

Ventilación y CO₂, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental

MIGUEL ÁNGEL CAMPANO

JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA

JUAN JOSÉ SENDRA

MARÍA SÁNCHEZ-MUÑOZ

Escuela Técnica Superior de Arquitectura,
Universidad de Sevilla (US), Sevilla, España

Lista de acrónimos

ACH renovaciones por hora (acrónimo del inglés *air changes per hour*).

CCD (ventilación) continua, cruzada y distribuida.

CO₂ dióxido de carbono.

COVID-19 acrónimo de enfermedad por coronavirus (del inglés *COronaVirus Disease 2019*).

C_r concentración de CO₂ en el aire exhalado por una persona adulta (en ppm).

H⁺ protón.

H₂CO₃ ácido carbónico.

HCO₃⁻ bicarbonato.

IDA calidad del aire interior (acrónimo del inglés *indoor air quality*).

pH medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa.

PM materia particulada (acrónimo del inglés *particulate matter*).

RFA fracción de aire previamente respirado (acrónimo del inglés *rebreathed fraction of air*).

SBS síndrome del edificio enfermo (acrónimo del inglés *sick building syndrome*).

SMS herramienta de simulación de desempeño estratégico (acrónimo del inglés *strategic management simulation*).

VMC ventilación mecánica controlada.

VOC compuestos orgánicos volátiles (acrónimo del inglés *volatile organic compounds*).

1.1. Introducción

La población de los países industrializados pasa entre un 80% y un 90% de su tiempo en interiores, incluyendo especialmente a la población más vulnerable, como niños, ancianos y enfermos [1-3]. De no existir una ventilación adecuada, se producirá una degradación del ambiente interior, lo que puede conllevar sintomatologías y problemas de salud; pérdida de rendimiento cognitivo, es decir, disminución de la capacidad de realizar tareas que requieran pensamiento o concentración, y generación de condiciones de alta transmisión de enfermedades respiratorias.

Es, por tanto, una cuestión de salud pública el procurar que la población esté expuesta a una buena calidad del aire en estos ambientes interiores, recurriendo para ello a una ventilación suficiente.

1.2. Ventilación contra la degradación ambiental

La ventilación permite mantener en niveles adecuados, entre otros, los siguientes parámetros y contaminantes ambientales derivados de la actividad humana (que se describirán con más detalle en capítulos posteriores):

- dióxido de carbono y otros gases;
- vapor de agua;
- materia particulada (PM) y aerosoles;
- compuestos orgánicos volátiles (VOC);
- bacterias, virus, hongos, etc.;
- olores relativos a la actividad humana.

1.2.1. ¿Cómo se realiza la ventilación?

La renovación de aire en un recinto mediante la introducción de aire exterior puede realizarse básicamente de dos formas diferentes (figura 1.1):

- Ventilación natural: el aire se renueva mediante la apertura de ventanas o puertas, así como por la entrada de infiltraciones incontroladas a través de la envolvente. Para que sea efectiva, se recomienda que esta sea CCD, o sea, continua en el tiempo, cruzada (apertura de ventanas y puertas en diferentes paramentos) y distribuida en su superficie.
- Ventilación mecánica controlada (VMC): el aire es tanto introducido como extraído del recinto mediante el empleo de un sistema de ventilación que, entre otros elementos, cuenta con ventiladores capaces de vehicular el aire (sistemas de doble flujo). Al igual que en la ventilación natu-

ral, se recomienda que esta sea continua, con una distribución adecuada de los elementos de impulsión y extracción, y que no tenga zonas donde el aire se acumule y «estaque», impidiendo su renovación.

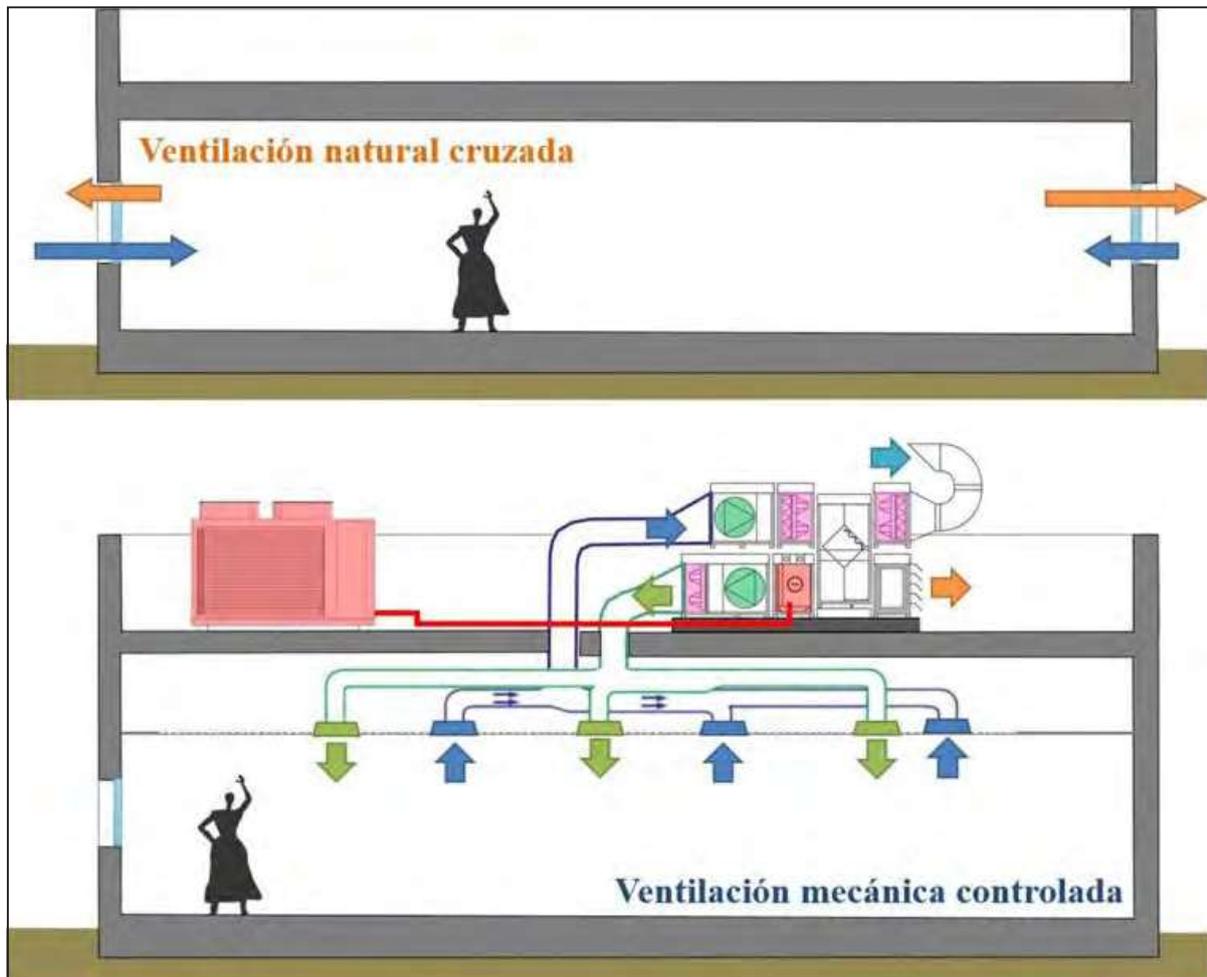


Figura 1.1. Ventilación natural y ventilación mecánica controlada.

Existen otros modos de ventilación, además de estos dos, como el modelo de ventilación híbrido, de flujo simple, en el que la extracción se realiza mecánicamente y la admisión se produce mediante la entrada incontrolada de aire en el recinto a través de huecos o aperturas en la envolvente, debido a la depresión generada; o la variante simétrica de este modelo de ventilación, en el que la impulsión es realizada mecánicamente, lo que genera una sobrepresión en el recinto, confiando en que el aire será extraído a través de las grietas o huecos de la envolvente.

Siempre que esté adecuadamente dimensionada, se considera que la VMC es la opción más fiable y adecuada para solventar la ventilación de un recinto, ya sea de forma constante o regulándose según la necesidad. Así lo recogen las diferentes normativas de ventilación, como se indicará posteriormente. En el caso de la ventilación natural, al depender enormemente de las con-

diciones exteriores (temperatura del aire, además de dirección y velocidad del viento), no se puede garantizar que solvente las necesidades del recinto a lo largo del tiempo, especialmente en días calurosos con baja o nula presión de viento.

Para regular el sistema de VMC o para modular la apertura de ventanas y puertas con ventilación natural, es altamente deseable conocer cuál es la necesidad real de ventilación del espacio, ya sea para evitar el exceso de consumo energético del espacio o para aumentar la tasa de ventilación.

1.2.2. ¿Cómo se cuantifica y evalúa la ventilación?

El nivel de ventilación que requiere un recinto puede expresarse con diferentes indicadores, todos ellos relacionados entre sí. Esto permite controlar el nivel de los parámetros y contaminantes anteriormente descritos.

Dichos indicadores del nivel de ventilación pueden ser indirectos (se asume que con una cantidad de aire determinada se puede lograr la dilución requerida) o directos (permite regular la cantidad de aire fresco según la evolución del recinto).

Entre los indicadores indirectos más usados están los siguientes (figura 1.2):

- Caudal de aire. Es habitual que, para mayor comodidad, se indique que el flujo de aire de renovación exterior se establezca por ocupante o por unidad de superficie (m^2). Puede expresarse en:
 - metros cúbicos por hora (m^3/h),
 - litros por segundo (l/s).
- Renovaciones por hora (ACH, *air changes per hour*, en h^{-1}). Con 1 ACH se introduce en una hora un caudal de aire exterior equivalente al volumen de la sala.

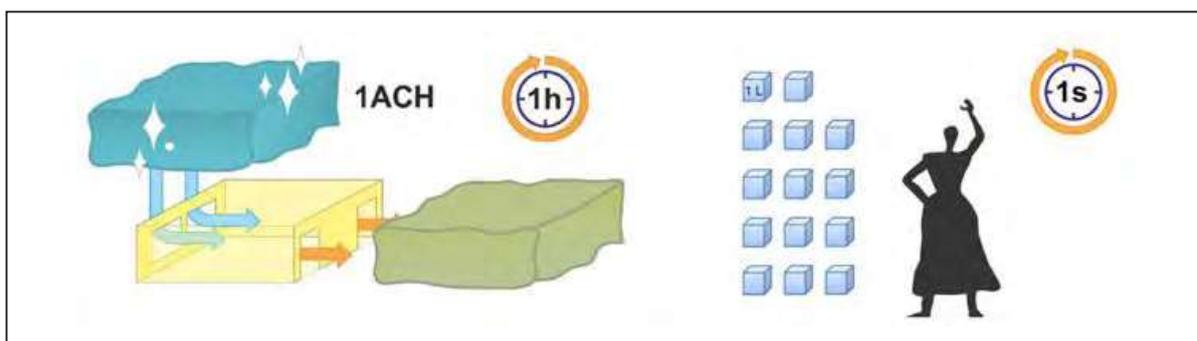


Figura 1.2. Ventilación según ACH y caudal de aire (l/s) [4].

Sin embargo, para poder regular con mayor precisión la cantidad de ventilación necesaria de un recinto, es preciso determinar su nivel de degradación a lo largo del tiempo mediante indicadores de tipo directo.

Con este fin, se puede recurrir a la medición continuada del dióxido de carbono, dado que, además de ser un contaminante en recintos ocupados, también puede actuar como indicador indirecto de olores y contaminantes derivados de la actividad humana (bioefluentes). Así, al monitorizar la evolución del nivel de dióxido de carbono en un espacio, es posible conocer de forma sencilla, fiable y asequible si se produce una adecuada renovación de aire.

1.3. ¿Qué es el dióxido de carbono?

El dióxido de carbono (CO_2) es un compuesto químico que, en condiciones atmosféricas normales, existe en forma de gas incoloro. Su concentración se puede medir en partes por millón (ppm), haciendo referencia a la cantidad de unidades que hay de este elemento por cada millón de partes de aire contaminado.

La concentración de CO_2 en el exterior suele ser estable y situarse en torno a 420 ppm [5], con una leve fluctuación según la estación del año, pudiendo también ser más elevada en entornos urbanos o industriales [6]. Este compuesto también es producido y liberado como parte del proceso respiratorio de los organismos aerobios, entre los que se encuentra el ser humano, además de liberarse en procesos de combustión.

La tasa de emisión de CO_2 de las personas durante la respiración depende, entre otros factores, de edad, sexo biológico y peso del individuo, y de la actividad desarrollada (actividad metabólica).

1.3.1. Monitorización del nivel de CO_2

Dado que el CO_2 es exhalado durante la respiración, es posible utilizar, en espacios libres de procesos de combustión y con ocupación humana, su nivel relativo –esto es, la diferencia entre el valor medido en el interior y el existente en el exterior– como indicador indirecto para caracterizar el proceso de la ventilación, así como representación (o *proxy*) del nivel de humedad relativa, de contaminantes y de bioefluentes generados por dicha actividad, además del posible riesgo relativo existente de transmisión de enfermedades aéreas.

Por esto, diversas guías y normas, tanto españolas como de ámbito internacional, establecen que el dióxido de carbono puede actuar como indicador indirecto de esta degradación ambiental, a fin de establecer el caudal mínimo del aire exterior de ventilación.

La exposición prolongada a ambientes con valores medios y altos de dióxido de carbono puede tener una serie de efectos negativos en la salud, así

como en el rendimiento cognitivo. De ahí, la relevancia de la monitorización de este parámetro.

1.3.2. Porcentaje de aire previamente respirado

Otra forma de expresar cuál es la concentración de CO₂ es mediante el empleo del porcentaje de aire previamente respirado (*RFA, rebreathed fraction of air*). Así, es posible entender de forma intuitiva cuál es la fracción de aire del recinto que ya ha pasado por los pulmones de los ocupantes de dicho espacio. Esto puede tener utilidad para evaluar cuál es el riesgo de transmisión aérea de algunas enfermedades.

Considerando que el aire que exhala una persona adulta tiene una concentración de CO₂ de, aproximadamente, 40.000 ppm (C_r), y conocida la diferencia del nivel de CO₂ entre el interior y el exterior en un instante dado ($D[CO_2]$), el porcentaje de aire previamente respirado de un recinto (*RFA*) se puede expresar como (ecuación 1):

$$RFA = 0,0025 \cdot \Delta [CO_2] \text{ (ppm)} \quad \text{Ecuación 1}$$

1.4. Impacto directo del nivel de CO₂ en la salud

La inhalación de dióxido de carbono en ambientes con niveles moderados y elevados (superiores a los habituales en edificación, pero más frecuentes en espacios con muy baja renovación de aire, como submarinos o incluso estaciones espaciales) puede generar efectos respiratorios y cardiovasculares, así como cambios fisiológicos en la química de la sangre (presión sanguínea, tasa cardíaca, solubilidad, etc.). A niveles muy elevados, se han documentado incluso respuestas similares a ataques de pánico y experiencias de estrés fisiológico [7].

Para el caso de niveles de concentración de dióxido de carbono relevantes en edificios (por debajo de 5.000 ppm), se ha encontrado una correlación entre el valor absoluto de CO₂ y la aparición de síntomas tales como dolor de cabeza, fatiga o dolor de garganta [8], observándose también una serie de efectos cognitivos negativos con concentraciones menores.

1.4.1. Efectos adversos para la salud asociados a la exposición al CO₂

Los efectos adversos para la salud asociados a la exposición al CO₂, ya sea puntual o continuada, pueden ser respiratorios y de las membranas mucosas, cardiovasculares o manifestarse en la química sanguínea.

Efectos en la química de la sangre

El CO_2 reacciona con el agua en el torrente sanguíneo para formar ácido carbónico (H_2CO_3), que luego se disocia en bicarbonato (HCO_3^-) y protones (H^+), alterando el pH, cuya disminución (acidosis) activa los quimiorreceptores arteriales periféricos y medulares, estimulando la ventilación en los músculos respiratorios. Así, se ha podido observar dicha disminución en el pH de la sangre (acidosis) en sujetos expuestos de forma continuada a concentraciones elevadas de CO_2 (de 7.000 a 15.000 ppm durante al menos 20 días) [9]. Por ello, diversas normas de calidad del aire interior en entornos residenciales han fijado valores límite de 3.500 ppm, tras aplicar un factor de incertidumbre de 2 a partir de estos estudios.

Efectos respiratorios y de las membranas mucosas

Se han encontrado vínculos entre una elevada concentración de CO_2 y diversos síntomas respiratorios y de las membranas mucosas [8]. Efectos como irritación de ojos, dolor de garganta o garganta seca, nariz congestionada, estornudos y tos están más presentes en individuos expuestos a concentraciones de $\text{CO}_2 > 800$ ppm que en otros expuestos a niveles más bajos de dióxido de carbono [10]. Y se han asociado valores de dióxido de carbono superiores a 1.000 ppm con un mayor riesgo de experimentar rinitis (estornudos/secreción nasal/congestión nasal) [11].

Si la exposición aguda por inhalación de CO_2 se produce a niveles muy elevados (entre 50.000 y 80.000 ppm), se produce una disminución de la conductancia específica de las vías respiratorias, causando síntomas respiratorios [12]. Y si se produce a niveles aún más altos (> 350.000 ppm) se produce irritación nasal que puede incluso causar asfixia (700.000 ppm) debido al desplazamiento de oxígeno.

Por otra parte, los efectos más habituales son los oculares, respiratorios (como irritación de nariz o garganta, rinitis, tos) y generales (como fatiga y dolor de cabeza), que se pueden relacionar con el tiempo que se pasa habitualmente en un edificio, en particular en espacios como oficinas [13].

La concentración de dióxido de carbono generalmente se puede considerar como sustituto (*proxy*) de otras concentraciones de contaminantes (bioefluentes) derivados de la ocupación y como indicador de la tasa de ventilación. En este sentido, se han encontrado evidencias de que las personas con ciertas afecciones de salud (como alergias y asma) son más propensas a reportar sintomatología relacionada con el edificio específico en el que se encuentran (lo que se denomina «síndrome del edificio enfermo», *sick building syndrome*, SBS) que aquellos sin estas condiciones [14].

Efectos cardiovasculares

El dióxido de carbono es también un potente vasodilatador. Diversos estudios han analizado el efecto de concentraciones de CO₂ de hasta 5.000 ppm en la variabilidad de la frecuencia cardíaca y el aumento de la presión arterial y la circulación sanguínea. Existiendo una mayor dependencia de una mayor concentración de biofluentes que de un mayor nivel de CO₂, o incluso de la combinación de ambos [15]. Estos estudios concluyen que, para esas concentraciones de CO₂, la dependencia de estos efectos cardiovasculares es menor que la se produce con las concentraciones altas de biofluentes.

Si la exposición por inhalación a concentraciones más elevadas de CO₂ (7.000 o 12.000 ppm) es prolongada en el tiempo (estudios realizados con ensayos de 20 o más días), los efectos cardiovasculares de dicha exposición se manifiestan en una capacidad de difusión reducida para el monóxido de carbono (CO) y una caída en el gasto cardíaco, así como un aumento de la ventilación (aire intercambiado entre el ambiente y los alveolos pulmonares) y un aumento temporal del ritmo cardíaco y respiratorio [16].

1.4.2. Deterioro de funciones cognitivas

Existen múltiples estudios que señalan que estar en ambientes con valores moderados de CO₂ (por debajo de 5.000 ppm) pueden afectar al desarrollo cognitivo de alto nivel, es decir, disminuir la capacidad para realizar tareas relativamente complejas que requieran pensamiento o concentración. Esto incluye la toma de decisiones y la resolución de problemas [17].

El estar expuesto a estas concentraciones de CO₂ se asocia en gran medida con el desarrollo del SBS [18], además de con un mayor absentismo y descenso del rendimiento cognitivo en estudiantes de Primaria [19].

Un estudio [20] mostró en 2012 una reducción en el rendimiento de tareas de corrección cuando se comparaban valores de CO₂ de 3.000-4.000 frente a 600 ppm, visibles únicamente cuando la dificultad de estas tareas y la duración de la exposición se incrementaban. A partir de este trabajo, Satisch *et al.* [21] demostraron que existía una dependencia significativa entre la calidad de la toma de decisiones y el nivel absoluto de CO₂ al que se sometían los voluntarios (1.000 y 2.500 ppm, frente a un valor mínimo de 600 ppm), utilizando para ello una serie de baterías de test previamente validados. En la figura 1.3 se puede observar que, al incrementar de 600 a 1.000 ppm el valor de CO₂ de la sala donde se realiza el estudio, se obtiene una bajada de hasta 15 puntos en los percentiles obtenidos en algunas de las pruebas (en otras, las diferencias fueron menores o incluso nulas), pudiendo aumentar esta disminución hasta en 30-50 puntos en varios de los ensayos, cuando el nivel absoluto de CO₂ subió a 2.500 ppm.

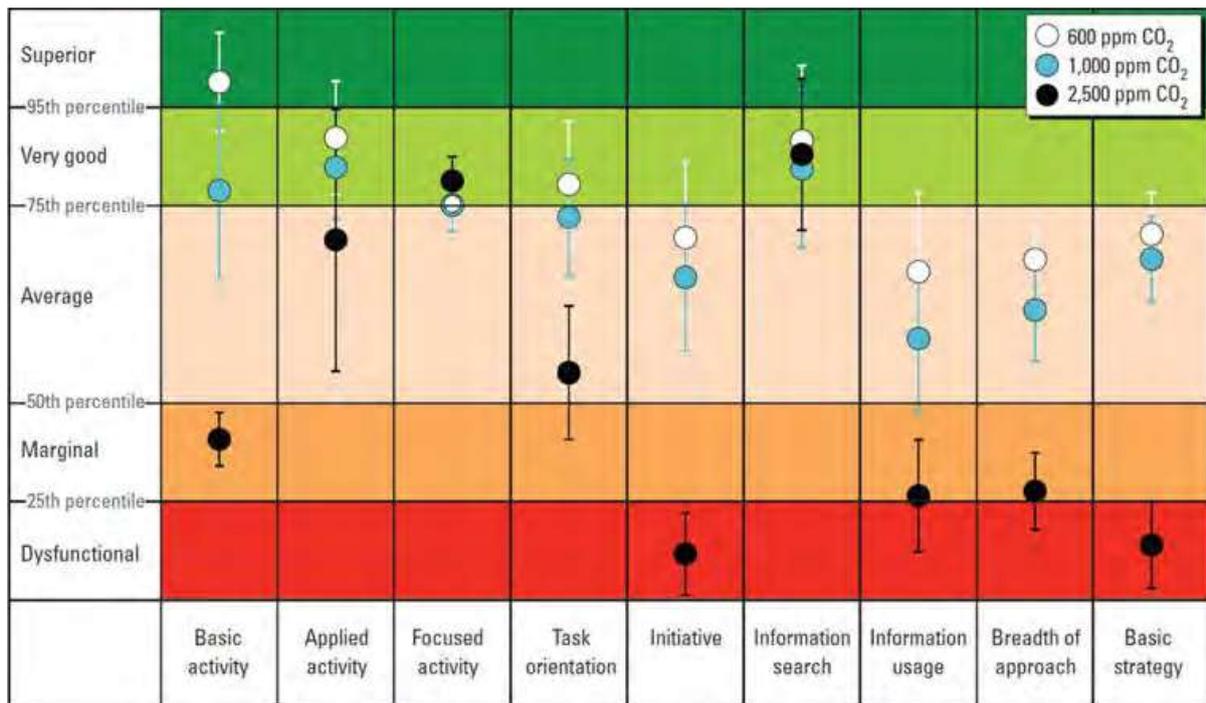


Figura 1.3. Resultados de ensayos de funciones cognitivas para tres niveles de CO₂ [21].

J. G. Allen *et al.* [22] realizaron un estudio en el que se analizaron nueve dominios de función cognitiva bajo diversas condiciones de CO₂ y VOC, todo ello a través de ensayos validados mediante la herramienta informática SMS (Strategic Management Simulation), realizados a lo largo de una semana en un horario convencional de oficina de ocho horas. Se pudo observar que las puntuaciones cognitivas promedio disminuyeron de forma significativa en siete de estos nueve dominios, conforme aumentaban los niveles de CO₂ absolutos; en concreto, fueron un 15 % más bajas con un nivel de 945 ppm, mientras que disminuyeron un 50 % con concentraciones de 1.400 ppm.

En promedio, el aumento de 400 ppm de CO₂ se pudo asociar con una disminución del 21 % en las puntuaciones cognitivas de los participantes en todos los dominios. Igualmente, los estudios de Bakó-Biró *et al.* [23] también demostraron que se producía una disminución significativa en el desempeño de tareas cognitivas en centros educativos de Primaria cuando se sometía a los estudiantes a una exposición a niveles ambientales elevados de CO₂.

1.5. Transmisión de enfermedades aéreas

La medición de CO₂ también permite estimar el riesgo potencial de transmisión de enfermedades aéreas en recintos con ocupación humana, en el caso de que haya uno o más ocupantes infecciosos en el espacio analizado.

Es posible emplear el valor relativo de CO₂ como indicador indirecto de dicho riesgo, dado que el CO₂ es exhalado junto con otros bioefluentes, entre los que destacan bioaerosoles potencialmente infectivos en sujetos infecciosos [24].

A partir de este planteamiento, restringir el valor límite admisible de CO₂ en recintos interiores con ocupación humana contribuye a reducir el riesgo de contagio, especialmente en periodos de alta incidencia epidémica. Esta vinculación entre CO₂ y riesgo se ampliará con más detalle en posteriores capítulos.

1.6. Normativas, directrices y guías para la regulación de los niveles de CO₂ en espacios interiores

El establecimiento de límites admisibles de CO₂ por parte de normativas, directrices y guías responde, por tanto, a la necesidad de controlar su efecto en la salud como contaminante o como indicador indirecto de enfermedades de transmisión aérea o de otros contaminantes derivados de la actividad humana.

Los niveles de ventilación en espacios interiores se encuentran regulados en España por un conjunto de normativas y directrices en las que se establece una serie de límites de CO₂ para espacios interiores según su uso (viviendas, lugares de trabajo, etc.):

- Residencial vivienda:
 - Documento DB-HS3 del Código Técnico de la Edificación, CTE [25].
- Otros usos diferentes a residencial vivienda:
 - Documento DB-HE2 del Código Técnico de la Edificación.
 - Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE [26].
- Lugares de trabajo:
 - Real Decreto 486/1997: Disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo [27], [28].

También existen otros documentos que, aunque no obligan a cumplir los límites máximos de CO₂ que marcan, son de gran ayuda para saber cómo actuar, como, por ejemplo, la *Nota técnica de prevención 549* (NTP 549) [29] o la *Guía para la ventilación en aulas* [30], entre otros.

Los diferentes niveles límite de CO₂ que plantean estos documentos, tanto relativos (diferencial entre interior y exterior) como absolutos, quedan recogidos en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Niveles límite de CO₂ según normativas y guías

Documento	Nivel de calidad del aire	Valor relativo límite de CO ₂ (ppm)	Valor absoluto límite de CO ₂ (ppm)
CTE DB-HS3	Media anual	-	900
	Límite para acumulación anual	-	1.600
RITE (método C por concentración de CO ₂)	IDA 1 (ocupantes sensibles)	350	770
	IDA 2 (ocupación permanente)	500	920
	IDA 3 (ocupación temporal)	800	1.220
RD 486/97	Uso sedentario y sin humo	≈ 800 (extrapolación)	≈ 1.220 [27]
		≈ 600 (extrapolación)	1.000 [28]
NTP 549	Exposición diaria (8 horas)	-	5.000
	Exposición corta (15 minutos)	-	15.000
	Indicador de contaminación	-	1.000

La figura 1.4 recoge los límites de CO₂ planteados por la guía de ventilación elaborada por Aireamos, que fue desarrollada como respuesta a la emergencia sanitaria del SARS-CoV-2 a partir de la evidencia científica existente sobre la transmisión de este virus por bioaerosoles [31-33], así como por otros documentos elaborados para la disminución del riesgo de contagio en aulas [4].



Figura 1.4. Límites de CO₂ como indicador indirecto de riesgo de infección de la *Guía de ventilación en aulas para prevención de COVID-19* [30].

Dicha guía plantea de forma simplificada que el umbral límite absoluto para el valor relativo de CO₂ no debería sobrepasar las 700 ppm, proponiendo 800 ppm como valor a partir del cual deberían tomarse medidas inmediatas para mejorar la ventilación del recinto.

Referencias

- [1] N. E. Klepeis, W. C. Nelson, W. R. Ott, J. P. Robinson, A. M. Tsang, P. Switzer, J. V Behar, S. C. Hern y W. H. Engelmann, «The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants», *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 11, pp. 231-252, 2001, doi: 10.1038/sj.jea.7500165.
- [2] W. R. Lane, *Education, Children and Comfort*. Ames, IA, EE.UU, University of Iowa, 1965.
- [3] C. Schweizer, R. D. Edwards, L. Bayer-Oglesby, W. J. Gauderman, V. Ilacqua, M. J. Jantunen, H. K. Lai, M. Nieuwenhuijsen y N. Künzli, «Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe», *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 17, pp. 170-181, 2007, doi: 10.1038/sj.jes.7500490.
- [4] M. de la C. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi y T. Garrido, *Guía para ventilación en aulas*, 2020, doi: 10.20350/digitalCSIC/12677.
- [5] AEMET, *El observatorio de Izaña vuelve a registrar en mayo de 2021 un máximo histórico en la concentración de dióxido de carbono (CO₂)*, 2021. <https://aemetblog.es/2021/06/21/el-observatorio-de-izana-vuelve-a-registrar-en-mayo-de-2021-un-maximo-historico-en-la-concentracion-de-dioxido-de-carbono-co2/>
- [6] K. George, L. H. Ziska, J. A. Bunce y B. Quebedeaux, «Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect», *Atmos. Environ.*, vol. 41, n.º 35, pp. 7654-7665, 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.08.018.
- [7] J. Kaye, F. Buchanan, A. Kendrick, P. Johnson, C. Lowry, J. Bailey, D. Nutt y S. Lightman, «Acute carbon dioxide exposure in healthy adults: evaluation of a novel means of investigating the stress response», *J. Neuroendocrinol.*, vol. 16, n.º 3, pp. 256-264, 2004, doi: 10.1111/j.0953-8194.2004.01158.x.
- [8] P. Wargocki, D. P. Wyon, J. Sundell, G. Clausen y P. O. Fanger, «The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity», *Indoor Air*, vol. 10, n.º 4, pp. 222-236, 2001, doi: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004222.x.
- [9] K. E. Schaefer, «Effects of increased ambient CO₂ levels on human and animal health», *Experimentia*, vol. 38, n.º 10, pp. 1163-1168, 1982, doi: 10.1007/BF01959726.

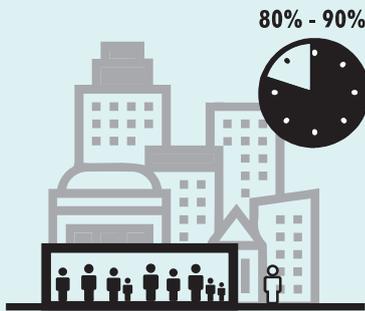
- [10] D. Norbäck, G. Wieslander, X. Zhang y Z. Zhai, «Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study», *Indoor Air*, vol. 21, pp. 427-437, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00717.x.
- [11] M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, M. Cancianie, P. Sestini y G. Viegi, «School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children», *Eur. Respir. J.*, vol. 35, n.º 4, pp. 742-749, 2010, doi: 10.1183/09031936.00016309.
- [12] C. M. Maresh, L. E. Armstrong, S. A. Kavouras, G. J. Allen, D. J. Casa, M. Whittlesey y K. E. LaGasse, «Physiological and Psychological Effects Associated with High Carbon Dioxide Levels in Healthy Men», *Aviat. Space. Environ. Med.*, vol. 68, n.º 1, pp. 41-45, 1997.
- [13] P. S. Burge, «Sick building syndrome», *Occup. Environ. Med.*, vol. 61, pp. 185-190, 2004, doi: 10.1136/oem.2003.008813.
- [14] C. A. Erdmann and M. G. Apte, «Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset», *Indoor Air*, vol. 14, pp. 127-134, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00298.x.
- [15] T. Vehviläinen, H. Lindholm, H. Rintamäki, R. Pääkkönen, A. Hirvonen, O. Niemi y J. Vinha, «High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work», *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 13, n.º 1, pp. 19-29, 2016, doi: 10.1080/15459624.2015.1076160.
- [16] A. Gundel, J. Drescher y M. R. Weihrauch, «Joint NASA-ESA-DARA study. Part three: cardiorespiratory response to elevated CO₂ levels during sleep», *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 69, n.º 5, pp. 496-500, 1998, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9591621/>
- [17] K. Azuma, N. Kagi, U. Yanagi y H. Osawa, «Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: a short review on human health and psychomotor performance», *Environ. Int.*, vol. 121, pp. 51-56, 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.08.059.
- [18] O. Seppänen and W. J. Fisk, «Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers», *Indoor Air*, vol. 12, n.º 2, pp. 98-112, 2002, doi: 10.1034/j.1600-0668.2002.01111.x.
- [19] O. A. Seppänen, W. J. Fisk y M. J. Mendell, «Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings», *Indoor Air*, vol. 9, n.º 4, pp. 226-252, 1999, doi: 10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x.
- [20] L. Kajtár and L. Herczeg, «Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work», *Idojaras*, vol. 116, n.º 2, pp. 145-169, 2012.

- [21] U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi y D. Sullivan, «Is CO₂ an Indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance», *Environ. Health Perspect.*, vol. 120, n.º 12, pp. 1671-1678, 2012.
- [22] J. G. Allen, P. MacNaughton, U. Satish, S. Santanam, J. Vallarino y J. D. Spengler, «Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments», *Environ. Health Perspect.*, vol. 124, n.º 6, pp. 805-812, 2016, doi: 10.1289/ehp.1510037.
- [23] Z. Bakó-Biró, D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H. B. Awbi y M. J. Williams, «Ventilation rates in schools and pupils' performance», *Build. Environ.*, vol. 48, n.º 1, pp. 215-223, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018.
- [24] Z. Peng and J. L. Jimenez, «Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 8, n.º 5, pp. 392-397, 2021, doi: 10.1021/acs.estlett.1c00183.
- [25] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, «Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación», BOE-A-2006-5515, 2006.
- [26] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», BOE n.º 207, 2007, Madrid, Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, 2021, p. 97. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
- [27] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, «Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo», BOE n.º 97, 1997, Madrid, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, 1997, p. 14.
- [28] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo*. Madrid, Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2015.
- [29] M. J. Berenguer y F. Bernal, *NTP 549: el dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior*. Madrid, 2000. https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074
- [30] Plataforma Aireamos, *Ventilación en aulas para prevención de COVID-19: límites de CO₂ recomendados en periodo de emergencia*. Plataforma Aireamos, 2021. https://drive.google.com/file/d/1jFavucO98vMz5_LpKtnDXBfDZvWlMLcL/view

- [31] H. Qian, T. Miao, L. Liu, X. Zheng, D. Luo y Y. Li, «Indoor transmission of SARS-CoV-2», *Indoor Air*, vol. 31, n.º 3, pp. 639-645, 2021, doi: 10.1111/ina.12766.
- [32] K. A. Prather, L. C. Marr, R. T. Schooley, M. A. McDiarmid, M. E. Wilsonand y D. K. Milton, «Airborne transmission of SARS-CoV-2», *Science*, vol. 370, n.º 6514, pp. 303-304, 2020, doi: 10.1126/science.abf0521.
- [33] T. Greenhalgh, J. L. Jiménez, K. A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman y R. Schooley, «Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2», *Lancet*, vol. 397, n.º 10285, pp. 1603-1605, 2021, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2.

CAPÍTULO 1

¿POR QUÉ VENTILAR?

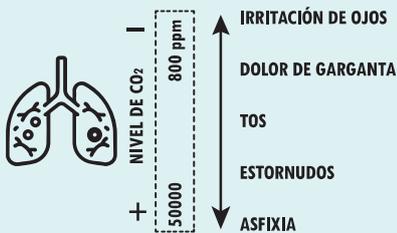


VENTILAR MANTIENE A RAYA:

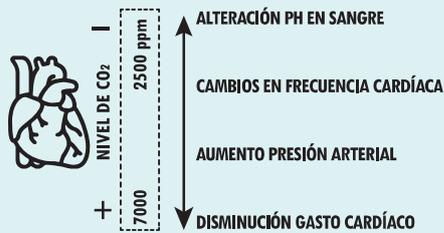
- CONTAMINANTES INTERIORES
- * AEROALÉRGENOS INTERIORES
- ⊗ PATÓGENOS INTERIORES
 - VIRUS
 - BACTERIAS
 - HONGOS
- DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)
- MATERIAL PARTICULADO INTERIOR (PM)
- VAPOR DE AGUA
- OXÍGENO (O₂)

EFFECTOS SOBRE LA SALUD

SISTEMA RESPIRATORIO



SISTEMA CARDIOVASCULAR



RENDIMIENTO COGNITIVO

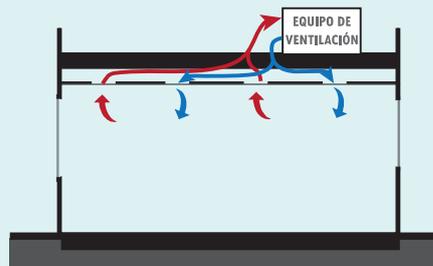


¿CÓMO SE VENTILA?

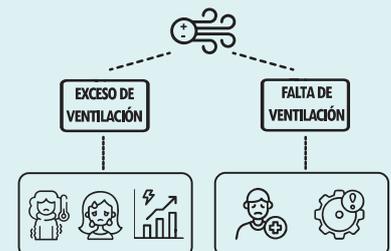
VENTILACIÓN NATURAL CCDM



VENTILACIÓN MECÁNICA CONTROLADA



¿POR QUÉ HAY QUE MEDIR?



"Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide no se puede mejorar. Lo que no se mejora se degrada siempre." Lord Kelvin

¿QUÉ DICE LA NORMATIVA?

CTE DB- HE3

CO_{2, MED} ≤ 900 ppm

CO_{2, MÁX}* ≤ 1.600 ppm

* ≤ 500.000 ppm · h/año

RITE

IDA 1: 770 ppm

IDA 2: 920 ppm

IDA 3: 1.220 ppm

R.D. 486/97

CO₂ ≤ 1.220 ppm

30 m³/h · ocupante

NTP 549

CO₂ ≤ 1.000 ppm

CO₂ ≤ 5.000 ppm

BUENAS PRÁCTICAS

P.AIREAMOS

CO₂ ≤ 700 ppm

BUENAS PRÁCTICAS