

# MONITORES DE CO2 PARA LA EVALUACIÓN DE ESPACIOS VENTILADOS EN EL REGRESO A LA PRESENCIALIDAD

Nicté Y. Luna Medina  
Guillermo Barrios del Valle

La Maestra Nicté Y. Luna Medina es académica del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) donde se desempeña como comunicadora de la ciencia.

El Dr. Guillermo Barrios del Valle es profesor e investigador del Instituto de Energías Renovables, UNAM, donde desarrolla su investigación e imparte clases en el área de Energía en Edificaciones.

*Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.*

## La pandemia

Han pasado poco más de dos años después de haberse confirmado el primer caso causado por el coronavirus SARS-CoV-2, más de un año de la variable DELTA y poco menos de haber identificado a la variable OMI-CRÓN. En el mundo seguimos viviendo en medio de esta pandemia, retomando cada vez más las actividades presenciales, inclusive las masivas, con las medidas de prevención que desde el 2020 nos han repetido insistentemente: uso de cubrebocas, lavado frecuentes de manos, distanciamiento social y espacios bien ventilados. A estas recomendaciones, se ha sumado la aplicación de la vacuna.

Hasta el momento sabemos que el virus se transmite por el contacto directo de las mucosas de la nariz, ojos y boca con las microgotas infectadas que una persona emite al exhalar, respirar, hablar, toser o estornudar, mismas que pueden llegar a depositarse a una distancia de menos de 1.5 metros (de ahí la sana distancia y el uso de cubrebocas); aunque los aerosoles expulsados al estornudar o toser pueden alcanzar hasta 7 u 8 metros de distancia, por eso es importante el estornudo de etiqueta. Los aerosoles no caen rápidamente a la superficie, se quedan flotando en el ambiente distribuyéndose en el espacio.

Zhan Peng y José L. Jiménez [1], investigadores de la Universidad de Colorado, en Estados Unidos, calcularon la probabilidad de que una persona se infecte de SARS-CoV-2 basándose en el modelo Wells-Riley, originalmente desarrollado para calcular la probabilidad de que una persona se infecte de tuberculosis o sarampión por transmisión aérea; y es la base de muchos modelos epidemiológicos de enfermedades respiratorias. Peng y Jiménez extendieron el modelo Wells-Riley agregando el dióxido de carbono (CO2) exhalado e inhalado por las personas, uso de mascarillas y considerando la actividad que realizan.

Las personas exhalamos CO2, por lo que la medición de la concentración de este gas en partes por millón (ppm) es una medida indirecta de la ventilación de los espacios. Si nos encontramos en un espacio interior con ventilación insuficiente y con una o más personas infectadas, el riesgo de contagiarse de COVID-19 aumentará proporcionalmente con la concentración de CO2 que haya en ese espacio.

Determinar si un espacio está ventilado adecuadamente y medir la protección que nos brindan las mascarillas han sido temas abordados por la comunidad científica durante esta pandemia.

## Aerosoles y uso de mascarillas

Retomar las actividades presenciales en esta nueva normalidad incluye a las artísticas como las visitas a museos, las obras de teatro y los conciertos en salas. Para entender cómo se distribuyen espacialmente los aerosoles y su correlación con la concentración de CO2 en una sala de conciertos ventilada, Wolfgang Schade, Vladislav Reimer, Martin Seipenbusch y Ulrike Willer [2], investigadores de instituciones alemanas, realiza-

ron el siguiente experimento: con un maniquí representaron a una persona sentada en una sala de conciertos con un volumen aproximado de 17,000 metros cúbicos y con capacidad para 1,650 personas. El maniquí emitía aerosoles y CO2. La sala contaba con un sistema de ventilación que proporcionaba un flujo de aire vertical con aire del exterior fresco que ingresaba debajo de cada uno de los asientos y salía por el techo, la velocidad vertical máxima del aire era de 0.05 m/s. Mientras que el flujo de aire horizontal cambiaba con el tiempo con una velocidad máxima de 0.01 m/s. El sistema de ventilación era capaz de cambiar el 100% del aire cada 20 minutos, es decir, 3 ach (air changes per hour).

Una persona emite entre 0.1 hasta 100 partículas por centímetro cúbico (p/cm3) de aerosoles y hasta 7,500 ppm de CO2. Estudiar la dispersión de aerosoles es difícil porque se dispersan rápidamente y, algunas veces, la concentración de aerosoles emitidos está por debajo de las concentraciones ambientales, dificultando su medición. Por esto, el maniquí se diseñó para que emitiera de manera continua aerosoles y dióxido de carbono a una velocidad horizontal de 2.4 m/s -exhalaba 35,000 (p/cm3) de aerosoles y alrededor de 5,600 ppm de CO2 simultáneamente-. Tanto las concentraciones de aerosoles como de CO2 se midieron con diferentes sensores al frente y alrededor del maniquí para monitorear los asientos hasta dos filas al frente y a los lados. Estos experimentos los hicieron con el maniquí sin y con cubrebocas sentado en el mismo asiento en ambos experimentos, como se ve en las Figuras 1 y 2.

Los resultados fueron los siguientes. Cuando el maniquí no tenía

cubrebocas, frente a él, la concentración de aerosoles bajó de 35,000 p/cm3 a 11,300 p/cm3 (32% de lo emitido) en el primer asiento y al medir en el segundo asiento frente al maniquí (1.5 metros de distancia), los aerosoles bajaron de 35,000 a 270 p/cm3 (0.7% de lo emitido). Cuando el maniquí tenía un cubrebocas, los aerosoles encontraron un obstáculo al salir, por lo que la velocidad de salida de estos no tuvo una componente horizontal dominante y fueron arrastrados hacia arriba por la ventilación vertical de la sala. En el primer asiento frente al maniquí con cubrebocas, el conteo de aerosoles bajó de 35,000 a 117 p/cm3 (0.3% de lo emitido). Para el caso de la concentración de CO2 se tuvo un comportamiento similar. Por otro lado, con el maniquí sin cubrebocas, se pasó de 5,631 ppm en el lugar del maniquí a 1,127 ppm (20% de lo emitido) de CO2 en el primer asiento y cuando se le colocó el cubrebocas, bajó de 5,631 a 676 ppm (12% de lo emitido) en el primer asiento. Las mediciones de los dos experimentos se esquematizan en la Figura 1 y 2, que incluyen las mediciones en los asientos contiguos y los porcentajes de lo medido respecto a lo emitido para los aerosoles. Este experimento demostró cómo el uso de cubrebocas, combinado con ventilación vertical, ayuda a disminuir los aerosoles y la concentración de CO2 en los alrededores.

## CO2 en espacios interiores

Como ya se mencionó, Peng y Jiménez realizaron un estudio para calcular la probabilidad de infección por SARS-CoV-2 en entornos interiores tomando como referencia la concentración de CO2 en ese ambiente. Para ello crearon un modelo que consideró a una persona infectada y a una o más personas suscep-

tibles, un espacio con ventilación con aire proveniente del exterior, asumiendo un mezclado perfecto, es decir, tanto los aerosoles como la concentración de CO2 es la misma en todo el espacio o ambiente. También se consideró que solo las personas producen CO2 en ese espacio. Dichos investigadores tomaron el modelo de Wells-Riley para adaptarlo y calcularon la probabilidad que tiene una persona de infectarse tomando en cuenta también la tasa de respiración, la actividad realizada, la permanencia en el espacio y el uso de cubrebocas. Con estas suposiciones Zhan Peng y José Jiménez calcularon la probabilidad de infectarse por la cantidad de CO2 inhalado durante una hora; así como la cantidad de CO2 que debe inhalar una persona susceptible durante una hora para tener una probabilidad de infectarse de 0.01%. En su estudio analizaron

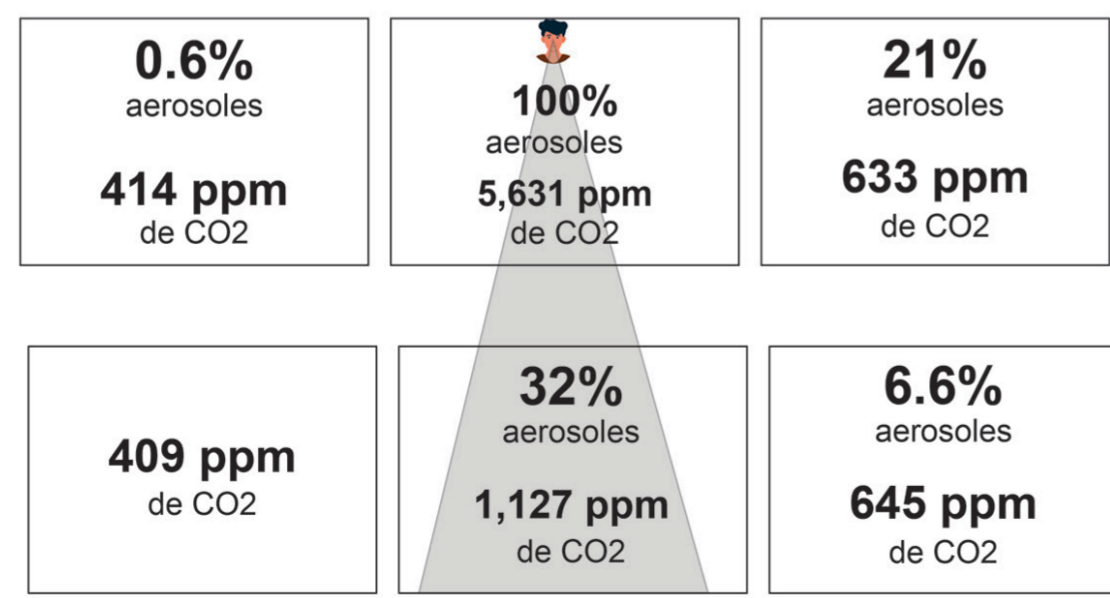


FIGURA 1. ESQUEMA de emisión de aerosoles y CO2 por el maniquí sin mascarilla (una adaptación de Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18(6), 3037).

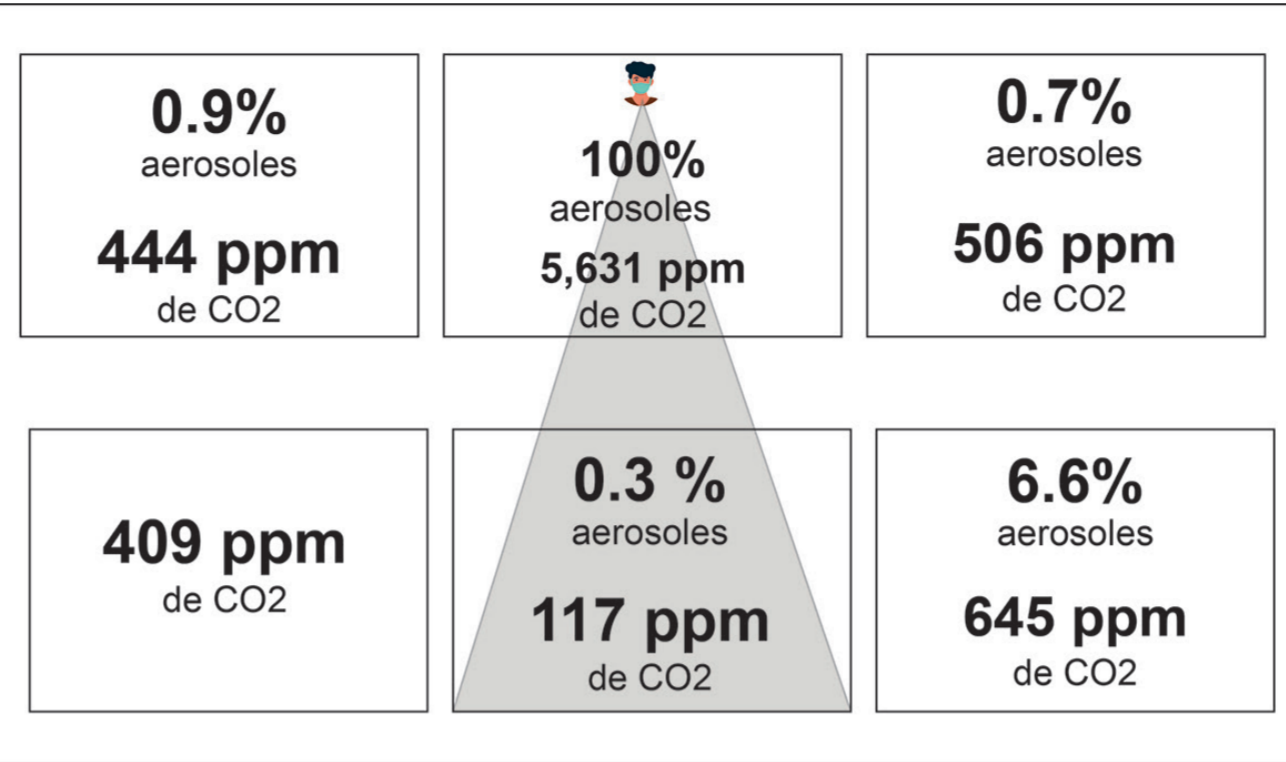


FIGURA 2. ESQUEMA de la emisión de aerosoles y CO2 por el maniquí con mascarilla (una adaptación de Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18(6), 3037).

diferentes escenarios de un salón de clases. En un escenario se consideró que la persona infectada estaba impartiendo clases, por lo que hablaba continuamente y con un volumen de voz alto. En otro escenario, la persona infectada estaba tomando la clase, hablando poco, sentada y con volumen de voz bajo. También consideraron escenarios donde la persona infectada usaba cubrebocas N95 y sin el cubrebocas. Con su modelo calcularon que el escenario que tenía mayor probabilidad de infectarse era cuando no se usa el cubrebocas; seguido del caso cuando la persona infectada era quien impartía la clase; luego, el caso donde la persona que escuchaba la clase se encontraba infectada y; finalmente, el caso con la probabilidad más baja de infectarse, fue el de la persona con cubrebocas N95.

## La concentración del dióxido de carbono y la ventilación en los espacios

Las personas adultas llegamos a respirar entre 18,000 y 20,000 veces al día, emitiendo CO2 en cada exhalación, que contribuye a que la concentración de CO2 de un espacio aumente si no hay una ventilación adecuada. Desde el siglo XIX, la concentración de este gas en espacios ha sido un indicador para determinar si existe buena ventilación en estos ambientes. Una manera de cuantificar la ventilación es midiendo la concentración de CO2 en un espacio interior. En mayo del 2022, el promedio de CO2 atmosférico fue de 420.23 ppm (CO2.Earth), por lo que, si la concentración de un espacio interior comienza a aumentar respecto a este valor, podemos interpretarlo como una fal-

ta de ventilación de ese espacio y los riesgos que conlleva respecto a contraer COVID-19. Un espacio se considera mal ventilado si la concentración de CO2 es mayor a 1000 ppm. Se ha calculado que una concentración de 800 ppm de este gas indica que el 1% del aire ha sido exhalado por otra persona y 10% del aire si la concentración de CO2 alcanza las 4,400 ppm. Utilizando modelos basados en el de Wells-Riley, se ha calculado que el riesgo de contraer de COVID-19 aumenta si también aumenta la concentración de dióxido de carbono en un espacio, asumiendo que las personas son la única fuente de CO2. Por esta razón, en el trabajo presentado por el equipo de Florentina Villanueva [3] se ha propuesto que la concentración de CO2 en aulas no sea mayor de 700 ppm y esto se puede lograr ventilando adecuadamente los espacios.

Para medir la concentración de este gas se requieren monitores de CO2, estos se pueden comprar; pero también, gracias a los avances tecnológicos actuales, con conocimientos básicos de electrónica y programación, una persona puede construir su propio monitor. Monitores de CO2 hechos en el IER

Las togas y birretes estuvieron guardadas durante dos años, aquellas ceremonias de graduación del 2020 y del 2021 tuvieron que adaptarse a la virtualidad, celebradas igualmente con regocijo, pero faltas de la dicha que representa compartir ese último momento con quienes fueron colegas en el aula por al menos cuatro años. Recientemente, en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM) se re-

tomó la actividad presencial en las aulas y con ello la realización de uno de los eventos más importantes para nuestra comunidad estudiantil: la ceremonia de graduación. Las togas y birretes volvieron a vestir al estudiantado; familiares y amistades llenaron nuevamente el auditorio principal, una edificación distinguida por sus estrategias de diseño bioclimático, entre ellas la ventilación natural.

Para realizar este evento, se instalaron monitores de CO2 diseñados y construidos en el IER-UNAM, se mantuvieron las ventilas y puertas abiertas y encendidos los ventiladores y el extractor de aire. Los monitores de CO2 fueron dispositivos clave para mantener alerta a la comisión de seguridad y evaluar el espacio en caso de que se superarían las 700 ppm de CO2. Sin embargo, durante las dos horas del evento, esto no sucedió, la ventilación fue adecuada para esta gran celebración. La tecnología instalada en el IER-UNAM nos ayudó a monitorear los espacios y asegurarnos de tener condiciones seguras. Además, fue desarrollada bajo licencias que permiten compartir de forma libre y que cualquier persona pueda construir su propio monitor de CO2. Los sensores de CO2 miden la concentración de este gas en un espacio usando diferentes tecnologías, una de ellas es la NDIR (Non-Dispersive Infra Red). Los sensores NDIR están compuestos por una fuente de luz infrarroja, una cámara de gas, un filtro óptico y un detector de luz. La fuente de luz emite una luz infrarroja (IR) en un canal que contiene una muestra del aire del lugar donde se encuentran. En el lado opuesto de la lámpara, se encuentra un filtro óptico y un detector de IR. El filtro óptico no deja pasar las longitudes de onda que no absorbe el CO2. Cuando esta luz entra en contacto con la molécula del dióxido de carbono, el gas absorbe las ondas que oscilan en las 4.26 micras de longitud dejando pasar otras longitudes de onda, estas últimas son absorbidas por el filtro óptico. Finalmente, el detector de IR mide la cantidad de luz que no fue absorbida por las moléculas de CO2 o el filtro óptico. La diferencia entre la luz IR irradiada por la lámpara y la recibida por el detector se traduce en la concentración de CO2 en partes por millón que

hay en la muestra de aire. Al diseñar el monitor de CO2 en el IER-UNAM, mostrado en la Figura 3, se pensó en un posible desabasto de sensores de CO2, por lo que se puede construir con tres sensores NDIR especificados, todos con un error de medición menor a 50 ppm. Utiliza un microcontrolador barato y accesible. Para reportar los niveles de CO2, cuenta con una pantalla donde reporta la concentración de dióxido de carbono medida en ppm. Además, tiene un led RGB para indicar los niveles de concentración de CO2 por medio de un código de colores verde, amarillo y rojo que indican que el espacio está bien ventilado, requiere mejorar la ventilación o que se recomienda evacuarlo, respectivamente. Se siguió la filosofía Open Source, donde se comparte el código fuente o programa para que el conocimiento se comparta y mejore. La lista de material, esquemáticos y programas para construir el monitor de CO2 se encuentra en el repositorio público <https://github.com/AltamarMx/co2> para que cualquier persona con conocimientos básicos de electrónica y programación lo pueda replicar.

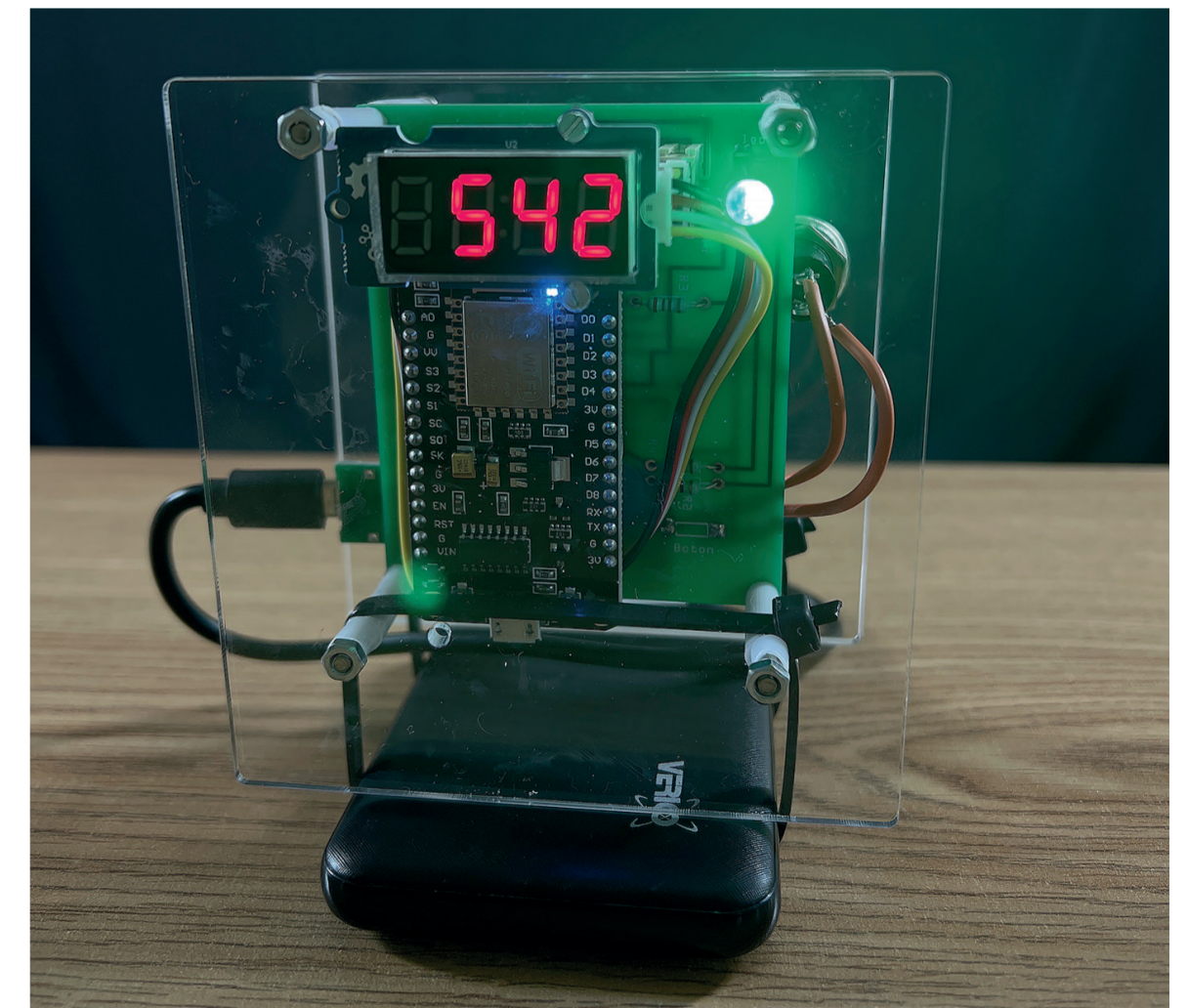


FIGURA 3. MONITOR de CO2 diseñado y construido en el IER-UNAM para el monitoreo de la concentración de CO2 en espacios.

*Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.*

## REFERENCIAS

- Peng Z.; Jimenez, J.L. Exhaled CO2 as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities. Environmental Science & Technology Letters 2021 8 (5), 392-397. DOI: 10.1021/acs.estlett.1c00183
- Schade, W.; Reimer, V.; Seipenbusch, M.; Willer, U. Experimental Investigation of Aerosol and CO2 Dispersion for Evaluation of COVID-19 Infection Risk in a Concert Hall. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 3037. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063037>
- Villanueva F.; Notario A, Cabañas B.; Martín P.; Salgado S.; Fonseca M. Assessment of CO2 and aerosol (PM2.5, PM10, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. Environmental Research 2021 (197) 111092. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>