

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona. **Benoît Semin** es investigador del CNRS francés en el Laboratorio de Física y Mecánica de Medios Heterogéneos, en París.



Cómo conseguir una buena ventilación

Renovar el aire de las estancias cerradas se ha demostrado eficaz para limitar la propagación de la COVID-19. ¿Cuándo y durante cuánto tiempo debemos ventilar?

Renovar el aire en los espacios cerrados: esta cuestión ha irrumpido en el debate público con motivo de la pandemia de COVID-19. Sabemos que el coronavirus SARS-CoV-2 se transmite por vía

aérea, lo que ha dado lugar a todo tipo de recomendaciones para ventilar adecuadamente las estancias a fin de controlar su propagación. Más allá de la crisis epidémica, una buena ventilación reviste im-

portancia para la salud y el bienestar general. Pero, ¿cómo podemos saber si una habitación está bien aireada?

La respuesta pasa por medir los niveles de dióxido de carbono. Este compuesto



EN UN ESPACIO CERRADO, la respiración de las personas allí presentes puede hacer que la concentración de dióxido de carbono (CO₂) aumente con rapidez. Para mantenerla por debajo de las 1500 partes por millón (ppm) en una habitación con unos 10 metros cúbicos de aire por persona, este debe renovarse aproximadamente cada media hora. Para lograrlo, suele bastar abrir las ventanas de par en par durante unos minutos.

es un producto de nuestra respiración, por lo que medir su concentración nos permite estimar la calidad del aire que inhalamos.

En el exterior, la concentración media de CO_2 ronda el 0,04 por ciento. En otras palabras: una de cada 2500 moléculas presentes en el aire es de CO_2 . Para evitar tener que trabajar con cifras decimales, suelen usarse las partes por millón (ppm). En este caso, hablamos de una concentración de unas 400 ppm, donde, en las ciudades, pueden darse variaciones de unas pocas decenas debido a la contaminación o a la situación meteorológica.

No superar las 1000 ppm

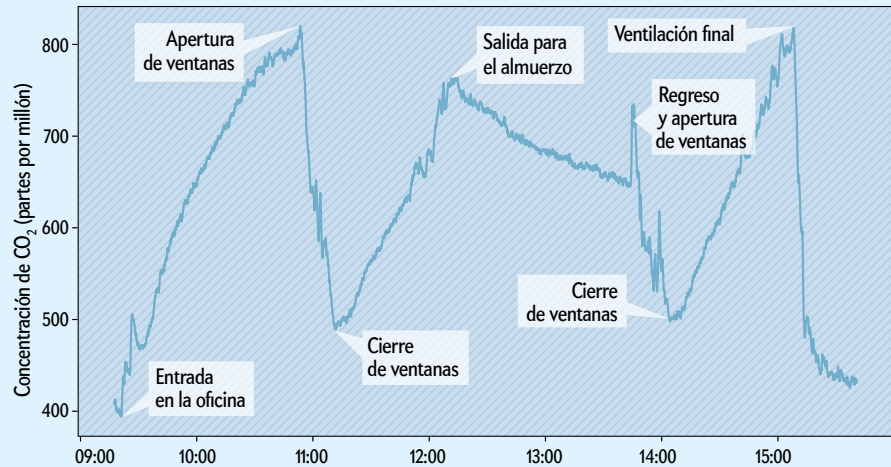
Cuando nos encontramos en el exterior, el aire que exhalamos se diluye con rapidez en la inmensidad de la atmósfera, por lo que nuestra respiración no ejerce ningún efecto sobre la concentración exterior de CO_2 . No ocurre así en un espacio cerrado. En el aire exhalado, la concentración de CO_2 alcanza el 4 por ciento; es decir, unas 40.000 ppm. Se estima que, durante la respiración normal y a presión atmosférica, un adulto libera unos 18 litros de CO_2 por hora. Por tanto, en un espacio cerrado y sin ventilar, la concentración de CO_2 aumentará de manera gradual.

Para fijar ideas, consideremos una habitación en la que cada persona disponga de 10 metros cúbicos de aire; es decir, 10.000 litros. Esto corresponde, por ejemplo, a 5 personas en una sala de 20 metros cuadrados y 2,5 metros de altura. Si la habitación es hermética y no está ventilada, la concentración de CO_2 aumentará linealmente con el tiempo. Pasada una hora se añadirán 18 litros de CO_2 a los 10 metros cúbicos de aire por persona. Como consecuencia, la concentración aumentará en 1800 ppm y alcanzará las 2200 ppm si el aire de la habitación tenía inicialmente la misma composición que el aire exterior.

Varios estudios han demostrado que, cuando la concentración de CO_2 supera las 2000 ppm, nuestras facultades cognitivas comienzan a deteriorarse, especialmente cuando acometemos tareas complejas como reflexionar, tomar decisiones, etcétera. Debido a ello, los valores máximos recomendados para la concentración de CO_2 en interiores

CAMBIOS RÁPIDOS

LA CONCENTRACIÓN DE CO_2 en una habitación cerrada puede aumentar con rapidez. Se estima que, a presión atmosférica, un adulto exhala por hora unos 18 litros de este gas. No obstante, abrir las ventanas permite regresar a los valores normales en muy poco tiempo. Esta gráfica ilustra la evolución temporal de la concentración de CO_2 en la oficina de uno de los autores (Courty) desde por la mañana hasta primera hora de la tarde.



suelen establecerse entre las 1000 y las 1500 ppm, en particular en viviendas y oficinas.

¿Cómo proceder para no superar estos umbrales? Una solución pasa por la ventilación mecánica. La norma europea para la ventilación en locales no residenciales (EN 13779) recomienda un flujo de 29 metros cúbicos por hora y por persona para lograr una calidad del aire «moderada». ¿De dónde procede esta cifra?

Tras una fase transitoria en la que varía, la cantidad de CO_2 se estabiliza una vez que el dióxido de carbono producido por la respiración se evacúa a través de la ventilación. Si suponemos que la mezcla de gases presentes en el aire es homogénea, esta cantidad evacuada no es otra que el producto del flujo de la ventilación y la concentración de CO_2 . Puede verse que, al alcanzar el régimen estacionario, la concentración de CO_2 viene dada por la suma de la concentración atmosférica (400 ppm) y la relación entre el flujo producido y el evacuado. De esta manera, 18 litros de CO_2 por hora (producidos durante la respiración) sobre 29 metros cúbicos de aire por hora (la tasa de ventilación aludida arriba) nos proporciona 620 ppm adicionales de CO_2 , lo que da como resultado una concentración de 1020 ppm.

Esta cifra es aceptable, pero comienza a rondar los máximos recomendados. Cabe

señalar también que este resultado (y, por tanto, las condiciones que ha de satisfacer un sistema de ventilación) no depende del volumen del local, sino solo del número de ocupantes. El cumplimiento de la norma requiere, en consecuencia, una estimación del aforo de las estancias.

Ventilar unos minutos cada media hora

Si no disponemos de ventilación mecánica, tendremos que recurrir a la natural. Volviendo a nuestro ejemplo de 10 metros cúbicos de aire por persona, hallamos que la concentración de CO_2 alcanzará las 1300 ppm tras media hora, lo que nos obligará a abrir las ventanas para renovar el aire. A este proceso contribuyen varios factores. Uno de ellos es, por supuesto, el viento. Pero también influye la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior: esta afecta a la densidad del aire y a los movimientos de convección causados por el flujo que circula a través de las ventanas.

No obstante, los flujos correspondientes resultan mucho más difíciles de estimar. Al igualar la fuerza ascendente del aire caliente con la fricción aerodinámica del aire ambiental, obtenemos velocidades del orden de 0,5 metros por segundo para diferencias de temperatura de 10 grados centígrados. Suponiendo que la mitad

de la superficie de las ventanas —unos 4 metros cuadrados para nuestra sala de 20 metros cuadrados, pongamos por caso— se utiliza para introducir aire del exterior mientras que la otra mitad se usa para expulsar aire viciado, renovaríamos completamente los 50 metros cúbicos de aire de la sala en 50 segundos gracias a un fenomenal flujo de 3600 metros cúbicos por hora.

Aunque esta estimación del flujo es algo elevada y el tiempo demasiado corto, las cifras dejan claro lo que todos hemos podido verificar en múltiples ocasiones: que la convección natural basta para renovar el aire de una habitación en apenas unos minutos. Este tiempo es lo suficientemente corto para evitar el enfriamiento de los muebles y las paredes durante el invierno, y el confort térmico solo se ve perturbado por unos momentos. Con todo, hemos de tener en cuenta que aquí hemos supuesto que la convección de aire es posible. Sin viento y sin una diferencia apreciable de temperatura, habremos de dejar las ventanas permanentemente abiertas para ventilar.

Medir la concentración de CO₂

Dejando a un lado nuestras estimaciones sobre la eficacia de la ventilación, ¿cómo podemos asegurarnos de que la renovación del aire es suficiente? En la industria de la construcción, una prueba estándar consiste en medir la concentración interior de CO₂. Y si bien hay dispositivos para uso profesional, hoy en día existen en el mercado sensores económicos que pueden controlarse con una placa Arduino. Estos dispositivos, conocidos como NDIR por el acrónimo inglés de «espectroscopia infrarroja no dispersiva», miden la absorción de luz infrarroja por parte de las moléculas de aire.

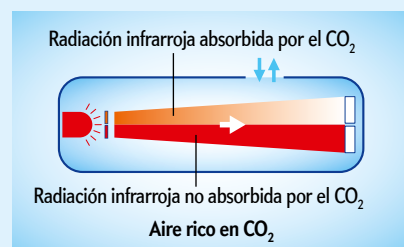
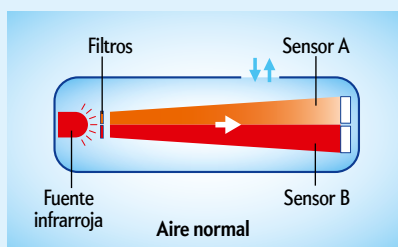
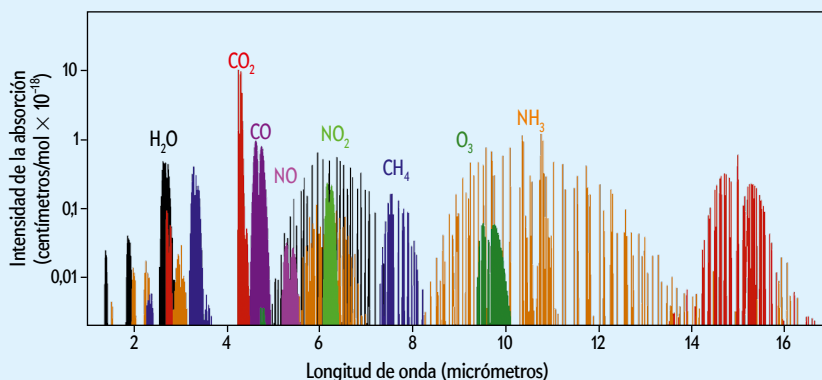
El CO₂ absorbe la radiación infrarroja con una longitud de onda de 4,3 micrómetros, la cual excita los modos de vibración de los enlaces entre el carbono y el oxígeno. Este valor se aleja de las bandas espectrales de absorción de otras moléculas presentes en el aire, como la de oxígeno, monóxido de carbono o agua. Medir esta línea de absorción constituye, por tanto, una técnica muy selectiva.

Con una concentración de CO₂ de 400 ppm, la intensidad de la radiación electromagnética de unos 4 micrómetros de longitud de onda disminuye un 2 por ciento tras haber recorrido 5 centímetros. Puede que esto no parezca gran cosa, pero basta para construir un pequeño dispositivo de medición.

MEDICIÓN CON INFRARROJOS

LA MOLÉCULA DE CO₂ presenta un pico de absorción en luz infrarroja de 4,3 micrómetros de longitud de onda. Dicho valor se encuentra claramente separado de las bandas típicas de absorción de otros gases presentes en el aire (*arriba*), por lo que proporciona una manera sencilla de medir la concentración de CO₂.

Los detectores de CO₂ basados en la espectroscopia infrarroja no dispersiva (NDIR, *abajo*) cuentan con dos sensores: uno que opera en la longitud de onda del pico de absorción del CO₂ (A) y otro que detecta las frecuencias no absorbidas (B). La señal del primero depende, por tanto, de la cantidad de CO₂ presente en el aire a través del cual pasa la luz infrarroja, mientras que la del segundo es independiente de dicha concentración. La comparación entre las lecturas de ambos sensores permite inferir la concentración de CO₂. A diferencia de otros dispositivos, los detectores NDIR no requieren una recalibración regular y permanecen operativos durante varios años.



Los detectores NDIR de buena calidad realizan mediciones diferenciales. Constan de una fuente que emite en el infrarrojo y de dos sensores: uno que detecta las longitudes de onda no absorbidas por el CO₂ y que sirve como referencia, y otro sensible a la radiación de onda de 4,3 micrómetros que absorbe el CO₂. Como consecuencia, la

intensidad recibida por el segundo sensor variará con la concentración de CO₂, y la diferencia de su lectura con la del primero nos permitirá determinar la concentración del gas. Con un dispositivo de este tipo, asequible por unas decenas de euros, todo el mundo puede comprobar si el aire que respira se renueva como es debido.

PARA SABER MÁS

The fluid mechanics of natural ventilation. P. F. Linden en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 31, págs. 201-238, enero de 1999.

Optical gas sensing: A review. Jane Hodgkinson y Ralph P. Tatam en *Measurement Science and Technology*, vol. 24, art. 012004, noviembre de 2012.

Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. Usha Satish et al. en *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, págs. 1671-1677, diciembre de 2012.

Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. Rajesh K. Bhagat et al. en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 903, art. F1, septiembre de 2020.