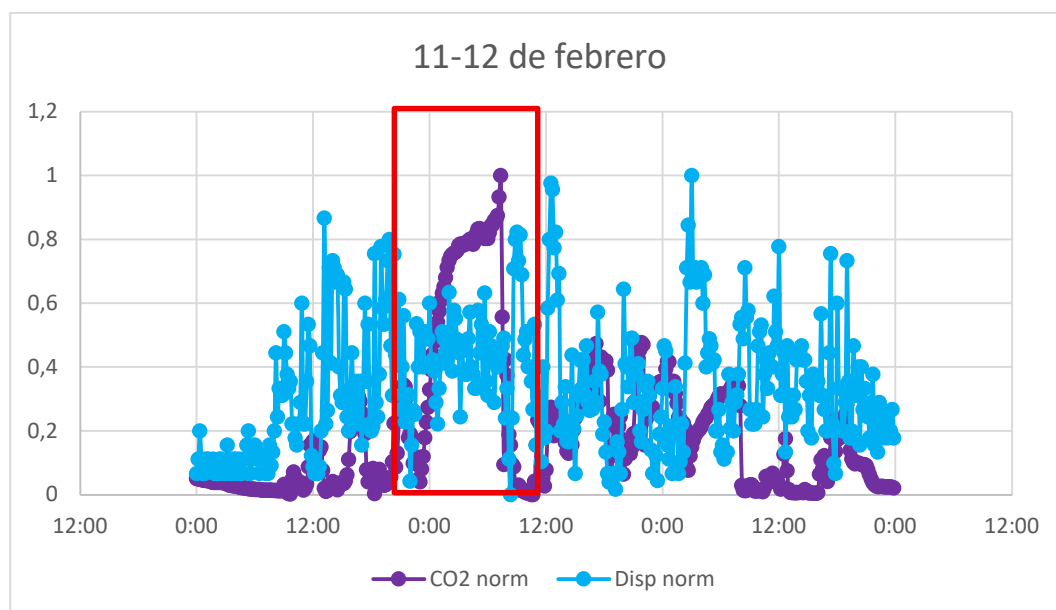


Figura 4-10 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de febrero normalizada

En está gráfica de la figura 4-11 el máximo del CO₂ y de dispositivos era 3700 ppm y 9 dispositivos.

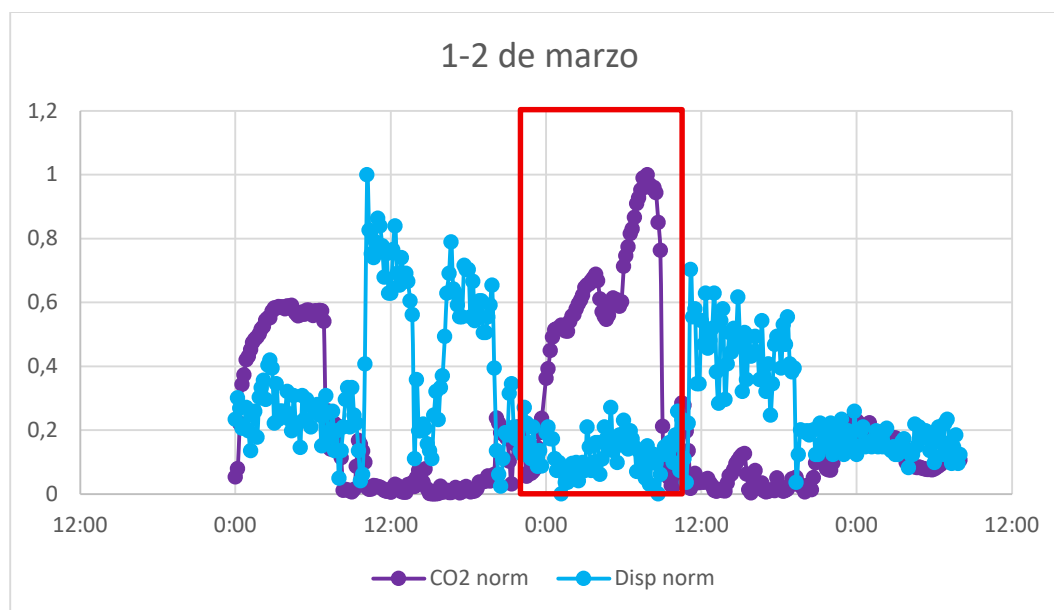


Figura 4-11 Gráfica CO₂ y dispositivos mes de marzo normalizada

En estos casos, volvimos a aplicar la correlación de Pearson para confirmar que efectivamente no siempre coinciden ambas variables. Por ejemplo, aplicamos el mismo proceso que hicimos del desplazamiento y vimos anteriormente en la Tabla 4-1, obteniendo en el caso del mes de julio los siguientes valores:

Desplazamiento (mins)	Correlación
0	0,143
+2	0,142
+4	0,141
+8	0,138
+16	0,131
+32	0,136

Tabla 3 Correlación de Pearson en julio

Viendo los resultados de aplicar el coeficiente de correlación de Pearson, podemos afirmar que no hay apenas relación entre el número de dispositivos y el CO₂ en otros casos, determinando así que hay otras variables que habría que tener en cuenta.

Este fenómeno sugiere que la acumulación de CO₂ no depende únicamente de la ocupación del espacio, sino también de factores relacionados con la ventilación y renovación del aire en el interior de la embarcación.

4.3 Influencia de la ventilación en la acumulación de CO₂

El análisis de los datos registrados durante los periodos de mayor actividad a bordo permitió identificar episodios en los que la concentración de dióxido de carbono alcanzaba valores significativamente elevados en el interior del puente de gobierno. En muchos casos, estos incrementos no coincidían necesariamente con aumentos en el número de dispositivos detectados, lo que indicaba

que la ocupación del espacio no era el único factor que influía en la evolución de la concentración de CO₂.

Un análisis más detallado de las series temporales reveló que algunos de los picos de concentración de CO₂ se producían durante periodos nocturnos, coincidiendo con intervalos en los que la temperatura exterior era inferior a la registrada durante el día. Este comportamiento sugirió que podían existir factores operativos relacionados con la ventilación del espacio que favorecieran la acumulación del gas en determinados momentos.

Con el objetivo de comprender mejor este fenómeno, se consultó a la tripulación de la embarcación acerca de las condiciones habituales de ventilación del puente durante las labores de navegación. Según indicaron los tripulantes, durante las horas nocturnas o en situaciones de temperaturas exteriores bajas, las ventanas del puente suelen permanecer cerradas por motivos de confort térmico, con el fin de evitar la entrada de aire frío en el compartimento.

El cierre de las ventanas reduce de forma significativa la ventilación natural del espacio, limitando la renovación del aire interior. En estas condiciones, el dióxido de carbono generado por la respiración de la tripulación puede acumularse progresivamente en el interior del puente, especialmente cuando el compartimento permanece cerrado durante periodos prolongados.

Si se analizan las gráficas presentadas en el apartado 4.2, en las que se observan picos de concentración de CO₂ que aparentemente no están asociados a incrementos en el número de dispositivos, se puede comprobar que todos ellos se producen a partir de la puesta de sol. Este comportamiento sugiere que la acumulación de CO₂ se produce con mayor facilidad durante los periodos nocturnos, probablemente debido a una menor ventilación o renovación del aire en esas horas.

Este comportamiento resulta coherente con los principios básicos de la ventilación en espacios interiores, según los cuales la concentración de contaminantes depende tanto de la tasa de generación del contaminante como de la tasa de renovación del aire. Cuando la ventilación es insuficiente, incluso niveles moderados de generación de CO₂ pueden provocar incrementos significativos en su concentración.

Por tanto, los resultados obtenidos sugieren que la acumulación de dióxido de carbono en el puente de gobierno no depende exclusivamente del número de personas presentes en el espacio, sino también de las condiciones de ventilación del compartimento, las cuales pueden verse afectadas por factores operativos como el cierre de ventanas o puertas durante determinados periodos de navegación.

Estas observaciones sugieren que la ventilación del puente desempeña un papel determinante en la evolución de la concentración de CO₂, lo que motivó la incorporación de variables meteorológicas externas al análisis, con el objetivo de evaluar la posible influencia de las condiciones ambientales exteriores en la ventilación del compartimento.

4.4 Relación entre la temperatura del sensor y la concentración de CO₂

Asimismo, durante el análisis se evaluó inicialmente la posible relación entre la temperatura interior registrada por el sensor y la concentración de CO₂. Sin embargo, se observó que esta variable no presentaba una relación clara con la evolución del dióxido de carbono. Este comportamiento puede explicarse por las condiciones de aislamiento térmico del compartimento en el que se encuentra instalado el sensor. Cuando el puente permanece cerrado —con puertas y ventanas cerradas— el intercambio térmico con el exterior se reduce significativamente, lo que provoca que la temperatura interior se mantenga relativamente estable y, en muchos casos, sea superior a la temperatura exterior.

Esto lo podemos ver en las siguientes gráficas en la que la temperatura regularmente se mantiene estable mientras que el CO₂ se va acumulando con el paso del tiempo:

En esta gráfica de la figura 4-12 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 1350 ppm y 34°C.

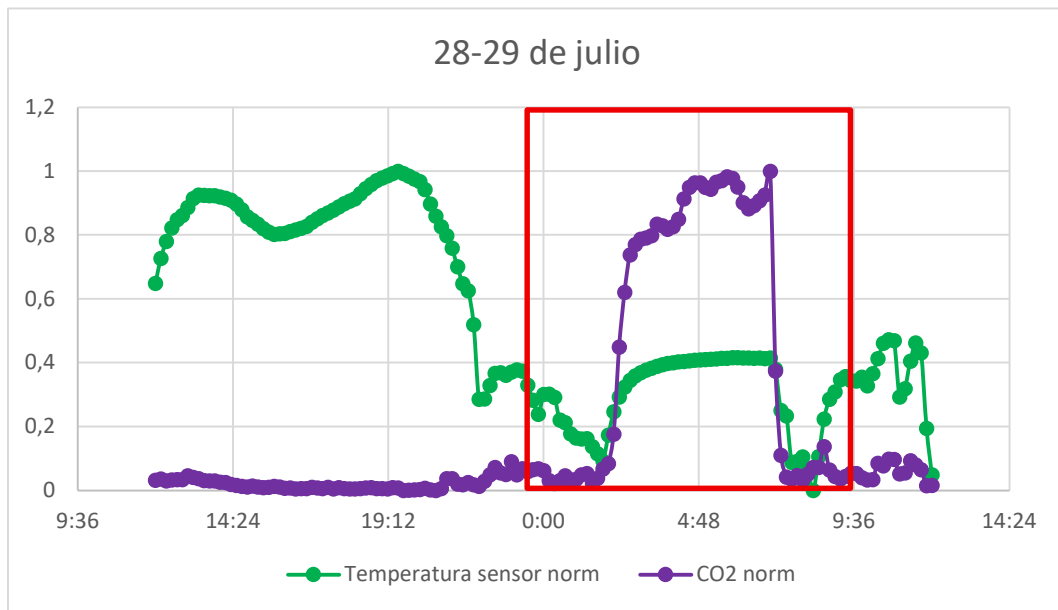


Figura 4-12 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en julio normalizada

En esta gráfica de la figura 4-13 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 1450 ppm y 28°C.

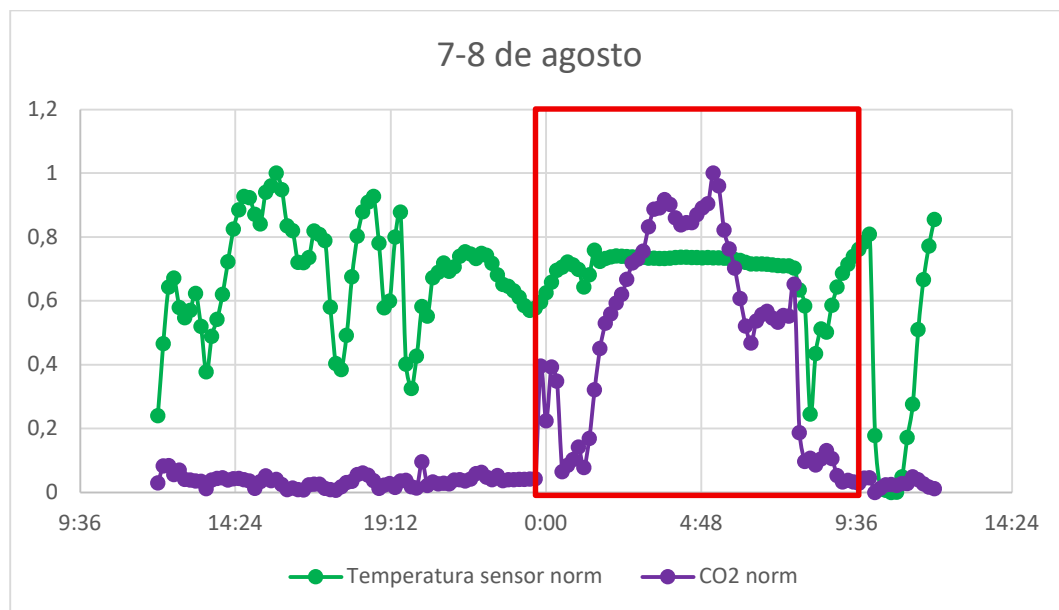


Figura 4-13 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en agosto normalizada

En esta gráfica de la figura 4-14 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 970 ppm y 31°C.

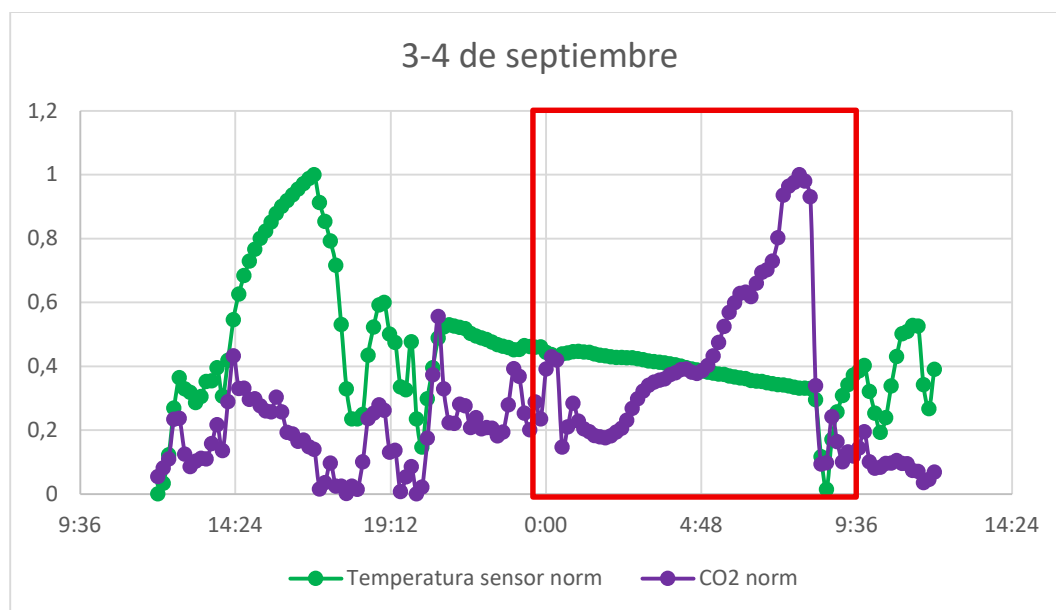


Figura 4-14 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en septiembre normalizada

En esta gráfica de la figura 4-15 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 1300 ppm y 28°C.

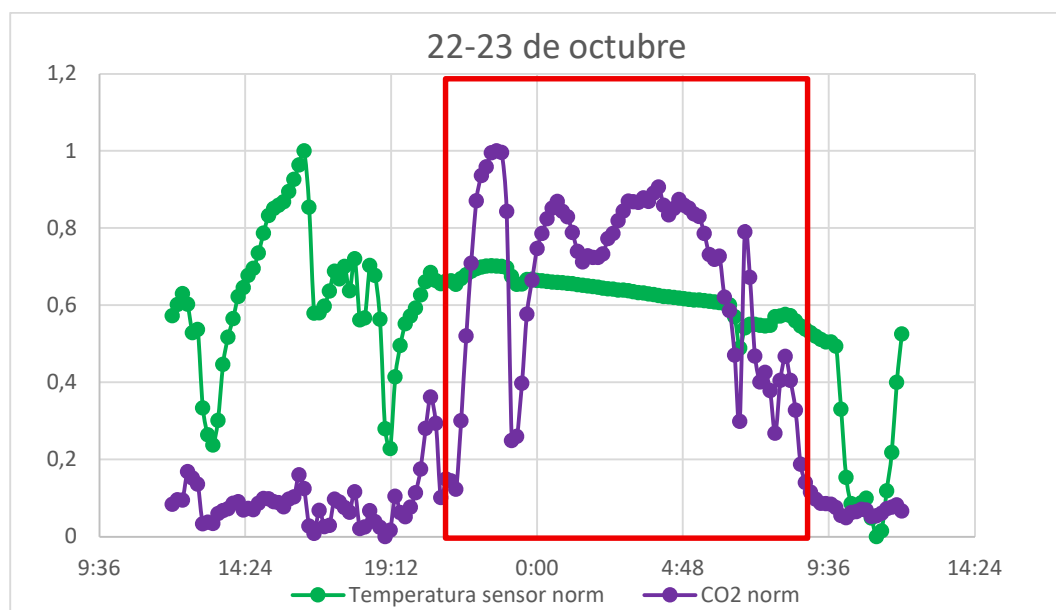


Figura 4-15 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en octubre normalizada

En esta gráfica de la figura 4-16 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 850 ppm y 22°C.

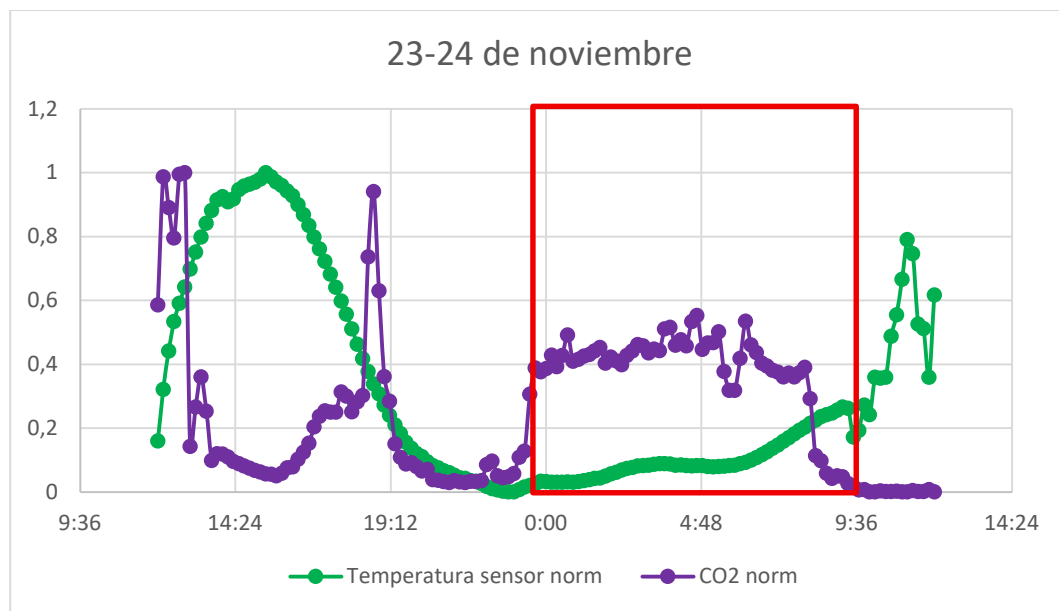


Figura 4-16 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en noviembre normalizada

En esta gráfica de la figura 4-17 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 2500 ppm y 23°C.

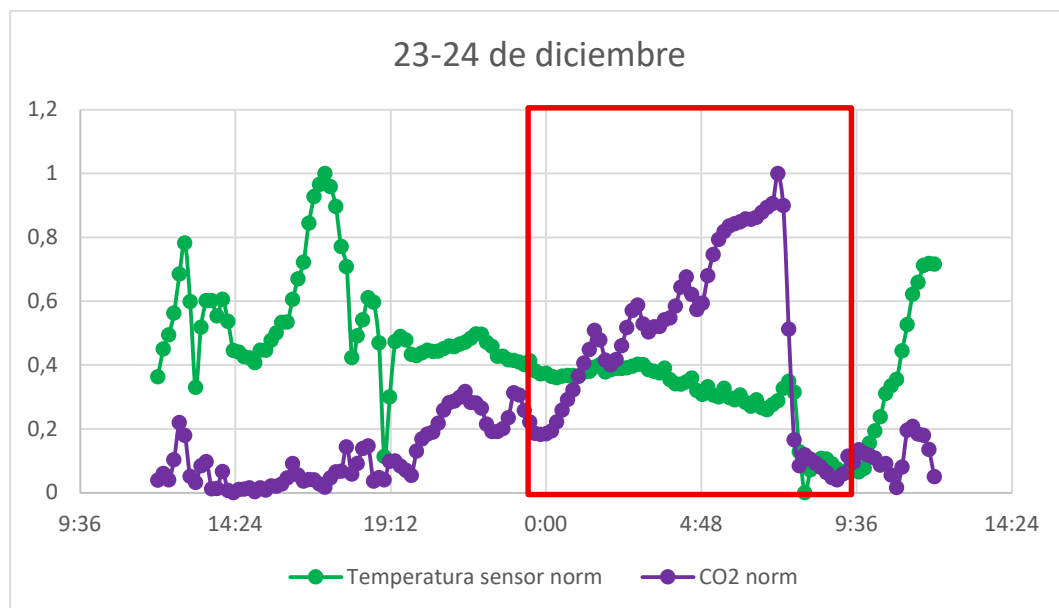


Figura 4-17 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en diciembre normalizada

En esta gráfica de la figura 4-18 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 3200 ppm y 29°C.

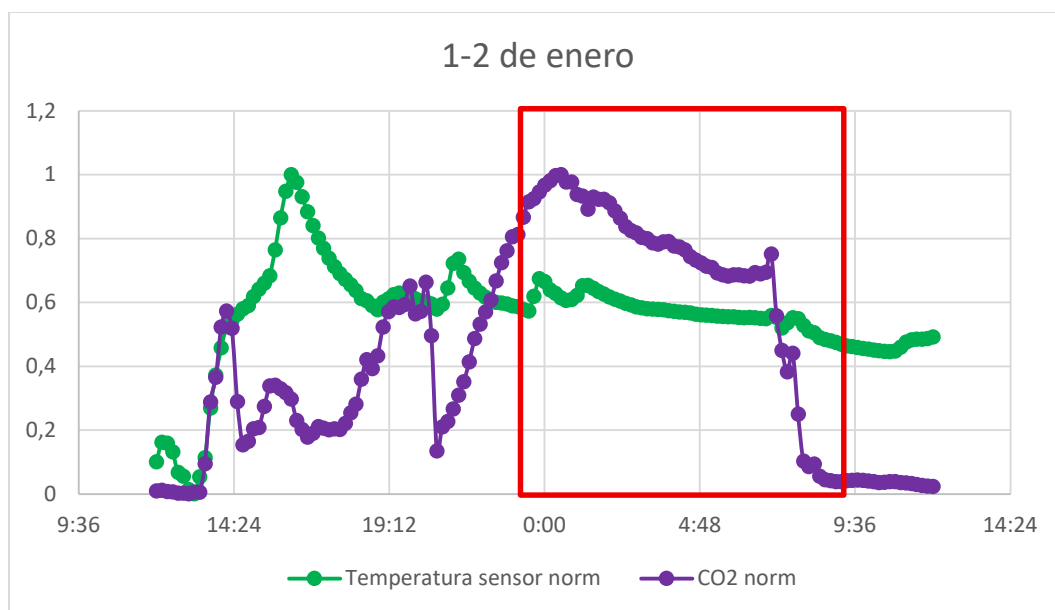


Figura 4-18 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en enero normalizada

En esta gráfica de la figura 4-19 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 2250 ppm y 21°C.

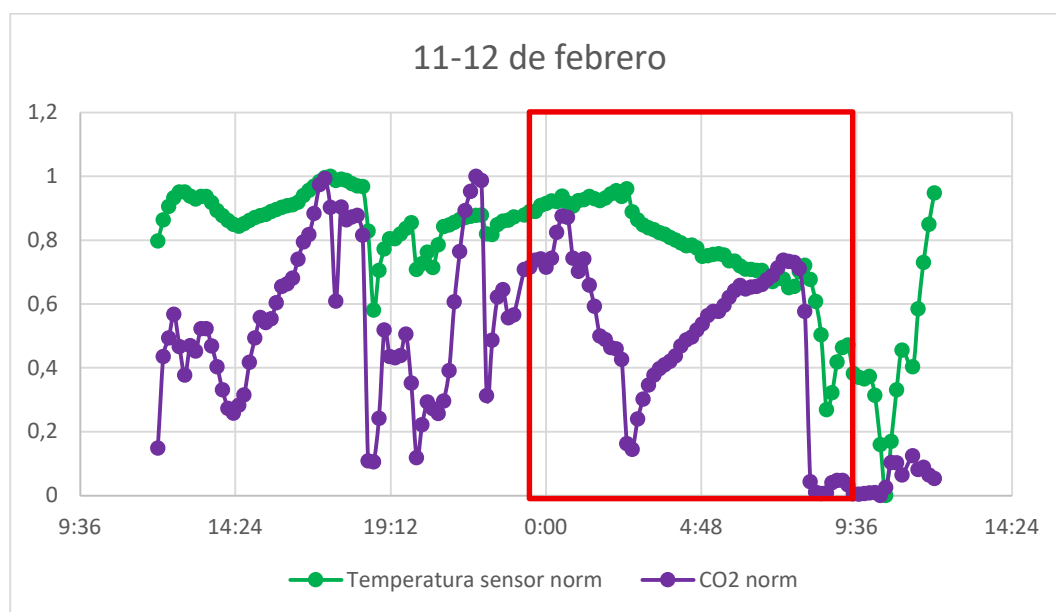


Figura 4-19 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en febrero normalizada

En esta gráfica de la figura 4-20 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 3700 ppm y 28°C.

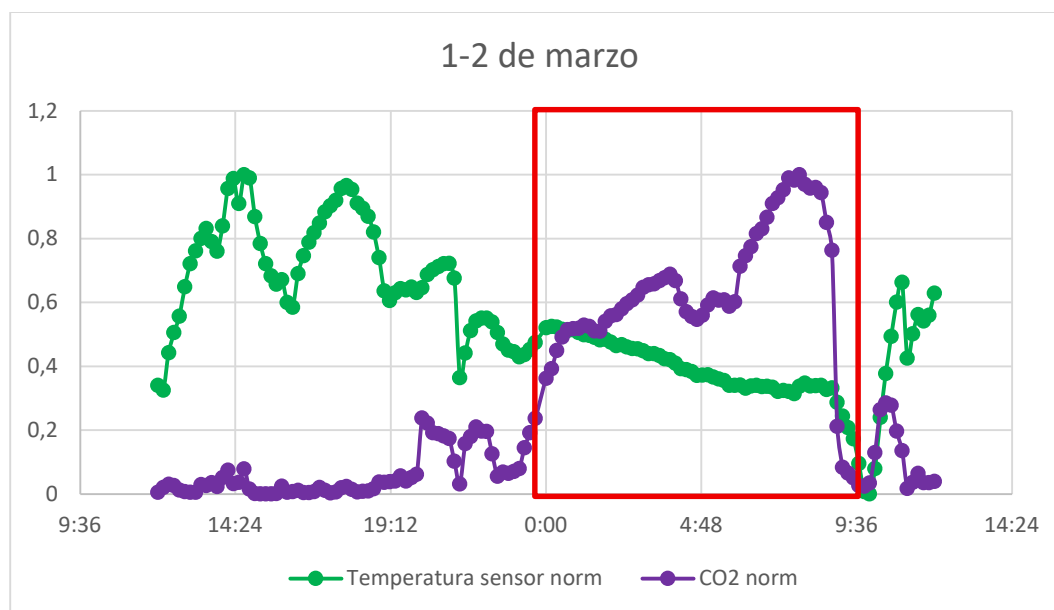


Figura 4-20 Gráfica Temperatura del sensor y CO₂ en marzo normalizada

En todas estas gráficas se observa que las mayores acumulaciones de CO₂ se producen en los rectángulos rojos, que coinciden con el periodo nocturno. Asimismo, se aprecia que pequeñas disminuciones en la temperatura registrada por el sensor, es decir, en la temperatura interior del compartimento, suelen coincidir con descensos en la concentración de CO₂. Este comportamiento podría estar asociado a episodios puntuales de ventilación, como la salida de algún miembro de la tripulación que implique la apertura de la puerta y la consiguiente ruptura de la estanqueidad del espacio, o bien a la apertura ocasional de una ventana. Estas variaciones nocturnas en la concentración de CO₂ pueden observarse en las gráficas comprendidas entre la figura 15 y la figura 18.

En estas condiciones, la temperatura interior no refleja adecuadamente los cambios ambientales que se producen en el exterior, especialmente durante los periodos nocturnos en los que la temperatura exterior desciende debido a la ausencia de radiación solar. Mientras que la temperatura interior permanece relativamente constante por efecto del aislamiento del compartimento, la concentración de CO₂ puede continuar aumentando debido a su carácter acumulativo en espacios con ventilación limitada, incluso cuando el número de tripulantes presentes en el puente es reducido.

Por este motivo, la temperatura interior registrada por el sensor no resultó adecuada para explicar matemáticamente las variaciones observadas en la concentración de dióxido de carbono.

4.5 Relación entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂

A partir de estas observaciones, y las realizadas en los apartados anteriores, se planteó la hipótesis de que la temperatura exterior podría influir indirectamente en la acumulación de dióxido de carbono en el interior del puente de gobierno. Esta hipótesis se basa en el hecho de que las condiciones térmicas exteriores influyen en el comportamiento de la tripulación respecto a la ventilación del espacio, particularmente en la apertura o cierre de las ventanas del puente.

Para evaluar esta posible relación, se incorporaron al análisis datos de temperatura exterior obtenidos a partir del servicio meteorológico MeteoGalicia. Estos datos presentan una resolución temporal de aproximadamente diez minutos y permiten caracterizar las condiciones ambientales externas durante los periodos analizados.

En las siguientes figuras se representa la relación entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂ para uno de los intervalos temporales seleccionados durante el mes de octubre. En esta

representación se observa una tendencia clara: cuando la temperatura exterior aumenta, la concentración de CO₂ en el interior del puente tiende a disminuir, mientras que descensos en la temperatura exterior suelen coincidir con incrementos en la concentración del gas.

A parte, para cuantificar la relación entre la temperatura exterior y la acumulación de CO₂ se aplicó un modelo de regresión lineal simple entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂. Los resultados obtenidos, que se muestran debajo de cada figura correspondiente, mostraron en algunos intervalos analizados, valores del coeficiente de determinación (R^2) cercanos a 1, lo que indica una elevada capacidad explicativa del modelo en esos casos. También de forma complementaria, se calculó y añadió a dichas tablas el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables, obteniéndose valores negativos cercanos a -1 en varios de los periodos estudiados, lo que confirma la existencia de una fuerte correlación inversa entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂.

En esta gráfica de la figura 4-21 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 1350 ppm y 30°C.

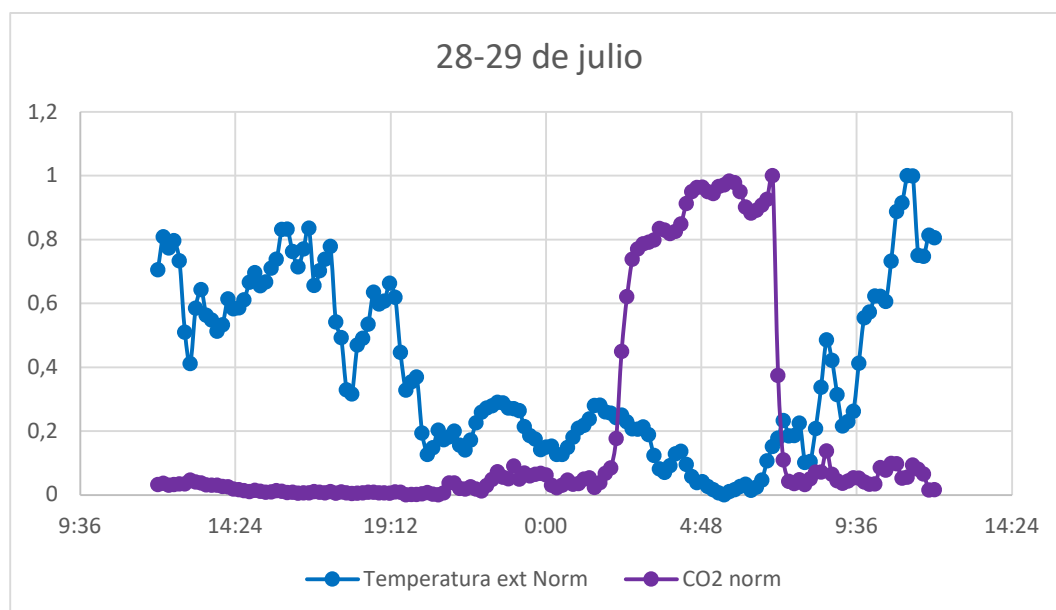


Figura 4-21 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en julio normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coeficiente de correlación múltiple	0,568
R^2 ajustado	0,318
Coeficiente de correlación de Pearson	-0,568

Tabla 4 Correlaciones julio

En el episodio correspondiente al 28-29 de julio, la concentración de CO₂ presenta un incremento progresivo durante el periodo nocturno, pasando de valores cercanos a 400 ppm a un máximo aproximado de 1350 ppm. Este comportamiento indica un proceso de acumulación del gas en el interior del puente bajo condiciones de ventilación limitada.

La temperatura exterior muestra una tendencia descendente durante ese mismo intervalo, lo que coincide con el aumento de la concentración de CO₂. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,568) indica la existencia de una correlación inversa moderada entre ambas variables. Este resultado sugiere que, a medida que la temperatura exterior disminuye, la ventilación natural del puente tiende a reducirse, favoreciendo la acumulación del gas.

La caída brusca observada al final del episodio, con un descenso rápido hasta valores próximos a 450 ppm, indica probablemente un episodio de ventilación puntual, asociado a la apertura de una puerta o ventana.

En esta gráfica de la figura 4-22 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 1500 ppm y 30°C.

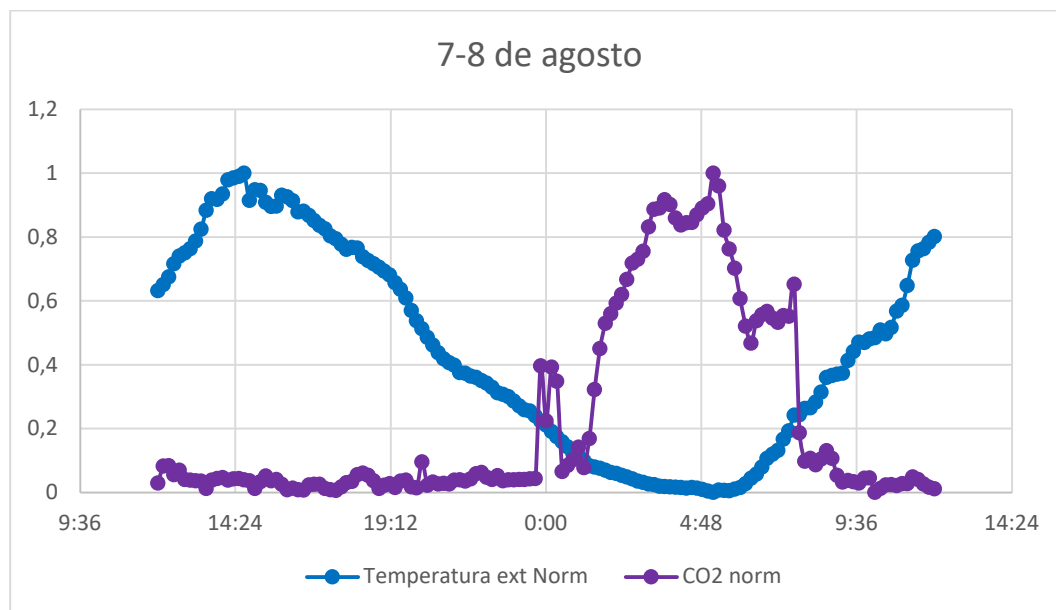


Figura 4-22 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en agosto normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,751
R ² ajustado	0,561
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,751

Tabla 5 Correlaciones agosto

En el episodio correspondiente al 7-8 de agosto se observa un patrón de acumulación similar al descrito en el mes anterior. Durante el periodo diurno las concentraciones de CO₂ se mantienen próximas a los valores del aire exterior (400-450 ppm), lo que indica una ventilación adecuada del compartimento.

Durante la noche la concentración aumenta progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a 1400 ppm. El crecimiento presenta varias fases con diferente pendiente, lo que podría estar relacionado con variaciones en la ocupación del puente o con cambios puntuales en las condiciones de ventilación.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,751) indica una correlación inversa fuerte entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂. Este resultado refuerza la hipótesis de que la temperatura exterior influye indirectamente en la ventilación del puente.

En esta gráfica de la figura 4-23 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 970 ppm y 23,5°C.

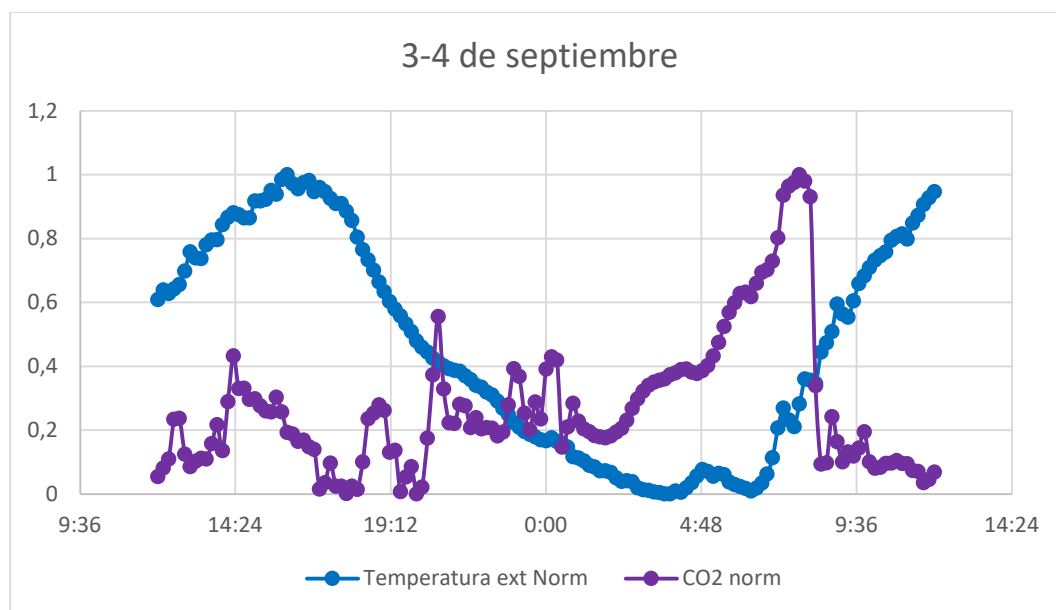


Figura 4-23 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en septiembre normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,516
R ² ajustado	0,262
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,516

Tabla 6 Correlaciones septiembre

En el episodio correspondiente al 3-4 de septiembre, el incremento de CO₂ es menos pronunciado que en los meses anteriores. Durante el día la concentración oscila entre aproximadamente 350 y 550 ppm, lo que sugiere una ventilación relativamente frecuente o una ocupación variable del puente.

Durante el periodo nocturno se observa un aumento progresivo del CO₂ hasta valores próximos a 950 ppm, indicando una acumulación moderada del gas en el interior del compartimento.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,516) refleja una correlación inversa moderada, lo que sugiere que la temperatura exterior continúa teniendo cierta influencia sobre la acumulación de CO₂, aunque menos marcada que en los meses estivales.

En esta gráfica de la figura 4-24 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 1300 ppm y 22°C.

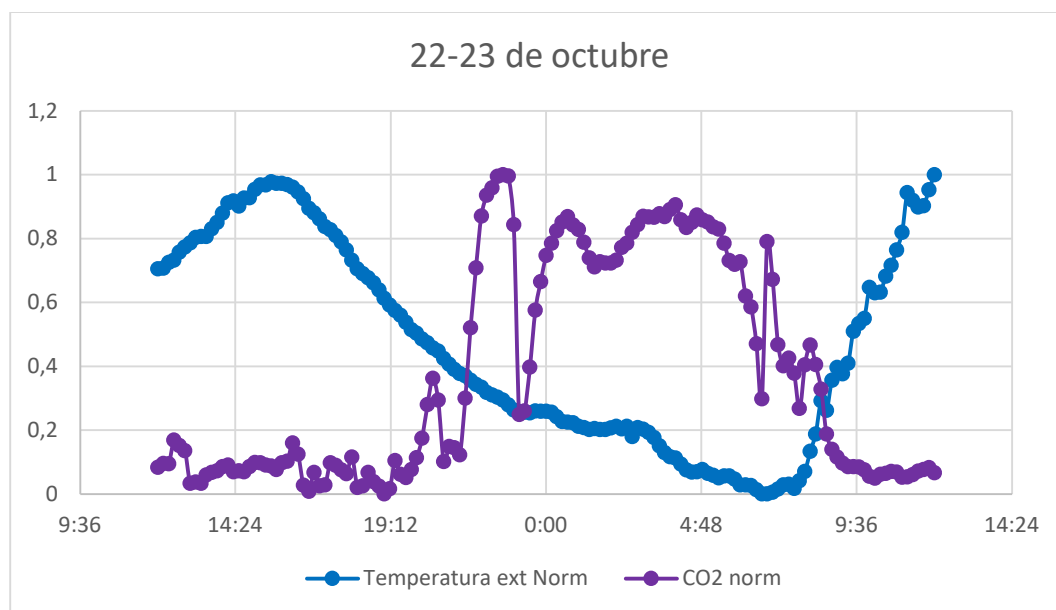


Figura 4-24 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en octubre normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,789
R ² ajustado	0,621
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,789

Tabla 7 Correlaciones octubre

En el episodio correspondiente al 22-23 de octubre se observa nuevamente un proceso de acumulación nocturna del CO₂, alcanzándose concentraciones cercanas a 1300 ppm.

La evolución de ambas variables muestra una relación claramente inversa: mientras la temperatura exterior desciende durante la noche, la concentración de CO₂ aumenta progresivamente en el interior del puente.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,789) indica una correlación inversa fuerte entre ambas variables, lo que sugiere que en este periodo la temperatura exterior tiene una influencia significativa sobre las condiciones de ventilación del compartimento.

En esta gráfica de la figura 4-25 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 850 ppm y 24,5°C.

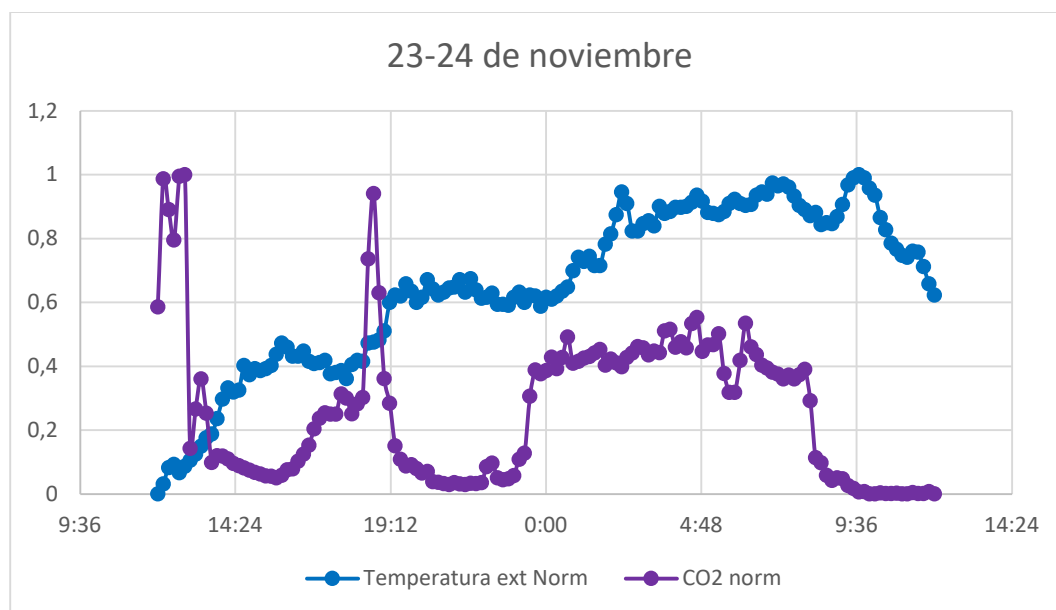


Figura 4-25 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en noviembre normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,099
R ² ajustado	0,010
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,099

Tabla 8 Correlaciones noviembre

En el episodio correspondiente al 23-24 de noviembre el comportamiento de las variables muestra una relación menos clara que en los meses anteriores. Aunque se observan variaciones en la concentración de CO₂, estas no siguen una tendencia claramente asociada a los cambios de temperatura exterior.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,099) indica una correlación prácticamente nula entre ambas variables. Esto sugiere que, en este caso, la evolución de la concentración de CO₂ está probablemente dominada por otros factores, como cambios en la ocupación del puente o episodios puntuales de ventilación.

Aparte, se muestra una subida aparente de la temperatura durante todo el día, la cual sigue ascendiendo por la noche. Esto, que puede llegar a ser un fallo del sensor de MeteoGalicia o algún suceso que se puede llegar a explicar.

En esta gráfica de la figura 4-26 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 2500 ppm y 15,5°C.

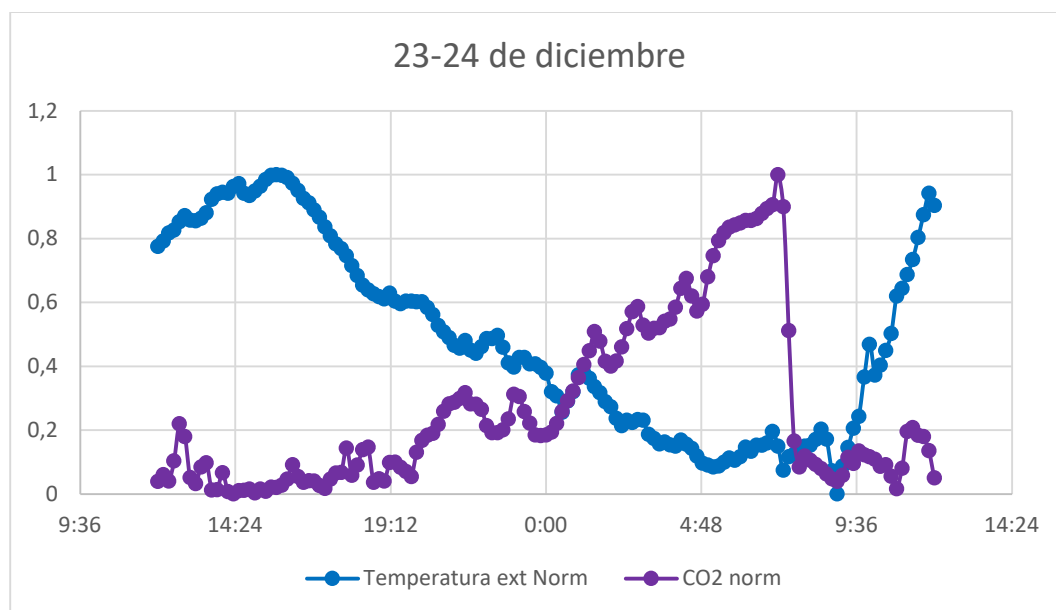


Figura 4-26 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en diciembre normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,697
R ² ajustado	0,482
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,697

Tabla 9 Correlaciones diciembre

En el episodio correspondiente al 23-24 de diciembre se observa un proceso de acumulación más intenso que en los meses anteriores, alcanzándose valores cercanos a 2500 ppm.

Durante este intervalo la temperatura exterior presenta una tendencia descendente, mientras que la concentración de CO₂ aumenta progresivamente en el interior del puente.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,697) indica una correlación inversa relativamente fuerte, lo que sugiere que en condiciones de baja temperatura exterior la ventilación natural del puente se reduce, favoreciendo la acumulación del gas.

En esta gráfica de la figura 4-27 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 3200 ppm y 15,2°C.

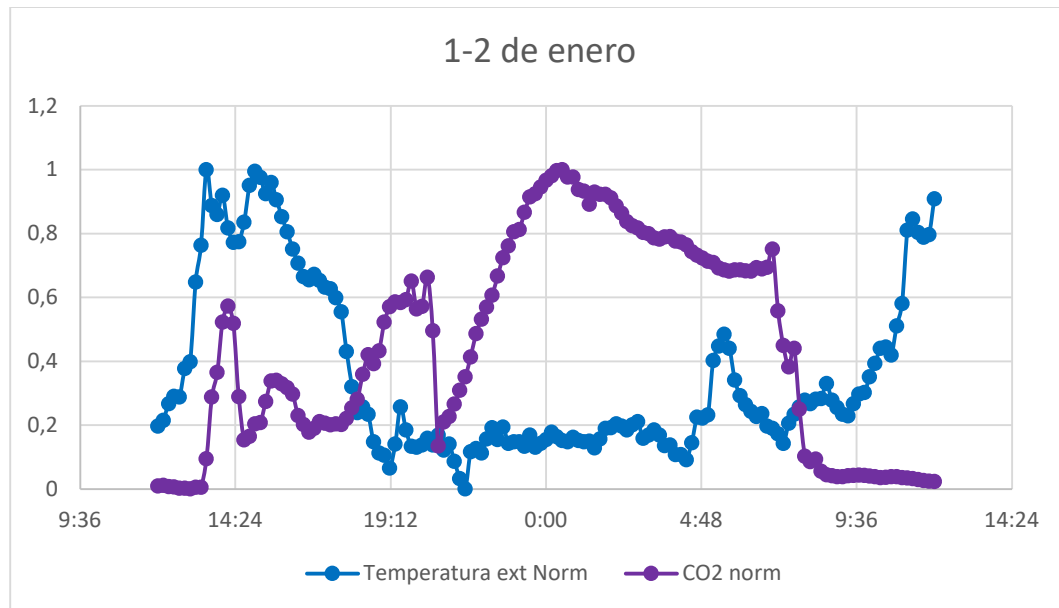


Figura 4-27 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en enero normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,505
R ² ajustado	0,249
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,505

Tabla 10 Correlaciones enero

En el episodio correspondiente al 1-2 de enero se observa una acumulación significativa de CO₂ durante el periodo nocturno, alcanzándose valores cercanos a 3200 ppm.

Este incremento coincide con temperaturas exteriores relativamente bajas y con que es periodo invernal, lo que podría favorecer que las ventanas del puente permanezcan cerradas durante el día y la noche, reduciendo la ventilación natural del compartimento.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,505) indica una correlación inversa moderada entre ambas variables.

En esta gráfica de la figura 4-28 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 2250 ppm y 14,5°C.

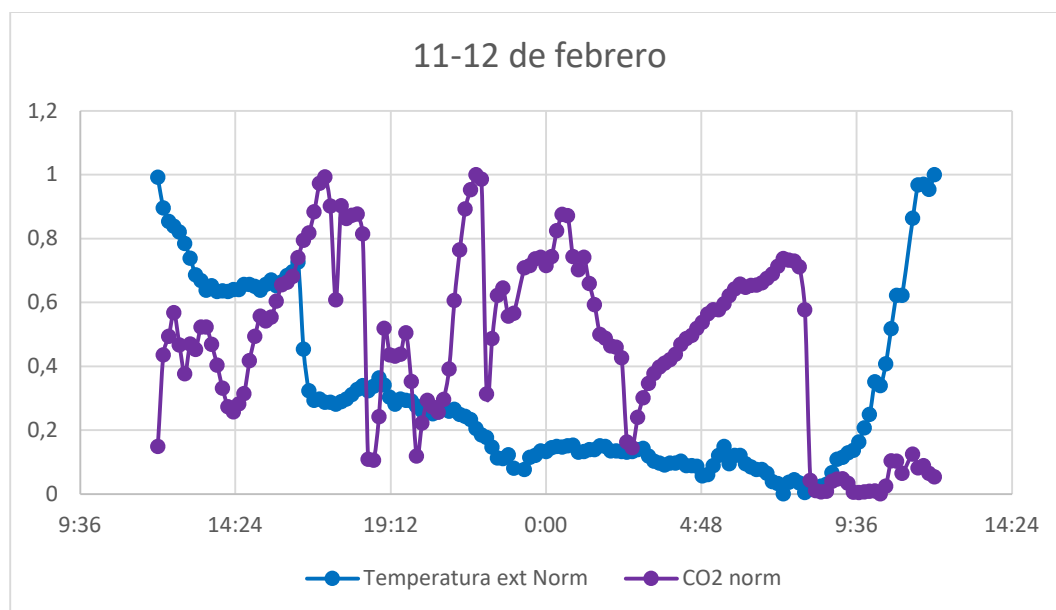


Figura 4-28 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en febrero normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,205
R ² ajustado	0,035
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,205

Tabla 11 Correlaciones febrero

En el episodio correspondiente al 11-12 de febrero la evolución de la concentración de CO₂ presenta variaciones notables, aunque la relación con la temperatura exterior es menos evidente debido a que estas variaciones se producen también por el día.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,205) indica una correlación débil, lo que sugiere que en este caso la dinámica del CO₂ podría estar más influida por cambios en la ocupación del puente o por episodios de ventilación puntuales que por la temperatura exterior.

En esta gráfica de la figura 4-29 el máximo de CO₂ y de temperatura fueron 3700 ppm y 16,5°C.

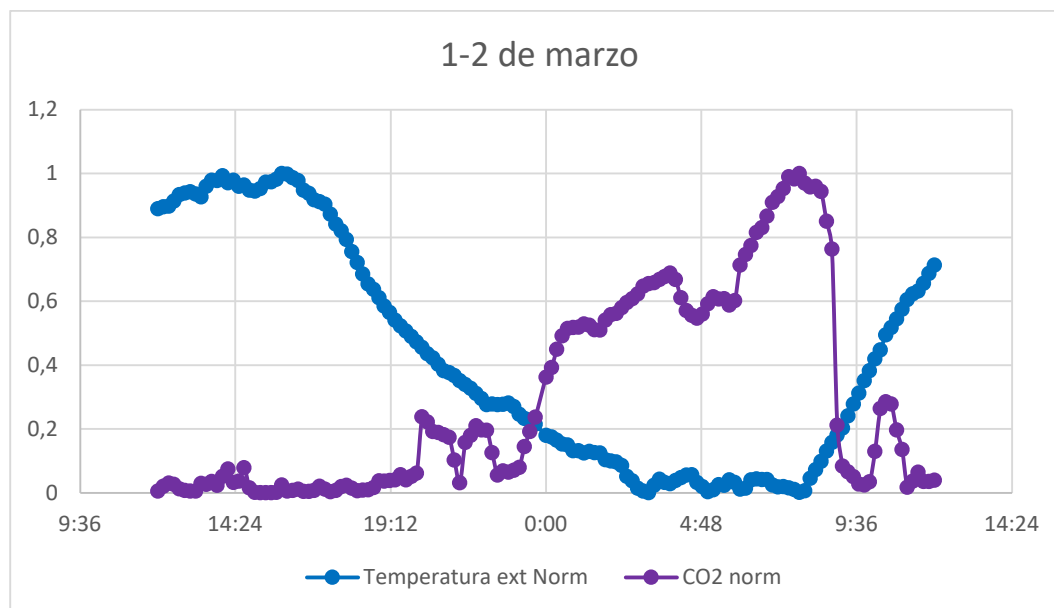


Figura 4-29 Gráfica Temperatura exterior y CO₂ en marzo normalizada

Parámetro	Valor de Correlación
Coefficiente de correlación múltiple	0,817
R ² ajustado	0,664
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,817

Tabla 12 Correlaciones Marzo

En el episodio correspondiente al 1-2 de marzo se observa uno de los mayores procesos de acumulación registrados durante el periodo de estudio, alcanzándose valores cercanos a 3700 ppm.

Durante este intervalo la temperatura exterior presenta una tendencia descendente mientras la concentración de CO₂ aumenta progresivamente en el interior del puente. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido (-0,817) indica una correlación inversa muy fuerte entre ambas variables.

Este resultado refuerza la hipótesis de que la temperatura exterior actúa como un factor indirecto que condiciona la ventilación del compartimento.

El comportamiento del CO₂ puede explicarse por el efecto indirecto de la temperatura exterior sobre las condiciones de ventilación del puente. Cuando la temperatura exterior es elevada, es más probable que las ventanas permanezcan abiertas, lo que favorece la ventilación natural del espacio y la renovación del aire interior. Por el contrario, cuando la temperatura exterior desciende, las ventanas suelen permanecer cerradas para mantener el confort térmico de la tripulación, lo que reduce la ventilación del compartimento y favorece la acumulación progresiva de dióxido de carbono.

Estos resultados sugieren que la temperatura exterior actúa como un factor indirecto que condiciona la ventilación del puente de gobierno, influyendo de forma significativa en la evolución de la concentración de dióxido de carbono en su interior.

4.6 Análisis de episodios de acumulación de CO₂ en el puente de gobierno.

Una vez analizada la relación entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂, se procedió a estudiar con mayor detalle los episodios de acumulación del gas en el interior del puente de gobierno. Para ello se seleccionaron diferentes intervalos temporales a lo largo del periodo de estudio en los que la concentración de CO₂ mostraba incrementos significativos y se calculó las tasas de incremento de CO₂ como se explica en el apartado 3.7 Estimación de generación por dispositivo.

Además, se incluyó una segunda estimación de la tasa de generación considerando un único ocupante en el puente de gobierno. Esta aproximación se introdujo tras consultar con la tripulación de la embarcación, quienes indicaron que, durante los periodos nocturnos, cuando la embarcación no se encuentra en navegación, lo habitual es que únicamente permanezca una persona en el puente. De este modo, se obtiene una estimación alternativa que permite evaluar la posible influencia de errores en la detección del número de dispositivos.

4.6.1 Análisis gráfico de los diferentes episodios

A continuación, se muestran las gráficas de variación de CO₂ y las tablas de cálculos de los diferentes episodios, con un breve análisis, para su posterior discusión:

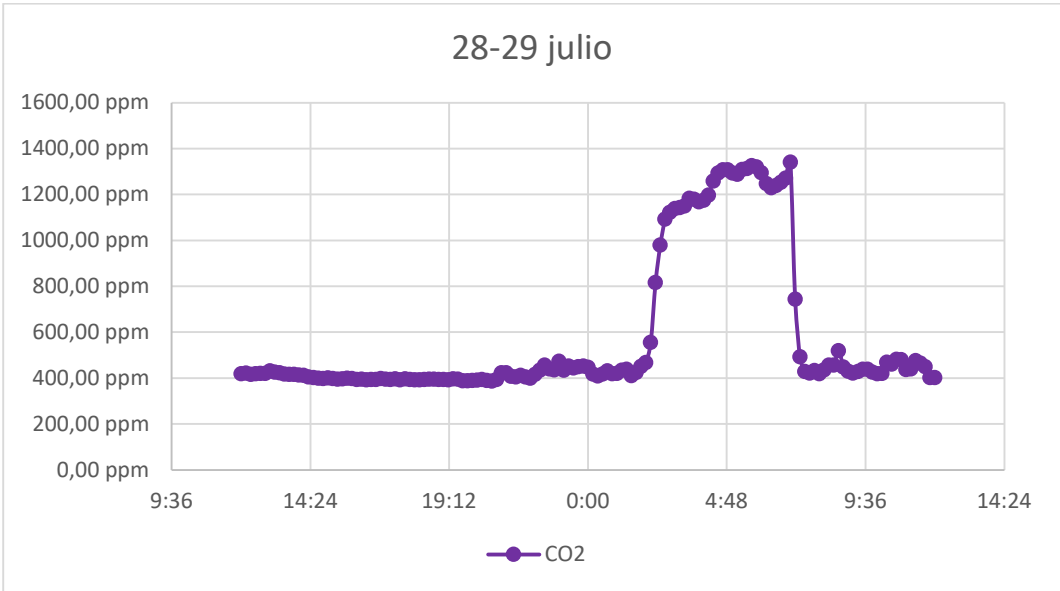


Figura 4-30 Gráfica variación CO₂ 28-29 de junio

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial= 410,5	1,666666667	157,8427046	443,538	0,10194008	0,286451625
	CO2 final= 1149,73					
	Tiempo inicial= 0,0625					
	Tiempo final= 0,131944444					
2º tramo:	Dispositivos= 2,81	1	48,4	137,94	0,031258333	0,08908625
	CO2 inicial= 1169,5					
	CO2 final= 1307,44					
	Tiempo inicial= 0,159722222					
3er tramo:	Tiempo final= 0,201388889	0,666666667	62,96697248	167,4	0,04066617	0,1081125
	Dispositivos= 2,85					
	CO2 inicial= 1229,9					
	CO2 final= 1341,5					
	Tiempo inicial= 0,263888889	2,658536585				
	Tiempo final= 0,291666667					
	Dispositivos= 2,85					
	Dispositivos= 2,85					

Figura 4-31 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 28-29 de junio

En el episodio correspondiente al 28-29 de junio se observa un episodio claro de acumulación de CO₂ durante el periodo nocturno. Durante las horas diurnas la concentración se mantiene relativamente estable, en valores cercanos a 400 ppm, lo que indica una situación próxima a las condiciones del aire exterior.

A partir de aproximadamente la 01:30, la concentración comienza a aumentar de forma progresiva hasta alcanzar valores cercanos a 1350 ppm. Este incremento se produce en varias fases de crecimiento continuo, lo que indica la acumulación del CO₂ generado por la respiración de los ocupantes en un volumen con ventilación limitada.

Posteriormente se produce una caída muy brusca de la concentración, que desciende rápidamente hasta valores cercanos a 450 ppm. Este comportamiento sugiere un episodio de ventilación repentina del compartimento, probablemente debido a la apertura de una puerta o ventana del puente.

Los tramos seleccionados en la tabla corresponden a los intervalos donde el incremento de concentración presenta una pendiente positiva relativamente continua, lo que permite estimar la tasa de generación de CO₂ en el interior del recinto.

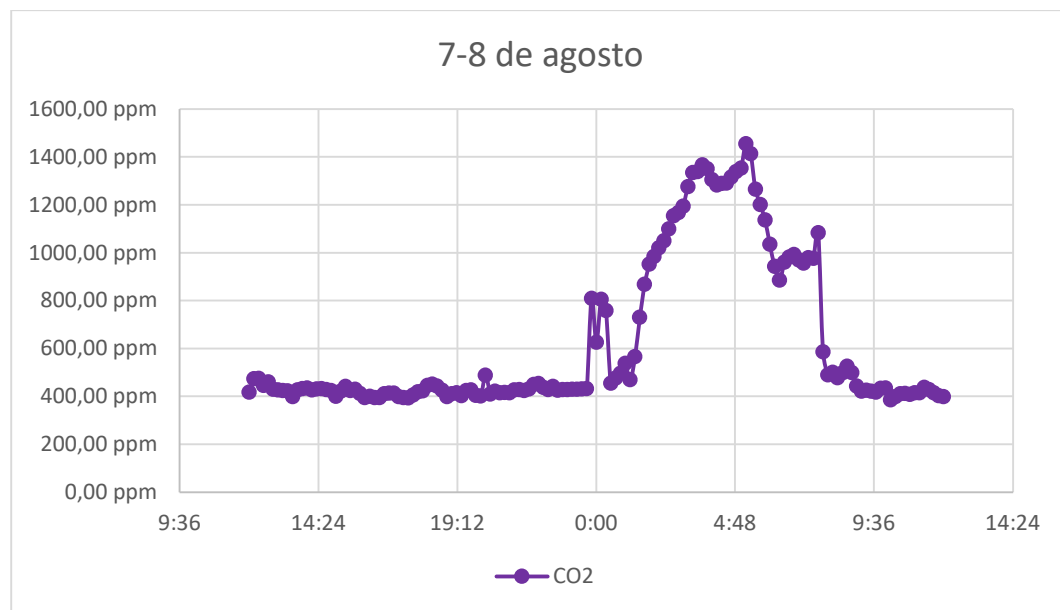


Figura 4-32 Gráfica variación CO₂ 7-8 de agosto

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo(V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo(V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial=	410,5				
	CO2 final=	1149,73				
	Tiempo inicial=	0,0625				
	Tiempo final=	0,131944444				
	Dispositivos=	2,81				
		0,5	103,14	680,7	0,066608902	0,43961875
2º tramo:	CO2 inicial=	1169,5				
	CO2 final=	1307,44				
	Tiempo inicial=	0,159722222				
	Tiempo final=	0,201388889				
	Dispositivos=	2,85				
		2,5	205,98	359,24	0,133026995	0,232009167
3er tramo:	CO2 inicial=	1229,9				
	CO2 final=	1341,5				
	Tiempo inicial=	0,263888889				
	Tiempo final=	0,291666667				
	Dispositivos=	2,658536585				
		0,67	149,65	248,1	0,096647421	0,16023125
4º tramo:	CO2 inicial=	886,2				
	CO2 final=	1083,9				
	Tiempo inicial=	0,263888889				
	Tiempo final=	0,319444444				
	Dispositivos=	2,5				
		0,67	59,31	148,28	0,038304375	0,095760938

Figura 4-33 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 7-8 de agosto

En el episodio correspondiente al 7-8 de agosto se observa un comportamiento similar al descrito en julio. Durante el periodo diurno las concentraciones se mantienen cercanas a 400-450 ppm, indicando una situación de ventilación suficiente o una baja ocupación del puente.

Durante la noche la concentración comienza a incrementarse de forma progresiva, alcanzando valores cercanos a 1400 ppm. La evolución de la curva presenta varias fases de crecimiento con distinta

pendiente, lo que puede indicar variaciones en la ocupación o en las condiciones de ventilación del compartimento.

Tras alcanzar el máximo, se observa nuevamente una reducción rápida de la concentración, que vuelve a valores próximos al nivel exterior. Este comportamiento confirma la existencia de episodios de ventilación puntuales que provocan la renovación rápida del aire interior.

Los distintos tramos analizados en la tabla reflejan estas fases de crecimiento de la concentración, permitiendo estimar la tasa de generación de CO₂ en condiciones relativamente estables.

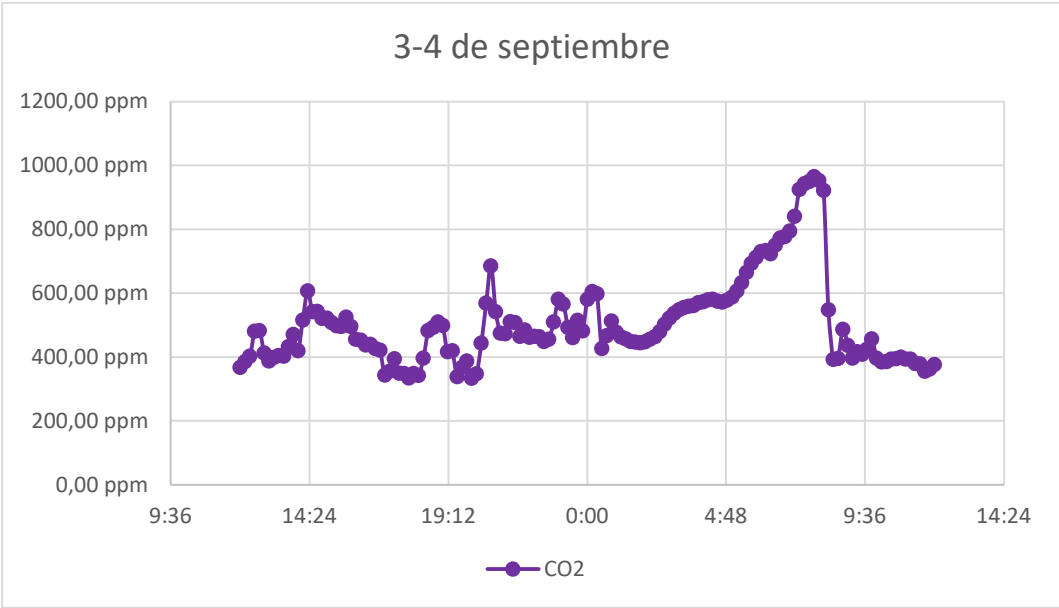


Figura 4-34 Gráfica variación CO₂ 3-4 de septiembre

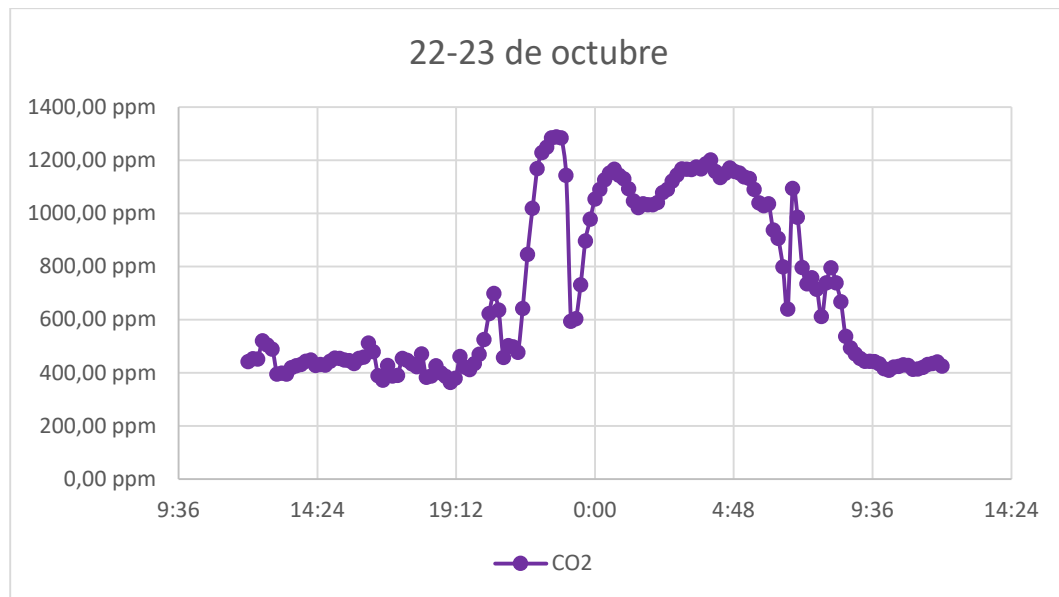
		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo(V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo0(V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO ₂ inicial= 455	2,166666667	21,6869165	58,10769231	0,014006134	0,037527885
	CO ₂ final= 580,9					
	Tiempo inicial= 0,090277778					
	Tiempo final= 0,180555556					
2º tramo:	Dispositivos= 2,679389313	3,166666667	39,90979213	124,3263158	0,025775074	0,080294079
	CO ₂ inicial= 571,9					
	CO ₂ final= 965,6					
	Tiempo inicial= 0,194444444					
	Tiempo final= 0,326388889					
	Dispositivos= 3,115183246					

Figura 4-35 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 3-4 de septiembre

En el episodio correspondiente al 3-4 de septiembre se observa un incremento de la concentración de CO₂ menos pronunciado que en los casos anteriores. Durante el día la concentración presenta fluctuaciones moderadas entre aproximadamente 350 y 550 ppm, lo que sugiere una ventilación más frecuente o una ocupación variable del puente.

Durante el periodo nocturno se produce un aumento progresivo del CO₂ hasta valores cercanos a 950 ppm. Aunque este incremento es menor que en otros episodios analizados, sigue reflejando un proceso de acumulación de CO₂ en un espacio con ventilación limitada.

Tras alcanzar el máximo se observa nuevamente una caída rápida de la concentración, lo que indica la renovación del aire interior. Los tramos seleccionados en la tabla corresponden a los periodos donde la pendiente de la concentración es positiva y relativamente constante.

Figura 4-36 Gráfica variación CO₂ 22-23 de octubre

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial=	477	1,333333333	266,282027	608,175	0,171973809
	CO2 final=	1287,9				
	Tiempo inicial=	0,888888889				
	Tiempo final=	0,944444444				
	Dispositivos=	2,283950617				
2º tramo:	CO2 inicial=	593,8	1,833333333	78,38735178	292,3636364	0,050625165
	CO2 final=	1129,8				
	Tiempo inicial=	0,965277778				
	Tiempo final=	0,041666667				
	Dispositivos=	3,72972973				

Figura 4-37 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 22-23 de octubre

En el episodio correspondiente al 22-23 de octubre, durante las horas diurnas las concentraciones se mantienen próximas a 400-450 ppm, con pequeñas fluctuaciones.

A partir del periodo nocturno se produce un aumento rápido de la concentración, alcanzando valores superiores a 1200 ppm. La evolución muestra una fase inicial de crecimiento rápido seguida de una zona de relativa estabilización en torno a 1100-1200 ppm, lo que podría indicar la presencia de una ventilación natural mínima que limita el incremento del CO₂.

Posteriormente la concentración desciende de forma abrupta hasta valores cercanos al nivel exterior, evidenciando nuevamente un episodio de ventilación repentina del compartimento.

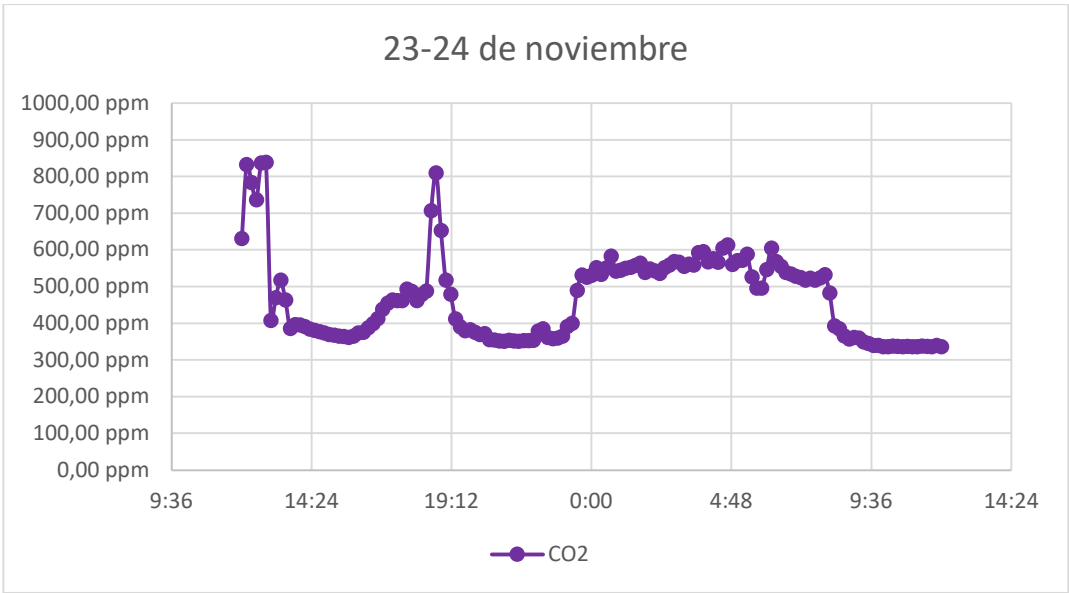


Figura 4-38 Gráfica variación CO₂ 23-24 de noviembre

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial=	805,3	1,666666667	137,1614237	400,62	0,088583419
	CO2 final=	1473				
	Tiempo inicial=	0,993055556				
	Tiempo final=	0,0625				
	Dispositivos=	2,920792079				

Figura 4-39 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 23-24 de noviembre

En el episodio correspondiente al 23-24 de noviembre se observa un comportamiento ligeramente diferente respecto a los meses anteriores. Durante el día se registran algunos picos aislados de concentración que alcanzan valores cercanos a 800 ppm, lo que podría estar asociado a entradas puntuales de personal en el puente.

Durante la noche se observa un incremento moderado del CO₂ hasta valores próximos a 600 ppm, significativamente inferiores a los registrados en otros episodios analizados. Esto sugiere que durante este periodo pudo existir una ventilación más frecuente.

Tras el periodo de acumulación, la concentración vuelve a descender hasta valores cercanos al nivel exterior.

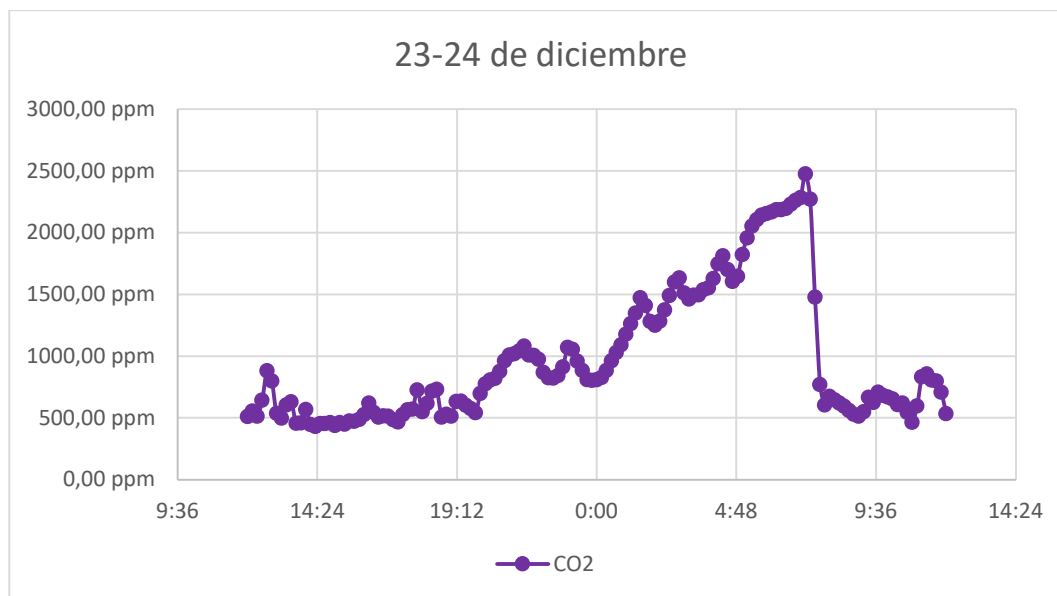


Figura 4-40 Gráfica variación CO₂ 23-24 de diciembre

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo(V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo(V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial=	895,3	1,666666667	76,34456604	400,62	0,049305866
	CO2 final=	1473				
	Tiempo inicial=	0,993055556				
	Tiempo final=	0,0625				
	Dispositivos=	5,247524752				
2º tramo:	CO2 inicial=	1250,3	0,833333333	83,66914286	459,36	0,054036321
	CO2 final=	1633,1				
	Tiempo inicial=	0,083333333				
	Tiempo final=	0,118055556				
	Dispositivos=	5,490196078				
3er tramo:	CO2 inicial=	1462,7	1,166666667	58,70039246	300,9428571	0,03791067
	CO2 final=	1813,8				
	Tiempo inicial=	0,131944444				
	Tiempo final=	0,180555556				
	Dispositivos=	5,126760563				
4º tramo:	CO2 inicial=	1604,5	2,666666667	47,0995614	250,125	0,030418467
	CO2 final=	2271,5				
	Tiempo inicial=	0,194444444				
	Tiempo final=	0,305555556				
	Dispositivos=	5,31059006				

Figura 4-41 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 23-24 de diciembre

El episodio registrado entre los días 23-24 de diciembre presenta una acumulación de CO₂ considerablemente mayor que en los meses anteriores. Durante el periodo nocturno la concentración aumenta de forma progresiva desde valores cercanos a 500 ppm hasta alcanzar aproximadamente 2400 ppm.

Este incremento prolongado indica un periodo relativamente largo de ventilación muy limitada, lo que permite que el CO₂ generado por los ocupantes se acumule en el interior del compartimento.

Tras alcanzar el valor máximo, se observa una caída brusca de la concentración hasta valores cercanos a 600 ppm, lo que nuevamente indica un episodio de ventilación rápida del puente.

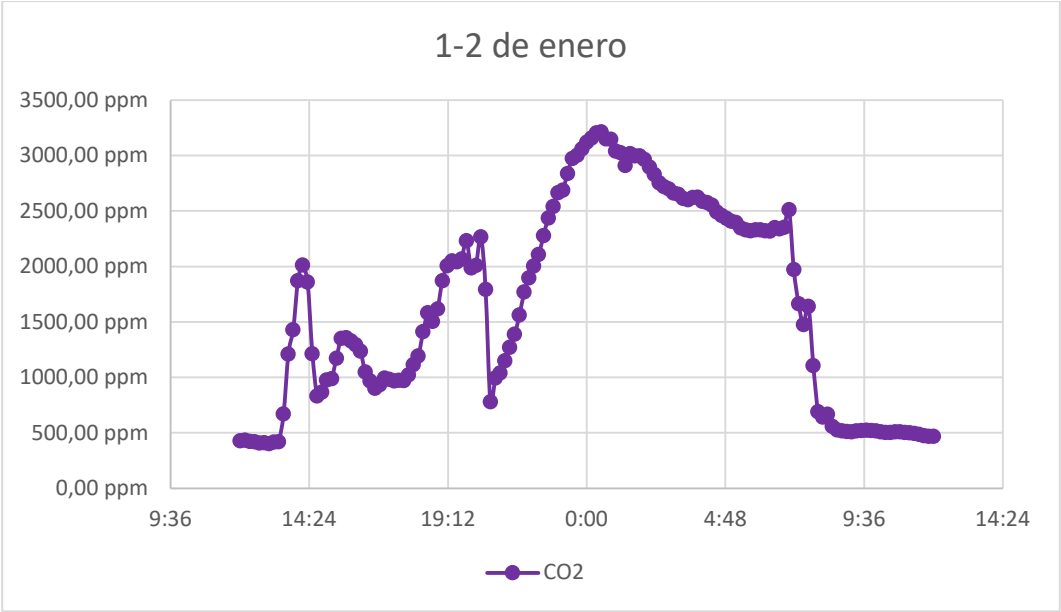


Figura 4-42 Gráfica variación CO₂ 1-2 de enero

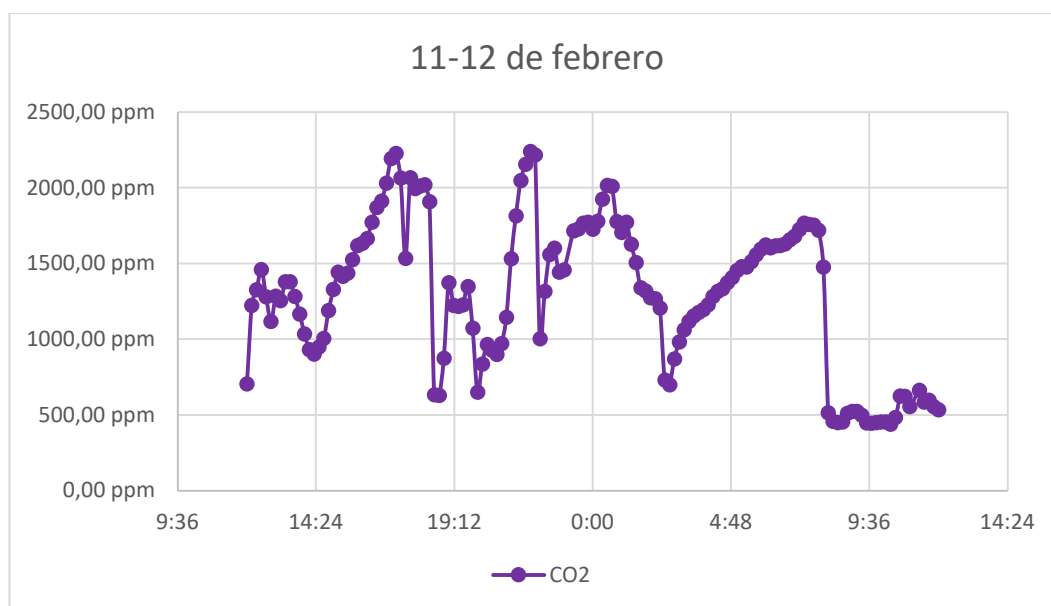
			Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo(V=15,5 m³)	L/h-dispositivo(V=15,5 m³)
1er tramo:	CO2 inicial= 782,3		3,833333333	215,8521739	634,1217391	0,139404529	0,409536957
	CO2 final= 3213,1						
	Tiempo inicial= 0,861111111						
	Tiempo final= 0,020833333						
	Dispositivos= 2,937759336						

Figura 4-43 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 1-2 de enero

El episodio correspondiente al 1-2 de enero muestra uno de los incrementos más significativos de todo el conjunto de datos. Durante la noche la concentración de CO₂ aumenta progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a 3200 ppm.

La evolución de la curva muestra varias fases de crecimiento y pequeñas fluctuaciones intermedias, lo que podría estar asociado a cambios en la ocupación o a ventilaciones parciales del compartimento.

Finalmente se produce una reducción muy rápida de la concentración hasta valores próximos a 500 ppm, indicando una renovación completa del aire interior.

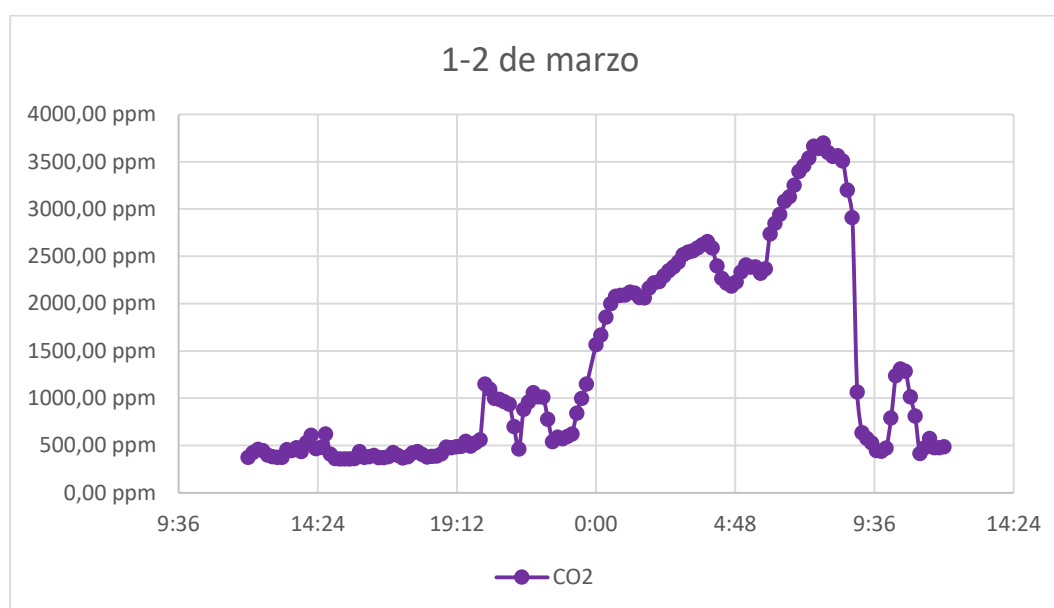
Figura 4-44 Gráfica variación CO₂ 11-12 de febrero

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo ($V=15,5 \text{ m}^3$)	L/h-dispositivo ($V=15,5 \text{ m}^3$)
1er tramo:	CO2 inicial= 699	4,666666667	83,40625	228,7714286	0,053866536	0,147748214
	CO2 final= 1766,6					
	Tiempo inicial= 0,111111111					
	Tiempo final= 0,305555556					
	Dispositivos= 2,742857143					

Figura 4-45 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 11-12 de febrero

En el episodio correspondiente al 11-12 de febrero se observa un comportamiento más irregular de la concentración de CO₂. Durante el periodo diurno y las primeras horas de la noche aparecen múltiples fluctuaciones entre aproximadamente 700 y 2200 ppm, lo que sugiere cambios frecuentes en la ventilación o en la ocupación del puente.

Posteriormente se produce una caída brusca de la concentración hasta valores cercanos a 500 ppm, indicando nuevamente un episodio de ventilación intensa del compartimento.

Figura 4-46 Gráfica variación CO₂ 1-2 de marzo

		Δt	ppm/dispositivo-h	ppm/h	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)	L/h-dispositivo (V=15,5 m ³)
1er tramo:	CO2 inicial= 541,9	5,333333333	206,4898144	396,73125	0,133358005	0,256222266
	CO2 final= 2657,8					
	Tiempo inicial= 0,9375					
	Tiempo final= 0,159722222					
	Dispositivos= 1,921311475					
2º tramo:	CO2 inicial= 2214,9	3,333333333	198,8307212	444,6966667	0,128411507	0,287199931
	CO2 final= 3697,222222					
	Tiempo inicial= 0,1875					
	Tiempo final= 0,326388889					
	Dispositivos= 2,23655914					

Figura 4-47 Tabla de cálculos de tasas de generación de CO₂ del 1-2 de marzo

El episodio registrado entre los días 1-2 de marzo presenta los valores máximos de concentración de todo el periodo analizado. Durante la noche la concentración aumenta progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a 3600-3700 ppm.

Este comportamiento indica un periodo prolongado de escasa ventilación del puente, lo que permite la acumulación continua del CO₂ generado en el interior del recinto.

Tras alcanzar el máximo se produce una reducción muy rápida de la concentración hasta valores próximos a 500 ppm, lo que nuevamente evidencia la apertura del compartimento o la entrada de aire exterior.

4.6.2 Comportamiento general de las concentraciones de CO₂

El análisis de las distintas gráficas de concentración de CO₂ a lo largo del periodo de estudio muestra un patrón de comportamiento muy similar en todos los meses analizados. En general, durante las horas diurnas la concentración de CO₂ se mantiene relativamente estable, con valores comprendidos aproximadamente entre 350 y 500 ppm, lo que corresponde a niveles cercanos a la concentración típica del aire exterior.

Sin embargo, durante las horas nocturnas se observa un comportamiento diferente. En primer lugar, la concentración comienza a aumentar de forma progresiva, seguida posteriormente por una fase de crecimiento más rápido. Finalmente, el CO₂ alcanza un valor máximo antes de producirse una disminución brusca de la concentración.

Tras esta caída, los niveles de CO₂ vuelven a situarse nuevamente en valores próximos a los del aire exterior, alrededor de 400–500 ppm. Este patrón de evolución —caracterizado por una fase de acumulación progresiva seguida de una reducción rápida— se repite de forma consistente en la mayoría de los episodios analizados.

Este comportamiento es característico de espacios interiores con ventilación limitada y ocupación humana, en los que el CO₂ generado por la respiración de los ocupantes se acumula durante periodos en los que no se produce renovación del aire.

4.6.3 Evidencia de episodios de ventilación

Uno de los rasgos más destacados observados en las gráficas es la presencia de descensos muy bruscos de la concentración de CO₂. Estas caídas se producen en intervalos de tiempo de aproximadamente 10 minutos en todos los casos y aparecen de forma recurrente en distintos meses del periodo de estudio.

Por ejemplo, en algunos episodios se observan descensos como los siguientes:

- en julio, la concentración desciende desde aproximadamente 1300 ppm hasta 450 ppm.
- en agosto, desde 1400 ppm hasta 500 ppm.
- en octubre, desde 1100 ppm hasta 450 ppm.
- en diciembre, desde aproximadamente 2400 ppm hasta 600 ppm.
- y en marzo, desde valores cercanos a 3600 ppm hasta 600 ppm.

Este tipo de descensos no puede explicarse únicamente por procesos de difusión natural del CO₂ en el interior del recinto. En un volumen reducido como el del puente de gobierno, estimado en aproximadamente 15,5 m³, la única explicación físicamente plausible es la presencia de episodios puntuales de ventilación.

Estos episodios pueden estar asociados a distintas situaciones operativas, como la apertura de puertas o ventanas del puente, la entrada o salida de personal o cualquier otro evento que provoque la renovación rápida del aire interior con aire exterior. Dado el reducido volumen del recinto, incluso una ventilación breve puede producir una renovación significativa del aire y, por tanto, una disminución rápida de la concentración de CO₂.

4.6.4 *Análisis de las tasas de generación*

A partir de los tramos de crecimiento de la concentración de CO₂ seleccionados en cada episodio, se calcularon las tasas de generación de CO₂ por dispositivo, expresadas en L/(h·dispositivo).

Los valores obtenidos se sitúan aproximadamente en el intervalo comprendido entre 0,03 y 0,4 L/(h·dispositivo), dependiendo del episodio y del tramo analizado. En términos generales, los valores obtenidos para cada mes se sitúan aproximadamente en los siguientes rangos:

- julio: entre aproximadamente 0,089 y 0,286 L/(h·dispositivo).
- agosto: entre aproximadamente 0,096 y 0,43 L/(h·dispositivo).
- octubre: entre aproximadamente 0,17 y 0,39 L/(h·dispositivo).
- diciembre: entre aproximadamente 0,03 y 0,35 L/(h·dispositivo).
- enero: alrededor de 0,40 L/(h·dispositivo).
- febrero: aproximadamente 0,15 L/(h·dispositivo).

Estos valores corresponden a la tasa aparente de generación de CO₂ en el interior del recinto, estimada a partir de la evolución observada de la concentración

4.6.5 *Comparación con valores fisiológicos de producción de CO₂*

Desde el punto de vista fisiológico, una persona en reposo genera aproximadamente entre 12 y 20 L/h de CO₂ [32]. Los valores obtenidos en este estudio son considerablemente menores que estas tasas fisiológicas.

No obstante, esta diferencia no implica necesariamente que los resultados obtenidos sean erróneos. Cabe destacar que el análisis se ha realizado considerando exclusivamente el volumen del puente, sin tener en cuenta la ausencia de una separación física entre este y la cubierta inferior. Esta condición favorece la comunicación de aire entre ambos espacios, de modo que el volumen efectivo real es superior al considerado inicialmente, lo que puede explicar las discrepancias observadas en los resultados.

Además, esta estimación está influida por diversos factores que afectan a la concentración observada, entre los que se incluyen:

- infiltraciones de aire exterior.
- episodios de ventilación parcial.
- mezcla no homogénea del aire interior.
- posibles incertidumbres en la detección del número de dispositivos.

Como consecuencia de estos factores, la tasa calculada a partir de la evolución de la concentración puede ser significativamente inferior a la producción real de CO₂ por parte de los ocupantes. Este tipo de discrepancia es habitual en estudios de campo realizados en condiciones reales de operación.

4.6.6 Variación estacional de las concentraciones máximas

Un aspecto relevante que se observa en las gráficas es que las concentraciones máximas alcanzadas durante los episodios de acumulación tienden a ser más elevadas durante los meses de invierno.

En particular, se registran valores máximos de aproximadamente:

- 2500 ppm en diciembre.
- 3200 ppm en enero.
- y hasta 3600 ppm en marzo.

Este incremento de las concentraciones máximas puede explicarse por una reducción de la ventilación natural del puente durante los meses más fríos. En estas condiciones es probable que las puertas y ventanas permanezcan cerradas durante periodos más prolongados para mantener el confort térmico en el interior del compartimento.

Como consecuencia, el aire interior se renueva con menor frecuencia, lo que favorece la acumulación progresiva del CO₂ generado por los ocupantes.

4.6.7 Comportamiento nocturno y ocupación del puente

Las gráficas muestran también un patrón claro de acumulación progresiva durante las horas nocturnas. En muchos episodios se observa una evolución típica en tres fases: al inicio de la noche, la concentración se sitúa alrededor de 400 ppm, posteriormente tras varias horas aumenta hasta valores cercanos a 800 ppm y por último, durante la madrugada puede alcanzar valores de 1200–1500 ppm o superiores.

Este comportamiento resulta coherente con la información proporcionada por la tripulación, según la cual durante los periodos nocturnos en los que la embarcación no se encuentra en navegación suele permanecer una única persona en el puente de gobierno.

Dado el volumen reducido del recinto y la ventilación limitada durante la noche, la presencia continuada de un ocupante puede provocar un aumento progresivo de la concentración de CO₂ a lo largo de varias horas.

4.6.8 Selección de los tramos utilizados

La selección de los tramos utilizados para calcular la tasa de generación de CO₂ se realizó identificando intervalos en los que la concentración presentaba un incremento progresivo y aproximadamente continuo. En particular, se escogieron tramos caracterizados por:

- una pendiente positiva de la concentración de CO₂.
- un crecimiento relativamente continuo.
- y la ausencia de caídas bruscas asociadas a episodios de ventilación.

Este procedimiento es habitual en estudios de ventilación interior y calidad del aire, donde se analizan periodos de acumulación del gas para estimar tasas de generación o parámetros de ventilación mediante métodos de balance de masa.

4.6.9 Incrementos rápidos de la concentración

En algunas gráficas se observan incrementos relativamente rápidos de la concentración de CO₂ en intervalos cortos de tiempo, especialmente en episodios registrados en meses como agosto, octubre o enero.

Este tipo de aumentos puede estar asociado a distintas situaciones operativas, como la entrada simultánea de varias personas en el puente, cambios en la actividad de los ocupantes o el cierre repentino del compartimento tras un periodo de ventilación.

En cualquier caso, el comportamiento observado es coherente con la dinámica esperada en un recinto de volumen reducido con ventilación limitada.

4.6.10 Influencia del volumen del puente de gobierno

El volumen interior del puente de gobierno se estimó en aproximadamente 15,5 m³, lo que constituye un espacio relativamente reducido. Esta característica tiene una influencia directa en la evolución de la concentración de CO₂.

En un volumen de estas dimensiones, incluso la presencia de un único ocupante puede provocar aumentos apreciables de la concentración en periodos de tiempo relativamente cortos si no se produce ventilación. De hecho, las curvas analizadas muestran que en ausencia de renovación del aire la concentración puede aumentar entre 800 y 1200 ppm en pocas horas, lo que resulta coherente con el volumen del recinto y con la ocupación observada.

4.6.11 Tiempo de exposición a concentraciones elevadas de CO₂

Con el objetivo de evaluar el posible impacto de la acumulación de dióxido de carbono sobre las condiciones ambientales del puente de gobierno, se analizó el tiempo durante el cual la concentración de CO₂ superó determinados umbrales de referencia. En particular, se consideró el valor de 1000 ppm, que habitualmente se emplea como límite orientativo para espacios interiores ocupados, al estar asociado al inicio de sensaciones de somnolencia y a una percepción de aire viciado.

La siguiente tabla muestra los tiempos de exposición a concentraciones de CO₂ superiores a 1000ppm en el puente de gobierno durante las horas nocturnas de los episodios estudiados:

Mes	Tiempo total >1000 ppm (h)
Julio	4,67
Agosto	5,34
Septiembre	0,00
Octubre	7,51
Noviembre	0,00
Diciembre	8,84
Enero	10,83
Febrero	9,67
Marzo	9,50

Tabla 13 Tiempo de exposición a concentraciones de CO₂ superiores a 1000 ppm en el puente de gobierno

Analizando los resultados de la tabla 4-12 podemos afirmar que en muchos casos la tripulación está expuesta a niveles de CO₂ perjudiciales para la salud durante un tiempo prolongado.

4.6.12 Recomendación de ventilación

A partir del análisis de las tasas de acumulación de CO₂ en los diferentes tramos seleccionados, se ha estimado el tiempo necesario de ventilación para que la tripulación no esté expuesta a niveles de CO₂ mayores de los recomendados:

Mes	Flujo tramos	Flujo medio noche	¿Cada cuánto es necesario ventilación?
Julio	443,54 ppm	249,63 ppm	2,32 horas
	137,94 ppm		
	157,41 ppm		
Agosto	680,7 ppm	359,55 ppm	1,6 horas
	359,24 ppm		
	248,1 ppm		
	148,8 ppm		
Septiembre	58,11 ppm	91,22 ppm	6,35 horas
	124,33 ppm		
Octubre	608,18 ppm	366,255 ppm	1,58 horas
	292,36 ppm		
Noviembre	400,62 ppm	400,62 ppm	1,45 horas
Diciembre	400,62 ppm	352,76 ppm	1,64 horas
	459,36 ppm		
	300,94 ppm		
	220,13 ppm		
Enero	634,12 ppm	634,12 ppm	0,91 horas
Febrero	228,77 ppm	228,77 ppm	2,55 horas
Marzo	396,73 ppm	420,72 ppm	1,38 horas
	444,7 ppm		
Total	335 ppm	335 ppm	2,2 horas

Tabla 14 Acumulación CO₂ con ventilación recomendada

Los resultados muestran una variabilidad estacional, con tiempos de acumulación más reducidos en meses como enero (0,91 h) y mayor necesidad de ventilación, y mayores en meses como septiembre (6,35 h), lo que puede estar asociado a diferencias en la ventilación natural y en las condiciones de operación del buque.

Considerando el valor medio global obtenido (2,2 horas), se propone como criterio operativo la realización de una ventilación completa del compartimento cada 2 horas, adoptando un enfoque conservador que garantice el control de las concentraciones de CO₂.

Asimismo, se ha observado que la apertura de las compuertas permite reducir la concentración hasta niveles exteriores en aproximadamente 10 minutos, lo que indica una renovación efectiva del aire interior de todo el compartimento.

En consecuencia, se recomienda realizar ventilaciones periódicas mediante la apertura de las compuertas durante intervalos de 10 minutos cada 2 horas, con el objetivo de mantener unas condiciones adecuadas de calidad del aire en el puente de gobierno.

4.7 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten identificar diversos patrones en la evolución de la concentración de dióxido de carbono en el interior del puente de la embarcación, así como los principales factores que influyen en su variación.

En primer lugar, el análisis temporal de las concentraciones de CO₂ pone de manifiesto un comportamiento característico de espacios interiores con ventilación limitada. Durante los periodos diurnos, los valores registrados se mantienen generalmente próximos a las concentraciones del aire exterior, situándose habitualmente entre 350 y 500 ppm. Sin embargo, durante el periodo nocturno se observa una acumulación progresiva del gas que puede alcanzar valores significativamente superiores.

Este comportamiento puede explicarse por la reducción de la ventilación natural del compartimento durante la noche, así como por la presencia continuada de personal en el interior del puente. De acuerdo con la información proporcionada por la dotación de la embarcación, durante los periodos nocturnos en los que la embarcación no se encuentra en navegación suele permanecer únicamente una persona en el puente, lo que concuerda con la evolución progresiva observada en las curvas de concentración.

Por otra parte, en numerosas ocasiones se observan descensos muy bruscos de la concentración de CO₂, con reducciones del orden de varios cientos de ppm en intervalos de tiempo muy cortos. Este comportamiento no puede explicarse únicamente por procesos de difusión natural del gas, por lo que resulta razonable atribuirlo a episodios puntuales de ventilación natural, como la apertura de puertas o ventanas o la entrada o salida de personal del compartimento.

En relación con la influencia de las condiciones ambientales exteriores, el análisis presentado en el apartado 4.5 muestra que en varios de los episodios analizados existe una correlación inversa entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂ en el interior del puente. No obstante, esta relación no debe interpretarse como una dependencia directa entre ambas variables, sino como un efecto indirecto asociado a las condiciones de ventilación del compartimento. En particular, temperaturas exteriores más bajas pueden favorecer que las ventanas permanezcan cerradas durante periodos prolongados, reduciendo la ventilación natural y facilitando la acumulación del gas.

Asimismo, el análisis de distintos episodios de acumulación realizado en el apartado 4.6 pone de manifiesto que las concentraciones máximas alcanzadas tienden a ser mayores durante los meses de invierno. En algunos casos se registran valores superiores a 3000 ppm, lo que indica condiciones de ventilación muy reducida durante periodos prolongados. Este comportamiento resulta coherente con el hecho de que, durante los meses más fríos, las aperturas del compartimento tienden a permanecer cerradas con mayor frecuencia.

Por otra parte, a partir del volumen estimado del puente y de la evolución temporal de las concentraciones de CO₂, se ha realizado una estimación de la tasa de generación del gas asociada a la presencia de personas en el compartimento. Los valores obtenidos presentan cierta variabilidad entre los diferentes episodios analizados, lo cual puede atribuirse a diversos factores, como cambios en la ocupación real del puente, pequeñas infiltraciones de aire exterior, episodios de ventilación no registrados o la propia incertidumbre asociada a los sensores utilizados.

En cualquier caso, los resultados obtenidos se sitúan dentro de un rango coherente para un estudio realizado en condiciones reales de operación, donde las condiciones de ventilación y ocupación no se encuentran completamente controladas.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la concentración de CO₂ en el interior del puente está determinada principalmente por tres factores: la ocupación del compartimento, las condiciones de ventilación y, de forma indirecta, las condiciones ambientales exteriores que influyen en los hábitos de ventilación del espacio.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado un análisis de la calidad del aire interior en el puente de gobierno de una lancha patrullera mediante el estudio de la evolución de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y su relación con diferentes variables ambientales y de ocupación. Para ello se han utilizado datos obtenidos mediante sensores instalados en el interior de la embarcación, que registran periódicamente la concentración de CO_2 , la temperatura interior, la humedad relativa y el número de dispositivos detectados en el compartimento.

El análisis de los datos ha permitido identificar el comportamiento general de la concentración de CO_2 en el interior del puente a lo largo del periodo de estudio. En condiciones diurnas, los valores registrados se mantienen generalmente próximos a los niveles del aire exterior, situándose en torno a 350–500 ppm. Sin embargo, durante periodos prolongados de ocupación y escasa ventilación, especialmente en horario nocturno, se observan episodios de acumulación progresiva de CO_2 en el interior del compartimento.

En diversos episodios analizados se ha observado un patrón característico consistente en un incremento gradual de la concentración de CO_2 a lo largo de varias horas, seguido en muchos casos por descensos bruscos asociados a la renovación del aire interior. Estas caídas rápidas de la concentración de CO_2 indican la existencia de episodios de ventilación natural, probablemente debidos a la apertura de puertas o ventanas del puente o a movimientos del personal que favorecen la renovación del aire.

Asimismo, el estudio ha permitido analizar la relación entre la concentración de CO_2 y el número de dispositivos detectados en el compartimento. Los resultados muestran una relación coherente entre ambas variables, observándose incrementos de la concentración de CO_2 asociados a un mayor número de dispositivos presentes, lo que confirma la influencia directa de la ocupación en la acumulación del gas en el interior del puente.

Otro aspecto relevante observado durante el análisis es la influencia de las condiciones estacionales en el comportamiento de la concentración de CO_2 . Durante los meses de invierno se registran concentraciones máximas significativamente más elevadas que en los meses de verano, concentraciones no solo durante la noche, sino también por el día, alcanzándose valores superiores a 3000 ppm en algunos episodios. Este comportamiento puede explicarse por una menor ventilación natural del compartimento durante los periodos de bajas temperaturas, en los que es más probable que puertas y ventanas permanezcan cerradas durante largos intervalos de tiempo.

A partir de distintos episodios representativos de acumulación de CO_2 se ha estimado la tasa de generación del gas asociada a la presencia de personas en el interior del compartimento. Para ello se ha utilizado el volumen estimado del puente y la variación temporal de la concentración de CO_2 durante

periodos de incremento continuo del gas. Los valores obtenidos representan tasas de generación aparentes dentro del volumen del compartimento, ya que en condiciones reales intervienen otros factores como infiltraciones de aire exterior, ventilación natural ocasional o posibles incertidumbres en la detección del número de dispositivos.

El análisis temporal de los episodios de acumulación muestra además que las concentraciones superiores a 1000 ppm se producen mayoritariamente durante periodos nocturnos, cuando el compartimento permanece cerrado y la ventilación natural es mínima. Durante estas horas, la presencia continuada de personal en el puente provoca una acumulación progresiva de CO₂, alcanzándose en algunos episodios valores considerablemente superiores a los recomendados para espacios interiores. Por el contrario, durante las primeras horas de la mañana se observa en la mayoría de las gráficas una disminución muy rápida de la concentración de CO₂, coincidiendo previsiblemente con la apertura de puertas o accesos al exterior y la renovación natural del aire del compartimento.

Este comportamiento sugiere que la ventilación del puente depende en gran medida de acciones puntuales de apertura al exterior, más que de un sistema de ventilación continuo. En este sentido, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia de la ventilación en espacios de volumen reducido con ocupación humana, donde pequeñas variaciones en la renovación del aire pueden producir cambios significativos en la concentración de CO₂.

A la vista de los resultados obtenidos, y considerando que las acumulaciones de CO₂ se producen principalmente durante las horas nocturnas, se recomienda la realización de ventilaciones periódicas del puente de gobierno durante la guardia nocturna durante 10 minutos, tiempo que se estima que tarda en renovarse el aire. En particular, la apertura temporal de puertas o accesos al exterior en uno o varios momentos de la noche permitiría renovar el aire del compartimento y reducir las concentraciones de CO₂ acumuladas, contribuyendo así a mantener unas condiciones ambientales más favorables para la tripulación. Este tipo de ventilación puntual resultara especialmente relevante en un compartimento de volumen reducido como el puente de gobierno, estimado en aproximadamente 15,5 m³.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten caracterizar el comportamiento de la calidad del aire interior en el puente de la embarcación analizada y evidencian la importancia de la ventilación en espacios cerrados de pequeño volumen. Este tipo de estudios resulta de interés para mejorar el conocimiento sobre las condiciones ambientales en espacios interiores de embarcaciones y puede contribuir al diseño de estrategias que permitan optimizar la ventilación y mejorar las condiciones de habitabilidad y trabajo de la tripulación.

Finalmente, el presente trabajo se enmarca dentro de una línea de investigación orientada al análisis de la calidad ambiental en espacios interiores de buques y embarcaciones. La disponibilidad de series temporales extensas de datos ambientales abre la puerta a futuros trabajos en los que se puedan aplicar técnicas de modelización y predicción que permitan anticipar episodios de acumulación de CO₂ y mejorar la gestión de la ventilación en estos espacios.

5.2 Líneas futuras

Durante el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado han surgido diversas propuestas de investigación que podrían abordarse en futuros estudios, con el objetivo de profundizar en el análisis de las variables ambientales en entornos marítimos.

- En primer lugar, se propone ampliar el estudio realizado en el patrullero *Corvo Mariño* mediante la instalación de un mayor número de sensores de CO₂ distribuidos en los distintos compartimentos del buque. Asimismo, resultaría de interés incorporar sensores adicionales que permitan detectar la apertura de puertas y ventanas, con el fin de evaluar de manera más precisa los efectos de la ventilación sobre la concentración de CO₂.
- En segundo lugar, se plantea el desarrollo de un sistema de monitorización basado en sensores de CO₂ que emita alertas cuando la concentración supere determinados umbrales, como por ejemplo

1000 ppm, contribuyendo así a la mejora de la calidad del aire interior y a la toma de decisiones en tiempo real.

- Por último, se propone la realización de un estudio análogo en un buque de mayores dimensiones, como el buque escuela *Juan Sebastián Elcano*, utilizando el mismo dispositivo de medición. En este caso, se sugiere la instalación de sensores tanto en la cámara de guardiamarinas como en las zonas de habitabilidad, lo que permitiría analizar el comportamiento de las variables ambientales en espacios de mayor volumen y comparar los resultados con los obtenidos en el presente trabajo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Cillero-Ares, P. Carrasco-Pena, P. Fernández-de-Córdoba, R. Peset, C. A. Reyes y A. V. Carpentier, «Predicción de la concentración de CO₂ con redes neuronales híbridas en lanchas de instrucción,» *DYNA*, vol. 1, nº 75, p. 101, 2026.
- [2] P. Crevillén Hernández, «Análisis de la calidad ambiental en el interior del patrullero “Tabarca” de la Armada Española,» Centro Universitario de la Defensa – Universidade de Vigo, Marín, 2024.
- [3] NASA, «Atmosphere,» [En línea]. Available: <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/atmosphere>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [4] Britannica, «Encyclopaedia Britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/atmosphere>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [5] N. G. M. laboratory, «Global Monitoring Laboratory,» [En línea]. Available: https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2_measurements.html. [Último acceso: 2 marzo 2026].
- [6] IPCC, «Chapter 2: Changing State of the Climate System,» de *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Cambridge, Cambridge University Press, 2021.
- [7] A. Persily, «Please Don't Blame Standard 62.1 for 1000 ppm CO₂,» *ASHRAE Journal*, vol. 63, nº 2, pp. 1-2, 2021.
- [8] VectorMine, «Causes of Air Pollution and Atmosphere Contamination Outline Diagram Set,» VectorMine, [En línea]. Available: <https://vectormine.com/item/causes-of-air-pollution-and-atmosphere-contamination-outline-diagram-set/>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [9] W. H. Organization, «WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,» Geneva, 2021.
- [10] Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios,» Ministerio de la Presidencia, Madrid, 2007.
- [11] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Evaluación de la calidad del aire en España 2023,» Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, 2024.
- [12] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Evaluación de la calidad del aire en España 2024,» Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, 2025.

- [13] Ministerio de Sanidad, «Calidad del aire interior,» Ministerio de Sanidad, [En línea]. Available: <https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/sueloHabitat/CAI/home.htm>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [14] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, «Calidad del ambiente interior,» INSST, [En línea]. Available: <https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-ergonomicos/calidad-del-ambiente-interior>. [Último acceso: Mar 2 2026].
- [15] Asociación Española de Normalización (UNE), «UNE 171330: Calidad ambiental en interiores,» Asociación Española de Normalización, Madrid, 2008.
- [16] European Environment Agency, «Europe's air quality status 2023,» Copenhagen, 2023.
- [17] Fiveable, «Air Pollution: Sources, Types & Effects,» Fiveable, 2026. [En línea]. Available: <https://fiveable.me/introduction-environmental-science/unit-8/air-pollution-sources-types-effects/study-guide/gX8FdL0EDXQ5039K>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [18] Sonia García-Ortega, «Indoor air quality in naturally ventilated dwellings in Spain,» Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, 2023.
- [19] F. e. a. Paul W., «Ventilation, indoor air quality, and health in homes undergoing weatherization,» 2017. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1111/ina.12325>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [20] Comunidad de Madrid, «Ventilación y enfermedades respiratorias,» Comunidad de Madrid, [En línea]. Available: <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/ventilacion-enfermedades-respiratorias>. [Último acceso: 2 marzo 2026].
- [21] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, «Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo,» BOE-A-1997-8669, Madrid, 1997.
- [22] Ministerio de la Presidencia, «Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el Documento Básico DB-HR Protección frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación,» BOE-A-2007-15820, Madrid, 2007.
- [23] PAEE, «Efectos del CO₂ en ambientes interiores no industriales,» PAEE, 2021. [En línea]. Available: <https://paee.es/efectos-del-co2-en-ambientes-interiores-no-industriales>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [24] World Health Organization, «WHO guidelines for Indoor Quality,» WHO, Copenhagen, 2009.
- [25] Macrofilter, «¿Qué es el síndrome del edificio enfermo?,» Macrofilter, 2023. [En línea]. Available: <https://filtrosindustrialesmacrofilter.com/que-es-el-sindrome-del-edificio-enfermo/?srsltid=AfmBOop7-pXHKj8c68R8aFEH28nyew89DXJ0QMLJEq-c9Jmm7iuzk-WW>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [26] Instituto de Salud Carlos III, «Impacto a corto plazo en España de la contaminación atmosférica sobre los ingresos hospitalarios urgentes por diferentes causas específicas y su estimación económica,» Instituto de Salud Carlos III. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Madrid, 2025.
- [27] Solectroshop, «Sensores de calidad del aire: parámetros, niveles y características,» Solectroshop, 2022. [En línea]. Available: <https://solectroshop.com/es/blog/sensores-de-calidad-del-aire-parametros-niveles-y-caracteristicas-n79?srsltid=AfmBOooXxrPV7OJEo6IrljZI7nZ7tqoYIS6XeKpyJjzQ2tNWGtsh65MA>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].

- [28] Isabel Marta Morales, Virgilio Blanco Acevedo y Almudena García Nieto., «Calidad del aire interior en edificios de uso público,» Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid., Madrid, 2010.
- [29] G. d. España, «Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas,» Jefatura del Estado, Madrid, 2013.
- [30] Sensirion AG, «Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module,» Sensirion AG, Stäfa, 2020.
- [31] A. Española, «Escuela Naval Militar,» Armada Española, [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/multimedialgaleria/prefLang-es/18escuelas--02enm-es>. [Último acceso: 2026 marzo 5].
- [32] MeteoGalicia, «Histórico de la rede meteorológica,» MeteoGalicia, 1 Julio 2024. [En línea]. Available: <https://www.meteogalicia.gal/web/observacion/rede-meteorologica/historico>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].
- [33] A. y. d. J. L. Persily, «Carbon dioxide generation rates for building occupants,» *Indoor Air*, vol. 27, nº 5, p. 868–879, 2017.
- [34] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [35] U.S. Environmental Protection Agency, «Criteria Air Pollutants,» EPA, [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>. [Último acceso: 2 Marzo 2026].

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

En cumplimiento del Sello Internacional de Calidad EUR-ACE y con el objetivo de evidenciar el sub-resultado de aprendizaje 3.1, relacionado con la capacidad de diseñar, analizar y desarrollar soluciones técnicas considerando aspectos sociales, de salud y seguridad, ambientales y económicos, en el presente trabajo se han tenido en cuenta diversas implicaciones asociadas al estudio realizado.

El Trabajo de Fin de Grado se centra en el análisis de la calidad del aire interior en el puente de gobierno de una embarcación mediante el estudio de la evolución de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y su relación con variables ambientales y de ocupación. Aunque el objetivo principal del trabajo es el análisis estadístico de los datos obtenidos mediante sensores, los resultados alcanzados presentan implicaciones relevantes desde el punto de vista social, sanitario, ambiental y operativo.

6.1 Implicaciones sociales y de salud

Desde el punto de vista social y de salud laboral, el estudio de la calidad del aire interior resulta especialmente relevante en espacios cerrados con ocupación continuada, como es el caso del puente de gobierno de una embarcación. La acumulación de CO₂ en espacios interiores puede provocar efectos como somnolencia, disminución de la capacidad de concentración, fatiga o malestar general, lo que puede afectar al bienestar y al rendimiento de las personas que desarrollan su actividad en estos entornos.

En el contexto de una embarcación, donde la tripulación debe mantener elevados niveles de atención y capacidad de reacción, la calidad del aire interior adquiere una importancia adicional. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que, en determinados periodos, especialmente durante las horas nocturnas, periodos invernales y en condiciones de ventilación limitada, la concentración de CO₂ puede incrementarse de forma significativa. La identificación de estos episodios permite proponer medidas sencillas de mejora, como la ventilación periódica del compartimento, contribuyendo así a mejorar las condiciones de trabajo y la seguridad de la tripulación.

6.2 Implicaciones ambientales

Desde el punto de vista ambiental, el trabajo contribuye al conocimiento de los procesos de acumulación de CO₂ en espacios interiores y de la influencia de la ventilación en la calidad del aire. Aunque el dióxido de carbono analizado en este estudio no se evalúa desde la perspectiva del cambio climático, su monitorización en interiores constituye una herramienta útil para evaluar la eficiencia de los procesos de ventilación y para optimizar el uso de los sistemas de renovación de aire.

La mejora de la ventilación en espacios interiores permite reducir la concentración de contaminantes y mejorar la calidad ambiental, lo que contribuye indirectamente a entornos más saludables y sostenibles. Además, el uso de sensores y sistemas de monitorización ambiental facilita la toma de decisiones basadas en datos reales, lo que puede favorecer estrategias de gestión más eficientes de los espacios ocupados.

6.3 Implicaciones económicas y operativas

Desde el punto de vista económico y operativo, el empleo de sensores de bajo coste para la monitorización continua de variables ambientales permite obtener información valiosa sobre el comportamiento de la calidad del aire sin necesidad de realizar inversiones elevadas en sistemas complejos de control ambiental.

El análisis de series temporales de datos ambientales, como el realizado en este trabajo, puede servir como base para optimizar estrategias de ventilación o para diseñar futuros sistemas de control automático

de la calidad del aire en embarcaciones. Esto podría contribuir a mejorar las condiciones ambientales de trabajo sin incrementar significativamente los costes operativos.

6.4 Consideraciones de los criterios de la memoria

Las implicaciones relacionadas con la calidad del aire interior, la ventilación y sus efectos sobre la salud y el bienestar de los ocupantes se han abordado a lo largo de diferentes apartados de la memoria, principalmente en los capítulos correspondientes al estado del arte, análisis de resultados y discusión de resultados, donde se analizan los efectos de la acumulación de CO₂ y la importancia de la ventilación en espacios interiores.

En conjunto, el presente trabajo pone de manifiesto la importancia de considerar aspectos relacionados con la salud, la seguridad y la calidad ambiental en el análisis de espacios interiores ocupados, contribuyendo así a una mejor comprensión de las condiciones ambientales en entornos de trabajo específicos como el puente de una embarcación.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En cumplimiento del Sello Internacional de Calidad EUR-ACE y con el objetivo de evidenciar el sub-resultado de aprendizaje 6.1, relacionado con la capacidad de recoger e interpretar datos y emitir juicios que impliquen una reflexión sobre aspectos éticos y sociales, en el presente anexo se recogen diversas consideraciones derivadas del trabajo desarrollado.

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el análisis de la calidad del aire interior en el puente de gobierno de una embarcación mediante el estudio de la evolución de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y su relación con variables ambientales y de ocupación. A partir de la monitorización de estos parámetros y del análisis estadístico de los datos recopilados, se han identificado distintos episodios de acumulación de CO₂ asociados a condiciones de ventilación limitada.

Desde una perspectiva ética, el análisis de las condiciones ambientales en espacios de trabajo tiene como objetivo contribuir a la mejora del bienestar, la seguridad y la salud de las personas que desarrollan su actividad en dichos entornos. En este sentido, el uso de tecnologías de monitorización ambiental permite identificar posibles situaciones de riesgo o incomodidad asociadas a una ventilación insuficiente, lo que facilita la adopción de medidas correctivas orientadas a mejorar las condiciones laborales.

Asimismo, el tratamiento de los datos recogidos mediante sensores implica la responsabilidad de realizar un análisis riguroso y objetivo de la información disponible. En el desarrollo del presente trabajo se ha procurado interpretar los resultados de forma prudente, teniendo en cuenta las limitaciones inherentes a los sistemas de medición, las posibles incertidumbres en los datos y las condiciones reales de funcionamiento del compartimento analizado.

Desde el punto de vista social, el estudio de la calidad del aire interior adquiere una relevancia especial en entornos donde la actividad humana requiere elevados niveles de atención y capacidad de respuesta, como es el caso del puente de gobierno de una embarcación. La identificación de episodios de acumulación de CO₂ permite proponer medidas sencillas orientadas a mejorar la ventilación del espacio, contribuyendo potencialmente a unas condiciones de trabajo más seguras y confortables para la tripulación.

Por otra parte, la utilización de sistemas de monitorización ambiental plantea también la necesidad de garantizar que la información recogida se emplee exclusivamente con fines técnicos y de mejora de las condiciones ambientales, evitando cualquier uso inadecuado de los datos relacionados con la presencia o actividad de las personas en el espacio monitorizado.

En conjunto, el presente trabajo pone de manifiesto la importancia de integrar consideraciones éticas y sociales en el desarrollo de estudios técnicos relacionados con el análisis de datos ambientales. La correcta interpretación de la información obtenida y su utilización para mejorar las condiciones de habitabilidad y trabajo contribuyen al desarrollo responsable de soluciones tecnológicas en el ámbito de la ingeniería.

ANEXO III: DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Para la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado se han empleado herramientas de inteligencia artificial como apoyo en tareas relacionadas con la redacción, revisión y mejora del texto, incluyendo la reformulación de párrafos, optimización de la cohesión y corrección del lenguaje.

El uso de estas herramientas se ha limitado exclusivamente a funciones de asistencia en la expresión escrita, con el objetivo de mejorar la claridad, calidad lingüística y presentación del documento. En ningún caso han sido utilizadas para la generación de contenido técnico original, ni para el desarrollo de los apartados correspondientes a la metodología, análisis de datos o resultados del trabajo.

Todo el contenido técnico, incluyendo el planteamiento del problema, el tratamiento de los datos, el análisis estadístico y la interpretación de los resultados, ha sido desarrollado íntegramente por el autor.

Asimismo, se ha realizado una revisión crítica de todos los textos en los que se ha contado con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial, garantizando su adecuación, coherencia y rigor académico.