

# Estimación del riesgo relativo de transmisión de enfermedades aéreas mediante el modelo de Wells–Riley

MIGUEL ÁNGEL CAMPANO  
JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA  
PEDRO BUSTAMANTE

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

JOSÉ LUIS JIMÉNEZ

Dept. of Chemistry and CIRES, University of Colorado, Boulder, Colorado, Estados Unidos.

## Lista de acrónimos

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

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

$B$  tasa de flujo volumétrico respiratorio de las personas susceptibles.

$B_0$  frecuencia respiratoria volumétrica promedio de una persona susceptible con actividad sedentaria, de acuerdo con su edad y tamaño.

$C$  número de casos de infección secundarios por una enfermedad en un evento dado.

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

$\text{CO}_2$  dióxido de carbono.

$D$  periodo de exposición en un evento dado.

$E_F$  factor de mejora de una variante de la enfermedad dada, con transmisión aérea.

$E_p$  tasa de exhalación de *quanta* que emite una persona infecciosa con una actividad metabólica y de vocalización dada.

$E_{p0}$  tasa de exhalación de *quanta* de una enfermedad dada, con transmisión por el aire, que tiene una persona infecciosa que está respirando oralmente, en silencio y con actividad sedentaria.

$E_{p,\text{CO}_2}$  es la tasa de exhalación de  $\text{CO}_2$  por persona, dependiente de la actividad metabólica, la edad, el sexo biológico y el tamaño.

EPI equipo de protección individual.

$f_e$  eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la exhalación.

$f_{fil}$  eficiencia de retirada de partículas de 1 a 3  $\mu\text{m}$  de un filtro.

$f_i$  eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la inhalación, que considera el efecto de la fracción de ocupantes que llevan mascarillas/respiradores.

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

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

MERS-CoV síndrome respiratorio de oriente medio (acrónimo del inglés *Middle East respiratory syndrome coronavirus*).

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

$n$  dosis infecciosa inhalada por un ocupante susceptible a una enfermedad en un evento dado.

$N$  número de ocupantes en el evento.

$N_i$  número de ocupantes infecciosos en el evento.

$N_{m,i}$  es el porcentaje de ocupantes infectivos en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores.

$N_{m,s}$  es el porcentaje de ocupantes susceptibles en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores.

$Q_{cle}$  caudal de aire proporcionado por el equipo de limpieza de aire.

$R$  riesgo individual de infección frente a una enfermedad en un evento dado

$r_B$  variación del flujo de aire inhalado según la actividad desarrollada.

$r_E$  incremento relativo de emisión vírica debido a la actividad y la vocalización.

$r_{ss}$  factor multiplicativo aplicado para eventos demasiado cortos para alcanzar aproximadamente el estado estacionario.

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

$S$  número de individuos susceptibles y sanos expuestos a una enfermedad en un evento dado.

SARS-CoV-1 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 1*).

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

$\bar{T}_a$  temperatura media del aire en un recinto.

UV ultravioleta.

UVB índice de exposición a luz ultravioleta proveniente del sol.

$V$  volumen del recinto donde se produce el evento.

$v_a$  velocidad del aire.

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

$\lambda$  tasa de retirada de carga vírica.

$\lambda_0$  tasa de retirada de *quanta* de primer orden, derivada del efecto de la ventilación con aire exterior.

$\lambda_{cle}$  es la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire.

$\lambda_{dec}$  es la tasa de decaimiento de la infectividad del virus en el aire.

$\lambda_{dep}$  es la tasa de la deposición promedio en superficies de los bioaerosoles con carga vírica.

## 2.1. Introducción

La promoción de una adecuada calidad del aire en espacios interiores es una cuestión de salud pública, ya que, de esta manera, se permite mantener a niveles adecuados diferentes parámetros y contaminantes ambientales derivados de la actividad humana. En este contexto, el hecho de que la población habite espacios más saludables puede repercutir en una disminución de las bajas laborales, pudiéndose traducir a una reducción de hasta el 35 % del absentismo laboral por enfermedad [1].

Su evaluación puede ser sencilla, tal como se ha discutido en el capítulo previo sobre «Ventilación y CO<sub>2</sub>, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental» [2]. En ausencia de otras fuentes significativas de emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el incremento de la concentración de este gas en un espacio interior dado, en relación con el nivel exterior de fondo (denominado «exceso de CO<sub>2</sub>»,  $\Delta[CO_2]$ ), se debe principalmente a la exhalación de los ocupantes. Monitorizar el exceso de CO<sub>2</sub> en interiores, por lo tanto, puede ser un buen indicador indirecto para caracterizar el proceso de la ventilación, especialmente en entornos con una alta densidad de ocupantes como las aulas.

La transmisión de enfermedades respiratorias, como la del SARS-CoV-2, ha sido ampliamente probada por la comunidad científica [3, 4], incluyendo el caso de instituciones educativas [5]. La monitorización del nivel de CO<sub>2</sub> en espacios interiores se puede utilizar para estimar el riesgo de transmisión de estas enfermedades, ya que los aerosoles cargados de viriones,<sup>1</sup> emitidos por los ocupantes con infección activa durante la respiración de forma similar a la exhalación de CO<sub>2</sub>, pueden acumularse fácilmente en estos espacios cerrados. Dada esta relación, es posible evaluar indirectamente el riesgo de infección de enfermedades por aerosoles (media y larga distancia) en cada espacio interior, utilizando el exceso de CO<sub>2</sub> como representación (*proxy*).

1. Viriones: partículas víricas infecciosas.

## 2.2. Modelo de Wells–Riley para propagación aérea de enfermedades

El procedimiento matemático desarrollado por Wells-Riley para el estudio estadístico de la propagación de enfermedades mediante aerosoles (media y larga distancia), refinado y adaptado por Buonanno *et al.* [6] y Peng *et al.* [7, 8], permite estimar el riesgo de infección a través del cálculo de los *quanta* que podría inhalar cada ocupante durante un evento dado en un espacio interior, considerando que hay uno o más ocupantes infecciosos en el recinto. Para ello, es necesario tener en cuenta diferentes aspectos.

### 2.2.1. ¿Qué es un *quantum*?

Un *quantum* (plural, *quanta*) es la dosis mínima de aerosoles con carga vírica suficiente para causar la infección en el 63 % de ocupantes susceptibles de contraer la enfermedad. Así, exponerse a un *quantum* de una enfermedad dada implica que es probable que se contraiga dicha enfermedad en caso de ser susceptible a esta.

### 2.2.2. ¿Pueden contagiarse todos los ocupantes durante un evento?

No todo ocupante presente en el evento es necesariamente susceptible de contagiarse, dado que previamente puede haber desarrollado inmunidad frente a la infección que sea efectiva en ese momento. Esta puede deberse, entre otros, tanto al hecho de haber pasado recientemente la enfermedad como por la vacunación, así como a la inmunidad natural y la sensibilidad de cada individuo.

### 2.2.3. ¿Qué es la tasa de emisión de *quanta*?

La tasa de emisión de *quanta* de un sujeto infectivo ( $E_p$ , en  $quanta^{-1}$ ) es la carga vírica viable emitida por dicho sujeto a lo largo de una hora. Este valor se obtiene a partir de la tasa básica de exhalación de la enfermedad dada ( $E_{por}$ , para una actividad sedentaria con respiración nasal), y se basa en la hipótesis de que los aerosoles emitidos por un sujeto infectado [9] contienen la misma carga viral (en copias por mL) que la existente en un esputo [10]. Para adecuarla a las actividades desarrolladas durante el evento, esta tasa básica es aumentada mediante la tasa de incremento relativo de emisión vírica debido a la actividad y la vocalización ( $r_E$ ) según [9]:

- Las características físicas (edad, peso, etc.) del sujeto infeccioso.

- La actividad metabólica (en reposo, sentado con trabajo ligero, caminando, en pie con trabajo medio o pesado, etc.) del sujeto infeccioso [8, 11, 12].
- La actividad de vocalización del sujeto infeccioso: en silencio (respiración nasal), hablando, gritando/cantando, etc.

Como se puede ver en la tabla 2.1, donde se muestran diversos valores predictivos de  $E_p$  para algunas enfermedades de transmisión aérea, esta emisión vírica depende en gran medida de la actividad de vocalización, siendo un factor determinante a la hora de evaluar el riesgo de contagio.

**Tabla 2.1.** Valores predictivos de  $E_p$  ( $quant\alpha^{-1}$ ), según actividad metabólica y de vocalización para SARS-CoV-2, rinovirus humano y gripe estacional, para los percentiles 50 y 85 [13, 14]

Patógeno	Actividad metabólica y de vocalización (percentiles 50/85)		
	Sedentaria, respiración oral	En pie, hablando	Actividad ligera, hablando alto
Gripe estacional	0,035 / 0,257	0,168 / 1,250	2,972 / 22,063
Rinovirus humano	0,209 / 1,514	0,995 / 7,211	17,908 / 129,805
SARS-CoV-2	3,336 / 18,600	19,018 / 106,020	283,596 / 1581,000
$r_{E,SARS-CoV-2}$	x1,0	x5,7	x85,0

La tabla A1 contiene más valores predictivos de  $E_p$  para otras de las enfermedades aéreas más comunes.

#### 2.2.4. ¿Cómo afectan las variantes al riesgo de contagio?

Cuando se analiza una variante de una enfermedad, con una capacidad de propagación diferente a la de la variante de referencia, es posible tomar el valor de  $E_p$  de dicha variante de partida y modificarlo mediante un factor de mejora ( $E_F$ ). Este se define como el cociente entre el número de reproducción efectivo ( $r_e$ ) de la variante en estudio y la variante de referencia. Por ejemplo, el  $E_F$  de la variante Alpha del SARS-CoV-2 puede considerarse como 1,5 respecto de la variante original, mientras que el valor de Ómicron BA.1 puede tomarse como 2,5 [15]. La tabla A2 recoge valores de  $E_F$  para algunas de las principales variantes del SARS-CoV-2.

### 2.2.5. ¿Qué variables influyen en la transmisión aérea?

Una vez estimada la emisión de partículas infectivas debido a la respiración y vocalización del sujeto infeccioso, el método asume que se produce una distribución por el recinto interior (considerando la simplificación que este proceso es homogéneo en el volumen del recinto, al tomarse la atmósfera como completamente mezclada). La emisión se acumula paulatinamente a lo largo de la duración del evento. Sin embargo, tanto la cantidad de bioaerosoles en suspensión como la infectividad de estos también es afectada por el paso del tiempo, según diversas variables, como:

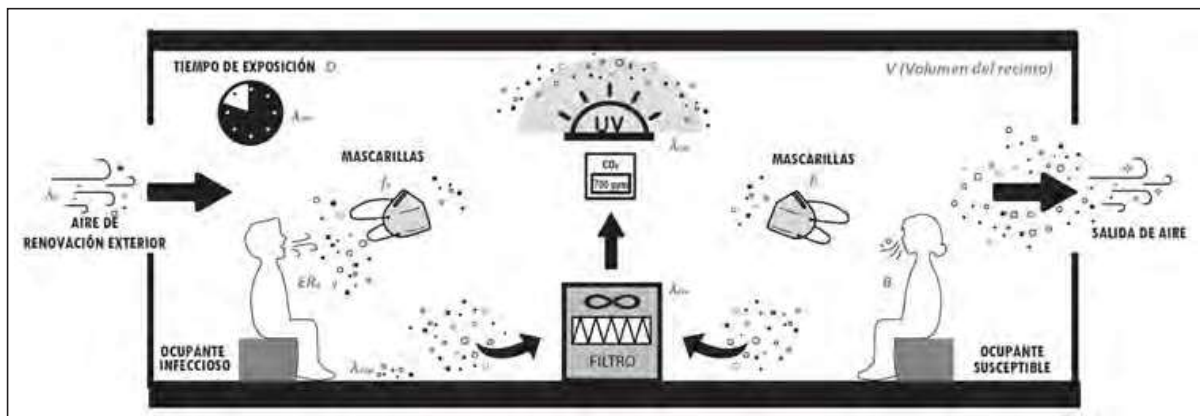
- la duración del evento,
- las condiciones ambientales interiores (temperatura del aire,  $\bar{T}_a$ ; humedad relativa,  $RH$ ; velocidad del aire,  $v_a$ ; etc.), así como la densidad y distribución del mobiliario en el recinto. Esto afecta a:
  - El tiempo promedio de suspensión de los bioaerosoles infectivos (tasa de deposición promedio en superficies de los bio-aerosoles con carga vírica,  $\lambda_{dep}$  en las cuales termina inactivándose [16, 17]). Este también varía según el diámetro promedio de los aerosoles. La tabla A3 contiene diversos valores para  $\lambda_{dep}$  ( $\text{h}^{-1}$ ) según distribución del mobiliario y velocidad del aire.
  - La tasa de decaimiento del virus en el aire (tiempo de inactivación promedio de su capacidad infectiva,  $\lambda_{dec}$  [18]). En esta tasa influye la exposición prolongada del ambiente interior a la luz solar, como se muestra en la ecuación A1.
- El nivel de renovación de aire exterior ya sea por ventilación natural (voluntaria o infiltraciones) o por ventilación mecánica controlada.
- Volumen de aire contenido en el recinto, que puede actuar como «reservorio de aire» a la hora de diluir con mayor efectividad la carga vírica emitida.
- Retirada de carga vírica mediante:
  - Equipos de protección individual (EPI) de los sujetos infecciosos (mascarillas y respiradores) [19-22]. La tabla A4 muestra la eficiencia en la reducción de la exhalación vírica de estos EPI (mex).
  - Elementos de filtrado en sala (filtros de alta eficiencia, filtros HEPA). La tabla A5 recoge diferentes valores de eficiencia de filtrado de estos elementos [23, 24], utilizadas para calcular la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire ( $\lambda_{cle}$ ,  $\text{h}^{-1}$ ) mediante la ecuación A2.
- Sistemas de inactivación del virus (equipos de radiación ultravioleta). El método asume la eficacia especificada por el fabricante en sus fichas de características (sin entrar a discutir su eficiencia volumétrica).

A partir de este número de *quanta* (dosis víricas viables) suspendidos en el ambiente del recinto a lo largo del evento, contando ya con las diversas variables de inactivación/retirada de aerosoles infectivos, es posible prever el total estadístico de *quanta* que puede inhalar una persona susceptible presente ( $n$ ). Para ello, se requiere:

- La tasa de inhalación para exposiciones de corta duración a lo largo del evento, siendo posible estimarla a partir del sexo, edad y la actividad metabólica desarrollada de los ocupantes susceptibles [11]. Dicha tasa (tabla A6), puede ser equivalente a la tasa de flujo volumétrico respiratorio de las personas susceptibles ( $B$ ,  $m^3/h$ ).
- El uso y ajuste de los EPI de los sujetos vulnerables (mascarillas y respiradores). La tabla A4 muestra la eficiencia en la reducción de la inhalación vírica de estos EPI ( $m_{in}$ ).

Una vez conocido el total de *quanta* inhalados por un ocupante susceptible mediante este procedimiento probabilístico (figura 2.1), es posible establecer el riesgo individual de infección  $y$ , a partir de él, el número de casos secundarios de contagio potenciales.

Como se indicó previamente, el hecho de inhalar una dosis vírica suficiente para infectar al 63 % de las personas susceptibles (*quantum*) no implica que un ocupante necesariamente se contagie. Por un lado, este procedimiento es un cálculo probabilístico que simplifica la complejidad de la realidad existente, y por otro, los ocupantes pueden no ser susceptibles al contagio en el momento del evento, debido a presentar en ese momento un nivel suficiente de inmunidad a la infección.



**Figura 2.1.** Proceso de emisión e inhalación de bioaerosoles potencialmente infectivos, con implementación de las medidas de mitigación disponibles para la retirada/inactivación de carga vírica.

## 2.3. Aplicación del modelo a enfermedades de transmisión aérea

Este modelo expuesto puede aplicarse a cualquier enfermedad de transmisión aérea, entre las que se encuentran, entre otras, las derivadas de los siguientes patógenos:

- SARS-CoV-1.
- SARS-CoV-2.
- MERS-CoV (coronavirus del síndrome respiratorio de Oriente Medio).
- Adenovirus (agente causante de enfermedades respiratorias, intestinales, etc.)
- Gripe estacional.
- Rinovirus humano (agente causante del resfriado común en humanos).
- Sarampión.
- Tuberculosis, ya sea tanto en tratamiento como sin tratar.

Para ello, es necesario determinar la tasa básica de exhalación de la enfermedad que se desea analizar ( $E_{p0}$ ) [13], para posteriormente poder aplicar la metodología descrita.

### 2.3.1. Indicadores de riesgo de infección a partir del modelo

De entre los distintos indicadores de riesgo de infección de enfermedades aéreas vinculados al modelo de Wells-Riley, cabe destacar tanto la tasa de ataque ( $AR$ ) como el riesgo relativo de infección ( $H_r$ ). Ambos indicadores son de gran utilidad para evaluar y comparar diversos eventos entre sí. Estos parámetros están referidos al riesgo de inhalación de la dosis vírica necesaria para generar una infección (*quantum*) que tienen los ocupantes susceptibles durante el evento. De esta manera, pueden utilizarse independientemente del número de personas vacunadas o de la efectividad de dichas vacunas.

$AR$  (%) se define epidemiológicamente como la relación entre el número de casos de infección secundarios ( $C$ ) y el número de individuos susceptibles y sanos expuestos ( $S$ ) que estuvieron expuestos a una concentración '*quanta*' distinta de cero [59]. Además,  $AR$  también representa el riesgo individual de infección ( $R$ ) en un escenario hipotético (ecuación 1).

$$AR = C / S = R \equiv 100 \cdot (1 - e^{-n}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $n$  es la dosis infecciosa inhalada por un ocupante susceptible presente en el recinto durante el evento (*quanta*), que se obtiene según las Ecuaciones 2 a 7, bajo la suposición de que no hay ocupantes ni viriones en suspensión en el ambiente del recinto al inicio del evento [8].



$$n = r_{ss} \cdot N_i \cdot E_p \cdot f_e \cdot f_i \cdot B \cdot D / (V \cdot \lambda) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$E_p = E_{p0} \cdot r_E \cdot E_F \quad \text{Ecuación 3}$$

$$f_e = (1 - m_{ex} / 100) \cdot (N_{m,i} / 100) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$f_i = (1 - m_{in} / 100) \cdot (N_{m,s} / 100) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$B = B_0 \cdot r_B \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{cle} + \lambda_{dec} + \lambda_{dep} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

$r_{ss}$  es el factor multiplicativo aplicado para eventos demasiado cortos para alcanzar aproximadamente el estado estacionario (adimensional). Habitualmente se puede considerar como 1.

$N_i$  es el número de ocupantes infecciosos durante el evento (personas).

$E_p$  es la tasa de exhalación de *quanta* que emite una persona infecciosa con una actividad metabólica y de vocalización dada (*quanta/h*). Puede consultarse valores para la misma en la tabla A1.

$f_e$  es la eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la exhalación (adimensional).

$f_i$  la eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la inhalación, que considera el efecto de la fracción de ocupantes que llevan mascarillas/respiradores (adimensional).

$B$  es la tasa de flujo volumétrico respiratorio de las personas susceptibles ( $m^3/h$ ), según la tabla A6.

$D$  es el periodo de exposición (h).

$V$  es el volumen del recinto donde se produce el evento ( $m^3$ ).

$\lambda$  es la tasa de retirada de carga vírica ( $h^{-1}$ ).

$E_{p0}$  es la tasa de exhalación de *quanta* de una enfermedad dada, con transmisión por el aire, que tiene una persona infecciosa que está respirando oralmente, en silencio y con actividad sedentaria (*quanta/h*).

$E_F$  es el factor de mejora de una variante de la enfermedad dada, con transmisión aérea (adimensional). Puede consultarse en la tabla A2.

$r_E$  es el incremento relativo de emisión vírica debido a la actividad y la vocalización (adimensional).

$m_{ex}$  es la eficiencia en la reducción de la exhalación vírica de pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%). La tabla A4 recoge valores para diversas mascarillas/filtros, según su ajuste.

$N_{m,i}$  es el porcentaje de ocupantes infectivos en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%).

$m_{in}$  es la eficiencia en la reducción de la inhalación vírica de pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%). La tabla A4 muestra valores para diversas mascarillas/filtros (según ajuste).

$N_{m,s}$  es el porcentaje de ocupantes susceptibles en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%).

$B_0$  es la frecuencia respiratoria volumétrica promedio de una persona susceptible con actividad sedentaria, de acuerdo con su edad y tamaño ( $m^3/h$ ).

$r_B$  es la variación del flujo de aire inhalado según la actividad desarrollada (adimensional).

$\lambda_0$  es la tasa de retirada de *quanta* de primer orden, derivada del efecto de la ventilación con aire exterior ( $h^{-1}$ ).

$\lambda_{cle}$  es la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire ( $h^{-1}$ ), calculada según la ecuación A2.

$\lambda_{dec}$  es la tasa de decaimiento de la infectividad del virus en el aire ( $h^{-1}$ ), obtenida mediante la ecuación A1.

$\lambda_{dep}$  es la tasa de la deposición promedio en superficies de los bio-aerosoles con carga vírica ( $h^{-1}$ ). La tabla A3 recoge diferentes valores para este índice.

Mediante este planteamiento es posible comprobar que la dosis infecciosa inhalada por un ocupante susceptible para una enfermedad dada ( $n$ ) depende proporcionalmente de:

- La actividad metabólica y de vocalización de los ocupantes infecciosos ( $E_p$ ).
- El número de ocupantes ( $N_i$ ).
- El adecuado uso de mascarillas, tanto por parte de los ocupantes infecciosos ( $f_e$ ) como de los susceptibles ( $f_i$ ).
- La actividad metabólica desarrollada por los ocupantes susceptibles ( $B$ ).
- La duración del evento ( $D$ ).

Asimismo, esta es inversamente proporcional al volumen del recinto ( $V$ ) y a la acción de las medidas de retirada de carga vírica del ambiente ( $\lambda$ ).

$H_r$  ( $h^2/m^3$ ), por otra parte, es un indicador del aumento del riesgo relativo individual de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado [8], como se muestra en la ecuación 8.

$$H_r = r_{ss} \cdot r_E \cdot r_B \cdot f_e \cdot f_{irss} \cdot D / (V \cdot \lambda) \quad \text{Ecuación 8}$$

En consecuencia, se puede deducir que  $H_r$  no depende de ninguna enfermedad/variante específica, dado que se obtiene a partir del incremento de la emisión *quanta* derivado de la actividad/vocalización ( $r_E$ ) y de la variación del flujo de aire inhalado por la actividad ( $r_B$ ), pero no de la tasa básica de exhalación de una enfermedad concreta ( $E_{p0}$ ).

Se proponen tres categorías de riesgo (bajo, medio y alto) para estos indicadores. Estos niveles se basan en los estudios previos realizados en espacios interiores en los que se dieron brotes documentados, como se puede observar en la tabla 2.2 [7, 8]. Para el SARS-CoV-2 original, se puede considerar que no se han encontrado brotes documentados cuando  $AR$  fue inferior a 0,5 % [8].

**Tabla 2.2.** Valores de las categorías de riesgo de los indicadores  $AR$  y  $H_r$

	Bajo	Medio	Alto
$AR$ (%)	< 0,5	< 5,0	$\geq 5,0$
$H_r$ ( $h^2/m^3$ ) para el SARS-CoV-2 original	< 0,001	< 0,010	$\geq 0,010$

### 2.3.2. Limitaciones del modelo de Wells-Riley

Esta metodología probabilística presenta un conjunto de asunciones y condiciones de aplicación para su utilización, al acotar determinados aspectos de la realidad existente con una serie de suposiciones:

- Considera que la atmósfera del espacio interior analizado es homogénea (ambiente completamente mezclado), con lo que la carga vírica pasaría a distribuirse uniformemente. Así, los resultados obtenidos pueden llegar a diferir ligeramente de los casos reales, pese a que el modelo ha sido previamente validado por comparación con brotes existentes en espacios de dimensiones medianas/grandes [8] y ser una suposición razonable en la mayoría de los ambientes interiores habituales.
- Este procedimiento excluye la transmisión por gotitas y contacto/fómites.
- La metodología asume que se respeta un distanciamiento social de 2 m (6 pies), ya que se centra en el método de transmisión mediante aerosoles de medio/largo alcance.

Por todo esto, en algunos casos, las tasas de infección calculadas con este modelo pueden ser levemente más bajas que las reales, especialmente para los ocupantes cercanos a los sujetos infecciosos.

### 2.4. Nivel de CO<sub>2</sub> como *proxy* de riesgo en el modelo de Wells-Riley

Dado que tanto el CO<sub>2</sub> como los aerosoles potencialmente infectivos se exhalan durante el proceso respiratorio, siendo ambos dependientes de la actividad metabólica, es posible tomar el nivel promedio de incremento de CO<sub>2</sub> respecto a la atmósfera exterior ( $\Delta[CO_2]$ ) a lo largo del evento y utilizarlo como indicador indirecto del riesgo de contagio. De esta forma, se utiliza este exceso promedio de CO<sub>2</sub> como indicador del proceso de ventilación en un recinto ocupado, asumiendo algunas limitaciones, dado que ésta actúa como una de las principales medidas de mitigación en el modelo adaptado de Wells-Riley.

Según lo expuesto, la relación entre la tasa de retirada de *quanta* de primer orden derivada del efecto de la ventilación con aire exterior ( $\lambda_0$ ) y el valor promedio homogéneo del diferencial de CO<sub>2</sub> entre interior y exterior durante un evento ( $\Delta[CO_2]_{avg}$  en ppm) puede definirse como en la ecuación 9 [7].

$$\Delta[\text{CO}_2]_{avg} = \frac{N \cdot E_{p,\text{CO}_2}}{V} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{(-\lambda_0 \cdot D)}}{\lambda_0^2 \cdot D} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

donde:

$N$  es el número de ocupantes (personas).

$E_{p,\text{CO}_2}$  es la tasa de exhalación de  $\text{CO}_2$  por persona, dependiente de la actividad metabólica, la edad, el sexo biológico y el tamaño ( $\text{m}^3/\text{h}$ ). Pueden consultarse en las tablas A6 y A7.

$D$  es el periodo de exposición (h).

$V$  es el volumen del recinto donde se produce el evento ( $\text{m}^3$ ).

$\lambda_0$  es la tasa de retirada de *quanta* de primer orden, derivada del efecto de la ventilación con aire exterior ( $\text{h}^{-1}$ ).

La tasa de exhalación de  $\text{CO}_2$  por persona ( $E_{p,\text{CO}_2}$ ) puede obtenerse a partir de los valores mostrados en las tablas A6 y A7 [12], deducidos en función de la actividad metabólica, el sexo biológico y la edad. Asimismo, la tabla A9 muestra, a modo de ejemplo, algunas correspondencias entre diversas actividades cotidianas y el valor asociado del nivel de actividad física, expresado en *met* [25, 26].

Así, al conocer el valor de  $\Delta[\text{CO}_2]_{avg}$  durante un evento realizado en un espacio interior, puede realizarse una estimación de los *quanta* ya emitidos que son retirados del aire gracias a la ventilación, reduciendo por tanto el total de *quanta* inhalados por los ocupantes susceptibles (al que también afectan el resto de las tasas de retirada de *quanta*). De esta forma, y a partir de esta posible dosis inhalada, es factible estimar los diferentes indicadores relativos de infección (entre los que destacan  $AR$  y  $H_r$ , anteriormente explicados).

#### 2.4.1. Limitaciones del uso del $\text{CO}_2$ como *proxy* de riesgo de transmisión de enfermedades

Es necesario destacar que esta aproximación para estimar el riesgo tiene algunas limitaciones, derivadas de las presentes del método de Wells-Riley [27]:

- La cantidad de viriones en el aire a lo largo del evento no escala necesariamente con los valores de  $\Delta[\text{CO}_2]$ . A diferencia de las moléculas de este gas, los viriones –transportados en los bioaerosoles– sí terminan tanto depositándose en el mobiliario y superficies interiores, como inactivándose desde el punto de vista de la infectividad. Estos fenómenos suceden con mayor o menor velocidad en función de las condiciones ambientales, así como de la distribución del mobiliario y elementos del recinto. Este aspecto puede ser incorporado de forma probabilística en la adaptación planteada del modelo (introduciendo lógicamente cierto margen de in-

certidumbre), a través tanto del parámetro de tiempo promedio de suspensión como de la tasa de decaimiento del virus.

- La presencia de ocupantes implica necesariamente la emisión de CO<sub>2</sub> como parte de la respiración, estando vinculada esta al metabolismo (actividad, edad, peso, etc.). Sin embargo, solo se podrá dar la posibilidad de que haya aerosoles con carga vírica cuando uno o más de los ocupantes del recinto estén infectados. Por lo tanto, el riesgo evaluado solo se produce realmente si existe algún ocupante infectado.
- El nivel de CO<sub>2</sub> de un recinto no es afectado por la acción de otras de las medidas de mitigación, como el uso de mascarillas y respiradores, así como empleo de técnicas de filtrado o esterilización mediante radiación ultravioleta. Para ello, el método que se propone incorpora estos aspectos como modificadores del riesgo.
- Por el contrario, la retirada o conversión de CO<sub>2</sub> del aire mediante procesos de reacción química (como la purificación de aire mediante sorción u otros métodos de captura de CO<sub>2</sub>) no modifica la carga vírica suspendida en el aire del recinto ni disminuye los riesgos de contagio.
- Finalmente, esta aproximación requiere asumir que el aire contenido en el recinto tiene un comportamiento completamente homogéneo, suposición que no es realista en espacios de volumen de aire contenido medio o grande, así como en aquellos con altura libre elevada, donde se pueda producir tanto una estratificación acusada como que el CO<sub>2</sub> se concentre en determinadas áreas del espacio, debido a un menor movimiento del aire o baja mezcla de la atmósfera interior.

No obstante, cabe destacar que este método adaptado de estimación del riesgo relativo ha sido validado por Peng *et al.* (2022) mediante comparación con diversos eventos de superpropagación documentados durante la crisis sanitaria COVID-19 [8].

## Referencias

- [1] D. K. Milton, P. M. Glencross y M. D. Walters, «Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints», *Indoor Air*, vol. 10, n.º 4, pp. 212-221, 2000, doi: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004212.x.
- [2] M. Á. Campano, J. Fernández-Agüera, M. Sánchez-Muñoz y J. J. Sendra, «Ventilación y CO<sub>2</sub>, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental», 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.

- [3] 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.
- [4] C. C. Wang *et al.*, «Airborne transmission of respiratory viruses», *Science*, vol. 373, n.º 6558, 2021, doi: 10.1126/science.abd9149.
- [5] E. Lorthe *et al.*, «A SARS-CoV-2 omicron (B.1.1.529) variant outbreak in a primary school in Geneva, Switzerland», *Lancet Infect. Dis.*, vol. 0, n.º 0, 2022, doi: 10.1016/S1473-3099(22)00267-5.
- [6] G. Buonanno, L. Morawska y L. Stabile, «Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications», *Environ. Int.*, vol. 145, p. 106112, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [7] Z. Peng y 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.
- [8] 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.
- [9] L. Morawska *et al.*, «Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities», *J. Aerosol Sci.*, vol. 40, n.º 3, pp. 256-269, 2009, doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.11.002.
- [10] G. Buonanno, L. Stabile y L. Morawska, «Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment», *Environ. Int.*, vol. 141, p. 105794, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [11] B. Wang, Z. Wang, Y. Wei, F. Wang y X. Duan, «Exposure Factors Handbook», en *Highlights of the Chinese exposure factors handbook*. U.S. Environmental Protection Agency, 2011, pp. 1-96.
- [12] A. Persily y L. de Jonge, «Carbon dioxide generation rates for building occupants», *Indoor Air*, vol. 27, n.º 5, pp. 868-879, 2017, doi: 10.1111/ina.12383.
- [13] A. Mikszewski, L. Stabile, G. Buonanno y L. Morawska, «The airborne contagiousness of respiratory viruses: a comparative analysis and implications for mitigation», *Geosci. Front.*, vol. 13, n.º 6, p. 101285, 2021, doi: 10.1016/j.gsf.2021.101285.
- [14] M. Á. Campano-Laborda *et al.*, *COVID risk airborne*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 2021. [www.covidairbornerisk.com](http://www.covidairbornerisk.com)
- [15] D. Rodríguez, I. R. Urbieto, Á. Velasco, M. Á. Campano-Laborda y E. Jiménez, «Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infec-

- tion in Spanish secondary school and university classrooms», *Build. Environ.*, vol. 226, p. 109717, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109717.
- [16] M. Schuit *et al.*, «Airborne SARS-CoV-2 is rapidly inactivated by simulated sunlight», *J. Infect. Dis.*, vol. 222, n.º 4, pp. 564-571, 2020, doi: 10.1093/infdis/jiaa334.
- [17] S. J. Smither, L. S. Eastaugh, J. S. Findlay y M. S. Lever, «Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity», *Emerg. Microbes Infect.*, vol. 9, n.º 1, pp. 1415-1417, 2020, doi: 10.1080/22221751.2020.1777906.
- [18] N. van Doremalen *et al.*, «Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1», *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, n.º 16, pp. 1-4, 2020, doi: 10.1056/nejmc2004973.
- [19] A. Davies, K.-A. Thompson, K. Giri, G. Kafatos, J. Walker y A. Bennett, «Testing the efficacy of homemade masks: would they protect in an influenza pandemic?», *Disaster Med. Public Health Prep.*, vol. 7, n.º 4, pp. 413-418, 2013, doi: 10.1017/dmp.2013.43.
- [20] D. K. Milton, M. P. Fabian, B. J. Cowling, M. L. Grantham y J. J. McDevitt, «Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks», *PLoS Pathog.*, vol. 9, n.º 3, pp. 1-7, 2013, doi: 10.1371/journal.ppat.1003205.
- [21] A. K. Melikov, «Human body micro-environment: the benefits of controlling airflow interaction», *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 70-77, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.010.
- [22] W. G. Lindsley, J. D. Noti, F. M. Blachere, J. V. Szalajda y D. H. Beezhold, «Efficacy of face shields against cough aerosol droplets from a cough simulator», *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 11, n.º 8, pp. 509-518, 2014, doi: 10.1080/15459624.2013.877591.
- [23] W. J. Kowalski, W. P. Bahnfleth y T. S. Whittam, «Filtration of airborne microorganisms: modeling and prediction», *ASHRAE Trans.*, vol. 105, n.º 2, pp. 4-17, 1999.
- [24] ANSI/ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017, method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*, 2017. [https://www.ashrae.org/FileLibrary/TechnicalResources/COVID-19/52\\_2\\_2017\\_COVID-19\\_20200401.pdf](https://www.ashrae.org/FileLibrary/TechnicalResources/COVID-19/52_2_2017_COVID-19_20200401.pdf).
- [25] B. Ainsworth *et al.*, *The compendium of physical activities tracking guide*. Healthy Lifestyles Research Center, College of Nursing & Health Innovation, Arizona State University, 2011. <https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/>
- [26] B. Ainsworth *et al.*, «2011 compendium of physical activities: a second update of codes and MET values», *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 43, n.º 8, pp. 1575-1581, 2011, doi: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821ece12>.

- [27] 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).
- [28] 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.
- [29] AENOR, UNE-EN 1822-1:2020. *Filtros absolutos (EPA, HEPA y ULPA). Parte 1: Clasificación, principios generales del ensayo y marcado*. Madrid, AENOR/Asociación Española de Normalización y Certificación, 2020.

## Anexos

**Tabla A1.** Valores predictivos de  $E_p$  ( $quanta^{-1}$ ), según actividad metabólica y de vocalización, para diversas enfermedades de transmisión aérea, para los percentiles 50º y 85º de emisión vírica [13, 14]

Patógeno	Actividad metabólica y de vocalización (percentiles 50º/85º)		
	Sedentaria, respiración oral	En pie, hablando	Actividad ligera, hablando alto
Adenovirus	0,780 / 7,511	4,446 / 42,810	66,300 / 638,394
Coxsackievirus	0,062 / 0,856	0,353 / 4,879	5,270 / 72,759
Gripe estacional	0,035 / 0,257	0,168 / 1,250	2,972 / 22,063
MERS-CoV	0,011 / 0,501	0,063 / 0,501	0,935 / 42,570
Rinovirus humano	0,209 / 1,514	0,995 / 7,211	17,908 / 129,805
Sarampión	3,0903 / 140,700	14,953 / 680,805	259,186 / 11800,827
SARS-CoV-1	0,008 / 0,187	0,048 / 1,065	0,714 / 15,888
SARS-CoV-2 (original)	3,336 / 18,600	19,018 / 106,020	283,596 / 1581,000
Tuberculosis (sin tratar)	0,617 / 13,720	3,083 / 68,601	0,0978 / 1172,864
Tuberculosis (en tratamiento)	3,083 / 0,564	52,709 / 2,762	1,696 / 47,910

**Tabla A2.** Valores predictivos de  $E_f$  (adimensional) para variantes del SARS-CoV-2 [15]

Variante	Original	Alfa	Beta	Gamma	Delta	Omicron BA.1	Omicron BA.2
$E_f$	1.0	1.5	1.2	1.5	2.0	2.5	3.3



**Tabla A3.** Valores para la tasa de deposición promedio en superficies de los bioaerosoles con carga vírica,  $\lambda_{dep}$  ( $h^{-1}$ ), en función del diámetro medio del bioaerosol ( $\mu m$ ) [16, 17]

Distribución interior del mobiliario / Diámetro aerosol	Tasa de deposición promedio en superficies de los bio-aerosoles, $\lambda_{dep}$ ( $h^{-1}$ )							
	Aire en reposo		Movimiento de aire muy leve		Movimiento de aire algo leve		Movimiento de aire leve	
	Poco amueblado	Muy amueblado	Poco amueblado	Muy amueblado	Poco amueblado	Muy amueblado	Poco amueblado	Muy amueblado
0.55 $\mu m$	0.10	0.20	0.10	0.23	0.09	0.23	0.14	0.27
0.65 $\mu m$	0.10	0.20	0.10	0.23	0.10	0.24	0.14	0.28
0.81 $\mu m$	0.10	0.19	0.10	0.24	0.11	0.27	0.15	0.30
1.00 $\mu m$	0.13	0.21	0.12	0.28	0.15	0.33	0.20	0.38
1.24 $\mu m$	0.20	0.29	0.18	0.38	0.25	0.47	0.33	0.53
<b>1.54 <math>\mu m</math></b>	<b>0.32</b>	<b>0.42</b>	<b>0.27</b>	<b>0.54</b>	<b>0.39</b>	<b>0.67</b>	<b>0.51</b>	<b>0.77</b>
1.91 $\mu m$	0.49	0.61	0.42	0.75	0.61	0.93	0.80	1.11
2.37 $\mu m$	0.78	0.93	0.64	1.07	0.92	1.32	1.27	1.60
2.94 $\mu m$	1.24	1.30	0.92	1.46	1.45	1.93	2.12	2.89
3.65 $\mu m$	1.81	1.93	1.28	1.93	2.54	3.39	3.28	3.88
4.53 $\mu m$	2.83	2.64	1.95	2.95	3.79	4.71	4.55	5.46
5.62 $\mu m$	4.41	3.43	3.01	3.51	4.88	5.73	6.65	6.59

Ecuación A1 para  $\lambda_{dec}$  ( $h^{-1}$ ) en función de la temperatura interior promedio del aire interior ( $\bar{T}a$ , en  $^{\circ}C$ ), la humedad relativa del aire interior ( $RH$ , en %) y el índice de exposición a luz ultravioleta proveniente del sol ( $UVB$ , de 0 a 10) [18]:

$$\lambda_{dep} = 7,56923 + 1,41126 \cdot \left( \frac{\bar{T}a - 20,54}{10,66} \right) + 0,02176 \cdot \left( \frac{RH - 45,235}{28,665} \right) + 7,55272 \cdot \left( \frac{0,185 \cdot UVB - 50}{50} \right) + \left( \frac{\bar{T}a - 20,54}{10,66} \right) \cdot \left( \left( \frac{0,185 \cdot UVB - 50}{50} \right) \cdot 1,39734 \right) \quad \text{Ecuación A1}$$

donde:

$\lambda_{dec}$  es la tasa de decaimiento de la infectividad del virus en el aire ( $h^{-1}$ ).

$\bar{T}a$  es la temperatura promedio del aire en el interior ( $^{\circ}C$ ).

$RH$  es la humedad relativa del aire en el interior (%).

$UVB$  es el índice de exposición a luz ultravioleta proveniente del sol (de 0, interior sin exposición directa, a 10, luz directa en un mediodía despejado).

**Tabla A4.** Eficiencia en la reducción de la exhalación ( $m_{ex}$ ) e inhalación vírica ( $m_{in}$ ) de pantallas faciales, mascarillas y respiradores [19-22]

Eficiencia en la reducción vírica (%)	Pantalla facial (sin mascarilla)	Mascarilla quirúrgica		FFP2/KN95/N95 con válvula de exhalación		FFP2/KN95/N95 sin válvula de exhalación	
		Sin ajustar	Ajustada	Sin ajustar	Ajustada	Sin ajustar	Ajustada
Exhalación ( $m_{ex}$ )	23	32,5	65	45	90	0	0
Inhalación ( $m_{in}$ )	23	25	50	45	90	45	90

**Tabla A5.** Valores de eficiencia de filtrado de filtros eficaces (M-F/MERV) y filtros de alta eficiencia (HEPA) [23, 24, 28, 29]

Tipo de filtro	ASHRAE 52.2	RITE / EN 1822	Eficiencia de filtrado (1,0-3,0 $\mu\text{m}$ )
<i>MERV</i>	MERV 08	G4	20
	MERV 09	M5	35
	MERV 10	M5	50
	MERV 11	M6	65
	MERV 12	M6	80
	MERV 13	F7	85
	MERV 14	F8	90
	MERV 15	F8	90
	MERV 16	F9	95
<i>HEPA</i>	MERV 19	H13	100
	MERV 20	H14	100

Ecuación A2 para  $\lambda_{cle}$  ( $\text{h}^{-1}$ ) proveniente de equipos de limpieza del aire mediante filtrado, en función de la eficiencia del filtro ( $f_{fil}$  en %, obtenido de la tabla A5) y el caudal de aire proporcionado por el equipo ( $Q_{cle}$  en  $\text{m}^3/\text{h}$ ) [18]:

$$\lambda_{cle} = \frac{V}{Q_{cle} \cdot \frac{f_{fil}}{100}} \quad \text{Ecuación A2}$$

donde:

$\lambda_{cle}$  es la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire ( $\text{h}^{-1}$ ).

$V$  es el volumen del recinto donde se produce el evento ( $\text{m}^3$ ).

$Q_{cle}$  es el caudal de aire proporcionado por el equipo de limpieza de aire ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

$f_{fil}$  es la eficiencia de retirada de partículas de 1 a 3  $\mu\text{m}$  del filtro (%).

**Tabla A6.** Valores de inhalación recomendados para exposición a corto plazo, según actividad metabólica (hombres y mujeres combinados), en m<sup>3</sup>/min, equivalente a B [11]

Edad (años)	Inhalación según actividad metabólica (m <sup>3</sup> /min)				
	Dormido	Sedentario	Intensidad ligera	Intensidad moderada	Intensidad alta
0 a <1	0.0030	0.0031	0.0076	0.0140	0.0260
1 a <2	0.0045	0.0047	0.0120	0.0210	0.0380
2 a <3	0.0046	0.0048	0.0120	0.0210	0.0390
3 a <6	0.0043	0.0045	0.0110	0.0210	0.0370
6 a <11	0.0045	0.0048	0.0110	0.0220	0.0420
11 a <16	0.0050	0.0054	0.0130	0.0250	0.0490
16 a <21	0.0049	0.0053	0.0120	0.0260	0.0500
21 a <31	0.0043	0.0042	0.0120	0.0260	0.0490
31 a <41	0.0046	0.0043	0.0120	0.0270	0.0520
41 a <51	0.0050	0.0048	0.0130	0.0280	0.0530
51 a <61	0.0052	0.0050	0.0120	0.0290	0.0530
61 a <71	0.0052	0.0049	0.0120	0.0260	0.0470
71 a <81	0.0053	0.0050	0.0120	0.0250	0.0470
≥81	0.0052	0.0049	0.0120	0.0250	0.0480

**Tabla A7.** Tasa de exhalación de CO<sub>2</sub> (l/s) para hombres [12]

Edad	Nivel de actividad física (met)						
	1.0 met	1.2 met	1.4 met	1.6 met	2.0 met	3.0 met	4.0 met
< 1 año	0.0009 l/s	0.0011 l/s	0.0013 l/s	0.0014 l/s	0.0018 l/s	0.0027 l/s	0.0036 l/s
1 a 3 años	0.0015 l/s	0.0018 l/s	0.0021 l/s	0.0024 l/s	0.0030 l/s	0.0044 l/s	0.0059 l/s
3 a 6 años	0.0019 l/s	0.0023 l/s	0.0026 l/s	0.0030 l/s	0.0038 l/s	0.0057 l/s	0.0075 l/s
6 a 11 años	0.0025 l/s	0.0030 l/s	0.0035 l/s	0.0040 l/s	0.0050 l/s	0.0075 l/s	0.0099 l/s
11 a 16 años	0.0034 l/s	0.0041 l/s	0.0048 l/s	0.0054 l/s	0.0068 l/s	0.0102 l/s	0.0136 l/s
16 a 21 años	0.0038 l/s	0.0045 l/s	0.0053 l/s	0.0060 l/s	0.0075 l/s	0.0113 l/s	0.0150 l/s
21 a 30 años	0.0040 l/s	0.0048 l/s	0.0056 l/s	0.0064 l/s	0.0080 l/s	0.0120 l/s	0.0160 l/s
31 a 40 años	0.0038 l/s	0.0045 l/s	0.0053 l/s	0.0061 l/s	0.0076 l/s	0.0114 l/s	0.0151 l/s
41 a 50 años	0.0039 l/s	0.0046 l/s	0.0054 l/s	0.0062 l/s	0.0077 l/s	0.0116 l/s	0.0155 l/s
51 a 60 años	0.0038 l/s	0.0046 l/s	0.0054 l/s	0.0062 l/s	0.0077 l/s	0.0115 l/s	0.0154 l/s

61 a 70 años	0.0033 l/s	0.0040 l/s	0.0046 l/s	0.0053 l/s	0.0066 l/s	0.0099 l/s	0.0132 l/s
70 a 80 años	0.0032 l/s	0.0038 l/s	0.0044 l/s	0.0051 l/s	0.0064 l/s	0.0095 l/s	0.0127 l/s
> 80 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0042 l/s	0.0048 l/s	0.0060 l/s	0.0090 l/s	0.0120 l/s

**Tabla A8.** Tasa de exhalación de CO<sub>2</sub> (l/s) para mujeres [12]

Edad	Nivel de actividad física (met)						
	1.0 met	1.2 met	1.4 met	1.6 met	2.0 met	3.0 met	4.0 met
< 1 año	0.0008 l/s	0.0010 l/s	0.0012 l/s	0.0014 l/s	0.0017 l/s	0.0025 l/s	0.0034 l/s
1 a 3 años	0.0014 l/s	0.0017 l/s	0.0020 l/s	0.0022 l/s	0.0028 l/s	0.0042 l/s	0.0056 l/s
3 a 6 años	0.0014 l/s	0.0017 l/s	0.0020 l/s	0.0022 l/s	0.0028 l/s	0.0042 l/s	0.0056 l/s
6 a 11 años	0.0017 l/s	0.0021 l/s	0.0024 l/s	0.0028 l/s	0.0035 l/s	0.0052 l/s	0.0069 l/s
11 a 16 años	0.0023 l/s	0.0027 l/s	0.0032 l/s	0.0037 l/s	0.0046 l/s	0.0069 l/s	0.0092 l/s
16 a 21 años	0.0029 l/s	0.0035 l/s	0.0041 l/s	0.0047 l/s	0.0058 l/s	0.0087 l/s	0.0117 l/s
21 a 30 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0041 l/s	0.0047 l/s	0.0059 l/s	0.0089 l/s	0.0118 l/s
31 a 40 años	0.0031 l/s	0.0038 l/s	0.0044 l/s	0.0050 l/s	0.0063 l/s	0.0094 l/s	0.0126 l/s
41 a 50 años	0.0029 l/s	0.0035 l/s	0.0041 l/s	0.0047 l/s	0.0059 l/s	0.0088 l/s	0.0118 l/s
51 a 60 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0042 l/s	0.0048 l/s	0.0060 l/s	0.0089 l/s	0.0119 l/s
61 a 70 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0042 l/s	0.0048 l/s	0.0060 l/s	0.0090 l/s	0.0119 l/s
70 a 80 años	0.0027 l/s	0.0033 l/s	0.0038 l/s	0.0044 l/s	0.0055 l/s	0.0082 l/s	0.0110 l/s
> 80 años	0.0026 l/s	0.0032 l/s	0.0037 l/s	0.0042 l/s	0.0053 l/s	0.0079 l/s	0.0105 l/s
< 1 año	0.0025 l/s	0.0030 l/s	0.0035 l/s	0.0040 l/s	0.0050 l/s	0.0075 l/s	0.0100 l/s

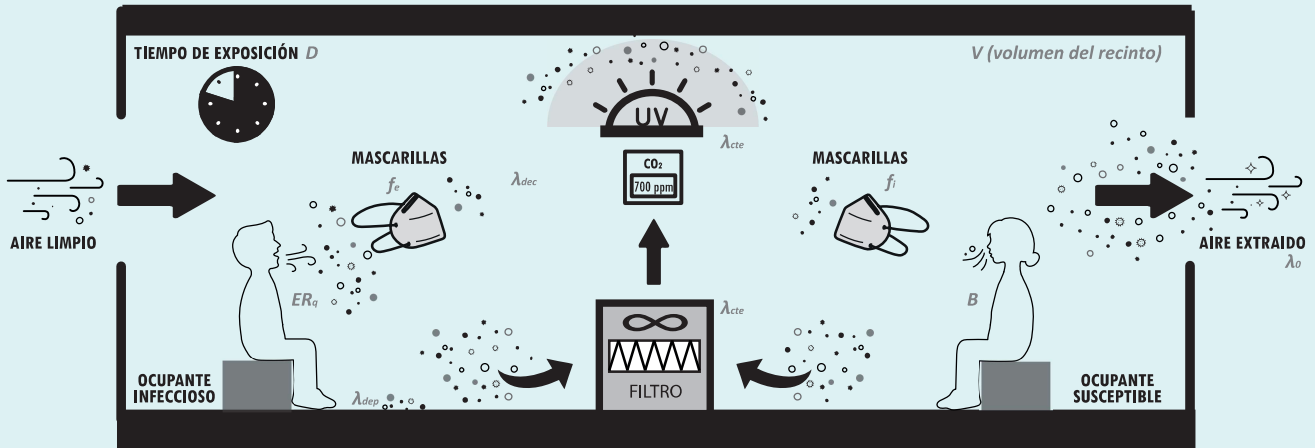
**Tabla A9.** Correspondencia entre actividad física y nivel de actividad física (en met) [25, 26]

Nivel de actividad física (met)	Actividad física
0,95	Durmiendo
1,00	Tumbado en silencio
1,30	Sentado en silencio, leyendo/estudiando/escribiendo
1,30	En pie, sin desplazarse, en silencio
1,50	Sentado, espectador de espectáculos deportivos
1,50	Sentado, tareas de oficina (esfuerzo ligero)
1,80	En pie, hablando, con esfuerzo ligero
2,00 a 2,50	Caminar, terreno llano y firme, a menos de 2 km/h (lento)

2,30	Trabajo de vigilancia (actividad ligera)
2,50	Limpieza (general, esfuerzo ligero)
2,80	Calistenia (esfuerzo ligero)
3,00	En pie, tareas ligeras (empleado de tienda, archivo)
3,00	Pilates
3,30	Cocina (esfuerzo moderado)
3,50 a 4,30	Caminar, terreno llano y firme, a 5 km/h
3,80	Calistenia (esfuerzo moderado)
4,50	Limpieza (general, esfuerzo moderado)
5,00	Aerobic, bajo impacto
7,80	Baile (general)
8,00	Calistenia (esfuerzo elevado)

# CAPÍTULO 2

## MÉTODO DE WELLS-RILEY



### PARÁMETROS A VALORAR



Enfermedad y variante.



Dimensiones del recinto.



Condiciones ambientales.



Reducción de la infectividad vírica.



Retirada de aerosoles del aire (filtrado).



Ocupantes presentes.



Ocupantes infectivos.



Inmunidad adquirida.



Actividad realizada.



Actividad de vocalización.



Duración del evento.



Caudal de ventilación.



Uso de mascarillas.

### LA ACTIVIDAD DE VOCALIZACIÓN



### ¿QUÉ HACER?



1. VENTILACIÓN CRUZADA, DISTRIBUIDA, CONTINUA.
2. USO DE MASCARILLA AJUSTADA.
3. FILTRADO HEPA.
4. MEDICIÓN/MONITORIZACIÓN DE  $CO_2$ .

### CONSIDERACIONES DEL MODELO

LA ATMÓSFERA INTERIOR SE ASUME COMO HOMOGÉNEA.



EXCLUYE TRANSMISIÓN POR FÓMITES.



NO CONSIDERA LA TRANSMISIÓN A CORTA DISTANCIA.

