



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Calidad del aire interior en viviendas:  
determinación de las necesidades de  
ventilación por concentración de CO<sub>2</sub>.**

**Autor:**

**Regueiro Tweed, Nicolás David**

**Tutor:**

**Tejero González, Ana**  
**Departamento de Ingeniería**  
**Energética y Fluidomecánica**

**Valladolid, junio 2022.**



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## Resumen

Dada la importancia de mantener el aire interior de las viviendas libre de contaminantes, se busca estudiar la evolución de la calidad del aire interior a partir de la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> y establecer una serie de recomendaciones para lograr una ventilación eficaz. Se realizaron varios ensayos utilizando diferentes tipos de sondas, entre ellas las de CO<sub>2</sub>, buscando aportar resultados relevantes sobre todo a nivel cualitativo, ya que cada vivienda tendrá sus particularidades. Los principales resultados indican que, en la mayoría de los casos, será suficiente con ventilar un total de entre 10 y 15 minutos al día, obteniendo mejores resultados al dividir este tiempo entre dos o más ventilaciones. Se concluye que el hecho de realizar una correcta ventilación de la vivienda resulta fundamental para mantener unos niveles de concentración de CO<sub>2</sub> óptimos para la salud y el confort humano, y para evitar que el consumo energético asociado a la apertura de ventanas sea excesivo.

## Palabras clave

Ventilación natural, viviendas, Calidad del Aire Interior (CAI), sondas, concentración de CO<sub>2</sub>.

## Abstract

Given the importance of maintaining the indoor air of our homes free of pollutants, the aim of this project is to study the evolution of the indoor air quality through the measurement of CO<sub>2</sub> concentrations and to establish a series of recommendations in order to achieve an effective ventilation. Several tests were carried out using different types of probes, including CO<sub>2</sub> probes, with the aim of providing relevant results, especially at a qualitative level, since each home has its own different characteristics. The main results indicate that, in most cases, ventilating between 10 and 15 minutes per day is sufficient and that better results are obtained if this time is divided between two or more ventilations. It is concluded that the correct ventilation of the home is essential in order to maintain optimal CO<sub>2</sub> concentration levels for human health and comfort, and also to prevent excessive energy consumption associated with opening the windows.

## Keywords

Natural ventilation, homes, Indoor Air Quality (IAQ), probes, CO<sub>2</sub> concentration.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. MEDIDA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> .....	4
1.2. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR EN VIVIENDAS.....	6
2. OBJETIVOS.....	9
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1. EQUIPOS DE MEDIDA.....	11
3.1.1. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> INTERIOR.....	12
3.1.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA Y DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIORES.....	18
3.1.3. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA Y DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EXTERIORES.....	21
3.1.4. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE.....	23
3.2. ENSAYOS REALIZADOS.....	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1. VENTILACIÓN UNILATERAL FRENTE A VENTILACIÓN CRUZADA. TIEMPO NECESARIO PARA LA RENOVACIÓN DEL AIRE DE LA VIVIENDA.....	31
4.2. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE VENTILACIÓN.....	38
4.3. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> DURANTE LA NOCHE.....	46
4.4. AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN UNA ESTANCIA OCUPADA DE LA VIVIENDA CON LA PUERTA CERRADA.....	49
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	51
6. BIBLIOGRAFÍA.....	53
7. ANEXO: TABLAS DE OCUPACIÓN DE LA VIVIENDA.....	55



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Powerbox (arriba) y Testo 454 logger (abajo) acoplados.....	12
Figura 2. Testo 350 XL (unidad de control). .....	12
Figura 3. Sonda CO <sub>2</sub> . .....	13
Figura 4. Conexión del equipo de medición de la concentración de CO <sub>2</sub> .....	15
Figura 5. Pestaña de “Configuración“ del programa easyEmission.....	16
Figura 6. Pestaña de “Medición online” del programa easyEmission. ....	16
Figura 7. Sonda 175 H1.....	18
Figura 8. Pestaña de “Seleccionar instrumento” del programa Comfort Software Basic 5.0.....	19
Figura 9. Pestaña de "Analizar datos de medición" del programa Comfort Software Basic 5.0.....	20
Figura 10. Sonda IAQ (a la izquierda) y data logger (a la derecha).....	21
Figura 11. Programa Comfort Software X35.....	22
Figura 12. Sonda de molinete (a la izquierda) y data logger (a la derecha)....	23
Figura 13. Colocación de la sonda de molinete. ....	24
Figura 14. Situación de la vivienda. ....	25
Figura 15. Distribución y orientación de la vivienda. ....	26
Figura 16. Colocación de las sondas de CO <sub>2</sub> durante las mediciones. ....	27
Figura 17. Rosa de los vientos de Valladolid (IDAE, 2010). ....	29
Figura 18. Patrón de flujo de aire con ventilación cruzada (izquierda) y con ventilación unilateral (derecha). Fuente: GIR de Termotecnia de la Universidad de Valladolid.....	31
Figura 19. Comparación entre ventilación unilateral y ventilación cruzada de una estancia.....	32
Figura 20. Comparación entre ventilación unilateral, ventilación cruzada y ventilación de toda la casa. ....	34
Figura 21. Efecto que tiene la concentración de CO <sub>2</sub> media inicial de la vivienda en el proceso de ventilación. ....	35
Figura 22. Evolución de la temperatura interior durante el proceso de ventilación.....	37
Figura 23. Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> en función del número de veces al día que se ventila. Días no comparables. ....	39
Figura 24. Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> en función del número de veces al día que se ventila. ....	40
Figura 25. Evolución virtual de la concentración de CO <sub>2</sub> en una academia en función del número de veces que se ventila. ....	42
Figura 26. Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> durante la noche.....	47
Figura 27. Aumento de la concentración de CO <sub>2</sub> en una estancia ocupada por una persona con la puerta cerrada. ....	49



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## 1. INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo surge tras una primera aproximación desarrollada por el Grupo de Investigación Reconocido de Termotecnia de la Universidad de Valladolid, en la que se abordaba brevemente cuándo, cómo y durante cuánto tiempo se debe ventilar, a fin de dar una serie de recomendaciones a la población para lograr una buena ventilación de la vivienda.

Siguiendo la misma idea, en este trabajo se han realizado una serie de ensayos en los que se ha medido la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para determinar las necesidades de renovación del aire de la vivienda y establecer unas pautas generales para ello.

La ventilación de las viviendas, además de renovar el aire interior eliminando en la medida de lo posible los contaminantes y reponiendo el contenido de oxígeno, evita el riesgo que existe de que aparezcan condensaciones si la humedad relativa es demasiado alta, ya que las personas expulsan  $\text{CO}_2$  y vapor de agua procedentes del aire exhalado, suponiendo un aumento tanto en la concentración de  $\text{CO}_2$  como en la humedad relativa del aire interior (Poirier, y otros, 2021) (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021).

En la mayoría de las viviendas, que solo cuentan con la opción de ventilación natural, la concentración de  $\text{CO}_2$  y la humedad relativa se regulan con la apertura de ventanas.

Se calcula que alrededor del 40% de la energía consumida mundialmente en 2014 se debió a los sistemas de ventilación y climatización de los edificios. Además, en muchos países desarrollados, los edificios suponen más del 30% de la emisión total de gases de efecto invernadero. Se conoce que la mayoría del consumo energético en edificios se debe a un pobre aislamiento térmico de los cerramientos exteriores, especialmente de las ventanas; las pérdidas de energía a través de ellas son bastante altas ya que son los elementos con peor coeficiente de aislamiento térmico. Esto se ha traducido en un creciente interés por la reducción de estos consumos mediante la mejora del aislamiento de las ventanas y el diseño de los llamados edificios pasivos. Estos edificios buscan mantener una adecuada calidad del aire interior además de reducir el consumo energético, esto último se consigue mediante unos cerramientos que minimicen las infiltraciones de aire y los puentes térmicos y mediante la incorporación de un sistema de recuperación de calor (Moreno-Rangel, Sharpe, McGill, & Musau, 2020) (Cuce & Cuce, 2016).





Una de las principales ventajas que se asocia a la ventilación natural de las viviendas es que contribuye a un entorno energéticamente sostenible al evitar el consumo de electricidad que implica el uso de sistemas de ventilación mecánica y aire acondicionado. Sin embargo, una de las desventajas de la ventilación natural es que, en climas calurosos, y especialmente en aquellos con mucha humedad, se encuentra limitada la capacidad que tiene de reducir la temperatura interior de la vivienda, resultando necesario combinarlo con un sistema de refrigeración de bajo consumo (Etheridge, 2011).

En todo caso, en viviendas con ventilación natural, la apertura de ventanas también suele afectar al consumo energético por la variación que se experimenta normalmente en la temperatura de la vivienda. De esta manera, en invierno suele ser conveniente ventilar durante las horas centrales del día, cuando la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es menor. Si durante el invierno se realiza una ventilación natural incorrecta, el consumo energético asociado será bastante elevado. En cambio, durante el verano es mejor aprovechar las primeras horas de la mañana y de la noche para ventilar. El objetivo es evitar un consumo de energía excesivo asociado a la apertura de ventanas.

Además, es interesante tener información de la calidad del aire exterior. La calidad de este aire se ve afectada tanto por la localización de la vivienda, ya que la presencia de contaminantes dependerá del nivel de tráfico en los alrededores y de la proximidad de industrias, actividad agrícola y otras fuentes naturales de contaminantes, como por la climatología, la cual determinará la dispersión y el transporte de los contaminantes. En base a estos datos, puede resultar conveniente modificar los momentos en que se ventila la vivienda para evitar las horas de mayor contaminación (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021).

Durante la ventilación natural, la renovación del aire se produce gracias al viento exterior y a la flotabilidad térmica. El diseño del edificio y la forma y la posición de las ventanas determinará la manera de ventilar. El viento genera una diferencia de presiones entre las diferentes fachadas del edificio, dando lugar a un flujo de aire dentro de la vivienda desde las aberturas a barlovento hacia las aberturas a sotavento. La diferencia de presiones se verá modificada con la forma del edificio, las construcciones colindantes y la dirección del viento. Por otro lado, la flotabilidad térmica se experimenta cuando la temperatura interior de la vivienda difiere de la exterior, dando lugar a una diferencia de densidad entre el aire interior y exterior. De esta forma, se origina una diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del edificio, que se traduce en un flujo de aire. Este flujo circulará desde las aberturas inferiores hacia las superiores en caso de que la temperatura interior sea superior a la



exterior (Hornero Pérez, 2013) (CEN/TC 156, 2017) (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021).

En definitiva, durante la ventilación natural de una vivienda, en la mayor parte de los casos, el aire entra por las ventanas situadas a barlovento y sale por la campana de la cocina, por los conductos de ventilación de los baños y por otras ventanas.



## 1.1. MEDIDA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>.

El aire es una mezcla gaseosa compuesta en un 21% por oxígeno y en un 78% por nitrógeno, el 1% restante lo constituyen otros gases entre los que se encuentra el dióxido de carbono. Por lo tanto, la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire se suele medir en partes por millón en volumen. El aire atmosférico contiene también un porcentaje variable de vapor de agua. En las viviendas, la composición del aire atmosférico se ve modificada por la actividad humana, que supone un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> y en la humedad relativa del aire y la incorporación de contaminantes como diversos Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), amoníaco y nanopartículas. Cuando el porcentaje de oxígeno en el aire desciende por debajo del 19,5% se considera insalubre; además, el contenido de CO<sub>2</sub> debe ser inferior al 0,25% (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021).

En el caso de las viviendas, las personas constituyen la principal fuente de contaminación por sus emisiones de CO<sub>2</sub>. Así pues, una ventilación insuficiente se traduce normalmente en una alta concentración de CO<sub>2</sub> y, por tanto, en una baja CAI. En consecuencia, resulta una buena práctica medir la concentración de CO<sub>2</sub> para determinar la CAI y las necesidades de renovación del aire en viviendas (AEN/CTN 171 Calidad ambiental de interiores., 2014) (Xiong, Lan, Lian, & De dear, 2020). De hecho, en los últimos dos años, dado que cuando una estancia no está bien ventilada el riesgo de una contaminación cruzada a través de aerosoles es muy alto, se ha utilizado la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> para estudiar y prevenir la transmisión de COVID-19 entre los ocupantes de una estancia (Aguilar, y otros, 2022).

Otra de las razones por las que resulta interesante y conveniente la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> en viviendas es porque resulta fácil y barata su medición, pudiendo obtener las sondas de CO<sub>2</sub> y un *data logger* a precios asequibles. De esta manera, si se realiza una medida de la disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> que se experimenta cuando un edificio queda vacío, se puede calcular el caudal de entrada de aire exterior debido al sistema de ventilación y a las infiltraciones. En función de si el sistema de ventilación está en funcionamiento, este método proporciona el caudal total de aire exterior aportado por el sistema o el caudal de aire exterior debido a las infiltraciones. Combinando este experimento con una medida de la diferencia de presiones, se puede determinar el nivel de hermeticidad de los cerramientos del edificio. Además, si se conoce la magnitud de la fuente de emisión de CO<sub>2</sub>, a partir de las mediciones realizadas en las que la concentración puede considerarse constante, es posible conocer el caudal de aire exterior necesario por persona



para mantener los niveles de CO<sub>2</sub> dentro del rango de valores buscado (Roulet & Foradini, 2002).

Junto a la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> es muy habitual utilizar la medida de la humedad relativa para determinar la CAI de forma más precisa. Sin embargo, existen muchos otros contaminantes presentes en el interior de las viviendas y que pueden tener un gran impacto en la salud humana. Hay estudios que han analizado estos contaminantes con el fin de hacer una selección de aquellos que consideran que deberían tenerse en cuenta para medir de una manera más fiable la CAI (Poirier, y otros, 2021) (Mentese, y otros, 2020).

Las sondas de CO<sub>2</sub> utilizadas en el presente estudio utilizan la tecnología de espectrometría infrarroja no dispersiva (NDIR), proporcionando unas medidas fiables para concentraciones de entre 1 y 10000 ppm (Testo, s.f.).



## 1.2. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR EN VIVIENDAS.

Dada la enorme cantidad de tiempo que se permanece en interiores, especialmente en el caso de la población urbana, la CAI es un aspecto muy importante a tener en cuenta ya que tiene un gran impacto en la salud pública, por lo menos el mismo impacto que tiene la calidad del aire exterior (Mentese, y otros, 2020). En las ciudades se destina aproximadamente entre el 80 y el 90% del tiempo a actividades en interior. Además, en 2018 ya se consideraba que el 55% de la población mundial residía en áreas urbanas, llegando casi al 75% en el caso de la población europea, y se espera que para 2050 estos porcentajes aumenten hasta el 68 y el 84%, respectivamente (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021) (United Nations, 2018).

Por otro lado, las personas pasamos diariamente en casa un tiempo igual o mayor que en otros espacios interiores como pueden ser oficinas o colegios. Aun así, la mayoría de los estudios realizados están orientados al mantenimiento de una buena CAI en los espacios de trabajo. Lo mismo sucede con los criterios de diseño y las normativas, teniendo que recurrir a las guías desarrolladas para edificios no residenciales para utilizar como referencia (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021).

Uno de los problemas habituales en viviendas con ventilación natural es que, a la hora de ventilar, se presta más importancia al confort higrotérmico que a la CAI, dando lugar a que el tiempo que permanecen las ventanas abiertas sea insuficiente para renovar el aire. Esto se debe muchas veces a la falta de información que se tiene respecto a la importancia de una buena CAI y a la cantidad de contaminantes que pueden estar presentes en las viviendas (Van Dongen, 2007). En definitiva, lo ideal sería mantener el confort higrotérmico junto con una buena CAI. Sin embargo, que la CAI sea buena muchas veces implica mayor tiempo de ventilación y, por tanto, un mayor consumo energético para mantener las condiciones higrotérmicas de confort.

Según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, una buena CAI implica que el aire se perciba como aire fresco para las personas que lo respiran, además de saber que la respiración de ese aire no supone un riesgo para la salud, con un porcentaje de oxígeno adecuado y porcentajes de los contaminantes dentro de los valores aceptables (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo).



En ambientes industriales puede ser suficiente con medir la concentración de las sustancias químicas que se sabe que están presentes en el ambiente, y a partir de dicha concentración determinar de forma aproximada la CAI. Sin embargo, para lugares en los que la actividad es de tipo no industrial, pueden encontrarse miles de contaminantes en concentraciones muy bajas, y es la combinación de todos ellos lo que puede dar lugar a que el aire se perciba por las personas como viciado o cargado. Esta sensación se produce gracias al olfato y al sentido químico (situado en las mucosas de la nariz y de los ojos) del ser humano, ya que son capaces de percibir una cantidad inmensa de contaminantes en el aire que se respira y permiten, en cierta medida, determinar la CAI (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo).

Como se ha explicado anteriormente, el nivel de concentración de CO<sub>2</sub> en la vivienda es buen indicador de la CAI, aunque a veces puede ser insuficiente. De hecho, será apropiado tomar como referencia la medida de CO<sub>2</sub> cuando la principal fuente contaminante sea la ocupación humana, pero en cualquier espacio y en particular en viviendas, podemos encontrarnos otras fuentes contaminantes que pueden adquirir relevancia como las que se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes contaminantes esperables en viviendas (Rey, San José, Tejero, Rey Hernández, & Esquivias, 2021).

Fuentes asociadas a la localización y construcción del edificio	Fuentes asociadas a la actividad humana	Fuentes asociadas a situaciones extraordinarias
Contaminación del propio aire exterior de renovación	Ocupación	Averías
Gases provenientes del terreno (radón, pesticidas, contaminantes transportados por el terreno)	Humo de tabaco	Tratamiento de plagas
Materiales, mobiliario y acabados del edificio	Cocinado de alimentos	Mantenimiento inadecuado de la vivienda
Sistemas de climatización y ventilación	Humedades	Condiciones de insalubridad
	Actividades de mantenimiento de la vivienda (limpieza, uso de ambientadores, pinturas, adhesivos, etc.)	



A pesar de los efectos perjudiciales que puede tener una baja CAI para la salud y el confort humano, en muchas ocasiones existe una falta de conocimiento al respecto. En particular, una alta concentración de CO<sub>2</sub> en la vivienda, además de ser un buen indicador de la presencia de otros muchos contaminantes, supone un riesgo para nuestra salud y afecta negativamente a la calidad del sueño, teniendo un impacto en nuestro día a día.

Hasta alcanzar concentraciones superiores a las 5000 ppm de CO<sub>2</sub> no se han observado efectos directos perjudiciales para la salud de los seres humanos, estos efectos pueden suponer desde una reducción en la capacidad física y alteraciones en el pH sanguíneo, hasta enfermedades cardiovasculares y respiratorias y dolores de cabeza. No obstante, para concentraciones por encima de las 1400-1500 ppm ya se considera como una calidad baja del aire en interiores, pudiendo provocar cansancio y falta de concentración (AEN/CTN 171 Calidad ambiental de interiores., 2014), (Aguilar, y otros, 2022).

Asimismo, se han realizado muchos ensayos analizando el impacto que tiene una alta concentración de CO<sub>2</sub> en la calidad del sueño. Los principales efectos son el aumento del número de veces y la facilidad con la que nos despertamos por la noche, la disminución de la eficiencia del sueño y el aumento del tiempo que tardamos en conciliar el sueño. Esto puede suponer a su vez un impacto en nuestro rendimiento al día siguiente debido a una falta de recuperación física y psicológica de nuestro cuerpo. Además, en habitaciones con ventilación natural durante el invierno y en habitaciones con aire acondicionado durante el verano, se suelen registrar bajos niveles de ventilación, que se traducen en altas concentraciones de CO<sub>2</sub>. Estos ensayos aseguran que la calidad del sueño se empieza a ver afectada negativamente para concentraciones ligeramente superiores a las 1000 ppm de CO<sub>2</sub> (ASHRAE, 2021) (Xiong, Lan, Lian, & De dear, 2020).

Por consiguiente, es muy importante la correcta ventilación de la vivienda. La medida de la concentración de CO<sub>2</sub> puede ser un recurso muy útil para alcanzar este objetivo sin olvidarse de la importancia de la eficiencia energética.



## 2. OBJETIVOS.

- Objetivos generales:
  - Obtener una idea de cómo evoluciona la calidad del aire interior en viviendas en función de la concentración de CO<sub>2</sub> medida.
  - Establecer una serie de recomendaciones para una ventilación eficiente de la vivienda.
  
- Objetivos específicos:
  - Estudiar la diferencia en la eficiencia del proceso de ventilación entre realizar una ventilación cruzada y una ventilación unilateral en una de las estancias de esta vivienda.
  - Analizar los factores de los que depende el tiempo necesario para renovar el aire de una o de varias estancias.
  - Obtener una estimación del tiempo que tarda en renovarse el aire de una determinada estancia de este caso particular, y también el aire de toda la vivienda.
  - Evaluar si, para reducir los picos de CO<sub>2</sub> en este caso concreto, resulta preferible ventilar más de una vez al día durante periodos de tiempo más cortos en vez de ventilar una sola vez al día.
  - Revisar los efectos que puede tener una alta concentración de CO<sub>2</sub> en la vivienda para nuestra salud y nuestro rendimiento en el día a día.
  - Evaluar los resultados obtenidos del caso particular para extraer recomendaciones generales para viviendas en general.





**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

### 3. METODOLOGÍA.

#### 3.1. EQUIPOS DE MEDIDA.

Los datos utilizados para los estudios se han obtenido mediante una serie de sondas empleadas para medir tanto la concentración de CO<sub>2</sub> como la temperatura y la humedad relativa en el interior de la vivienda. También se ha utilizado otro tipo de sonda para medir la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub> en el exterior. Además, en ciertos casos, se ha empleado una sonda de molinete para medir, durante el proceso de ventilación, la velocidad con la que circula el aire en la dirección perpendicular al plano de la ventana.

El equipo utilizado para la toma de datos nos permite registrar la concentración de CO<sub>2</sub> en una estancia en concreto a lo largo del tiempo.

En la Tabla 2 se resumen las características de las sondas empleadas en el presente estudio.

*Tabla 2. Principales características de las sondas utilizadas.*

Sonda Testo	Variable medida	Rango	Precisión	
Sonda de molinete Modelo 0635 9335	Velocidad del aire	0,25 - 20 m/s	± (0,1 m/s + 1,5 % del valor medio)	
Sonda 175 H1 Modelo 0572 1754	Temperatura seca	-20 - 55 °C	± 0,4 °C	Resolución: 0,1 °C
	Humedad relativa	0 - 100 %	±2 %	Resolución 0,1 %
Sonda IAQ Modelo 0632 1535 (Sonda IAQ)	Temperatura seca	0 - 50 °C	± 0,3 °C	
	Concentración de CO <sub>2</sub>	0 - 10000 ppm	± (75 ppm + 3 % del v.m.) (0 hasta + 5000 ppm) ± (150 ppm + 5 % del v.m.) (+ 5001 hasta + 10000 ppm)	
Sonda Testo Modelo 0632 1240 (Sonda CO <sub>2</sub> )	Concentración de CO <sub>2</sub>	0 - 10000 ppm	± (75 ppm + 3 % del v.m.) (0 hasta + 5000 ppm) ± (150 ppm + 5 % del v.m.) (+ 5001 hasta + 10000 ppm)	

### 3.1.1. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> INTERIOR.

Para la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior se ha hecho uso de los siguientes dispositivos:

- Powerbox (Figura 1) junto al cable de alimentación correspondiente.
- Testo 454 logger (Figura 2).
- Testo 350 XL (unidad de control) (Figura 2) junto al cable de alimentación correspondiente.
- Tres sondas de CO<sub>2</sub> (Figura 3) junto con sus cables para conectarlos al registrador correspondiente.
- Cable DATA para unir el Testo 454 logger con el Testo 350 XL.
- Cable RS232 - VGA macho junto al cable VGA hembra - USB para conectar el Testo 350 XL al ordenador.



Figura 1. Powerbox (arriba) y Testo 454 logger (abajo) acoplados.



Figura 2. Testo 350 XL (unidad de control).



Figura 3. Sonda CO<sub>2</sub>.

Los dispositivos mencionados anteriormente se conectan entre sí para poder leer desde el ordenador los datos registrados por las tres sondas, para ello se utiliza el *software* de Testo llamado *easyEmission*. Este es el único equipo de medida utilizado que debe permanecer conectado, tanto a la toma eléctrica para su funcionamiento, como al ordenador para poder registrar los valores medidos.

Para montar el equipo se empieza conectando a la corriente la unidad de control y el *powerbox* acoplado al *logger* mediante sus respectivos cables de alimentación. De esta manera, si los dispositivos llevan un tiempo sin utilizarse, se logrará que las baterías se carguen ligeramente antes de empezar a realizar medidas y evitar así posibles problemas a la hora de registrar los datos.

En el caso de la unidad de control, mientras se encuentre apagada se va cargando la batería como se indica en la pantalla del dispositivo; una vez encendida, la batería deja de cargarse y la unidad de control recibe la energía a través del cable de alimentación.

Tanto el *powerbox* como el *logger* disponen de unos LED que nos indican su estado (Testo Germany). En el caso del *powerbox*:

- LED rojo permanente o intermitente: error de funcionamiento.
- LED amarillo intermitente: cargando (batería baja).
- LED amarillo permanente: *powerbox* operativo y con modo de carga rápida activado.
- LED verde intermitente: cargando.
- LED verde permanente: *powerbox* operativo y modo de carga lenta para suministrar la energía necesaria para mantener el nivel de carga de la batería al máximo.

En el *logger* solamente se distingue entre rojo, amarillo y verde, que indican el nivel de carga de la batería de menor a mayor. La recarga de la batería del *logger* depende del *powerbox*, que es el dispositivo que le suministra la energía.



Es posible que durante las primeras medidas el *powerbox* y el *logger* no se encuentren totalmente cargados (no están los dos LED de color verde permanente); aun así, es posible la toma de datos siempre que no haya ningún LED de color rojo, en cuyo caso es posible que alguna de las sondas no este registrando datos.

Si a la hora de conectar el equipo al ordenador hay algún dispositivo que no se detecta o una sonda que no está registrando datos, se recomienda desconectar el equipo del ordenador y dejarlo conectado a la corriente durante un tiempo para volver a probar después. Lo normal es que las próximas veces que se monte el equipo para tomar medidas se acaben mostrando las dos luces en verde.

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para el montaje del equipo:

1. Enchufar a la corriente la unidad de control y el conjunto *powerbox-logger* con sus respectivos cables de alimentación.
2. Conectar cada una de las sondas al dispositivo correspondiente mediante sus respectivos cables.
3. Unir el *logger* y la unidad de control mediante el cable DATA.
4. Juntar el cable RS232 – VGA macho con el cable VGA hembra – USB, conectando el extremo RS232 a la unidad de control y dejando la conexión del extremo USB al ordenador para el último paso.
5. Encender el dispositivo Testo 454 *logger*.
6. Encender el dispositivo Testo 350 XL. En este momento se puede comprobar en la pantalla si se detectan el resto de los dispositivos conectados y si se están registrando los datos de las tres sondas (proceso explicado más adelante), de la misma forma que se puede comprobar al final del proceso desde la aplicación del ordenador.
7. Conectar el equipo al ordenador enchufando el cable USB.

En la Figura 4 se puede observar el equipo de medición ya conectado.



Figura 4. Conexión del equipo de medición de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Como se mencionaba en el paso número 6, antes de conectar el equipo al ordenador se puede comprobar en el dispositivo Testo 350 XL, dando al botón “OK”, si aparecen conectados los dispositivos “control\_1”, “testo 454 logger” y “powerbox”. Pulsando “OK” con el dispositivo “control\_1” marcado debería aparecer una medida de concentración de CO<sub>2</sub> correspondiente a la sonda 1, pulsando en “testo 454 logger” deberían aparecer los valores registrados por las sondas 2 y 3.

Una vez completados los pasos anteriores, se abre la aplicación de Testo easyEmission y en el primer menú se selecciona la opción “Medición en tiempo real con el analizador 350 S/M/XL”. Después se debe comprobar en la pestaña de “Configuración testo 350 S/M/XL” que aparecen los tres dispositivos conectados, como se puede ver en la Figura 5.

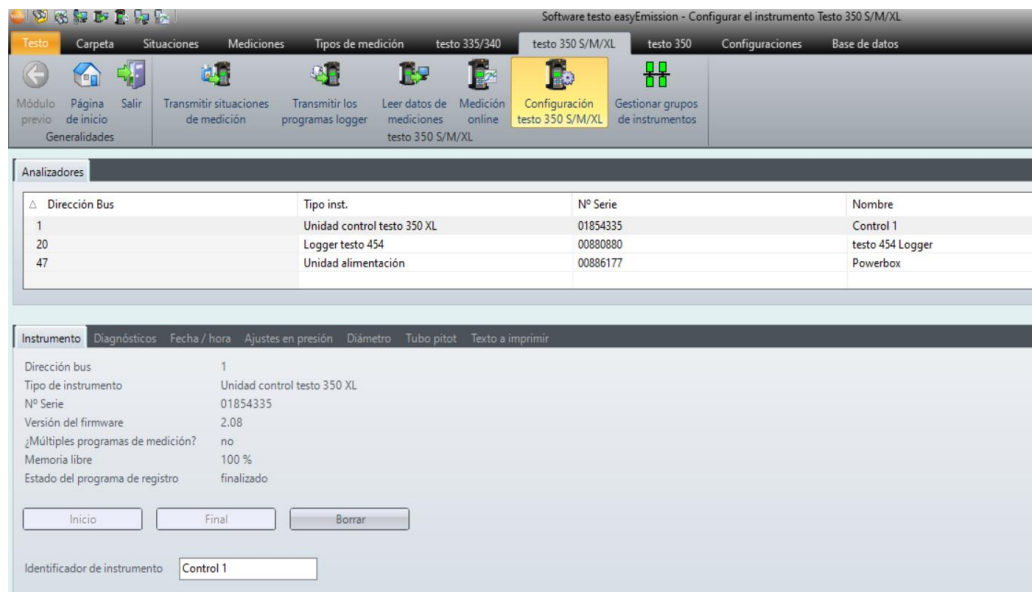


Figura 5. Pestaña de “Configuración” del programa easyEmission.

Ahora se vuelve a la pestaña “Medición online” y después de elegir el ciclo de medición se pulsa en el botón de “Inicio” (Figura 6). En el caso de que no se estén registrando los valores de las tres sondas, y suponiendo que ninguno de los LED se encuentre de color rojo, el problema puede deberse a que un cable este mal conectado y se deben comprobar las conexiones y repetir el proceso.

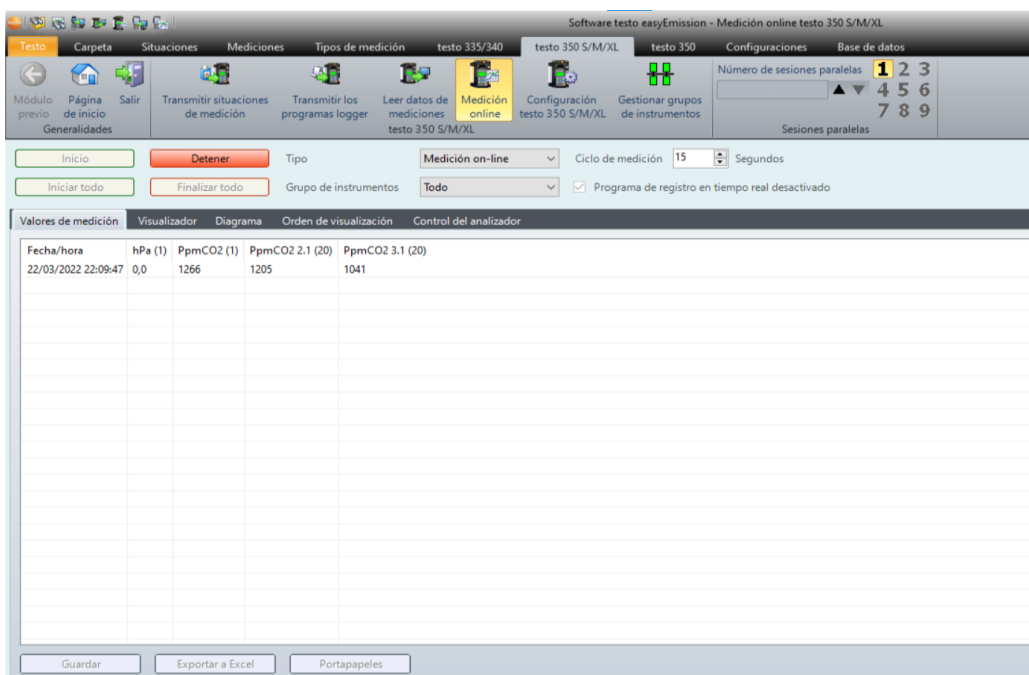


Figura 6. Pestaña de “Medición online” del programa easyEmission.



El número de segundos asignado al ciclo de medición dependerá del tipo de estudio realizado: si se estudia la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> únicamente durante el periodo de ventilación de la vivienda, lo mejor será establecer un ciclo de medición igual o inferior a 15 segundos, en función de la precisión buscada; si se estudia la evolución de la concentración durante uno o varios días, un ciclo de medición de 15 segundos será más que suficiente.

Al finalizar la toma de datos, se pulsa en el botón de “Detener”. Después, pulsando en “Exportar a Excel”, el programa nos permitirá guardar los datos en una hoja de Excel.



### 3.1.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA Y DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIORES.

Para la medida de las condiciones higrotérmicas interiores se han utilizado los siguientes dispositivos:

- Tres sondas de temperatura y humedad relativa (Figura 7).
- Cable USB – USB mini para conectar la sonda al ordenador.



Figura 7. Sonda 175 H1.

Para la medición de la temperatura y de la humedad relativa en el interior de la vivienda se ha colocado una sonda 175 H1 junto a cada una de las sondas de CO<sub>2</sub>.

Se debe conectar cada sonda al ordenador mediante el cable correspondiente para poder configurarla antes de empezar a medir con ella.

Una vez conectada la sonda e iniciada la aplicación de Testo llamada Comfort Software Basic 5.0, pulsando en “Instrumento” en la barra superior de la pantalla de inicio, aparece la pantalla que se puede ver en la Figura 8. El dispositivo se detecta automáticamente y aparece con el nombre de Testo 175/176, solo falta pulsar en el botón de “Conectar”.

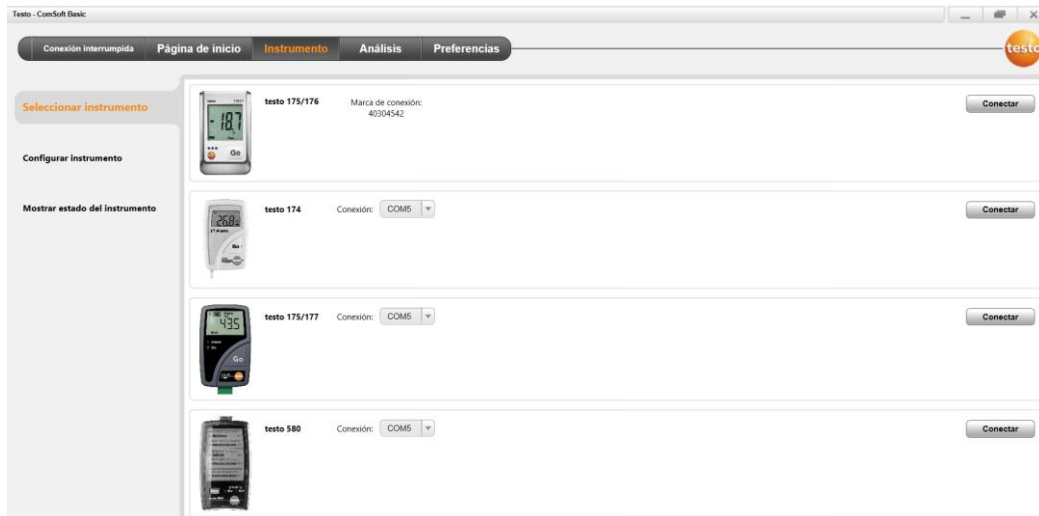


Figura 8. Pestaña de “Seleccionar instrumento” del programa Comfort Software Basic 5.0.

Ahora se puede configurar la sonda desde la pestaña de “Configurar instrumento”. De la misma manera que con las sondas de CO<sub>2</sub> se debe elegir el ciclo de medición, que dependerá del tipo de estudio realizado. Para los estudios realizados en el presente trabajo se ha elegido un ciclo de medición de 15 segundos, igual que para las sondas de CO<sub>2</sub>. También se configura la forma en que se indica al dispositivo que debe empezar a registrar los valores medidos.

Una vez finalizado el estudio, se deben volver a conectar las sondas al ordenador para detener el registro de datos desde la pestaña de “Configurar instrumento”. A continuación, se importan los datos guardados en cada sonda desde la pestaña de “Importar datos de medición” dentro del apartado de “Análisis”, como se ve en la Figura 9.

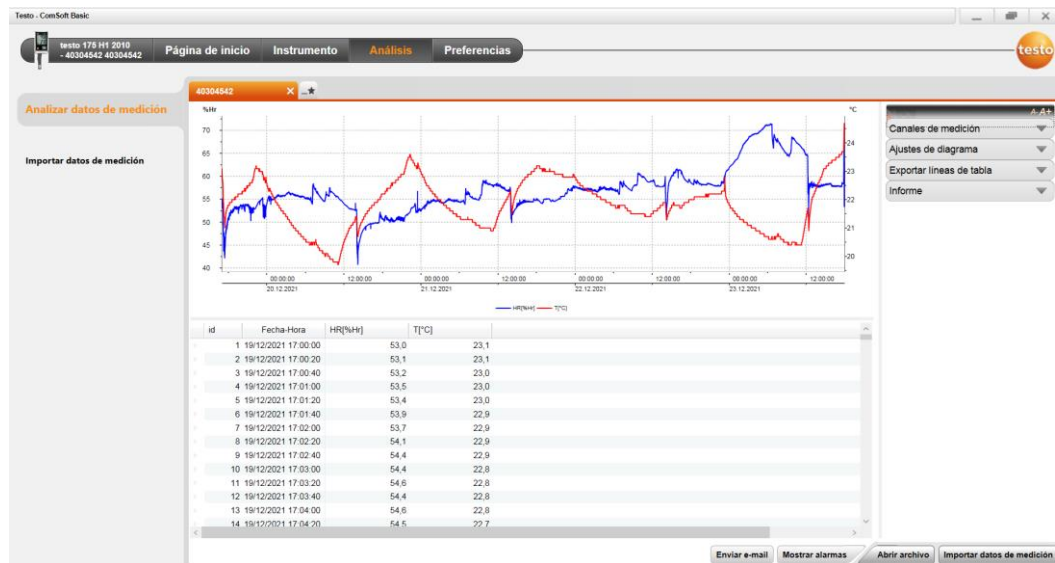


Figura 9. Pestaña de "Analizar datos de medición" del programa Comfort Software Basic 5.0.

Después de importar los datos, el programa permite exportarlos en formato Excel desde el desplegable situado en la parte superior derecha de la pantalla.

### 3.1.3. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA Y DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> EXTERIORES.

Se han utilizado los siguientes dispositivos para la medición de la temperatura y de la concentración de CO<sub>2</sub> exteriores:

- *Data logger* (Testo 435-4) (Figura 10).
- Sonda IAQ (Figura 10) junto al cable correspondiente.
- Cable USB – USB mini para conectar el *data logger* al ordenador.

En los estudios realizados resulta interesante conocer tanto la temperatura como la concentración de CO<sub>2</sub> en el exterior a determinadas horas del día, especialmente en aquellos que se realizan durante el proceso de ventilación de la vivienda. Para ello se ha utilizado el *data logger* junto a la sonda IAQ, manteniendo esta última en el exterior de la vivienda sujetándola desde la ventana. Antes de empezar a medir se debe esperar a que se establezca el valor de la concentración de CO<sub>2</sub> que registra la sonda; después, basta con tomar datos durante 1 o 2 minutos y utilizar la media de los datos registrados como el valor de la concentración de CO<sub>2</sub> exterior y de la temperatura exterior, respectivamente.



Figura 10. Sonda IAQ (a la izquierda) y data logger (a la derecha).

Con el *data logger* encendido, se utiliza la flecha de arriba para modificar la variable que se está visualizando en la mitad superior de la pantalla, lo mismo se consigue con la flecha de abajo para la mitad inferior. La información que aparece en la parte inferior de la pantalla nos indica la función de cada uno de los botones naranjas. Para empezar a registrar los datos, se pulsa el botón situado en el medio para entrar al menú, utilizando las flechas para navegar entre las opciones se pulsa en “Promedio” – “p. tiempo” – “Inic.”, en este momento el dispositivo empieza a grabar los valores medidos cada segundo, finalmente se pulsa en “Final” – “mem.” para guardar los datos en la memoria.

Los datos se extraen del dispositivo mediante el programa Comfort Software X35 instalado en el ordenador. Con el *data logger* encendido y conectado al ordenador se abre el programa y se hace doble clic en “testo435-635-735”, automáticamente aparecerán los registros almacenados en el dispositivo como se puede observar en la Figura 11.

01 Log 1	Fecha	Hora	[ppm] C...	h...	°C	%...	h...	m...												
1	22/03/2022	17:50:45	571	915,0	21,5	50,5	-0,08	0,0												
2	22/03/2022	17:50:46	571	915,0	21,5	50,5	-0,08	0,0												
3	22/03/2022	17:50:47	572	915,0	21,5	50,5	-0,08	0,0												
4	22/03/2022	17:50:48	572	915,0	21,5	50,5	-0,08	0,0												
5	22/03/2022	17:50:49	572	915,0	21,5	50,5	-0,08	0,0												
6	22/03/2022	17:50:50	572	915,1	21,5	50,5	-0,08	0,0												

Figura 11. Programa Comfort Software X35.

Para visualizar los datos de cualquiera de las mediciones se debe hacer doble clic en uno de los “Log” que aparecen en la parte izquierda de la pantalla.

Para pasar los datos a una hoja de Excel se hace clic derecho del ratón sobre uno de los “Log” de la lista y se elige la opción de copiar, después, basta con pegar los datos en una hoja de Excel.

### 3.1.4. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE.

El registro de la velocidad con la que entra el aire a través de la ventana correspondiente se ha hecho empleando los siguientes dispositivos:

- *Data logger* (testo 435-4) (Figura 12).
- Sonda de molinete (Figura 12) junto al cable correspondiente.



Figura 12. Sonda de molinete (a la izquierda) y data logger (a la derecha).

El proceso es muy parecido al que se sigue para medir la concentración de CO<sub>2</sub> y la temperatura en el exterior.

En este caso se mide la velocidad con la que circula el aire en la dirección perpendicular al plano de la ventana. Este dato es importante para los estudios relacionados con el proceso de ventilación de la vivienda.

Para registrar los datos se utiliza una sonda de molinete colocada según se muestra en la Figura 13, asegurándose de que la flecha apunta en la dirección hacia la que circula el aire.



*Figura 13. Colocación de la sonda de molinete.*

Para determinar la velocidad del aire se vuelve a tomar datos durante 1 o 2 minutos para después utilizar la media como el valor de la velocidad.

Los datos registrados se extraen del *data logger* de la misma manera que en el caso de la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> y la temperatura exteriores.

### 3.2. ENSAYOS REALIZADOS.

Para facilitar el seguimiento de los estudios realizados, se ha elaborado con el programa SketchUp un plano simplificado tanto de la situación de la vivienda como de su distribución.

Se trata de un piso que se encuentra en la zona centro de Valladolid y cuya situación se puede ver en la Figura 14. De color negro se ha representado la carretera, de color gris los edificios colindantes y de color blanco tanto la vivienda objeto de estudio como las aceras y el patio interior.

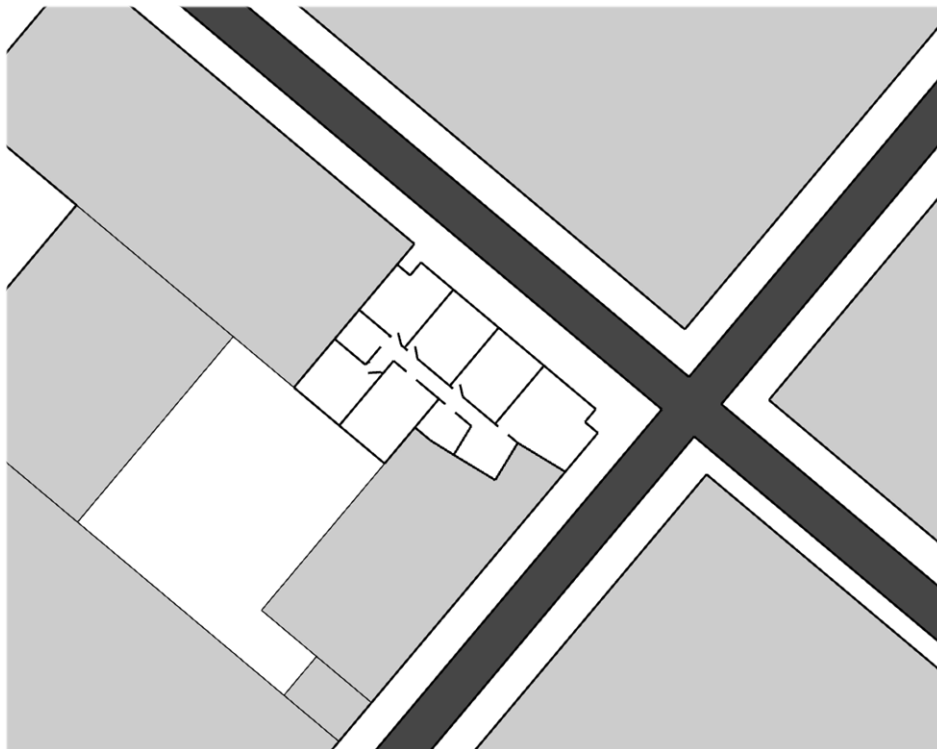


Figura 14. Situación de la vivienda.



En la Figura 15 se ha representado la disposición de las estancias de la casa. Se han enumerado las ventanas para poder distinguirlas en los estudios expuestos más adelante, también se ha asignado una letra a cada una de las estancias con el mismo propósito.

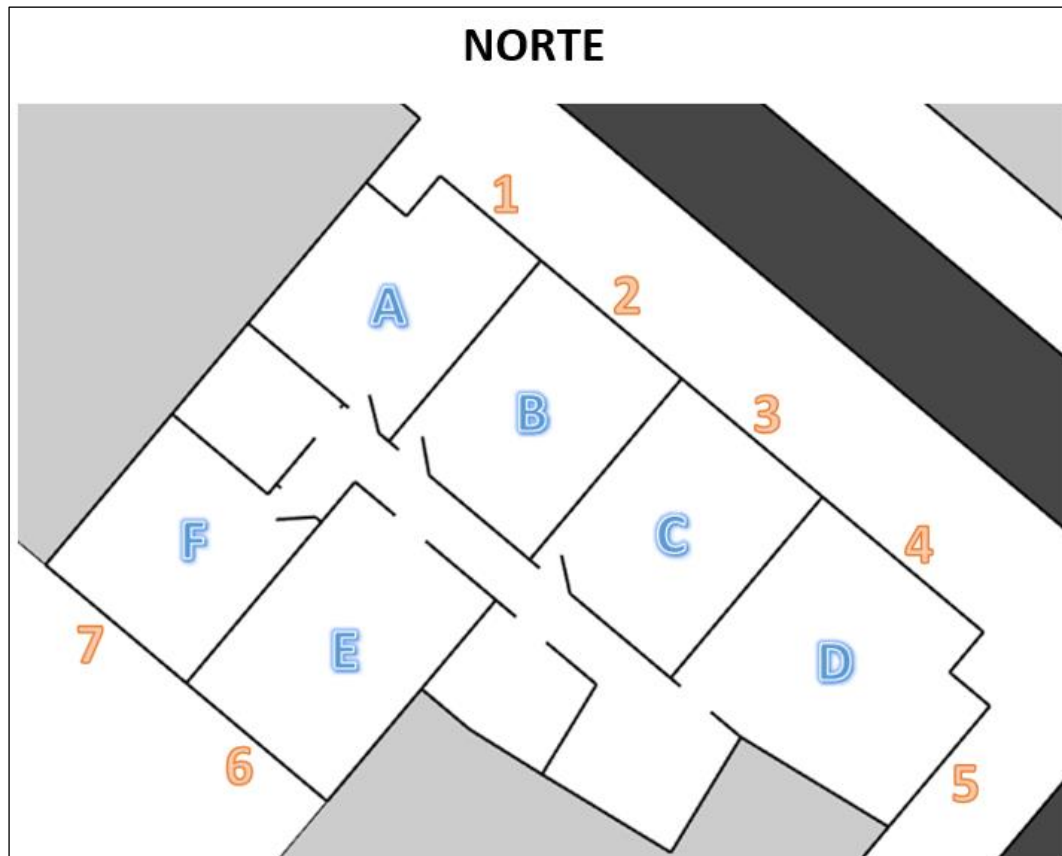


Figura 15. Distribución y orientación de la vivienda.

El equipo utilizado para registrar la concentración de CO<sub>2</sub> permite medir dicha concentración en una sola estancia a la vez, lo que supone una limitación a la hora de realizar distintos tipos de estudio.

Para los estudios realizados en los que se mide la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de un largo periodo de tiempo, solamente se han utilizado los datos registrados por una de las sondas (siempre la misma).

En cambio, para las mediciones realizadas únicamente durante el proceso de ventilación de una estancia o de la vivienda completa, se han utilizado los datos obtenidos por las tres sondas de CO<sub>2</sub> de las que se dispone. Esto se debe a que a la hora de ventilar existen en cada estancia zonas con mayor flujo de aire, normalmente situadas en la dirección que va de la puerta a la ventana; en los rincones, por ejemplo, el flujo de aire suele ser bastante menor. Por lo tanto, en este caso, resulta más apropiado utilizar la media de los valores obtenidos por cada una de las sondas.

Teniendo en cuenta que a la hora de ventilar una estancia el flujo de aire varía de una zona a otra, se ha tratado de colocar una sonda en uno de los puntos peor ventilados, otra en la zona de mayor flujo de aire, y la última en una zona intermedia, todas ellas colocadas a aproximadamente un metro del suelo. La colocación de las sondas se ha representado de color rojo en la Figura 16.

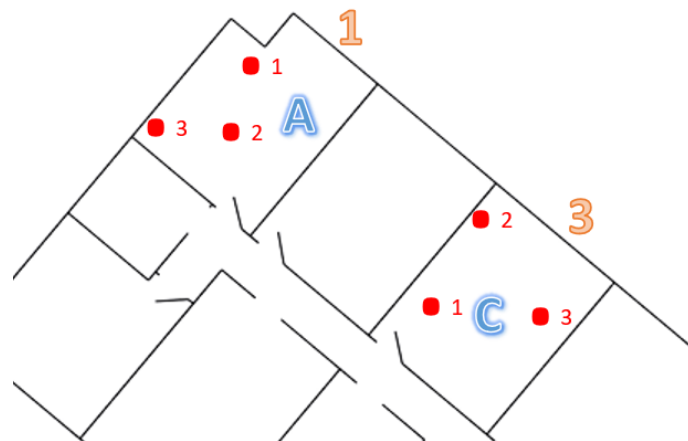


Figura 16. Colocación de las sondas de CO<sub>2</sub> durante las mediciones.

En todos los estudios, se ha colocado una sonda de temperatura y humedad relativa junto a cada una de las sondas de CO<sub>2</sub> situadas en la estancia donde se realizan las mediciones. A la hora de ventilar siempre se ha abierto un solo lado de las ventanas. Además, durante los procesos de ventilación realizados para comparar la ventilación unilateral y la ventilación cruzada, se ha medido tanto la temperatura como la concentración de CO<sub>2</sub> exteriores y la velocidad con la que circula el aire a través del plano de la ventana.

La información general de los ensayos realizados se ha recopilado en la Tabla 3. En el siguiente capítulo se presentan y discuten los resultados derivados de cada objeto de estudio.

Tabla 3. Resumen de los ensayos realizados.

Estudio objeto	Caso	Fecha	Periodo de medición (hh:mm)	Condiciones de ensayo
Ventilación unilateral frente a ventilación cruzada. Tiempo necesario para la renovación del aire de la vivienda. <b>ESTANCIA A</b>	Ventilación unilateral	18 dic 2021	12:53 – 13:11	Puerta de la estancia A cerrada y ventana 1 abierta.
	Ventilación cruzada	14 nov 2021	13:29 – 13:42	Puertas de las estancias A y F abiertas, ventanas 1 y 7 abiertas.
	Ventilación de toda la casa	18 dic 2021	15:46 – 16:02	Puertas y ventanas abiertas salvo la ventana 4.
Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> en función de la frecuencia de ventilación. <b>ESTANCIA C</b>	2 veces al día	12 dic 2021	12 dic 17:00 – 15 dic 06:30	Todas las puertas y ventanas abiertas durante la ventilación salvo la ventana 4.
	1 vez al día	19 dic 2021	19 dic 17:00 – 22 dic 06:30	Todas las puertas y ventanas abiertas durante la ventilación salvo la ventana 4.
Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> durante la noche. <b>ESTANCIA C</b>	Puerta cerrada	10 y 14 mar 2022	23:00 – 07:00*	Puerta de la estancia cerrada.
	Puerta abierta	12, 14, 15 y 22 dic 2022		Puerta de la estancia abierta.
Aumento de la concentración de CO <sub>2</sub> en una estancia ocupada de la vivienda. <b>ESTANCIA C</b>	-	12 dic 2021	19:00 – 19:45	Puerta de la estancia cerrada.

\*Periodo orientativo.

En el primer estudio se ha tratado de establecer aproximadamente el tiempo necesario en cada caso para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> de la estancia A en un 75% respecto a la concentración inicial.

Para el segundo estudio se ha medido, en cada caso, la concentración de CO<sub>2</sub> en la estancia C durante varios días. Este estudio se ha realizado con el objetivo de determinar si ventilando la vivienda más de una vez al día se consiguen reducir los picos de concentración de CO<sub>2</sub>.

En el tercer estudio se ha medido, en ambos casos, la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante la noche en la estancia C, para después comparar los valores obtenidos con los de diferentes estudios publicados y determinar si son aceptables.

El cuarto y último estudio se ha realizado para dar una idea del aumento que se produce en la concentración de CO<sub>2</sub> de una estancia de la vivienda cuando permanece en ella una persona con la puerta cerrada. Para ello se han utilizado valores registrados durante el segundo estudio en el caso en que se ventilaba dos veces al día.

Por otra parte, se dispone de datos climáticos de la provincia de Valladolid (IDAE, 2010). Se proporciona información sobre la dirección más frecuente de los vientos, el porcentaje de calmas, y la dirección y el porcentaje correspondiente en función de diferentes rangos de velocidades del viento (García-Pertierra, 2010). Con estos datos se conoce la fachada del edificio sobre la que normalmente el viento va a ejercer mayor presión y, por ejemplo, puede ayudar a elegir qué ventanas sería mejor abrir a la hora de ventilar; sin embargo, todos los edificios situados alrededor de la vivienda pueden modificar ligeramente la dirección de los vientos. Además, se tiene una idea de los valores de velocidad que se esperan registrar a la hora de realizar las mediciones. Toda esta información se recoge en la Figura 17.

Rosa de los vientos: velocidad media 2,31 m/s

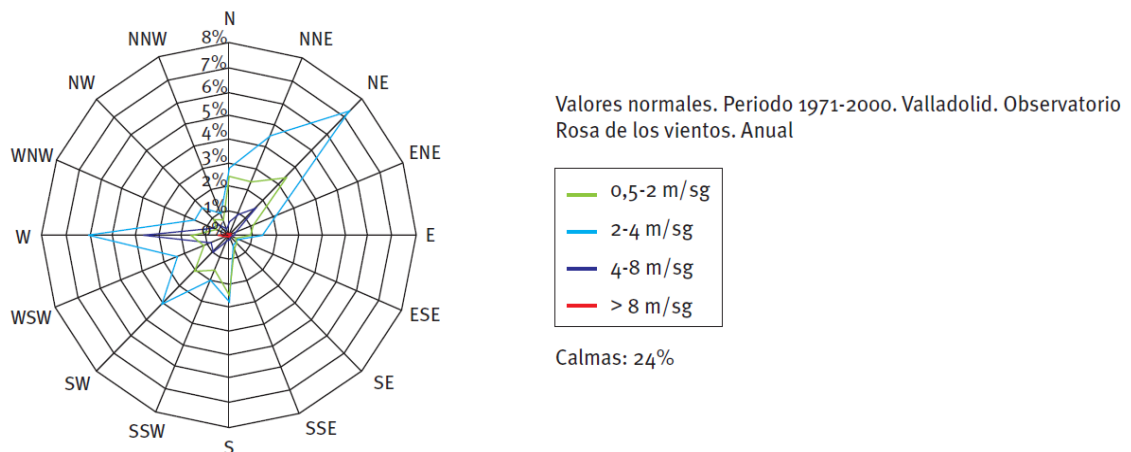


Figura 17. Rosa de los vientos de Valladolid (IDAE, 2010).



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1. VENTILACIÓN UNILATERAL FRENTE A VENTILACIÓN CRUZADA. TIEMPO NECESARIO PARA LA RENOVACIÓN DEL AIRE DE LA VIVIENDA.

En este estudio se busca demostrar que la ventilación cruzada es más eficiente que la ventilación unilateral, además de dar una aproximación del tiempo necesario para renovar el aire tanto de la estancia donde se ha realizado el estudio como de la vivienda completa.

Cuando las ventanas de la vivienda se encuentran en fachadas con orientaciones diferentes se habla de ventilación cruzada, en cambio, si las ventanas tienen la misma orientación se habla de ventilación unilateral. En función del tipo de ventilación, se generan diferentes flujos de aire como se puede observar en la Figura 18.



Figura 18. Patrón de flujo de aire con ventilación cruzada (izquierda) y con ventilación unilateral (derecha). Fuente: GIR de Termotecnia de la Universidad de Valladolid.

Se han hecho varias mediciones en la estancia A realizando cada tipo de ventilación con el objetivo de obtener dos casos comparables, es decir, en los que la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial en la vivienda fuera similar y la temperatura exterior no fuera demasiado dispar. Para la ventilación unilateral se abre únicamente la ventana 1 manteniendo la puerta de dicha estancia cerrada, mientras que para la ventilación cruzada se abren la ventana 1 y la ventana 7 y se mantienen abiertas las puertas de las estancias correspondientes. En la Figura 19 se han representado los resultados obtenidos, correspondientes a los dos primeros ensayos realizados para este estudio (véase la Tabla 3):

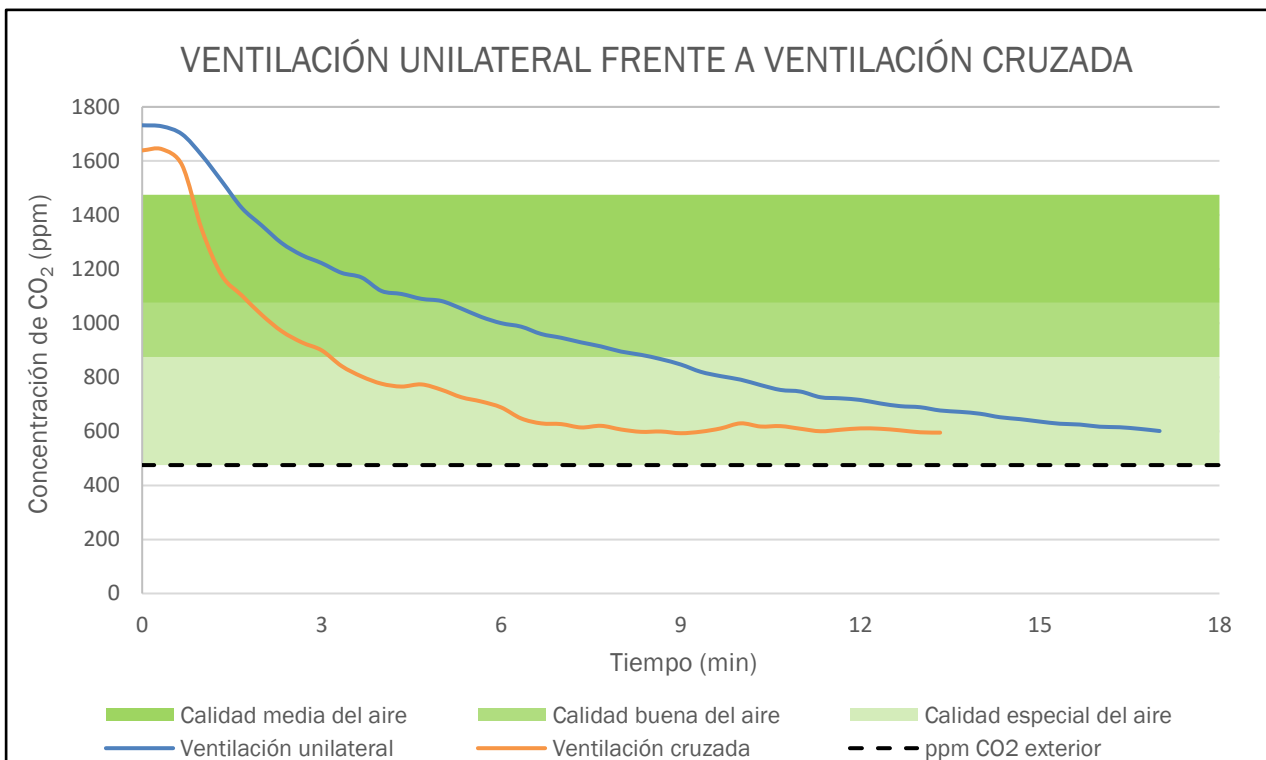


Figura 19. Comparación entre ventilación unilateral y ventilación cruzada de una estancia.

Como valor de la concentración de CO<sub>2</sub> exterior se ha utilizado la media de los dos casos representados, que es de aproximadamente 475 ppm. A partir de este valor, se han dibujado unas franjas que representan la calidad del aire en interiores según la Tabla 4; se ha omitido la franja que representa una calidad baja del aire ya que no hay un límite superior establecido para esta franja.

Tabla 4. Clasificación de la calidad del aire en interiores en función de la concentración de CO<sub>2</sub> (AEN/CTN 171 Calidad ambiental de interiores., 2014).

	Aumento de la concentración de CO <sub>2</sub> respecto a la concentración de CO <sub>2</sub> exterior (ppm)
Calidad especial del aire en interiores	< 400
Calidad buena del aire en interiores	400 – 600
Calidad media del aire en interiores	600 – 1000
Calidad baja del aire en interiores	> 1000

A parte de la ligera e inevitable disparidad en la concentración de CO<sub>2</sub> inicial, la mayor diferencia entre ambos casos se observa en la velocidad del aire que entra a través de la ventana 1.

El porcentaje en el que se ha reducido la concentración de CO<sub>2</sub> de la estancia se ha calculado a partir de la ecuación (E- 1):

$$\% \text{ reducido} = \frac{C_o - C_j}{C_o - C_{min}} * 100 \quad E- 1$$

Donde:

$C_o$ : concentración de CO<sub>2</sub> inicial [ppm]

$C_j$ : concentración de CO<sub>2</sub> del instante estudiado [ppm]

$C_{min}$ : concentración de CO<sub>2</sub> exterior [ppm]

Como se puede observar en la Figura 19, con una ventilación cruzada de la estancia se consigue reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en un tiempo bastante menor, esto se debe a que, al abrir ventanas de fachadas opuestas, la velocidad con que entra el aire a través de la ventana 1 es mucho mayor por el flujo de aire que se genera (véase la Figura 18), que además favorece la ventilación de la estancia.

Los valores registrados en cada caso se han recogido en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos de los distintos casos estudiados en la estancia A.

Tipo de ventilación	Concentración de CO <sub>2</sub>		Temperatura		Velocidad del aire a través de la ventana 1 (km/h) **	Tiempo para reducir la concentración de la estancia en un 75% (min)
	Interior inicial (ppm)	Exterior (ppm)	Interior (°C)	Exterior (°C)		
Unilateral (18 dic)	1728	470	21,2	8,1	0,10	10
Cruzada (14 nov)	1643	482	21,6	10,0	2,23	4
Toda la casa a la vez (18 dic)	1685	475*	21,6	11,0*	1,58	10

\*Se trata de una aproximación a partir de otras mediciones realizadas el mismo día y de los valores proporcionados por los servicios meteorológicos (AccuWeather, s.f.).

\*\*Los valores registrados no son fiables debido a un error en el procedimiento de medida, en todo caso, sí que son representativos a nivel cualitativo.



De modo que, para ventilar la totalidad de la vivienda será mejor abrir ventanas con orientaciones diferentes que abrir todas las ventanas situadas en la misma fachada. Como es de esperar, también será mejor abrir el mayor número de ventanas posible y distribuidas de la mejor forma posible, ya que habrá zonas con un flujo preferente de aire, y habrá estancias que sean más difíciles de ventilar como la estancia desde la que se accede a la estancia D (véase la Figura 15). Por esto a la hora de renovar el aire de toda la vivienda harán falta más de 4 minutos para reducir en un 75% la concentración de CO<sub>2</sub> de toda la vivienda.

En el caso en que se ventila la totalidad de la vivienda, representado en la Figura 20, se necesitaron 10 minutos para reducir en un 75% la concentración de la estancia donde se realizaron las medidas, sin embargo, esto no nos asegura que se haya reducido en un 75% la concentración del resto de la vivienda porque habrá estancias en las que se haya reducido en un porcentaje ligeramente mayor y en otras ligeramente menor; en todo caso, el porcentaje reducido en una estancia es una buena aproximación de lo que ocurre en el resto de la vivienda, siempre que la concentración inicial media de la vivienda no sea muy alta, como se verá más adelante.

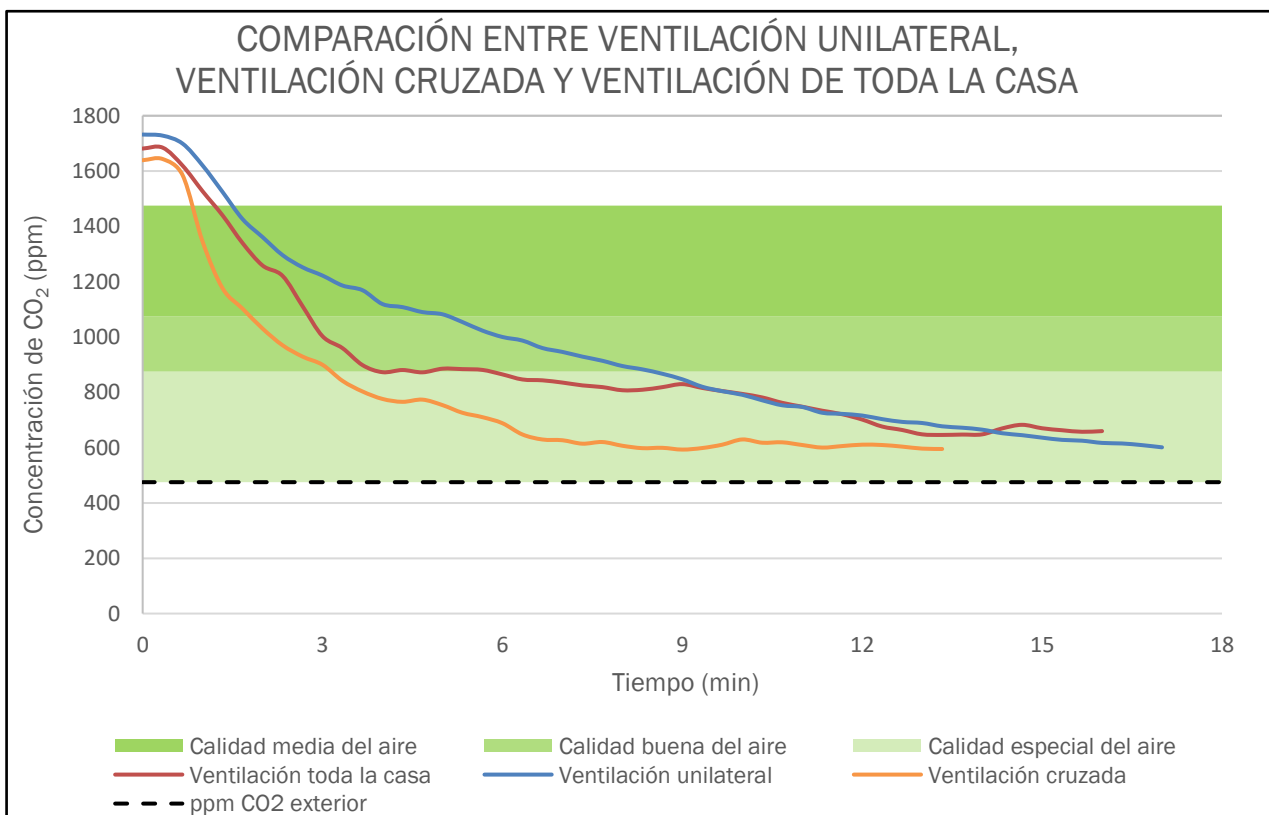


Figura 20. Comparación entre ventilación unilateral, ventilación cruzada y ventilación de toda la casa.

En definitiva, el tiempo necesario para la ventilación de toda la vivienda dependerá fundamentalmente de la concentración media inicial de la vivienda y del viento y de la temperatura exteriores.

Como se mencionaba anteriormente, en la Figura 21 se representa el efecto que tiene la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial de la vivienda en el proceso de ventilación, dicho efecto será mayor o menor en función de las condiciones exteriores e interiores antes de empezar a ventilar. Se han representado los procesos de ventilación realizados los días 20 y 21 de diciembre correspondientes a los ensayos llevados a cabo en la estancia C durante el segundo estudio (véase la Tabla 3); en ambos casos han permanecido las ventanas abiertas durante 10 minutos y durante las dos horas siguientes la ocupación de la vivienda ha sido esencialmente la misma, como se puede comprobar en la Tabla 7.

Al estar midiendo en una sola estancia, puede que la sonda llegue a medir una concentración de CO<sub>2</sub> de, por ejemplo, 500 ppm, por ser una zona con mayor flujo de aire. Sin embargo, siempre habrá zonas de la vivienda que sean más difíciles de ventilar (alejadas de las ventanas) y que puede que en ese momento todavía se encuentren por encima de las 500 ppm. Por esto si la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial de la vivienda es alta y se cierran las ventanas en el momento en que la sonda mide una concentración de 500 ppm, el aire del interior de la vivienda se mezclará y la concentración de CO<sub>2</sub> subirá rápidamente antes de estabilizarse. Este suceso se aprecia claramente en la Figura 21 en el caso en el que la concentración inicial de CO<sub>2</sub> es alta.

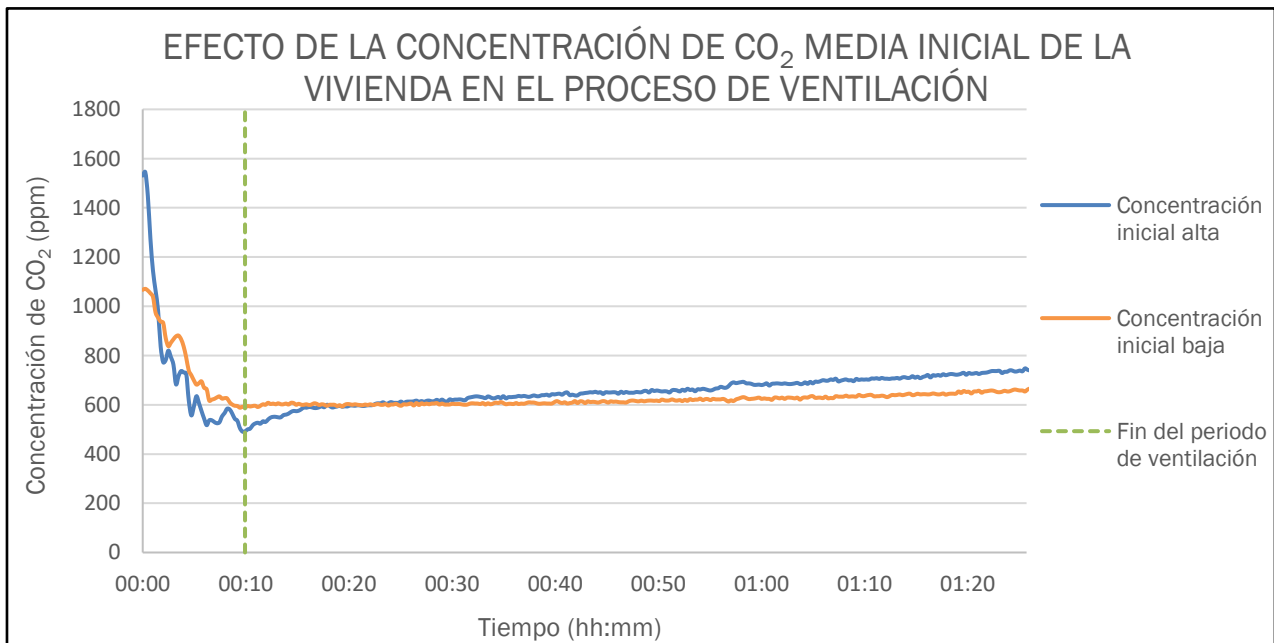


Figura 21. Efecto que tiene la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial de la vivienda en el proceso de ventilación.



En el caso en el que la concentración media inicial de la vivienda es alta, es probable que la concentración en la estancia C se haya reducido en mayor medida porque las condiciones exteriores eran más favorables y porque es una estancia con un gran flujo de aire. Sin embargo, el aire de las estancias peor ventiladas, al mezclarse con el del resto de la casa, hará que la concentración media de la vivienda suba ligeramente.

Por lo tanto, si la concentración inicial es alta y se quiere evitar que esto suceda, habrá que mantener las ventanas abiertas durante unos minutos más.

Debido a los diferentes factores expuestos anteriormente, determinar un tiempo exacto para la ventilación de una vivienda es ilógico. Sin embargo, las mediciones realizadas sirven para tener una idea aproximada del tiempo necesario para renovar el aire de la vivienda en distintos casos.

Además, los datos proporcionados en este estudio son específicos para la vivienda estudiada, por lo que los resultados son significativos solamente a nivel cualitativo.

Por último, se analiza la idoneidad de controlar el tiempo de apertura de ventanas en función de la temperatura alcanzada en el interior de la vivienda.

En la Figura 22 se han representado los mismos procesos de ventilación que en la Figura 19 pero cambiando la concentración de CO<sub>2</sub> interior por la temperatura interior. En ella se ve como al realizar una ventilación unilateral el descenso en la temperatura es pequeño y progresivo, mientras que con ventilación cruzada el descenso es prácticamente el doble y en la mitad de tiempo. De todas formas, la temperatura descenderá en mayor o menor medida en función del viento y de la diferencia de temperatura interior-exterior, y no existe ninguna equivalencia entre la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub> del aire interior. Además, al realizar la ventilación cruzada la concentración de CO<sub>2</sub> desciende hasta las 600 ppm a los 13 minutos mientras que la temperatura ya se ha estabilizado a los 9 minutos.

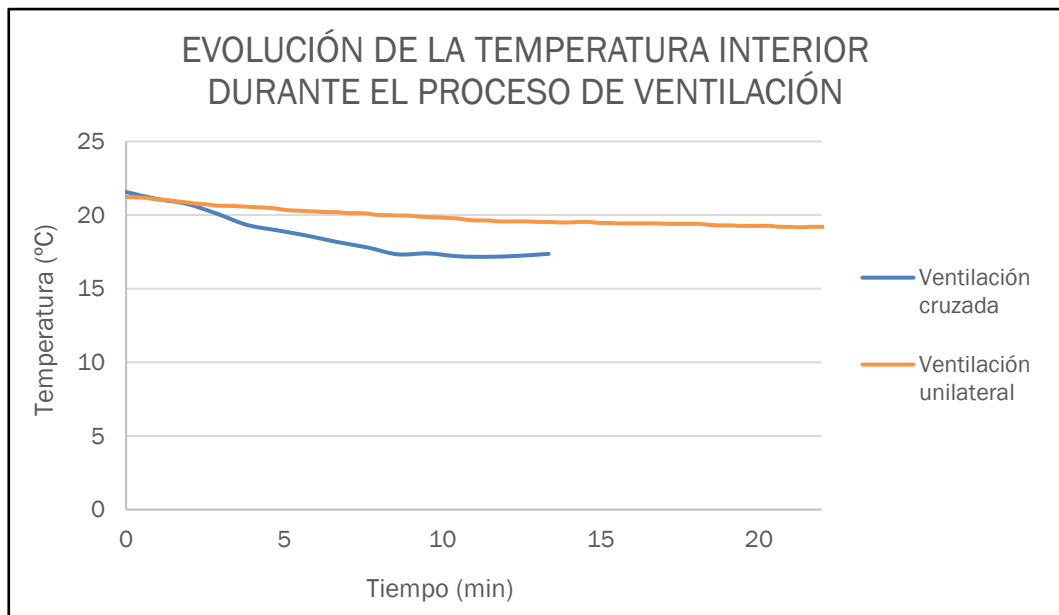


Figura 22. Evolución de la temperatura interior durante el proceso de ventilación.

Por otro lado, es importante mencionar que estas medidas están realizadas en periodo invernal, siendo previsible que en épocas más templadas la evolución de la temperatura no sea tan clara.

En definitiva, guiarse por la medida de la temperatura puede resultar bastante difícil a la hora de ventilar la vivienda.



## 4.2. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE VENTILACIÓN.

La necesidad de realizar este estudio aparece después de lanzar la siguiente hipótesis: ventilando dos veces al día se evitarían los altos picos de concentración de CO<sub>2</sub> que se experimentan en la vivienda al ventilar una sola vez al día. Por lo tanto, se quiere comprobar si efectivamente se reducen de esta manera los picos de concentración de CO<sub>2</sub>.

Para ello se ha escogido un intervalo de tiempo y se han repetido las mediciones ventilando una vez al día y ventilando dos veces al día. Se ha medido en la estancia C y la persona que ha dormido ahí lo ha hecho siempre con la puerta abierta.

Una de las mayores complicaciones a la hora de realizar dicho estudio ha sido la determinación de la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial en la vivienda, debido en gran parte al reducido número de aparatos de medición disponibles. Con el equipo utilizado resultaba muy difícil asegurar que la concentración inicial media de la casa fuese la misma en ambos casos, ya que se ha estado midiendo la concentración de CO<sub>2</sub> únicamente en la estancia C.

Esta concentración inicial depende del día anterior: tanto del uso que se haya hecho de la vivienda como del número de veces y el tiempo que se haya ventilado. Para que se lograra partir de la misma concentración inicial en ambos casos, una opción habría sido ventilar justo antes de comenzar las mediciones y después dejar la vivienda vacía para que se homogeneizara la concentración de CO<sub>2</sub> (ya que solo se mide en una de las estancias); de esta manera se obtendría una buena aproximación del valor de la concentración media inicial y bastaría con repetir las mediciones hasta obtener un estudio de cada caso en los cuales la concentración media inicial fuera lo más parecida posible.

Además, durante la primera realización del estudio, quedó claro que para poder interpretar los resultados y extraer conclusiones fiables, se debían comparar unos días concretos en los que el uso de la vivienda fuera lo más parecido posible, tanto por número de ocupantes como por horarios de ocupación. En la Figura 23 se aprecia como resulta prácticamente imposible comparar los dos intervalos de tiempo estudiados, ya que el uso de la vivienda en cada uno de ellos es totalmente diferente.

Tanto en la Figura 23 como en la Figura 24 se ha representado con fondo azul la franja de 00:00 a 06:00 que coincide normalmente con las horas de sueño.

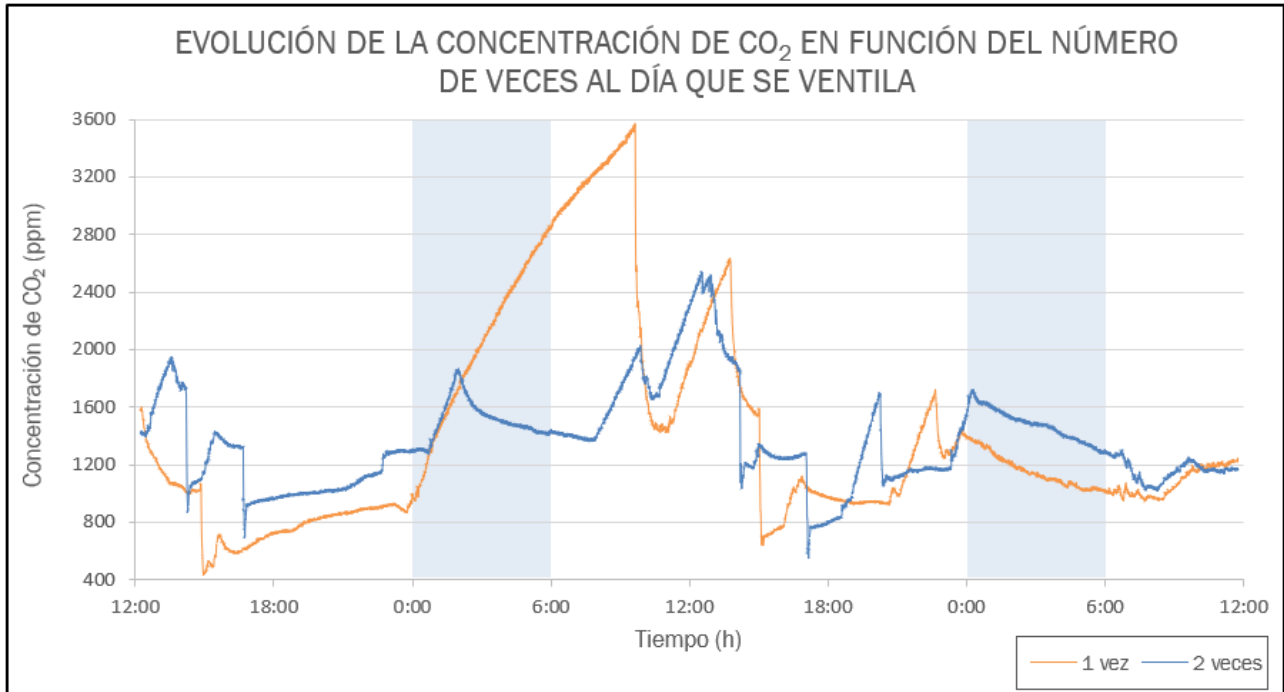


Figura 23. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en función del número de veces al día que se ventila. Días no comparables.

Como se mencionaba anteriormente, en la Figura 23 no se distingue la diferencia entre ventilar una vez al día y dos veces al día. Sin embargo, en la Figura 24, se observa con bastante claridad, especialmente en los periodos entre las 12:00 y las 00:00.

Por otra parte, en la Figura 24, la concentración de CO<sub>2</sub> desciende durante las franjas de tiempo coloreadas debido al uso previo que se ha hecho de la estancia; como la concentración media del resto de la vivienda es menor y la puerta de la estancia permanece abierta, la concentración desciende a pesar de que la estancia permanezca ocupada.

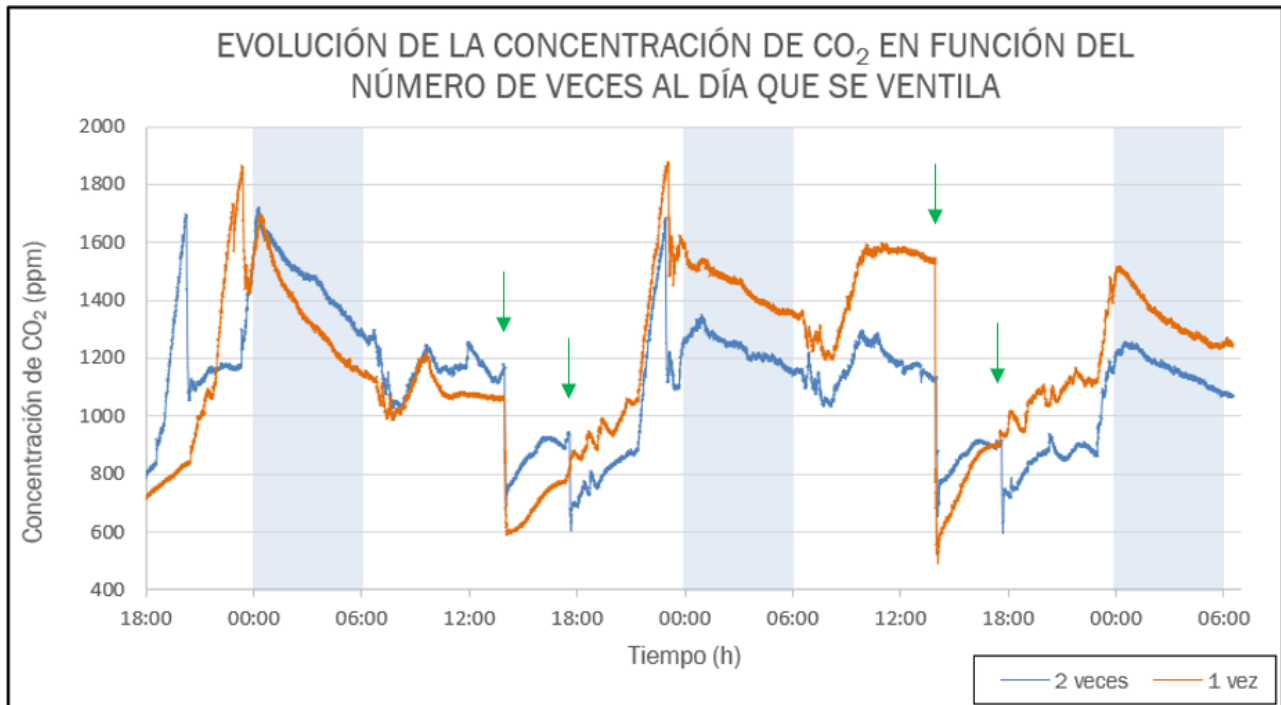


Figura 24. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en función del número de veces al día que se ventila.

En la Figura 24 se ha representado el resultado de la segunda realización del estudio, en ambos casos se ha empezado a representar la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> justo después de haber ventilado. Se han marcado con una flecha de color verde los procesos de ventilación posteriores.

Durante la primera medición se ventiló dos veces al día y se ventiló de la misma manera el día anterior al comienzo de la toma de datos, sin embargo, se desconocía la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial de la vivienda después de haber ventilado.

Para solventar este problema se hizo lo siguiente: como en la segunda medición se iba a ventilar una sola vez al día y se esperaba alcanzar mayores concentraciones de CO<sub>2</sub>, antes de comenzar a medir se ventiló el tiempo suficiente para prácticamente igualar la concentración de toda la vivienda con la del exterior, y así asegurarse de que la concentración media inicial de la vivienda era menor que en la primera medición. Debido a la alta concentración de CO<sub>2</sub> media inicial a la hora de la ventilación previa al comienzo de la medición, y como se conocía el efecto que podía tener en el proceso de ventilación (Figura 21), se mantuvieron las ventanas abiertas durante unos minutos más a pesar de que la sonda ya registraba una concentración de CO<sub>2</sub> muy parecida a la exterior.



La diferencia de concentración media inicial (después de cada ventilación) se pone de manifiesto principalmente cuando queda vacía la vivienda, porque la concentración de  $\text{CO}_2$  tiende a estabilizarse en todo momento en un valor mayor o menor en función de dicha concentración inicial (la ocupación prácticamente no influye ya que es casi la misma en ambos casos). También se observa su efecto en la evolución de la concentración durante la noche: en la Figura 24 se puede ver como durante la primera noche se parte de una concentración de  $\text{CO}_2$  muy parecida, sin embargo, la línea naranja desciende mucho más rápido debido a que en ese caso la concentración media inicial de la vivienda era menor y, como la puerta de la estancia permanece abierta en ambos casos, se mezcla el aire de la estancia con el del resto de la vivienda.

Como se puede observar en la Figura 24, a pesar de haber partido de una concentración inicial menor, en el caso de ventilar una sola vez al día se alcanzaron unos picos de  $\text{CO}_2$  mayores que cuando se ventiló dos veces al día, y que probablemente habrían sido aún mayores si la concentración inicial hubiese sido la misma en ambos casos.

De este estudio se puede concluir que, como norma general: si una vez determinado de forma aproximada el tiempo necesario para que la concentración de  $\text{CO}_2$  de la vivienda descienda y se sitúe entre los niveles óptimos de  $\text{CO}_2$  en un solo periodo de ventilación, se divide este tiempo entre dos o más periodos de ventilación (en función del uso que se hace de la vivienda), los picos de concentración de  $\text{CO}_2$  se logran reducir.

Otro ejemplo claro de esto último sería el de una academia con ventilación natural y que utiliza una sola estancia para dar clases; supongamos que por la mañana se imparten cuatro clases de hora y media. En este caso, si en vez de ventilar después de la segunda y de la última clase se ventilara después de cada clase, se evitarían unos picos muy altos de concentración de  $\text{CO}_2$ . Este ejemplo se representa en la Figura 25.



Para elaborar la gráfica, se ha supuesto que la estancia tiene unas dimensiones de 8 m de largo, 5 m de ancho y 3 m de alto, lo que supone 120 m<sup>3</sup> de aire. Se ha utilizado como tasa de emisión de CO<sub>2</sub> para una actividad sedentaria un valor de 20L/h por persona, según establece la norma (AEN/CTN 171 Calidad ambiental de interiores., 2014). Por lo tanto, basta con aplicar la ecuación (E- 2) para obtener el aumento en ppm de CO<sub>2</sub> que se produce cada hora y media suponiendo que hay 8 personas en la estancia durante cada una de las clases y que la puerta permanece cerrada:

$$\text{Aumento en ppm de CO}_2 = \frac{n^{\circ}\text{personas} \times 0,02 \frac{\text{m}^3 \text{ de CO}_2}{\text{persona} \times \text{hora}} \times n^{\circ}\text{horas}}{\text{m}^3 \text{ de aire}} \quad \text{E- 2}$$

De esta manera se obtiene que el aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> después de cada clase es de 2000 ppm (sin tener en cuenta las posibles exfiltraciones e infiltraciones de aire).

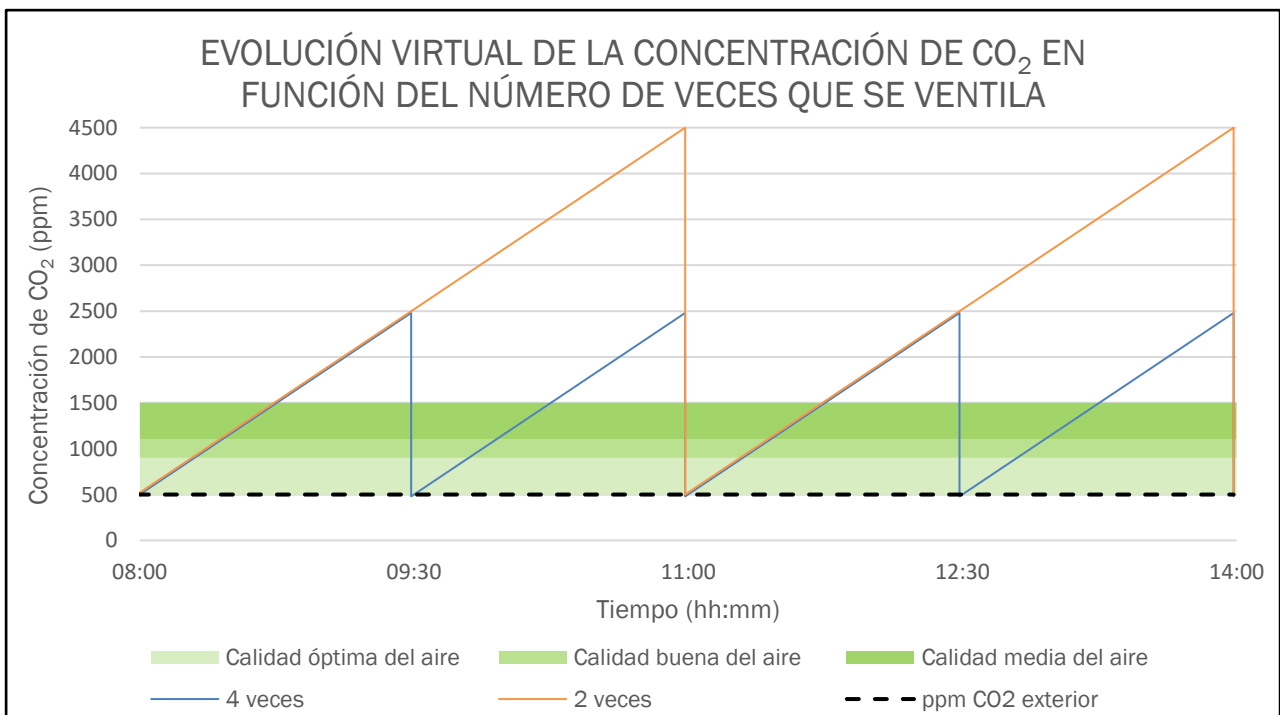


Figura 25. Evolución virtual de la concentración de CO<sub>2</sub> en una academia en función del número de veces que se ventila.



Como se puede observar en la Figura 25, quizá la mejor solución para mantener la concentración de CO<sub>2</sub> de la estancia en unos niveles aceptables sería instalar un sistema de ventilación mecánica, con el objetivo de que haya una renovación continua del aire de la estancia y evitar de esta manera la continua y elevada subida de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Volviendo al estudio representado en la Figura 24, las mediciones parecen indicar que resulta más eficiente ventilar dos veces al día en lugar de una sola vez. Primero porque cuando se ha ventilado una sola vez la concentración media inicial era menor pero poco después se ha establecido la línea de evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> por encima de su análoga, en vez de permanecer por debajo. Y segundo porque ventilando dos veces al día se han abierto las ventanas un total de 8 minutos, en cambio, ventilando una vez han sido 10 minutos en total (2 minutos más).

Sin embargo, tanto el viento como la temperatura exterior influyen en la eficiencia de cada proceso de ventilación y son imposibles de controlar para que se repitan las mismas condiciones durante todos los procesos de ventilación. Al abrir las ventanas, el aire interior se mezcla con el aire exterior debido a la diferencia de temperatura que se traduce en una diferencia de presiones, y debido también a la diferencia de presiones que genera el viento sobre las distintas fachadas del edificio. El aire entra por las ventanas y sale por la campana de la cocina, por los conductos de ventilación de los baños y por otras ventanas.

A pesar de que el viento y la temperatura exterior no varían significativamente durante los periodos de tiempo estudiados, con el equipo utilizado y los datos de los que se dispone no se puede asegurar que lo descrito anteriormente se deba únicamente al tiempo y al número de veces que se ha ventilado y a los tiempos de ocupación de la vivienda.

De todos modos, en la Tabla 8 se ha resumido la ocupación de la vivienda durante este estudio a partir de los datos recogidos en la Tabla 6 y en la Tabla 7, sin tener en cuenta al perro.

El hecho de que los tiempos de ocupación de la estancia C sean tan parecidos se refleja en la Figura 24, obteniendo unas líneas de evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> muy parecidas (ascensos y descensos de la concentración prácticamente simultáneos).



Las diferencias en la ocupación total de la casa también son bastante pequeñas; para evaluar las diferencias se ha calculado, para cada periodo diferenciado en la Tabla 8, el tiempo de ocupación simulando que en todo momento la ocupación total ha sido de 3 personas (el tiempo que permanece la vivienda ocupada por 1 persona se ha dividido entre 3 y el de 2 personas se ha multiplicado por 2/3). Una vez calculados estos tiempos, se puede observar cómo durante el caso en el que se ventila una vez al día, el tiempo de ocupación respecto al otro caso solamente se supera significativamente durante el periodo de 06:00 a 14:00 pasada la segunda noche (el quinto periodo); este hecho se distingue en la Figura 24, aumentando la diferencia de concentración entre una línea y la otra. Se trata también de la diferencia más grande entre todos los periodos (33 minutos) y supone un aumento de aproximadamente 115 ppm; calculado utilizando la ecuación (E- 2) y teniendo en cuenta que el aumento se produce por 3 personas ocupando la vivienda entera, lo que significa unos 288 m<sup>3</sup> de aire (120 m<sup>2</sup> de superficie por 2'4 m de altura), a lo largo de 33 minutos. En el resto de los casos en los que hay una diferencia significativa, es durante el caso en el que se ventila dos veces cuando se registra mayor ocupación, lo que refuerza la idea de que resulta más eficiente ventilar dos veces, ya que la línea de evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> de este caso debería tender a situarse por encima de la otra, pero no sucede así.

En todo caso, hay muchas variables difíciles de controlar con el equipo utilizado, pero si se repitiera el ensayo varias veces y se obtuvieran resultados parecidos se podrían establecer conclusiones más fiables.

También debe mencionarse que, si el proceso de ventilación fuera más eficiente dividiéndolo en dos etapas, en lugar de realizarlo en una sola, la diferencia entre ambas líneas de evolución debería aumentar cada día, sin embargo, durante la tercera noche parece reducirse la diferencia. Por lo tanto, resulta difícil establecer una conclusión respecto a si el hecho de dividir el proceso de ventilación en dos etapas resulta más eficiente o no.

Finalmente, es importante aclarar que cada vivienda requiere de un estudio particular. Los resultados de este estudio son representativos a nivel cualitativo, y aunque los tiempos precisos cambien con las particularidades de la vivienda, su perfil de uso y las condiciones exteriores, pueden tomarse como referencia. Además, siempre que sea posible, conviene ventilar durante los periodos de mayor ocupación.



Asimismo, se debe saber que este estudio se ha realizado durante el invierno, cuando conviene ventilar durante las horas centrales del día sobre todo para reducir la pérdida de temperatura de la vivienda y, por tanto, el gasto de energía asociado a la calefacción. Estas pautas se podrán seguir durante la mayor parte del año salvo en verano, cuando será mejor aprovechar las primeras horas de la mañana y de la noche para ventilar. También conviene evitar las horas de mayor contaminación del aire exterior debidas al tráfico, polen, obras, etc., en el caso de que sea previsible una baja calidad del aire de ventilación.



### 4.3. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> DURANTE LA NOCHE.

Mientras se realizaba la toma de datos del primer estudio, que comparaba la ventilación cruzada con la ventilación unilateral en la estancia A y bastaba con realizar mediciones durante unos minutos, se aprovechó para registrar la concentración de CO<sub>2</sub> durante el día completo para familiarizarse con el funcionamiento del equipo y con el procedimiento para la toma de datos. Revisando los valores de concentración de CO<sub>2</sub> registrados, se observó una subida repentina en dicha concentración que coincidía con el momento en que se abría la puerta de la estancia F, en la que habían descansado dos personas durante la noche y con la puerta cerrada. Dado que la subida en la concentración de CO<sub>2</sub> era de unas 1000 ppm, era de imaginar que la concentración en la estancia F era muy alta antes de abrir la puerta de dicha estancia.

Más adelante, durante la realización del ensayo en el que se estudiaba la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de varios días en función de la frecuencia de ventilación, se observó que cuando una persona descansaba durante la noche en la estancia correspondiente y con la puerta cerrada, la concentración de CO<sub>2</sub> en dicha estancia aumentaba enormemente, por encima de las 2500 ppm.

Tras observar estos hechos, se decide llevar a cabo nuevas mediciones de la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante la noche en la misma estancia, tanto con la puerta cerrada como con la puerta abierta. En todos los casos la ocupación de la vivienda y de la estancia es la misma.

En la Figura 26 se muestran los resultados obtenidos, después de filtrar las mediciones que resultaban muy parecidas entre sí. También se ha representado la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante los 30 minutos previos a las horas de sueño, ya que el uso que se hace previamente de la estancia influye en la concentración inicial. Además, la concentración media en el resto de la casa afecta a los valores registrados durante la noche, tanto si la puerta permanece abierta como si permanece cerrada, ya que en este último caso sigue habiendo una corriente muy pequeña de aire que pasa por la parte inferior de la puerta. Durante la primera hora de sueño se observan algunas fluctuaciones que pueden deberse tanto a que la concentración del resto de la vivienda esté todavía estabilizándose como al hecho de que la sonda se encuentra cerca de la fuente de emisión de CO<sub>2</sub>.

Como se puede observar en la Figura 26, en casi todo momento el valor de la concentración de CO<sub>2</sub> permanece por encima de las 1000 ppm.

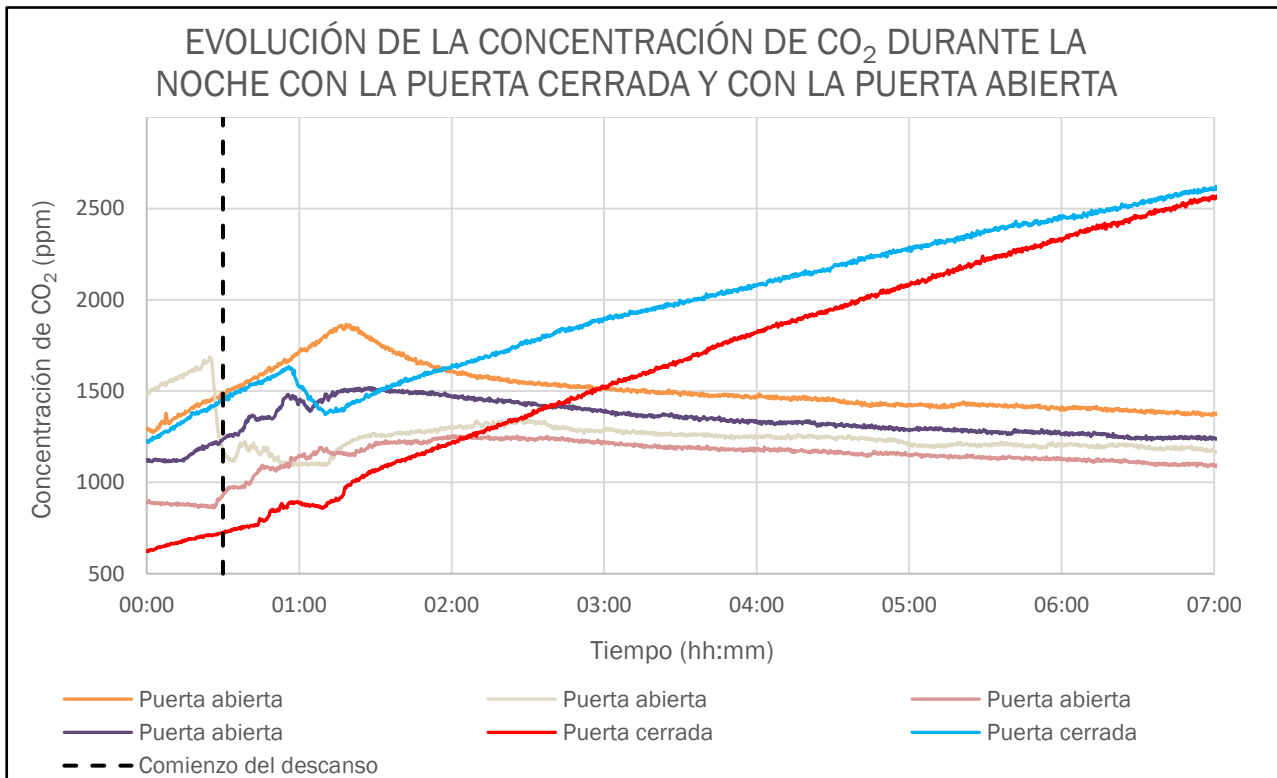


Figura 26. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante la noche.

Una buena calidad del sueño es fundamental para que el cuerpo humano se recupere tanto física como psicológicamente de la fatiga acumulada durante el día, también resulta muy importante para recuperar energía. Además, una baja calidad del aire interior afecta negativamente a la calidad del sueño. Por lo tanto, es interesante tener un mejor conocimiento de la relación que existe entre estos dos aspectos (Xiong, Lan, Lian, & De dear, 2020).

Como ya se ha mencionado anteriormente, una ventilación insuficiente en las viviendas se traduce normalmente en una alta concentración de CO<sub>2</sub> y, por tanto, en una baja CAI. Es por eso por lo que se puede utilizar la concentración de CO<sub>2</sub> como indicador del grado de ventilación y de la CAI.



En un artículo publicado por la ASHRAE (ASHRAE, 2021), se examina y agrupa la información existente en 10 estudios que evalúan la relación que existe entre la calidad del sueño, la ventilación y la CAI:

Los estudios mencionados en el artículo en cuestión demuestran que, por lo general, una alta concentración de CO<sub>2</sub> en la habitación afecta negativamente a la calidad del sueño: aumenta el número de veces y la facilidad con la que nos despertamos por la noche, la eficiencia del sueño disminuye y aumenta el tiempo que tardamos en conciliar el sueño. Por lo tanto, puede afectar a nuestro rendimiento el día siguiente.

Entre las medidas tomadas en los diferentes experimentos para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> se encuentran la ventilación natural, la ventilación mecánica y la apertura de puertas. A la hora de adoptar como medida la ventilación natural, que consiste en la apertura de ventanas, el problema con el que nos solemos topar es el ruido exterior, que también afecta negativamente a la calidad del sueño.

Además, se menciona que en habitaciones con ventilación natural durante el invierno y en habitaciones con aire acondicionado durante el verano, se suelen registrar bajos niveles de ventilación, que se traducen en altas concentraciones de CO<sub>2</sub>.

En el artículo se concluye que no se han observado efectos negativos cuando la concentración de CO<sub>2</sub> permanece por debajo de las 835 ppm. Por encima de este valor, es más probable que se observen efectos negativos en relación con la calidad del sueño, de hecho, para una concentración ligeramente por encima de las 1000 ppm ya se observaron efectos negativos.

Por lo tanto, en la estancia objeto de estudio interesaría reducir ligeramente los niveles de concentración durante la noche.

#### 4.4. AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> EN UNA ESTANCIA OCUPADA DE LA VIVIENDA CON LA PUERTA CERRADA.

Durante la realización de los ensayos anteriores se pudo observar la rapidez con la que aumenta la concentración de CO<sub>2</sub> en cualquiera de las estancias de la vivienda cuando dicha estancia está ocupada y la puerta permanece cerrada.

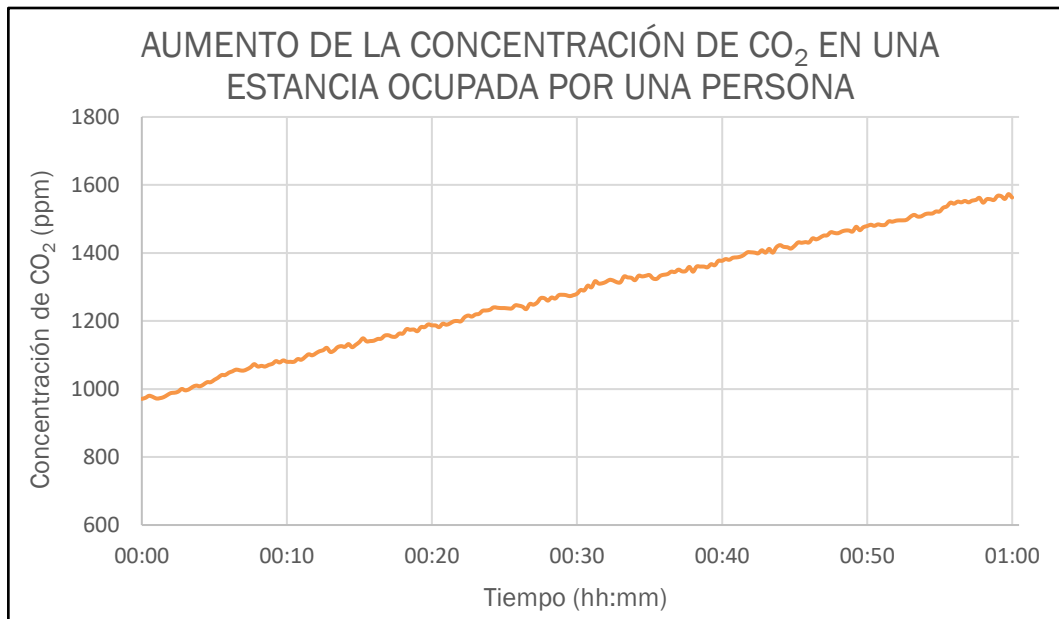


Figura 27. Aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en una estancia ocupada por una persona con la puerta cerrada.

En la Figura 27 se ha representado la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la estancia C cuando permanece una persona en el interior con la puerta cerrada.

La sonda registra un aumento de 592 ppm en una hora. Utilizando la ecuación (E- 2) para una estancia de 4'2 m de largo, 3'2 m de ancho y 2'4 m de alto, que supone un volumen de aire de unos 32 m<sup>3</sup>, obtenemos un aumento de aproximadamente 620 ppm; el hecho de que la sonda registre un valor menor puede deberse, tanto al proceso de exfiltración-infiltración que supone una reducción en la concentración de CO<sub>2</sub> (y que no se ha tenido en cuenta en los ensayos realizados), como a la pequeña corriente de aire que circula por debajo de la puerta de la estancia (siempre que en el resto de la casa la concentración sea mayor). Además, el dato utilizado como volumen de aire también es aproximado.





Debido a la evolución observada, a la hora de permanecer en una estancia con la puerta cerrada, conviene renovar el aire cada cierto tiempo para reducir la concentración de  $\text{CO}_2$ . Muchas veces puede ser suficiente con dejar la puerta de la estancia abierta para permitir que el aire de la estancia se mezcle con el resto del aire de la vivienda consiguiendo que se reduzca considerablemente la concentración de  $\text{CO}_2$  en la estancia. En todo caso, realizando una ventilación cruzada o unilateral, se conseguirá una mayor reducción en la concentración de  $\text{CO}_2$  de la estancia y en un intervalo de tiempo menor.

En definitiva, resulta conveniente mantener la concentración de  $\text{CO}_2$  de la estancia entre los niveles óptimos ya que, en caso contrario, puede afectar negativamente a nuestro rendimiento.



## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Siempre que se tenga la posibilidad de realizar una ventilación cruzada de una estancia o de la vivienda completa, frente a una ventilación unilateral, se logrará realizar una ventilación más eficiente, es decir, se reducirá la concentración de CO<sub>2</sub> en mayor medida y en un periodo de tiempo menor.

En caso de que se elija utilizar un aparato de medida para controlar la ventilación, siempre será mejor utilizar una sonda de CO<sub>2</sub>, aunque sea de baja calidad, que una sonda de temperatura. A pesar de que una sonda de CO<sub>2</sub> de baja calidad no devolvería valores muy precisos, la tendencia mostrada proporcionaría un criterio cualitativo adecuado, sin embargo, guiarse por la medida de la temperatura no resultaría fiable. De todas formas, puede ser suficiente con guiarse por el olfato, ya que es un buen indicador de la calidad del aire que respiramos, siempre y cuando no se esté presente en la estancia durante su ventilación.

En la mayor parte de los casos (siempre en función de la ocupación de la vivienda), será mejor ventilar al menos dos veces al día durante periodos más cortos de tiempo en vez de ventilar una sola vez. De esta manera se conseguirán reducir los picos en la concentración de CO<sub>2</sub>.

Ventilar durante un total de entre 10 y 15 minutos al día debería ser suficiente en la mayoría de los casos. De todas formas, tanto las condiciones de viento y temperatura exterior como la distribución particular de la vivienda modificarán el tiempo necesario para la renovación del aire y, como se ha explicado anteriormente, si la concentración de CO<sub>2</sub> media inicial de la vivienda es bastante alta, se necesitará ventilar durante más tiempo.

En invierno, cuando conviene ventilar durante las horas centrales del día para reducir el consumo energético que supone la pérdida de temperatura de la vivienda, es preferible ventilar durante los periodos de mayor ocupación. En cambio, en verano, suele ser mejor aprovechar las primeras horas de la mañana y de la noche para ventilar. En todo caso, en localizaciones con baja calidad del aire exterior conviene ajustar los momentos de ventilación para evitar las horas de mayor contaminación. En casos extremos, será conveniente disponer de equipos de purificación de aire para evitar la ventilación en esos periodos de máxima contaminación del aire exterior.



Cuando se está trabajando en una estancia con la puerta cerrada, interesará mantener la concentración de  $\text{CO}_2$  por debajo de determinado nivel. Por lo tanto, cada cierto tiempo será necesario ventilar la estancia. Para ello, puede ser suficiente con dejar la puerta de la estancia abierta para permitir que el aire de la estancia se mezcle con el resto del aire de la vivienda consiguiendo que se reduzca considerablemente la concentración de  $\text{CO}_2$  en la estancia. Sin embargo, resultará más eficiente realizar una ventilación cruzada o unilateral de la estancia.

Durante la noche también interesa que la concentración de  $\text{CO}_2$  de las estancias se mantenga entre los niveles aceptables para asegurar la calidad del sueño, y muchas veces será suficiente con dejar abierta la puerta de la estancia.

En definitiva, conviene mantener la concentración de  $\text{CO}_2$  de la vivienda entre los niveles óptimos en todo momento ya que una mala calidad del aire a causa de una alta concentración de  $\text{CO}_2$  puede producir cansancio y falta de concentración. Además, una alta concentración durante la noche afectará negativamente a la calidad del sueño.

Como trabajos futuros, se propone profundizar en el estudio de si resulta más eficiente ventilar dos veces al día en lugar de hacerlo una sola vez. Además, sería interesante extender los estudios realizados a otras viviendas, para contrastar y validar los resultados.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

AccuWeather. (s.f.). Recuperado el 9 de junio de 2022, de <https://www.accuweather.com/es/es/valladolid/307145/december-weather/307145?year=2021>

AEN/CTN 171 Calidad ambiental de interiores. (2014). UNE-EN ISO 16000-26. Aire de interiores. Parte 26: Estrategia del muestreo del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Madrid: AENOR.

Aguilar, A., de la Hoz-Torres, M., Costa, N., Arezes, P., Martínez-Aires, M., & Ruiz, D. (2022). Assessment of ventilation rates inside educational buildings in Southwestern Europe: Analysis of implemented strategic measures. *Journal of Building Engineering*, Vol. 51. doi:10.1016/j.job.2022.104204

ASHRAE. (abril de 2021). *ASHRAE Journal* Vol. 63 n<sup>o</sup>4, 56-60.

CEN/TC 156. (2017). UNE-CEN/TR 16798-4. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 4: Interpretación de los requisitos de la norma EN 16798-3 para edificios no residenciales. Madrid: AENOR.

Cuce, E., & Cuce, P. (2016). Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 54., 1345-1357.

Etheridge, D. (2011). *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. John Wiley and Sons. doi:10.1002/9781119951773

García-Pertierra, M. d. (2010). El viento: energía y riesgo. En A. M. Española (Ed.), *XXXI Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (2010)*. Sevilla. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11765/5507>

Hornero Pérez, R. (Abril de 2013). Estudio de la ventilación natural en un edificio y su efecto en el grado de confort de los ocupantes. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18512>

IADE. (2010). *Guía técnica. Condiciones climáticas de exteriores de proyecto*. Madrid.

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (s.f.). *NTP 343: Nuevos criterios para futuros estándares de ventilación de interiores*. Obtenido de



[https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp\\_343.pdf/d89f5d0c-f868-4181-8ed6-83a354d8fd49](https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp_343.pdf/d89f5d0c-f868-4181-8ed6-83a354d8fd49)

- Mentese, S., Mirici, N., Elbir, T., Palaz, E., Tadibi Mumcuoglu, D., Cotuker, O., . . . Tatman Otkun, M. (2020). A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 11, Issue 12, 2270-2281. doi:10.1016/j.apr.2020.07.016.
- Moreno-Rangel, A., Sharpe, T., McGill, G., & Musau, F. (2020). Indoor Air Quality in Passivhaus Dwellings: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17, Issue 13. doi:10.3390/ijerph17134749
- Poirier, B., Guyot, G., Woloszyn, M., Geoffroy, H., Ondarts, M., & Gonze, E. (2021). Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators. *Journal of Building Engineering*. doi:10.1016/j.jobe.2021.103140
- Rey, F., San José, J., Tejero, A., Rey Hernández, J., & Esquivias, P. (2021). *DTIE 1.07, Ventilación en edificios de vivienda*. Madrid: ATECYR.
- Roulet, C.-A., & Foradini, F. (2002). Simple and Cheap Air Change Rate Measurement Using CO<sub>2</sub> Concentration Decays. *International Journal of Ventilation*, Vol. 1, Issue 1, 39-44.
- Testo. (s.f.). Recuperado el 20 de junio de 2022, de <https://www.testo.com/es-AR/sonda-de-co-sub-2-/sub-ambiente/p/0632-1240>
- Testo Germany. (s.f.). Obtenido de <https://static-int.testo.com/media/4f/63/12fa44a894ea/testo-350-M-XL-Instruction-Manual.pdf>
- United Nations. (2018). *World Urbanization Prospects. The 2018 revision*. New York: United Nations.
- Van Dongen, J. (2007). *Occupant Behaviour and Attitudes with respect to Ventilation of Dwellings*. Brussels: International Energy Agency.
- Xiong, J., Lan, L., Lian, Z., & De dear, R. (2020). Associations of bedroom temperature and ventilation with sleep quality. *Science and Technology for the built environment*, Vol. 26, Issue 9., 1274-1284. doi:10.1080/23744731.2020.1756664



## 7. ANEXO: TABLAS DE OCUPACIÓN DE LA VIVIENDA.

Para las mediciones realizadas durante largos periodos de tiempo se han ido rellenando una serie de tablas con el fin de poder realizar un seguimiento del número de ocupantes que ha habido en la casa y en la estancia correspondiente en cada momento.

Tabla 6. Ocupación de la estancia C los días 12-15 de diciembre.

HORA	Nº DE OCUPANTES DE LA CASA	Nº DE OCUPANTES DE LA ESTANCIA	OBSERVACIONES
<b>12 de diciembre</b>			
17:00	1 + perro	0	Ventanas abiertas 4 min salvo la v4
17:45	2 + perro	0	-
18:35	3 + perro	1	Puerta abierta
18:40	3 + perro	0	-
19:00	3 + perro	1	Puerta cerrada
20:15	3 + perro	0	-
20:26	3 + perro	1	Puerta abierta
20:30	2 + perro	0	-
23:21	3 + perro	1	Puerta abierta
23:50	3 + perro	1	Puerta cerrada
<b>13 de diciembre</b>			
00:05	3 + perro	1	Puerta abierta
06:40	3 + perro	0	-
06:52	3 + perro	1	Puerta abierta
07:00	3 + perro	0	-
07:28	2 + perro	0	-
08:00	1 + perro	0	-
09:45	0	0	-
10:20	1 + perro	0	-
10:30	Perro	0	-
10:35	1 + perro	0	-
11:35	2 + perro	0	-
14:00	2 + perro	0	Ventanas abiertas 4 min salvo la v4
15:20	1 + perro	0	-
15:50	Perro	0	-
17:22	1 + perro	1	Puerta abierta
17:30	1 + perro	0	-
17:36	1 + perro	0	Ventanas abiertas 4 min salvo la v4
17:45	0	0	-
18:05	1 + perro	1	Puerta abierta
18:17	1 + perro	0	-
18:24	Perro	0	-



18:41	1 + perro	1	Puerta abierta
18:45	1 + perro	0	-
19:07	1 + perro	1	Puerta abierta
21:20	2 + perro	1	Puerta abierta
21:25	2 + perro	1	Puerta cerrada
21:45	3 + perro	1	Puerta cerrada
22:55	3 + perro	1	Puerta abierta
23:45	3 + perro	1	Puerta abierta (durmiendo)
<b>14 de diciembre</b>			
06:30	3 + perro	0	-
06:43	3 + perro	1	Puerta abierta
06:52	3 + perro	0	-
07:16	3 + perro	1	Puerta abierta
07:26	2 + perro	0	-
07:55	1 + perro	0	-
09:15	2 + perro	0	-
09:50	1	0	-
10:25	2 + perro	0	-
10:43	1 + perro	0	-
11:23	2 + perro	0	-
12:00	1 + perro	0	-
14:00	1 + perro	0	Ventanas abiertas 4 min salvo la v4
14:10	2 + perro	0	-
15:20	1 + perro	0	-
15:50	Perro	0	-
17:20	1 + perro	0	-
17:38	1 + perro	0	Ventanas abiertas 4 min salvo la v4
17:45	0	0	-
18:10	1 + perro	0	-
18:24	1 + perro	1	Puerta abierta
20:22	Perro	0	-
20:40	1 + perro	0	-
21:05	2 + perro	0	-
22:55	3 + perro	1	Puerta abierta
23:01	3 + perro	0	-
23:08	3 + perro	1	Puerta abierta
23:45	3 + perro	1	Puerta abierta (durmiendo)
<b>15 de diciembre</b>			
06:33	3 + perro	0	-
06:52	3 + perro	1	Puerta abierta
06:56	3 + perro	0	-



Tabla 7. Ocupación de la estancia C los días 19-22 de diciembre.

HORA	Nº DE OCUPANTES DE LA CASA	Nº DE OCUPANTES DE LA ESTANCIA	OBSERVACIONES
<b>19 de diciembre</b>			
17:00	2 + perro	0	Ventanas abiertas 17 min salvo la v4
17:20	1 + perro	0	-
19:30	2 + perro	0	-
20:30	3 + perro	1	Puerta abierta
21:25	3 + perro	0	-
21:50	3 + perro	1	Puerta cerrada
23:21	3 + perro	0	-
23:25	3 + perro	1	Puerta abierta
23:30	3 + perro	0	-
23:40	3 + perro	1	Puerta abierta
23:50	3 + perro	1	Puerta cerrada
<b>20 de diciembre</b>			
00:18	3 + perro	1	Puerta abierta
06:49	3 + perro	0	-
07:05	3 + perro	1	Puerta abierta
07:10	3 + perro	0	-
07:25	3 + perro	1	Puerta abierta
07:32	2 + perro	0	-
07:55	1 + perro	0	-
09:20	Perro	0	-
09:25	1 + perro	0	-
09:50	0	0	-
10:30	1 + perro	0	-
10:40	2 + perro	0	-
11:05	1 + perro	0	-
13:00	2 + perro	0	-
13:56	2 + perro	0	Ventanas abiertas 10 min salvo la v4
15:20	1 + perro	0	-
16:05	Perro	0	-
17:26	1 + perro	1	Puerta abierta
17:38	1 + perro	0	-
17:48	0	0	-
18:13	1 + perro	1	Puerta abierta
18:38	Perro	0	-
19:09	1 + perro	1	Puerta abierta
19:22	1 + perro	0	-
20:00	1 + perro	1	Puerta abierta
21:20	2 + perro	1	Puerta abierta
21:25	2 + perro	1	Puerta cerrada
21:45	3 + perro	1	Puerta cerrada
23:00	3 + perro	1	Puerta abierta
23:40	3 + perro	1	Puerta abierta (durmiendo)
<b>21 de diciembre</b>			





06:33	3 + perro	0	-
06:50	3 + perro	1	Puerta abierta
06:55	3 + perro	0	-
07:08	3 + perro	1	Puerta abierta
07:17	3 + perro	0	-
07:20	3 + perro	1	Puerta abierta
07:25	3 + perro	0	-
07:30	2 + perro	0	-
08:00	1 + perro	0	-
09:20	2 + perro	0	-
09:50	1	0	-
10:30	2 + perro	0	-
11:00	1 + perro	0	-
11:50	2 + perro	0	-
13:50	1 + perro	0	-
13:56	1 + perro	0	Ventanas abiertas 10 min (salvo v4)
14:15	2 + perro	0	-
15:20	1 + perro	0	-
15:50	Perro	0	-
17:32	1 + perro	0	-
17:55	1 + perro	1	Puerta abierta
18:04	0	0	-
18:20	Perro	0	-
18:55	1 + perro	0	-
19:05	1 + perro	1	Puerta abierta
20:00	1 + perro	0	-
20:18	1 + perro	1	Puerta abierta
20:28	Perro	0	-
20:35	1 + perro	0	-
21:20	2 + perro	0	-
23:18	3 + perro	1	Puerta abierta
23:25	3 + perro	0	-
23:30	3 + perro	1	Puerta abierta
<b>22 de diciembre</b>			
00:00	3 + perro	1	Puerta abierta (durmiendo)
06:36	3 + perro	0	-
06:50	3 + perro	1	Puerta abierta
06:58	3 + perro	0	-
07:20	3 + perro	1	Puerta abierta
07:33	2 + perro	0	-



Tabla 8. Resumen de la ocupación de la vivienda los días 12-15 dic y 19-22 dic.

OCUPACIÓN TOTAL DE LA VIVIENDA (h:mm)					OCUPACIÓN DE LA ESTANCIA C (1 persona) (h:mm)	
3 pers.	2 pers.	1 pers.	0 pers.	Suponiendo siempre 3 pers.	Puerta cerrada	Puerta abierta
<b>12 dic (17:00 - 06:00)</b>						
8:34	3:41	0:45	0:00	11:16	1:30	6:33
<b>19 dic (17:00 - 06:00)</b>						
9:30	1:20	2:10	0:00	11:06	1:59	6:52
<b>13 dic (06:00 - 14:00)</b>						
1:28	2:57	2:55	0:40	4:24	0:00	0:48
<b>20 dic (06:00 - 14:00)</b>						
1:32	1:48	3:55	0:40	4:02	0:00	1:01
<b>13 dic (14:00 - 18:00)</b>						
0:00	1:20	0:53	1:47	1:11	0:00	0:08
<b>20 dic (14:00 - 18:00)</b>						
0:00	1:20	1:07	1:33	1:15	0:00	0:12
<b>13 dic (18:00 - 06:00)</b>						
8:15	0:25	2:58	0:22	9:31	1:30	9:39
<b>20 dic (18:00 - 06:00)</b>						
8:15	0:25	2:36	0:44	9:24	1:35	9:03
<b>14 dic (06:00 - 14:00)</b>						
1:26	1:59	4:35	0:00	4:17	0:00	0:49
<b>21 dic (06:00 - 14:00)</b>						
1:30	3:30	3:00	0:00	4:50	0:00	0:52
<b>14 dic (14:00 - 18:00)</b>						
0:00	1:10	1:05	1:45	1:09	0:00	0:00
<b>21 dic (14:00 - 18:00)</b>						
0:00	1:05	1:13	1:42	1:07	0:00	0:05
<b>14 dic (18:00 - 06:00)</b>						
7:05	1:50	2:37	0:28	9:10	0:00	8:19
<b>21 dic (18:00 - 06:00)</b>						
6:42	1:58	2:22	0:58	8:48	0:00	7:46