

# CO<sub>2</sub> y transmisión aérea de enfermedades

MIGUEL ÁNGEL CAMPANO  
SAMUEL DOMÍNGUEZ-AMARILLO  
IGNACIO ACOSTA

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

JOSÉ LUIS JIMÉNEZ

Dept. of Chemistry and CIRES, University of Colorado, Boulder, Colorado, United States.

## Lista de acrónimos

AR tasa de ataque (acrónimo del inglés *attack rate*).

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

CO<sub>2</sub> dióxido de carbono.

EPI equipo de protección individual.

FFP2 mascarilla filtrante (EPI) de tipo 2 (acrónimo del inglés *filtering face pieces*).

HEPA filtros de partículas de alta eficiencia (de sus siglas en inglés *high efficiency particulate air*).

$H$  indicador del aumento del riesgo relativo de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado.

$H_r$  indicador del aumento del riesgo relativo individual de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado.

MERV valor mínimo de eficiencia de filtrado de un filtro (acrónimo del inglés *minimum efficiency reporting values*).

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

RITE Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

RH humedad relativa del aire (acrónimo del inglés *relative humidity*).

SARS-CoV-2 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*).

UV ultravioleta.

VMC ventilación mecánica controlada.

$\Delta[\text{CO}_2]$  exceso de CO<sub>2</sub> en un espacio interior respecto del valor exterior.

### 3.1. Introducción

En el capítulo anterior [1] se explicaron los fundamentos básicos que rigen la adaptación del método de Wells-Riley [2, 3], con la que se puede determinar probabilísticamente cuál es el riesgo relativo de infección de enfermedades mediante aerosoles de media y larga distancia en un evento dado. Así, con este método es posible evaluar el impacto que tienen las diferentes medidas de mitigación en el riesgo relativo de contraer la enfermedad.

Entre estas medidas de mitigación, destaca la ventilación, dado que es una de las principales acciones disponibles para limitar el riesgo de brotes epidémicos mediante aerosoles, al permitir renovar el aire de los espacios interiores mediante dilución y desplazamiento del aire viciado.

Para evaluar la eficiencia de dicha ventilación, se puede recurrir a la monitorización del nivel diferencial de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) existente entre el espacio interior y el exterior (denominado «exceso de  $\text{CO}_2$ »,  $\Delta[\text{CO}_2]$ ), en ausencia de otras fuentes significativas de emisión de  $\text{CO}_2$  [4]. Con este indicador, cuya medición es sencilla, fiable y de coste asumible, es posible evaluar indirectamente el riesgo de infección de enfermedades por aerosoles (media y larga distancia) en espacios interiores, utilizando por tanto dicho exceso de  $\text{CO}_2$  como *proxy* [2].

### 3.2. Aplicación al SARS-CoV-2: COVID Risk<sup>airborne</sup>

La transferencia del conocimiento científico a la sociedad es una necesidad de primera magnitud, como se ha visto en repetidas ocasiones a lo largo de la emergencia sanitaria, en la que se ha recibido multitud de mensajes contradictorios. En el caso de la pandemia por SARS-CoV-2, el ciudadano ha de tener información precisa y sencilla para poder conocer y gestionar el riesgo de transmisión de enfermedades aéreas al que se expone (empoderamiento del usuario).

Asimismo, los gestores de edificios, los diseñadores y los legisladores requieren herramientas que les permitan analizar diversos escenarios operativos para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de mejora contra la transmisión aérea de enfermedades. Además, estas herramientas pueden llegar a suministrar datos dinámicos a las lógicas de control de los sistemas de ventilación/climatización.

Por todo esto, en 2021, un equipo de investigadores del grupo TEP130 de la Universidad de Sevilla, junto con las plataformas Aireamos [5] y VentilANDO [6], así como con el profesor José Luis Jiménez de la Universidad de Colorado Boulder (EEUU), desarrolló una herramienta en línea para la estimación del riesgo de transmisión aérea del SARS-CoV-2 [7].

Su objetivo era dotar, tanto a la ciudadanía como a los técnicos, gestores y legisladores, de una herramienta de estimación del riesgo de infección de COVID-19 en espacios interiores según el exceso de CO<sub>2</sub> existente en dicho recinto, así como de sus condiciones dimensionales, ambientales y de uso.

La herramienta dispone de una versión *online*, COVID Risk<sup>airborne</sup> ([www.covidairbornerisk.com](http://www.covidairbornerisk.com)), accesible a todo el público, de uso gratuito y en constante actualización, tanto a las nuevas variantes del SARS-CoV-2, como de otras enfermedades de transmisión aérea (figura 3.1).

Su elaboración se basa en el modelo de propagación de enfermedades de transmisión aérea de Wells-Riley anteriormente descrito, habiendo sido adaptado al SARS-CoV-2 por Z. Peng y J. L. Jiménez a partir de los eventos de superpropagación documentados durante la crisis sanitaria COVID-19 [2, 3, 8]. Con esta herramienta, es posible estimar el nivel de riesgo esperado que puede producirse en una situación determinada (aulas, oficinas, restaurantes, reuniones familiares o transporte público) a través de la medición del nivel de CO<sub>2</sub> promedio en dicho espacio [9, 10].

Mediante el uso de esta aplicación es posible evaluar, para un espacio interior dado, el impacto de:

- El tiempo de duración (exhalación de viriones) y de permanencia (exposición) en el evento.
- El aforo (ocupación), la actividad metabólica y respiratoria, así como su modificación dinámica a lo largo del tiempo.
- Tasa de renovación de aire aconsejada (ventilación).
- Los tipos de mascarillas usadas, incluyendo el nivel de ajuste.



Figura 3.1. Pantalla de inicio de la herramienta *online* COVID Risk<sup>airborne</sup> [7].

- El impacto de la purificación de aire ya sea mediante filtrado de alta eficiencia (MERV13/F7 o superior) o de muy alta eficiencia (filtros HEPA), o a través del empleo de sistemas de luz ultravioleta (UV).
- La acción de captura de las superficies interiores del espacio.

Para conocer dichos datos es necesario definir una serie de parámetros o variantes en la herramienta. Con el fin de que la aplicación sea accesible a toda la población, se han desarrollado dos versiones. Una versión más detallada («cálculo detallado»), enfocada al uso de profesionales e investigadores con capacidad de ser más precisa y con un mayor número de parámetros a definir, y una versión más simplificada («cálculo simplificado»), más sencilla e intuitiva en la que existe una disminución de los parámetros a introducir (figura 3.2), tomando la herramienta una serie de valores predeterminados característicos.

Además, con esta herramienta es posible evaluar parámetros como:

- Caudal de ventilación por ocupante.
- Tasa de pérdida de primer orden (velocidad en la que se reduce la carga vírica infectiva del aire, combinando ventilación, paso del tiempo, deposición en superficies y otras medidas de control).
- Probabilidad de infección por individuo o tasa de ataque ( $AR$ ).
- Número de personas susceptibles de enfermar (incluyendo el efecto de las vacunas tras descontar el número de ocupantes infectivos).
- Casos de COVID-19 resultantes.
- Riesgo de infección ( $H$ ).
- Riesgo de infección relativo ( $H_r$ ).



Figura 3.2. Selección de modalidad de cálculo en herramienta *online* COVID Risk<sup>airborne</sup> [7].

- Valor promedio de CO<sub>2</sub> en el recinto.
- Valor promedio de CO<sub>2</sub> a inhalar en 1 hora para alcanzar una probabilidad del 1 % de infección.
- Fracción de aire reinhalado (*RFA*).
- Evolución gráfica del valor medio de CO<sub>2</sub> en el interior del recinto.

El proceso de introducción de datos se realiza según se indica en la figura 3.3.

### 3.3. Ejemplo de estimación del riesgo de infección: aula de educación infantil

Como ejemplo de la aplicación de esta herramienta, se ha tomado un aula de educación infantil en Andalucía, a fin de estimar el riesgo de transmisión aérea del SARS-CoV-2 frente a diferentes niveles de exceso de CO<sub>2</sub> interior. La elección responde a la especial vulnerabilidad de los niños de dicha edad, sumado a la pobre tasa de ventilación que suelen tener estos recintos en el ámbito de estudio. Con los resultados de este breve estudio teórico, es posible optimizar las estrategias de ventilación y autoprotección de los ocupantes.

#### 3.3.1. Muestra de estudio

La forma y dimensiones del aula, así como su sistema de calefacción, el mobiliario y la ocupación teórica responden a los estándares de diseño establecidos para edificios de uso docente no universitario [11], aunque son altamente representativas de las aulas de este tipo en gran parte del país. El recinto tiene 50 m<sup>2</sup> y 3 m de altura, estando diseñado para una capacidad máxima de 24 niños [12]. Dispone de baño propio, con entrada directa desde el interior del aula, así como de un patio escolar asociado, accesible desde una puerta en la fachada del espacio (figura 3.4).

El aula no tiene falso techo ni perforaciones en los tabiques interiores con el aula contigua ni con el pasillo; por tanto, presenta una elevada estanqueidad al paso del aire de la envolvente. El cerramiento vertical exterior está compuesto por una fábrica cerámica con cámara y aislante, con ventanas y puertas exteriores de doble vidrio con cámara de aire y carpintería metálica sin rotura de puente térmico, con estanqueidad al aire según UNE-EN 12207 [13]. Los tabiques interiores están compuestos por una doble placa de cartón yeso con lana mineral entre ambas.

La calefacción se solventa mediante una instalación de radiadores de agua caliente, sin existir previsión de sistemas de refrigeración por aire [14, 15] ni, inicialmente, sistema de ventilación controlada.

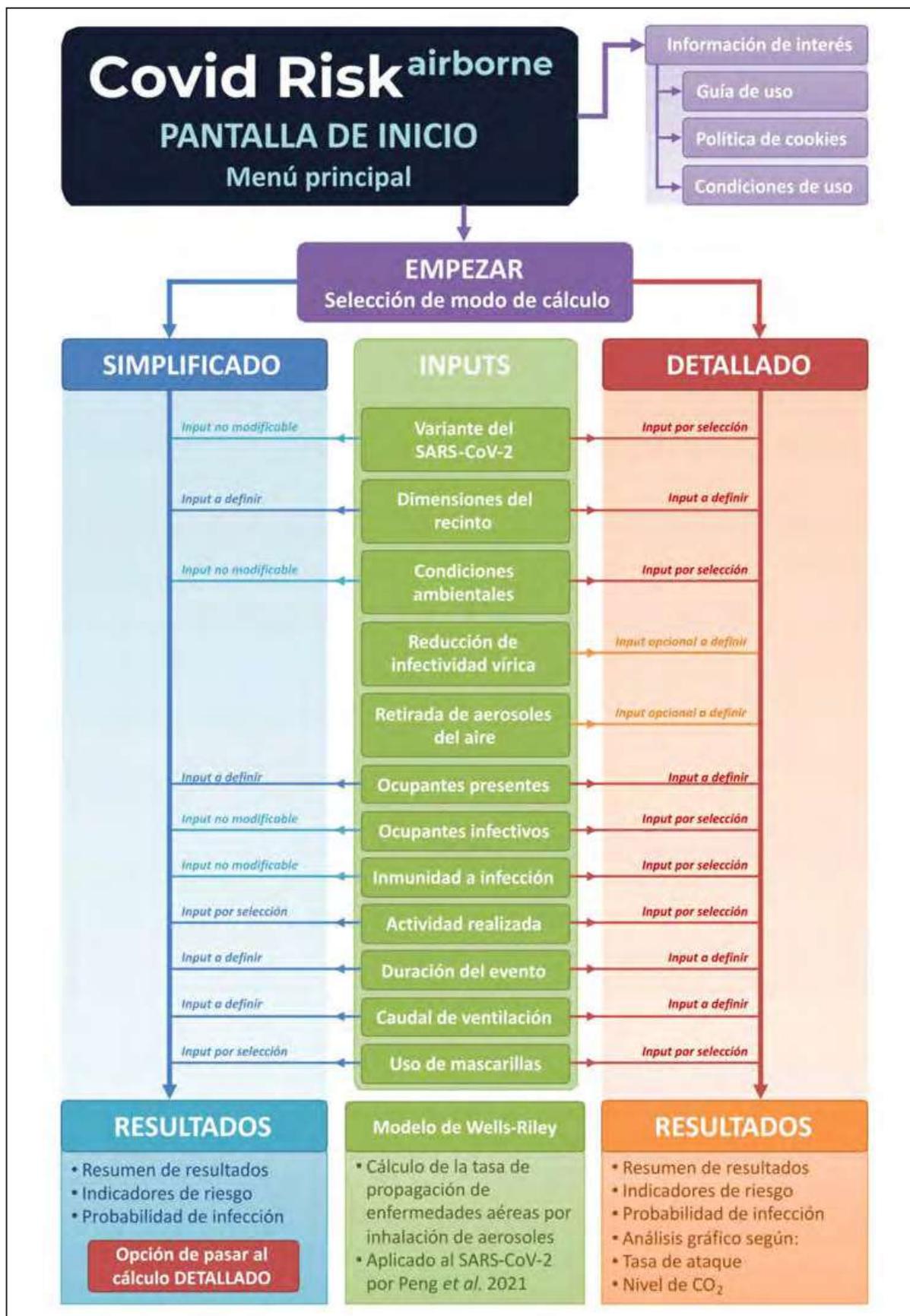
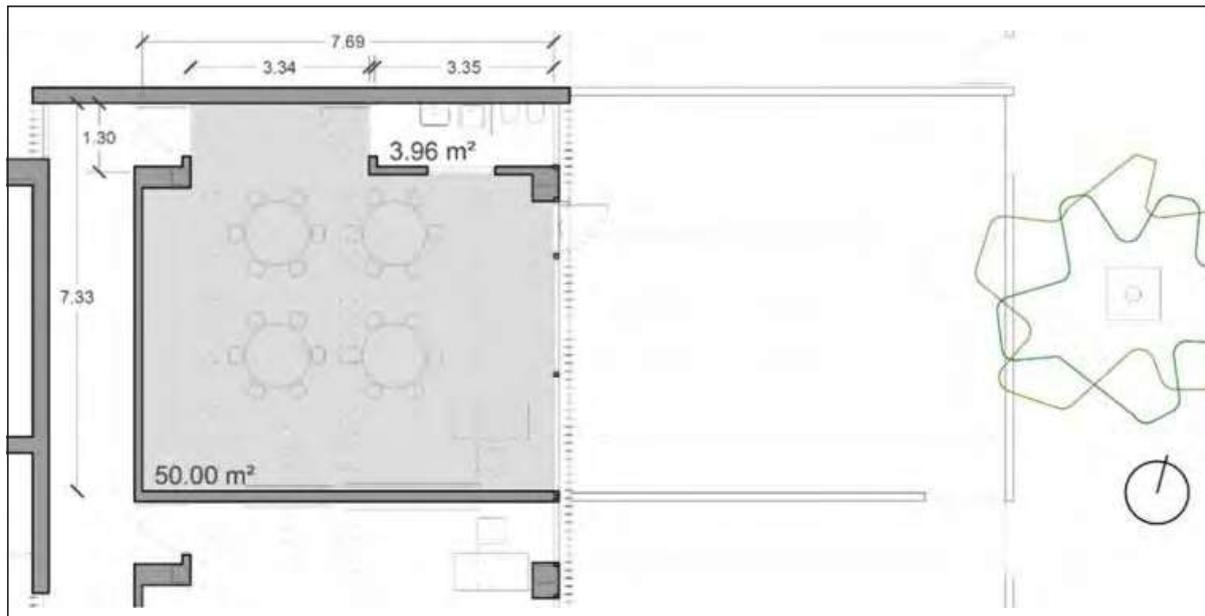


Figura 3.3. Proceso de introducción de datos en la herramienta *online* COVID Risk<sup>airborne</sup>.



**Figura 3.4.** Planta del aula de educación infantil en estudio, según estándares de diseño establecidos para edificios de uso docente no universitario [11].

Habitualmente, la ventilación se confía a la apertura de puertas y ventanas, así como a las infiltraciones no controladas, a pesar de que el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [16] establece que la ventilación mecánica controlada (VMC) es la única opción viable para los edificios no residenciales. En condiciones invernales, el límite inferior de temperatura operativa fijado por el RITE es de 21 °C.

La jornada escolar en los colegios públicos de Educación Infantil y Primaria de Andalucía es de 5 horas, normalmente de 9:00 a 14:00 horas, con media hora de descanso entre ellas. Cada centro puede establecer el punto de inicio de dicho descanso, aunque suele ser en la franja intermedia de la jornada (de 11:15 a 11:45).

### 3.3.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de cálculo requeridas para estimar el riesgo de infección existente por aerosoles de media y larga distancia en el aula de educación infantil estudiada se muestran en la tabla 3.1 [17].

El tiempo de exposición (duración del evento) se ha establecido, para este caso, en 135 minutos, dado que es el tiempo medio entre la hora del almuerzo y el inicio/final de la jornada escolar –aunque en otros entornos escolares podría variar–. También se considera que el aula de Infantil analizada se encuentra en condiciones ambientales típicas del periodo invernal, estando activo el sistema de calefacción por radiadores existente para lograr el

cumplimiento de las condiciones higrotérmicas fijadas por el RITE (temperatura operativa de 21 °C y  $RH \geq 40\%$ ).

**Tabla 3.1.** Condiciones ambientales y operacionales consideradas para el análisis

Dimensiones			
Área (m <sup>2</sup> )	50,0	Altura (m)	3,0
Condiciones ambientales interiores (invierno)			
Temperatura operativa (°C)	21,0	Humedad relativa del aire (RH, %)	40
Presión atmosférica (atm)	1,0	Atmósfera interior	Aire en calma ( $v < 0.25$ m/s), ambiente mezclado
Variante de SARS-CoV-2			
Variante de SARS-CoV-2	Ómicron BA.2	Percentil de tasa de exhalación viral (%)	85
Parámetros de ocupación y tipo de actividad			
N.º ocupantes infecciosos	1	N.º ocupantes presentes	25
Edad media (años)	5	Duración del evento (minutos)	135
Actividad de los niños	Sentados – Respiración oral	Actividad del docente	En pie – hablando

Para realizar el estudio, se ha considerado que en el aula hay un ocupante infectado con carga viral alta (percentil 85 % de tasa de exhalación viral), como hipótesis conservadora para las simulaciones de riesgo de transmisión aérea.

### 3.3.3. Hipótesis estudiadas

Se han considerado cuatro escenarios para este estudio en función del ocupante con infección activa y las condiciones de actividad.

Las hipótesis se agrupan en dos categorías, según el ocupante que se infectó inicialmente (niño o docente).

- Caso 1: un niño infectado por SARS-CoV-2 (sentado, respiración oral), nadie con mascarilla en el aula.
- Caso 2a: docente infectado (de pie, hablando), nadie con mascarilla en el aula.
- Caso 2b: docente infectado (de pie, hablando) con mascarilla quirúrgica (no ajustada) y resto de ocupantes (niños) sin mascarilla.

- Caso 2c: docente infectado (de pie, hablando) con mascarilla FFP2 bien ajustada y el resto de los ocupantes (niños) sin mascarilla.

Para calcular el número de *quanta* que pudo inhalar estadísticamente cada ocupante se ha utilizado el valor promedio en el ambiente interior del incremento de concentración de CO<sub>2</sub> exhalado respecto del exterior,  $\Delta[CO_2]$ . Este parámetro se analiza a lo largo de los citados 135 minutos de una jornada escolar normal (periodo de exposición) como indicador.

Los cálculos para la estimación del riesgo definidos anteriormente se han realizado considerando incrementos de 100 ppm en el valor promedio de  $\Delta[CO_2]$ , con un rango de exceso de 100 a 1.600 ppm, rango que se ha considerado adecuado para este tipo de espacios en estudios previos [18]. Con ello, se obtuvieron un total de 68 combinaciones de análisis, agrupadas en los citados cuatro escenarios.

Este procedimiento también permite considerar diferentes umbrales recomendados, como se recoge en la tabla 3.2:

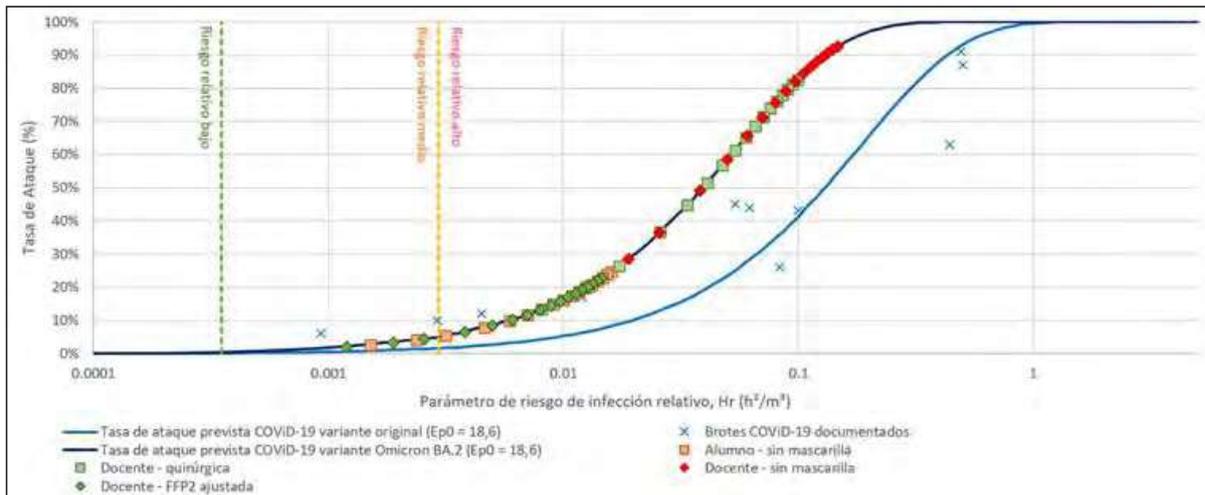
**Tabla 3.2.** Umbrales de CO<sub>2</sub> recomendados según estándares normativos y guías de aplicación

Valor recomendado	Aplicación
1000 ppm. (aprox.)	El RD 486/1997 [19] establece un caudal mínimo de ventilación en espacios laborales de 30 m <sup>3</sup> /h por ocupante, que puede asemejarse a un valor de 1.000 ppm absolutos.
$\Delta 500 \text{ ppm.}$	El RITE fija un valor límite de $\Delta[CO_2]$ para aulas (calidad del aire interior de IDA 2) de 500 ppm, en caso de usar el método de medición directa [16].
$\Delta 300 \text{ ppm.}$	Las recomendaciones desarrolladas para las escuelas durante la emergencia del COVID-19 establecen un umbral de CO <sub>2</sub> de 300 ppm por encima del nivel exterior [20, 21]. Este límite de $\Delta[CO_2]$ está próximo al que establece el RITE para IDA 1 (350 ppm), aplicable a espacios con ocupantes sensibles (hospitales, guarderías y residencias de mayores).
$\Delta 150 \text{ ppm.}$	La recomendación aplicable a espacios educativos, tanto para aulas con ocupantes vulnerables o sin mascarilla, como para pasillos (espacios «aliviadero»), que establece un umbral de $\Delta[CO_2]$ de 150 ppm [21].

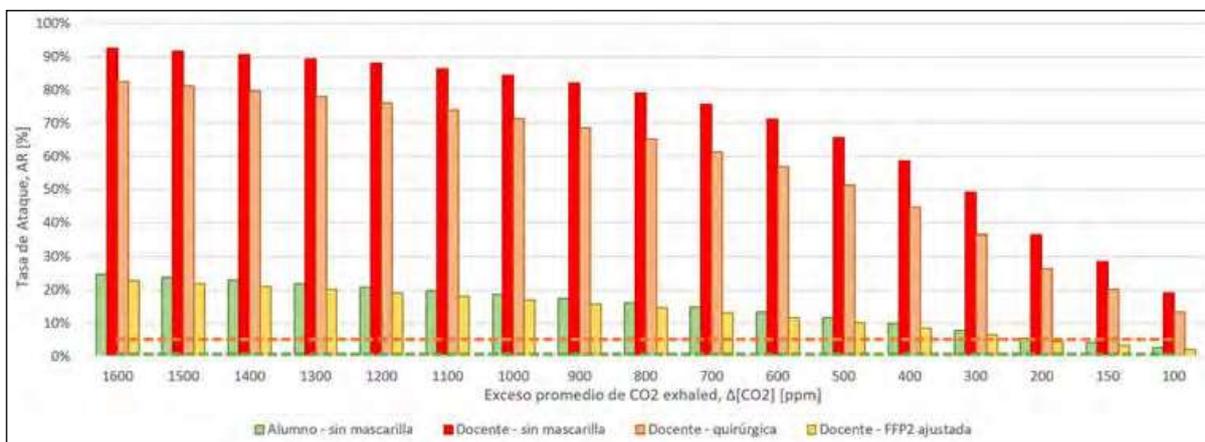
### 3.3.4. Resultados

La figura 3.5 muestra la evolución gráfica de  $H_r$  con respecto a AR. Y la evolución gráfica de  $\Delta[CO_2]$  respecto de AR se puede ver en la figura 3.6.

Como puede verse tanto en la figura 3.5 como en la figura 3.6, el riesgo relativo de infección ( $H_r$ ) de casi todas las hipótesis estudiadas de niveles de CO<sub>2</sub> para las cuatro hipótesis es alto. Es importante resaltar que, para este conjunto de condiciones, no se han encontrado situaciones de bajo riesgo. Bajo estas circunstancias, se pueden establecer dos categorías de AR:



**Figura 3.5.** Análisis gráfico de AR respecto de  $H_r$  para las 68 hipótesis del aula de educación infantil. Tiempo de exposición de 135 minutos.



**Figura 3.6.** Análisis gráfico de AR respecto de  $\Delta[CO_2]$  para las 68 hipótesis del aula de educación infantil. Tiempo de exposición de 135 minutos.

- Riesgo alto (AR 5-25 %): se produce cuando el sujeto infeccioso es un niño, o cuando es el docente y este esté usando una mascarilla FFP2 bien ajustada.
- Riesgo muy alto (AR >25%): se da cuando el sujeto infeccioso es el docente, ya sea cuando no lleva mascarilla o cuando usa una mascarilla quirúrgica (no ajustada).

Al observar la relación entre AR y el nivel de  $\Delta[CO_2]$ , aquellas combinaciones estudiadas que tienen valores de AR por debajo del 5% (umbral de alto riesgo de brotes) se producen cuando:

- Uno de los niños es el sujeto infeccioso –que está sentado, en relativo silencio y respira oralmente–, que presenta la atmosfera interior un incre-

mento de la concentración de CO<sub>2</sub> bajo ( $\Delta[CO_2] \leq 150$  ppm) respecto al aire exterior.

- El docente es el sujeto infeccioso –que está de pie y hablando, siendo el único que lleva una mascarilla FFP2 bien ajustada– y existe un incremento de CO<sub>2</sub> interior bajo ( $\Delta[CO_2] \leq 200$  ppm).

Este valor de  $\Delta[CO_2]$  de 150 ppm concuerda con las recomendaciones desarrolladas por Aireamos para espacios interiores con ocupantes vulnerables o sin mascarillas.

Como se puede apreciar, el valor de AR se presenta más elevado cuando el sujeto infeccioso es el profesor. Esto se debe a que el docente exhala una mayor cantidad de bioaerosoles potencialmente infectivos, tanto por su mayor actividad de vocalización como por su mayor tasa metabólica –debido a la actividad y a su edad y peso–. De esta forma, cuando el profesor es el principal ocupante infectado y no lleva una mascarilla FFP2 bien ajustada, solo se puede obtener un AR inferior al 20% cuando  $\Delta[CO_2]$  es menor a 100 ppm, lo cual es altamente improbable en espacios mal ventilados.

Finalmente, al analizar la posibilidad de que el centro cuente con un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC) según establece el RITE (asociado a un umbral de  $\Delta[CO_2]$  de 500 ppm), se puede derivar de la evaluación del AR que:

- Si el sujeto infeccioso es uno de los niños o el docente (cuando este usa una mascarilla FFP2 bien ajustada): AR de 10-11%, lo que duplica el umbral admisible.
- El docente es el sujeto infeccioso, que o bien no lleva mascarilla, o bien lleva mascarilla quirúrgica sin ajustar: AR superior a 50-65%, lo que supone 10-12 veces el umbral admisible.

Los resultados para este caso indican que, para tener condiciones aceptables de riesgo de transmisión de enfermedades por vía aérea –debidas al SARS-CoV-2 (con un ocupante infectado)– en aulas de educación infantil, es necesario mantener condiciones de ventilación suficientes para alcanzar al menos un nivel promedio de exceso de CO<sub>2</sub> exhalado ( $\Delta[CO_2]$ ) en el entorno de 150 ppm.

Para poder garantizar una adecuada ventilación en estas condiciones, es necesario que estos espacios cumplan con la normativa vigente (RITE [16] y RD 486/1997 [19]) y estén dotados de un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC), en este caso, gestionado mediante control de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire interior.

Asimismo, sería altamente recomendable que los docentes, que desarrollan su actividad de pie y hablando, usen mascarillas FFP2 bien ajustadas

durante situaciones de emergencia debido al alto riesgo de transmisión de enfermedades por vía aérea. Según los cálculos realizados, el riesgo de contagio es mucho mayor (5-6 veces mayor) cuando el sujeto infeccioso es el profesor y no lleva mascarilla ni es quirúrgica.

### 3.3.5. Conclusiones

El empleo de este tipo de herramientas de estimación del riesgo permite disponer de la capacidad de analizar situaciones diferentes y dinámicas, introduciendo en la evaluación el factor temporal, tanto para conocer la evolución de la presencia de aerosoles infecciosos como para conocer la exposición de los usuarios en el interior de los locales. En concreto aporta capacidades para:

- Analizar escenarios operativos para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de mejora.
- Suministrar umbrales a las lógicas de control de los sistemas de ventilación/climatización.
- Informar a los usuarios y gestores de estos espacios del riesgo esperado, concienciándoles y permitiéndoles tomar decisiones individuales (empoderamiento del usuario). Esto es especialmente deseable en entornos educativos, con ocupantes especialmente sensibles (niños). De esta forma, se implica también en la didáctica a docentes y progenitores.
- Diseñar los tiempos máximos recomendables para el desarrollo de actividades.

Respecto al caso de estudio, el análisis pone de manifiesto la dificultad de mantener atmósferas de bajo riesgo en entornos de alta densidad de ocupación, en especial cuando el periodo de desarrollo de la actividad es significativo.

Las altas tasas de ventilación necesarias para mantener el riesgo en niveles bajos obliga al concurso de sistemas mecánicos controlados (VMC), con objeto de asegurar una dilución de los posibles aerosoles infectivos. Igualmente, en muchas de las ocasiones, se hace necesario el complemento de medidas complementarias como el uso de mascarillas, en especial para el caso de los profesores.

## Referencias

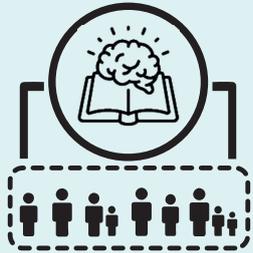
- [1] M. Á. Campano-Laborda, J.-L. Jiménez, J. Fernández-Agüera y P. Bustamante, «Estimación del riesgo relativo de transmisión de enfermedades aéreas

- mediante el modelo de Wells-Riley», en J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano y J. J. Sendra (eds.), *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica*. Barcelona, Octaedro, 2023, p. 178.
- [2] Z. Peng and J. L. Jiménez, «Exhaled CO<sub>2</sub> 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.
- [3] Z. Peng *et al.*, «Practical indicators for risk of airborne transmission in shared indoor environments and their application to COVID-19 outbreaks», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, n.º 2, pp. 1125-1137, 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c06531.
- [4] ASHRAE Board of Directors, *ASHRAE position document on indoor carbon dioxide*, 2022. [https://www.ashrae.org/filelibrary/about/positiondocuments/pd\\_indoorcarbondioxide\\_2022.pdf](https://www.ashrae.org/filelibrary/about/positiondocuments/pd_indoorcarbondioxide_2022.pdf)
- [5] Aireamos, *Aireamos 2021*, 2022. <https://www.aireamos.org/>
- [6] VentilANDo, *VentilANDo 2021*, 2022. <http://www.ventilando.org/>
- [7] M. Á. Campano-Laborda, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta García, J. J. Fernández-Agüera, P. Bustamante Rojas, J. J. Sendra Salas, J. L. Jiménez Palacios, J. D. Velarde Rodríguez, I. Acosta García, P. Bustamante Rojas, J. J. Sendra Salas, J. L. Jiménez Palacios y J. D. Velarde Rodríguez, *COVID Risk airborne*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 2021. [www.covidairbornerisk.com](http://www.covidairbornerisk.com).
- [8] J. L. Jiménez Palacios y Z. Peng, *COViD-19 aerosol transmission estimator (v3.5.7)*, 2021. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/16K1OQkLD4BjgBdO8ePj6ytf-RpPMLJ6aXFg3PrIQBbQ/edit#gid=519189277>
- [9] M. Baselga, J. J. Alba A. J. Schuhmacher, S. Kodera y E. A. Rashed, *Citation: the control of metabolic CO<sub>2</sub> in public transport as a strategy to reduce the transmission of respiratory infectious diseases*, 2022, doi: 10.3390/ijerph19116605.
- [10] D. Rodríguez, I. R. Urbietta, Á. Velasco, M. Á. Campano-Laborda y E. Jiménez, «Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infection in Spanish secondary school and university classrooms», *Build. Environ.*, vol. 226, p. 109717, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109717.
- [11] Junta de Andalucía, «Orden de 24 de enero de 2003 de la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Andalucía por la que se aprueban las normas de diseño y constructivas para los edificios de uso docente», *Boletín Of. de la Junta Andalucía*, vol. 43, p. 4669, 2003.
- [12] M. A. Campano, *Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía* (tesis doctoral). Sevilla, Universidad de Sevilla, 2015. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/30632>
- [13] AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-EN 12207:2017. Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación*.

- Madrid, AENOR, 2017. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058081>
- [14] M. A. Campano, J. J. Sendra y S. Domínguez-Amarillo, «Analysis of thermal emissions from radiators in classrooms in Mediterranean climates», *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 106-113, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.1993.
- [15] M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera y J. J. Sendra, «Thermal perception in mild climate: adaptive thermal models for schools», *Sustainability*, vol. 11, n.º 14, p. 3948, 2019, doi: 10.3390/su11143948.
- [16] 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>
- [17] M. Á. Campano-Laborda, S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera y I. Acosta, «Indoor comfort and symptomatology in non-university educational buildings: Occupants' perception», *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, n.º 4, 2020, doi: 10.3390/atmos11040357.
- [18] J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta y J. J. Sendra, «CO2 concentration and occupants' symptoms in naturally ventilated schools in Mediterranean climate», *Buildings*, vol. 9, n.º 9, p. 197, 2019, doi: 10.3390/buildings9090197.
- [19] 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. <https://www.boe.es/buscar/pdf/1997/BOE-A-1997-8669-consolidado.pdf>
- [20] M. de la C. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi y T. Garrido, *Guía para ventilación en aulas*, 2020. doi: 10.20350/digitalCSIC/12677.
- [21] 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](https://drive.google.com/file/d/1jFavucO98vMz5_LpKtnDXBfDZvWlMLcL/view)

# CAPÍTULO 3

## LA APLICACIÓN Y SU FINALIDAD



- ✓ EMPODERAMIENTO
- ✓ CONOCIMIENTO COLECTIVO

COVID Risk<sup>airbone</sup>



RIESGO ASUMIBLE SEGÚN:



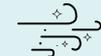
AFORO



ACTIVIDAD



TIEMPO



VENTILACIÓN

OPCIONES DE CÁLCULO

CÁLCULO DETALLADO

- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

CÁLCULO SIMPLIFICADO

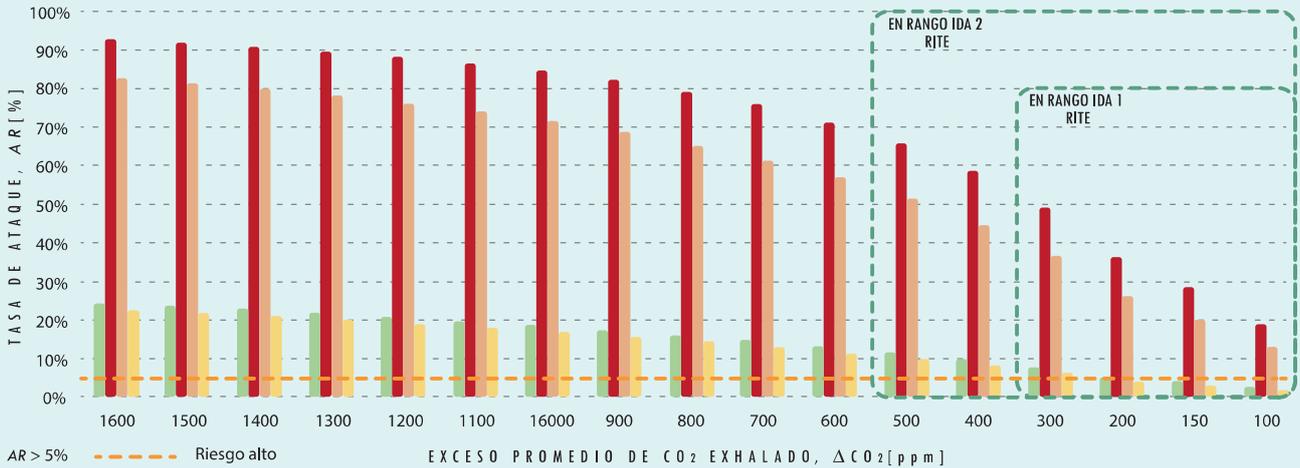
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

## EJEMPLO DE APLICACIÓN: AULA 5 AÑOS

### CONDICIONES DE CÁLCULO



### RESULTADOS



### CONCLUSIONES

NIVELES ADECUADOS DE  $\Delta CO_2 \leq 300$  ppm

> 500 ppm    ≤ 500 ppm    ≤ 300 ppm

ÓPTIMO ≤ 150 ppm

PROFESORES TESTEADOS O CON MASCARILLA FFP2

