Guía para ventilación en aulas

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC
Mesura

VERSIÓN 2, 3 de noviembre de 2020

María Cruz Minguillón, Xavier Querol, José Manuel Felisi y Tomás Garrido

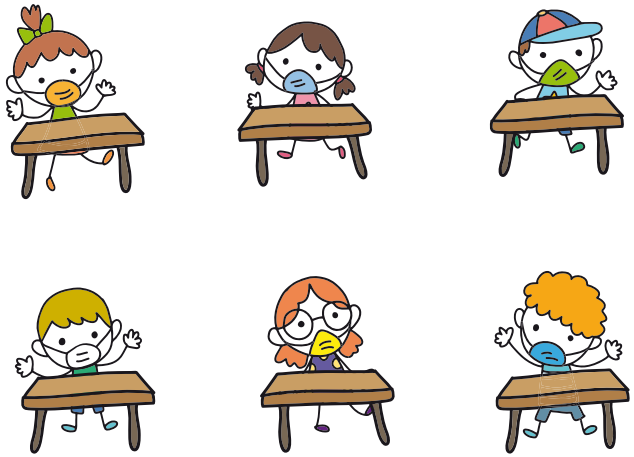
Esta versión 2, de 3 de noviembre de 2020, sustituye a la versión anterior.
Se han corregido algunas erratas.

Elaborada por: *CSIC-IDAEA, Ministerio de Ciencia e Innovación y Mesura*

Esta guía ha contado con la participación de la Conselleria d'Educació, Cultura i Esports de la Generalitat Valenciana en la conceptualización y la toma de medidas en aulas.

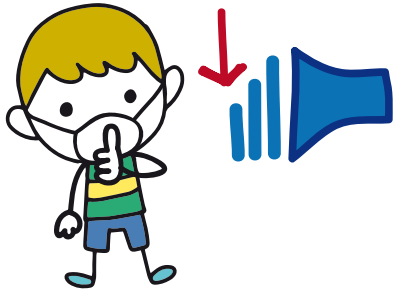
Resumen

Exterior
preferible a interior



Mejor menos personas

Aumentar distancia interpersonal

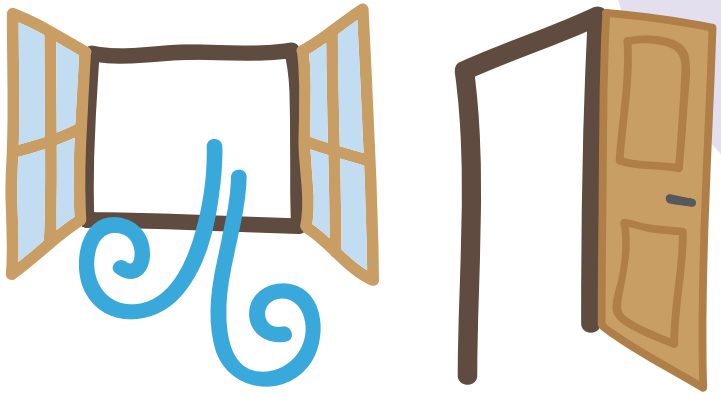


Silencio y volumen bajo

Mascarilla bien ajustada

Resumen

Reducir tiempo de exposición



Ventilar

Purificar aire: filtrar

Comprobar midiendo CO_2

Sobre esta guía para ventilación en aulas

La presente guía pretende ser una herramienta para reducir las probabilidades de contagio de Covid-19 por vía aérea. Explica estrategias y posibles soluciones y proporciona las herramientas para determinar si las condiciones de ventilación alcanzadas son adecuadas.

Está basada en la Guía de la Universidad de Harvard (*https://schools.forhealth.org*, en español en bit.ly/guiaventilacion) y en fuentes y trabajo experimental en ventilación y filtración en España.

Es aplicable a otros tipos de espacios interiores como oficinas u otros edificios de uso público.

El uso de mascarillas, el mantenimiento de la distancia y las medidas de higiene siguen siendo de necesaria aplicación, junto con las estrategias aquí descritas.

El riesgo de contagio cero no existe. Las medidas aquí descritas reducen el riesgo pero no lo eliminan completamente. El riesgo depende, además, de la incidencia de casos en cada región.

Esta guía no sustituye el servicio de profesionales de ventilación y tratamiento de aire, pues algunos emplazamientos pueden requerir soluciones y cálculos complejos que no necesariamente puedan asumir los usuarios finales.

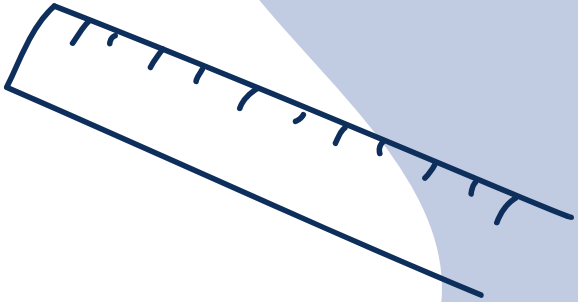
ÍNDICE

Contenido:

- Qué necesitamos saber ____ 7
- Diagrama de flujo para búsqueda de soluciones ____ 12
- Soluciones y ejemplos ____ 14
- Cómo verificar la solución elegida usando sensores de CO_2 ____ 28

Anexos:

- Medidores de dióxido de carbono
- Equipos de ventilación individual forzada
- Purificadores de aire
- Hoja excel para cálculos de ventilación y purificación



Qué necesitamos saber

Qué necesitamos saber (1/4)

El riesgo de contagio de Covid-19 en ambientes interiores es superior al riesgo en el exterior. Por tanto, las actividades en **exterior** son siempre preferibles.

En ambientes interiores, las **partículas en suspensión**, también llamadas **aerosoles**, susceptibles de contener virus, se pueden acumular. La exposición a este aire puede resultar en infecciones. La **reducción del riesgo de contagio** se consigue reduciendo emisión y exposición.

La **emisión** se puede reducir mediante:

- Disminución del **número de personas**.
- **Silencio** o volumen de habla bajo (al hablar fuerte o gritar la emisión es 30 veces superior)
- Actividad física relajada (al aumentar intensidad de actividad se aumenta la emisión)
- Uso de **mascarilla** bien ajustada.

La **exposición** se puede reducir mediante:

- Uso de **mascarilla bien ajustada**, incluso en ausencia de otras personas si estas han abandonado la sala muy recientemente
- Reducción del **tiempo de exposición**
- Aumento de la **distancia interpersonal**
- **Ventilación o purificación del aire**, para eliminar o reducir la concentración de virus en el aire

Esta guía se centra en este último apartado.

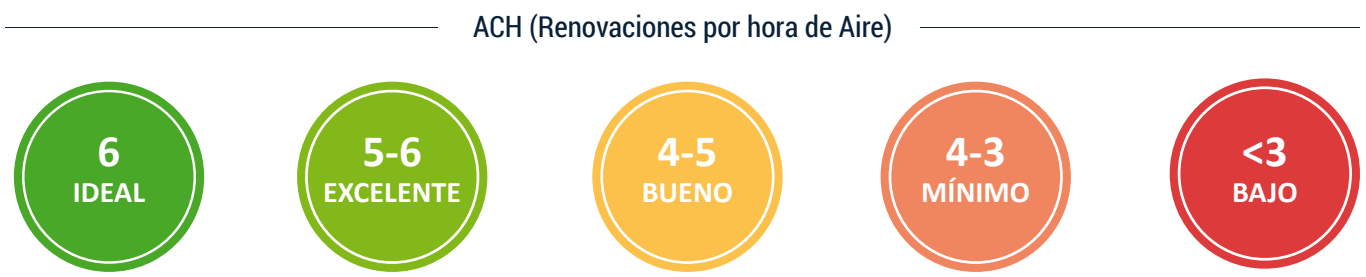
Qué necesitamos saber (2/4)

La ventilación se refiere a renovación de aire, es decir, sustitución del aire interior, potencialmente contaminado, con aire exterior, libre de virus. La utilización de un ventilador en un ambiente interior cerrado no equivale a ventilar en el sentido de renovación de aire.

La purificación del aire consiste en la eliminación de las partículas en suspensión, susceptibles de contener virus. El método más sencillo y eficaz es la filtración.

La renovación de aire se puede denominar por sus siglas en inglés **ACH**, Air Changes per Hour. Si un espacio tiene 1 ACH (1 renovación de aire por hora) significa que en una hora entra en la sala un volumen de aire exterior igual al volumen de la sala, y, debido a la mezcla continua del aire, esto resulta en que el 63% del aire interior ha sido reemplazado por aire exterior. Con 2 renovaciones se reemplaza el 86% y con 3 renovaciones el 95%.

La ventilación necesaria para reducir el riesgo de contagio depende del volumen de la sala, el número y la edad de los ocupantes, la actividad realizada, la incidencia de casos en la región y el riesgo que se quiera asumir. La guía de Harvard recomienda **5-6 renovaciones de aire por hora** para aulas de 100 m², con 25 estudiantes de 5-8 años, y establece esta clasificación:



Qué necesitamos saber (3/4)

Otra forma de medir la ventilación son los litros de aire por persona y segundo que entran del exterior. Un valor adecuado para reducir riesgo de contagio es **14 litros por persona y segundo**.

La relación entre ambos parámetros es:

ACH = litros por persona y segundo * número personas * 3600 segundos/hora * 0.001 m^3/litro / volumen sala en m^3

Estos valores se pueden ajustar según el riesgo que se quiera o se pueda asumir. El riesgo cero no existe. **Cuanto mejor sea la ventilación, menor es el riesgo de contagio.**

Existen métodos para medir la ventilación en un espacio concreto, que se basan en medidas de CO_2. En el aire exterior, las concentraciones de CO_2 son de aproximadamente 420 ppm. En interiores, en espacios ocupados, las concentraciones de CO_2 son elevadas por el CO_2 exhalado por los ocupantes. Dichas concentraciones se pueden utilizar para calcular la renovación de aire en un espacio y condiciones dadas.

Qué necesitamos saber (4/4)

Otras consideraciones:

- En los periodos de **frío**, si se opta por ventilación natural, habrá que elegir entre reducción de riesgos sanitarios y confort térmico. Disponer de ropa de abrigo cómoda para interiores permitirá no abusar de la calefacción con ventanas parcialmente abiertas.

- La ventilación natural, si bien es la primera opción en esta guía, puede no ser viable debido a condiciones meteorológicas adversas. En ese caso sería necesario **avanzar en las soluciones según los cambios meteorológicos previstos**. Se puede empezar a implementar ventilación forzada y/o purificación de aire antes de que estas condiciones se alcancen.

- La apertura de ventanas y puertas puede conllevar problemas de **ruido**. Hay que llegar a un compromiso entre el riesgo sanitario y el malestar y dificultades acústicos. Es preferible reducir el ruido en pasillos que cerrar puertas.

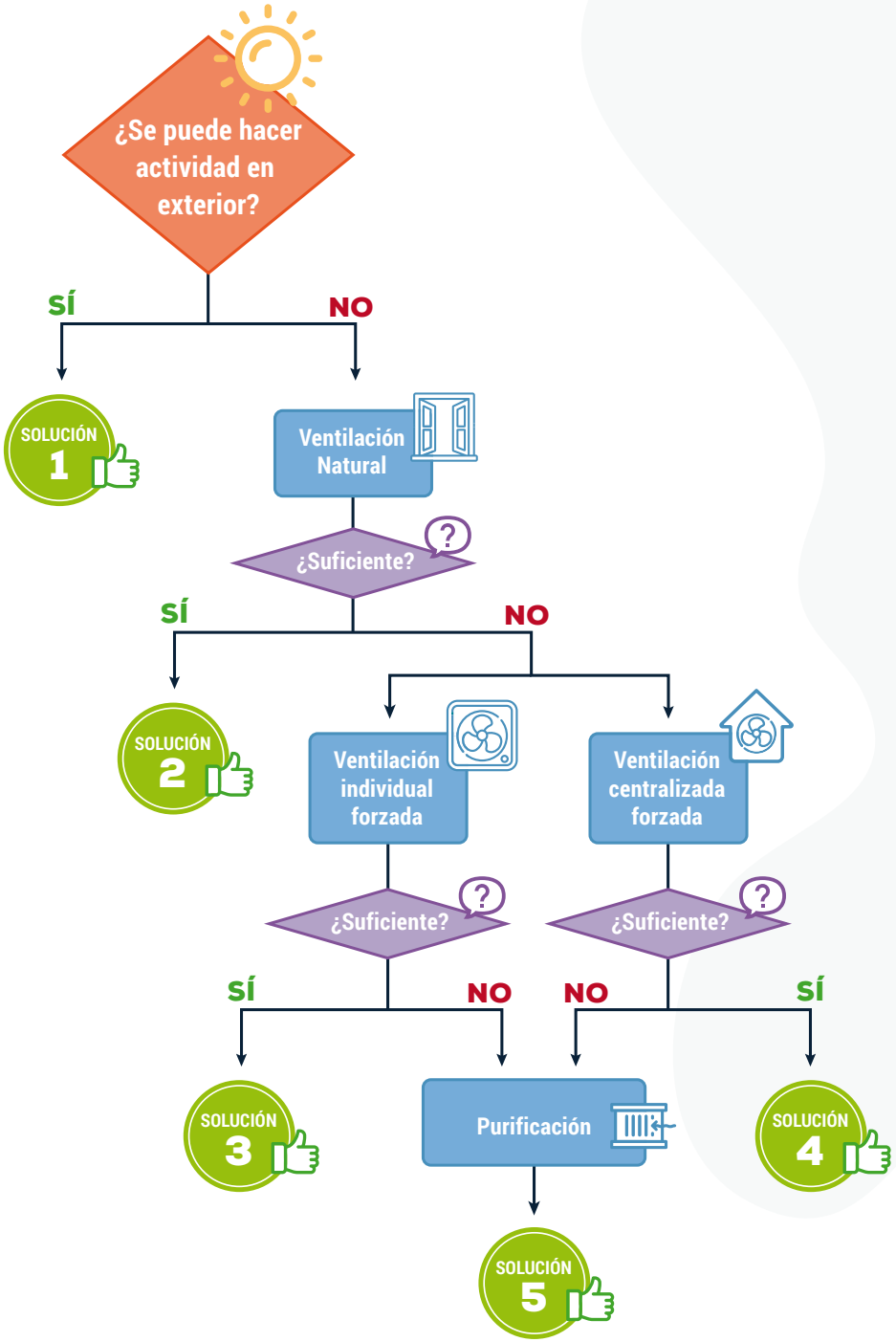
- La apertura de ventanas con la consecuente introducción del aire exterior puede conllevar el incremento de niveles de **contaminantes** procedentes del exterior en zonas altamente contaminadas. Hay que llegar a un compromiso entre el riesgo sanitario por Covid-19 y el riesgo debido a exposición a contaminación.

- **La concentración de CO_2** en espacios interiores cerrados aumenta rápidamente en presencia de personas, que exhalan CO_2 al respirar. La renovación de aire con aire exterior reduce las concentraciones de CO_2 en el interior. Esto favorece la **atención y rendimiento escolar**, ya que la exposición a concentraciones de CO_2 demasiado elevadas produce aletargamiento y dificulta la atención.

Diagrama de flujo para búsqueda de soluciones

Diagrama de flujo para búsqueda de soluciones

- Las actividades en exterior son siempre preferibles al interior, incluido desayuno.
- Si la actividad ha de ser en interior es preferible en aulas con posibilidad de ventilación natural, especialmente ventilación cruzada (ventanas y puertas en lados opuestos).
- Si la ventilación natural no es suficiente, generalmente se puede conseguir ventilación suficiente utilizando equipos extractores o impulsores individuales con un caudal de aire adecuado.
- Cuando se dispone de sistemas centralizados de ventilación forzada, la tasa de aire exterior se debe incrementar y la recirculación se debe reducir.
- Cuando todo lo anterior no es posible o no es suficiente, se debe purificar el aire con equipos provistos de filtros HEPA.
- La solución final puede ser una combinación de opciones, por ejemplo se puede combinar ventilación natural y purificación.
- Para evaluar si una configuración dada es suficiente se puede utilizar uno de los dos métodos descritos en esta guía, ambos basados en medidas de CO_2.
- El uso de mascarillas, el mantenimiento de la distancia y las medidas de higiene siguen siendo necesarias en todas las soluciones.



Soluciones y ejemplos

Solución 1. Exterior

SOLUCIÓN 1
EXTERIOR

La actividad se realiza en el exterior.

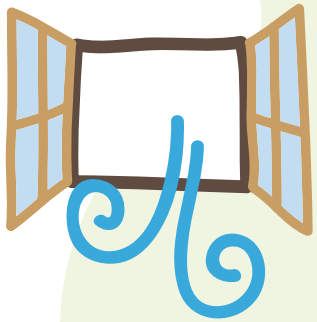
- En exteriores el viento diluye la concentración de las partículas emitidas por una persona y las arrastra fuera del entorno.

- El uso de mascarillas, el mantenimiento de la distancia y las medidas de higiene siguen siendo necesarias.

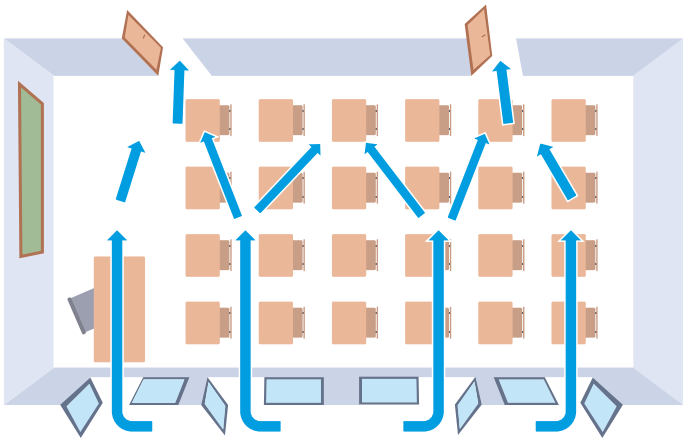
Solución 2. Ventilación natural

Interior. La ventilación natural es suficiente.

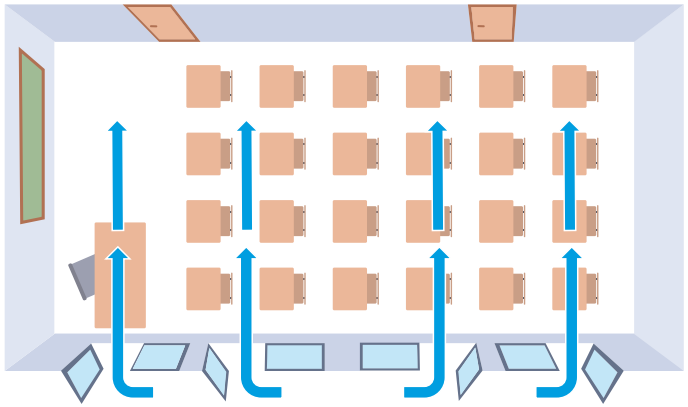
- La solución consiste en aumentar la renovación de aire interior con aire exterior sin utilización de instrumentación, es decir, abriendo ventanas y puertas para provocar un flujo de aire.
- La ventilación cruzada, consistente en la apertura de ventanas y puertas en lados opuestos de la habitación, es más efectiva que la apertura en un solo lado y por tanto preferible. En muy pocas ocasiones se alcanza la ventilación suficiente sin ventilación cruzada.
- Las condiciones ambientales exteriores influyen en la ventilación efectiva. Para una misma configuración de ventanas y/o puertas, la ventilación puede variar, especialmente en días ventosos.
- Se pueden realizar pruebas con diferentes configuraciones de apertura de ventanas y/o puertas.
- Se puede favorecer la ventilación natural mediante la utilización de un ventilador junto a una ventana colocado con el flujo hacia el exterior, de manera que favorece la extracción del aire interior.



Ventilación cruzada

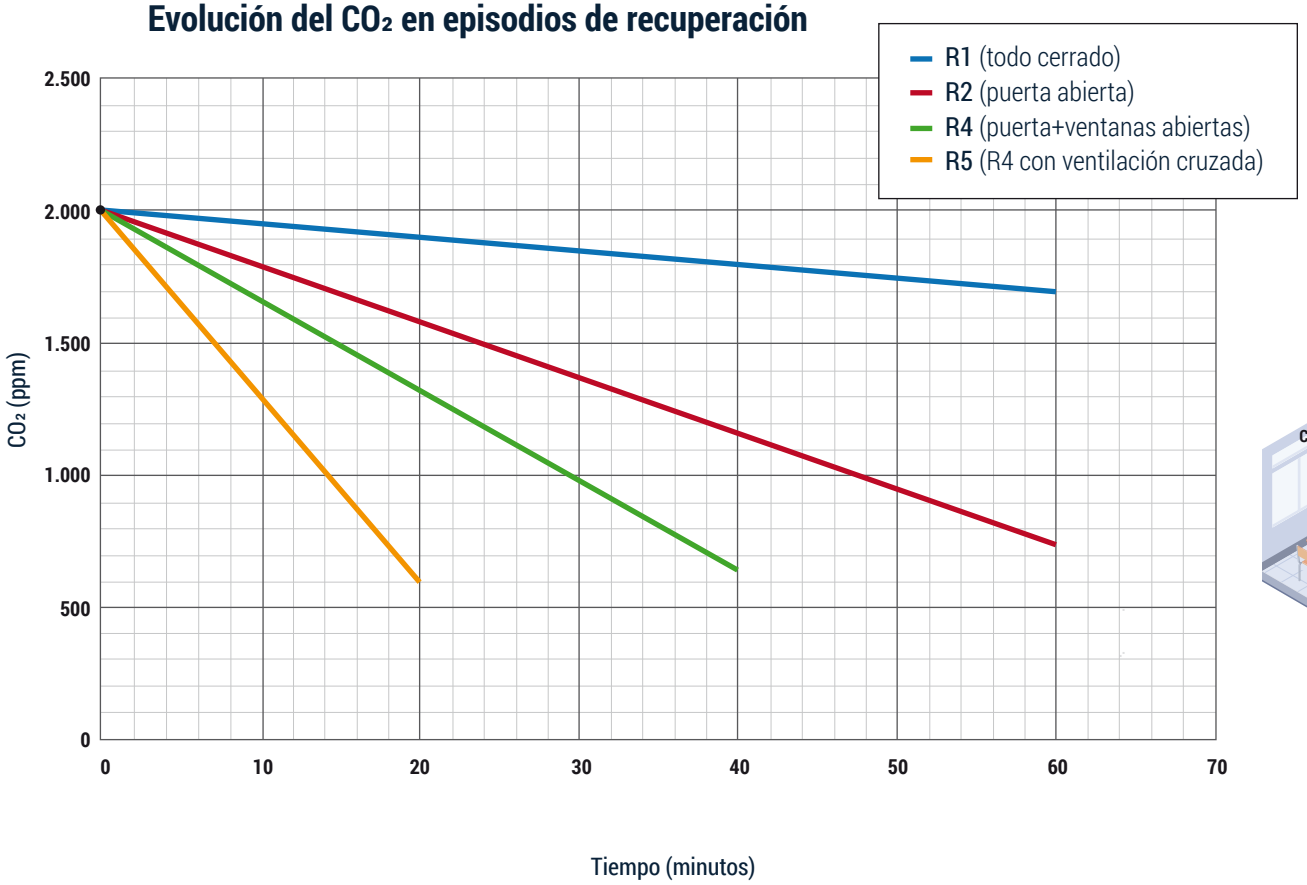


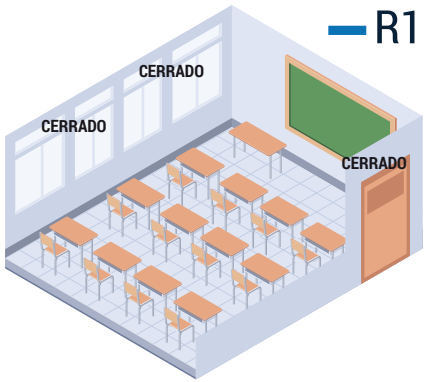
Ventanas abiertas, puertas cerradas



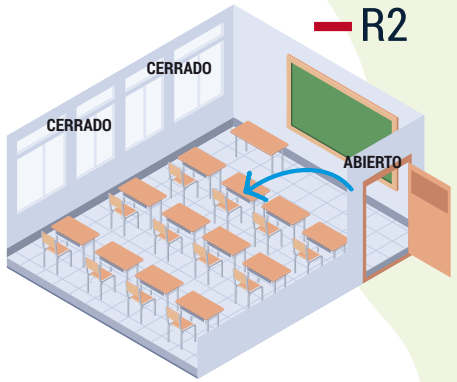
- **Variación de concentración de CO_2, indicativo de la renovación de aire, para diferentes escenarios tipo.**

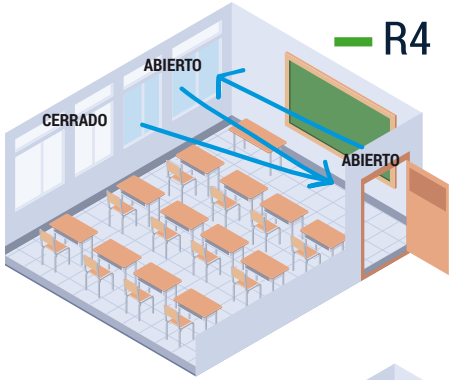
Evolución del CO_2 en episodios de recuperación

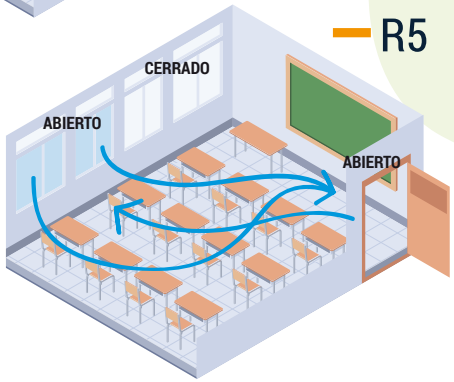




SOLUCIÓN 2 VENTILACIÓN NATURAL



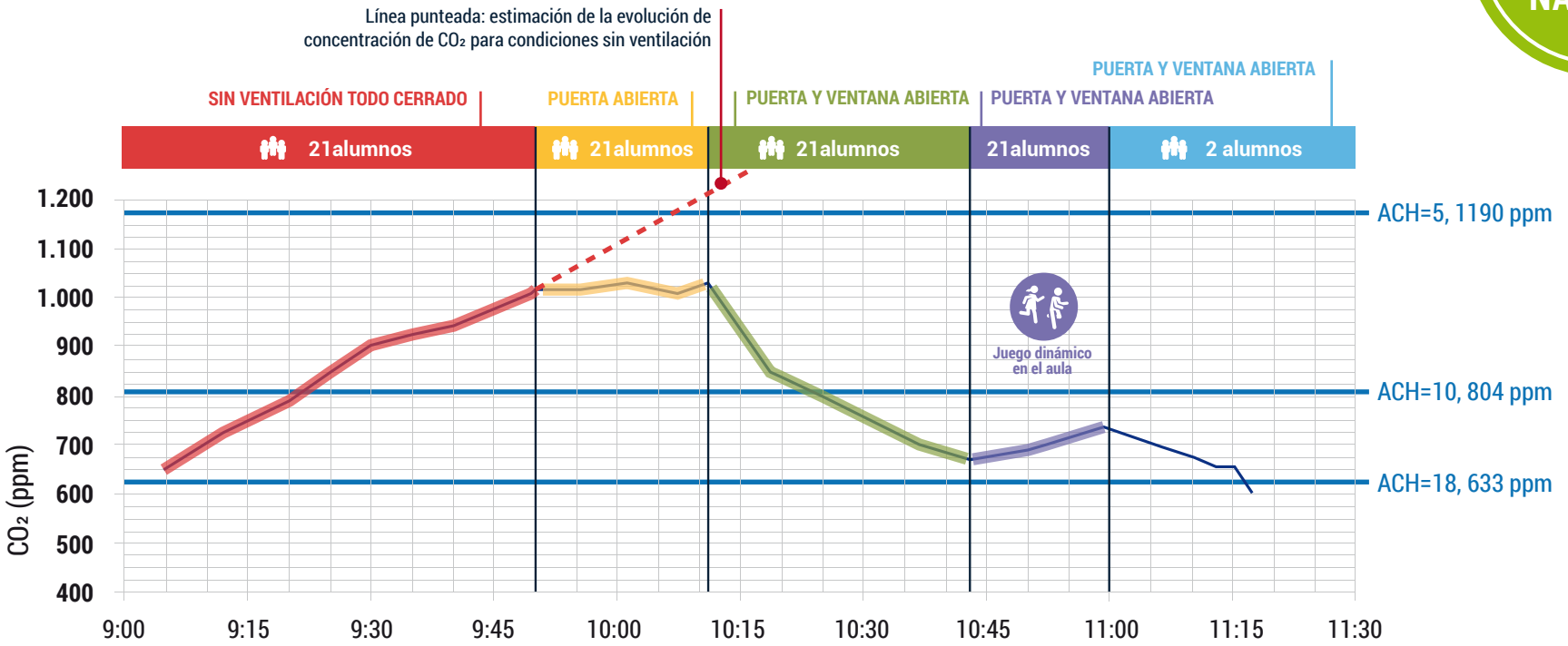




Ejemplo ventilación natural

SOLUCIÓN 2 VENTILACIÓN NATURAL

- **Variación de concentración de CO_2 en diferentes condiciones de ventilación en un aula.**



En este ejemplo, el aula es de 61 m³ y hay 21 estudiantes infantiles y 1 docente. Con esta densidad de estudiantes, serían recomendables más de 5 renovaciones por hora. En la gráfica se indican las concentraciones de CO_2 en el interior en estado estable correspondientes a 5, 10 y 18 renovaciones por hora (este último valor equivalente para estas condiciones a 14 litros por persona y segundo).

El CO_2 incrementa con el paso de tiempo en ausencia de ventilación. En 45 minutos alcanza niveles de 1000 ppm.

El aumento se controla con la apertura de puertas. Se consigue reducir la concentración con apertura de puertas y ventanas simultánea, ventilación cruzada. La estabilización de la medida indica que se puede comparar con los niveles de estado estable, comprobando que se alcanzan más de 10 renovaciones por hora.

(Para detalles de cálculos consultar métodos al final de la guía)

Medidas reales hechas por Mesura en aulas de la Comunidad Valenciana

mimoCO₂ *https://webmesura.org/mimoco2/*

Solución 3. Ventilación individual forzada

Interior. La ventilación natural no es suficiente y se añade ventilación individual forzada.

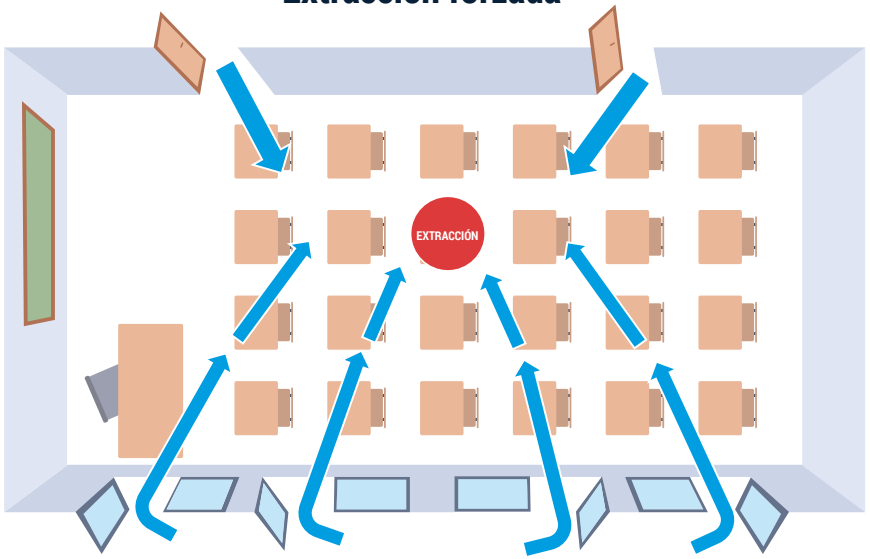
- La solución consiste en aumentar la renovación de aire interior con aire exterior utilizando instrumentación.
- Se puede hacer introduciendo aire del exterior (impulsión) o tomando aire del aula y sacándolo (extracción).
- La toma o salida de aire puede ser por ventana, techo, u orificio específico realizado para ello. Según el espacio, puede haber un punto de extracción de aire en una zona común (por ej. pasillo) que sirva para varias aulas.
- El caudal necesario se calcula según las renovaciones de aire necesarias, teniendo en cuenta que las medidas de ventilación son aditivas y por tanto:

  $$ACHobjetivo = ACHtotal = ACHventilación\ natural + ACHventilación\ forzada$$

- El caudal necesario será:

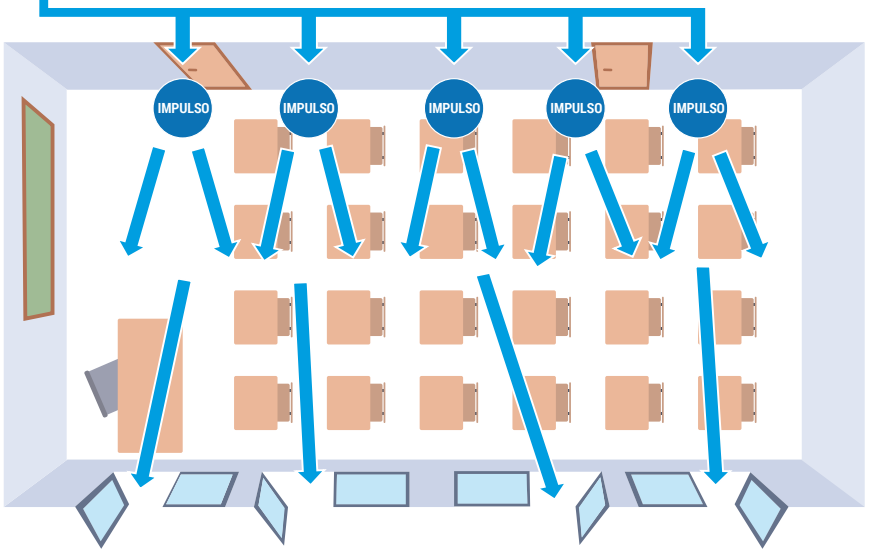
  $$Caudal = ACHventilación\ forzada * volumen\ aula$$

Extracción forzada

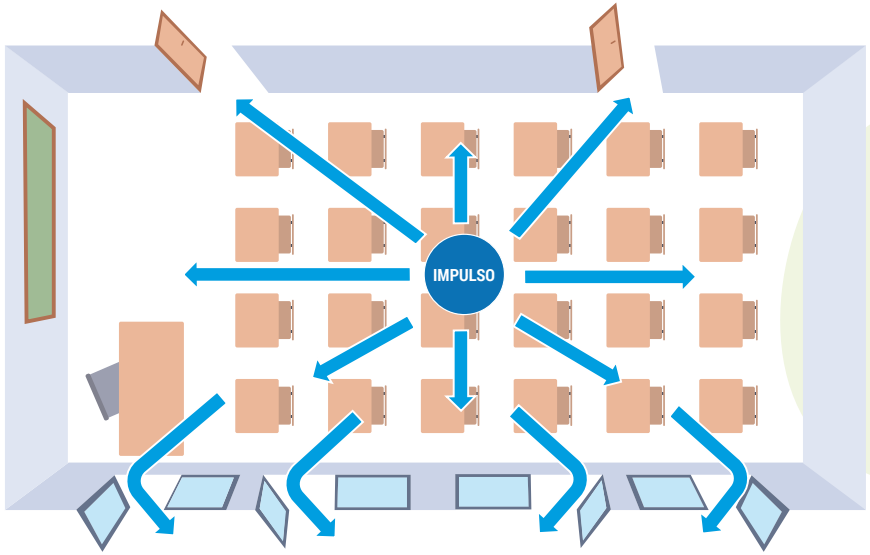


SOLUCIÓN 3
VENTILACIÓN INDIVIDUAL FORZADA

Impulsión forzada



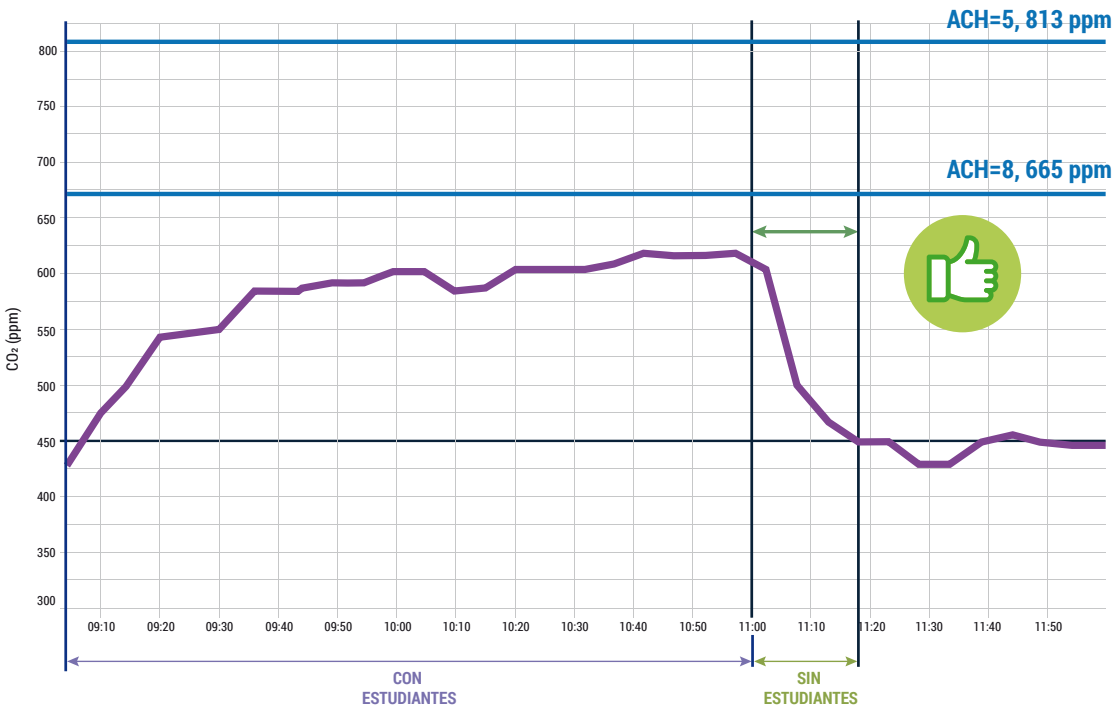
Impulsión forzada desde techo



Ejemplo ventilación individual forzada

SOLUCIÓN 3
VENTILACIÓN
INDIVIDUAL
FORZADA

- **Variación de concentración de CO_2 con y sin estudiantes en un aula equipada con ventilación individual forzada de impulsión.**



Medidas reales hechas por Mesura en aulas de la Comunidad Valenciana

mimoCO₂ *https://webmesura.org/mimoco2/*

En este ejemplo, el aula tiene 142 m³ y hay 21 estudiantes de 10 años y 1 docente. Con esta densidad de estudiantes, serían recomendables más de 5 renovaciones por hora.

En la gráfica se indican las concentraciones de CO_2 en el interior en estado estable correspondientes a 5 y 8 renovaciones por hora (este último valor equivalente para estas condiciones a 14 litros por persona y segundo).

En el ejemplo la ventilación forzada está activa durante todo el tiempo, consiguiendo suficiente renovación de aire reflejada en las concentraciones de CO_2, una vez alcanzada la estabilización, que no superan los niveles correspondientes a 8 renovaciones por hora.

Cuando los estudiantes desalojan el aula, la concentración de CO_2 desciende a niveles de fondo.

(Para detalles de cálculos consultar métodos al final de la guía)

Solución 4. Ventilación forzada centralizada

Interior. No hay ventilación natural y se usa ventilación forzada centralizada.

- La solución consiste en la utilización de sistemas de ventilación centralizados, es decir, comunes para todo el edificio o gran parte de él, para incrementar renovación de aire interior con aire exterior. Son los mismos sistemas utilizados para climatización.
- Se ha de maximizar la cantidad de aire exterior con respecto a la cantidad de aire recirculado. La configuración existente y su modificación ha de estar a cargo de personal técnico especializado.
- El aire recirculado se puede **filtrar** mediante la introducción de un filtro en el sistema. Se ha de utilizer el filtro con mayor capacidad de filtración que sea capaz de soportar el Sistema, por ejemplo MERV13. El caudal de aire limpio conseguido se calcula teniendo multiplicando el caudal de aire recirculado por la eficacia del filtro utilizado.
- En cualquier caso, la relación entre renovación de aire y caudal es: ACH = Caudal / Volumen aula
- Las renovaciones de aire proporcionadas por el sistema serán:

$$ACH_{totalsistema} = ACH_{ventilación\ forzada} + ACH_{recirculadofiltrado}$$

- El caudal necesario se calcula según las renovaciones de aire necesarias:

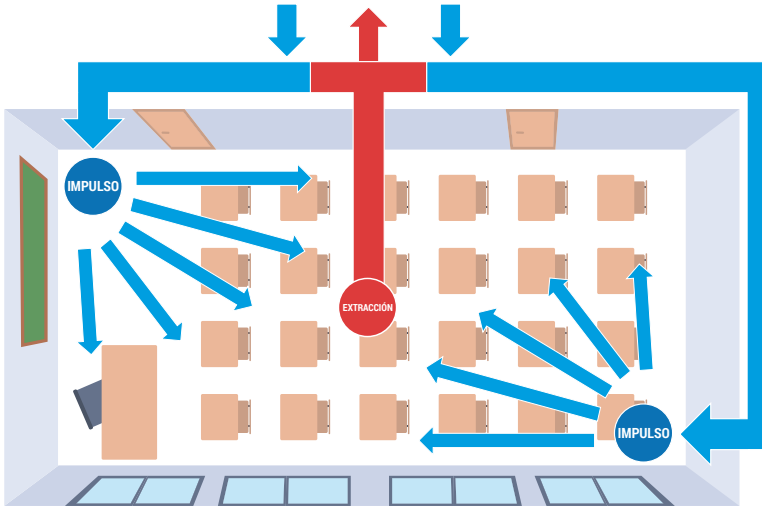
  ACHobjetivo = ACHtotalsistema

- El caudal necesario será:

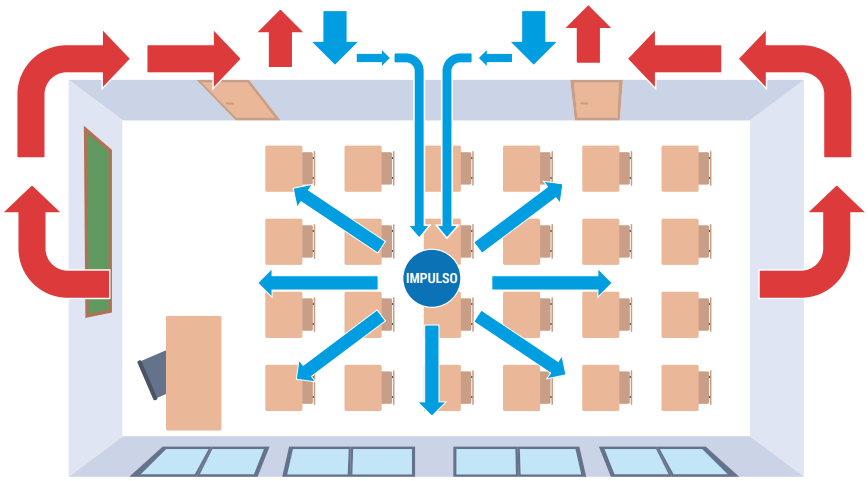
  *Caudal =ACHtotalsistema * volumen aula*

Nota: en caso de combinar con ventilación natural, a pesar de la existencia de ventilación forzada centralizada, las ACH son aditivas, por tanto ACHtotal =ACHventilación natural + ACHsistema

Ventilación centralizada que llega a aula por techo



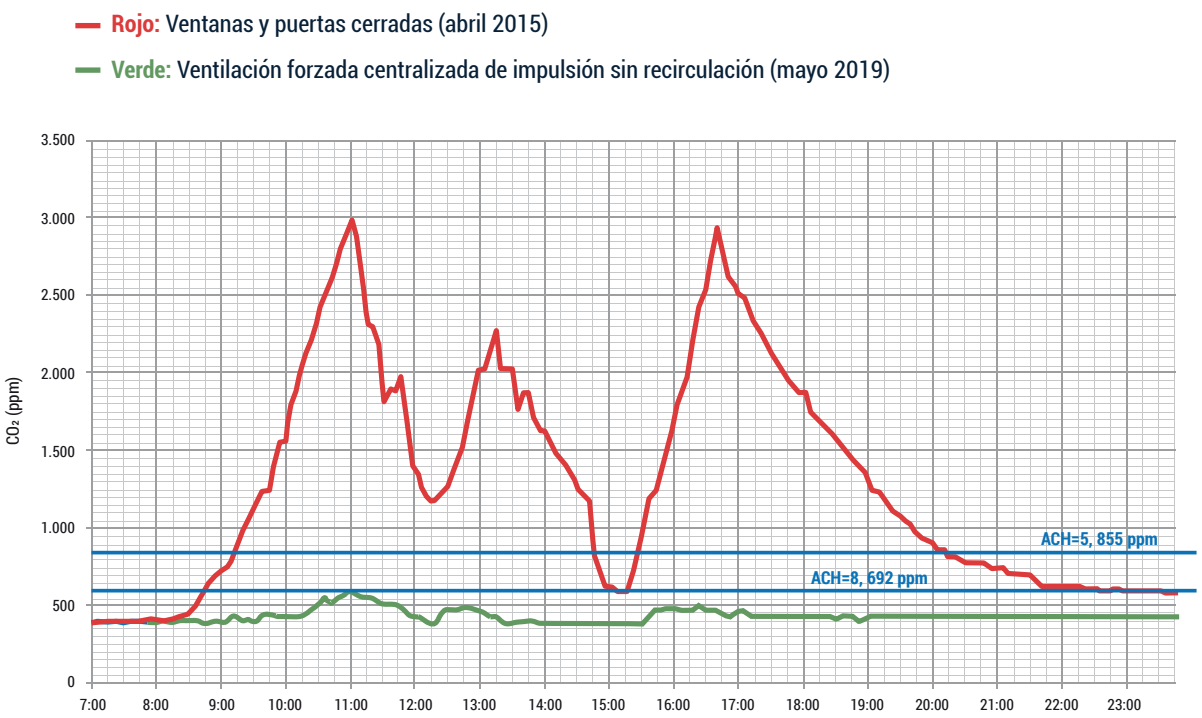
Ventilación centralizada que llega a aula por techo



Ejemplo ventilación forzada centralizada

SOLUCIÓN 4
VENTILACIÓN
FORZADA
CENTRALIZADA

- Variación de concentración de CO_2 durante una jornada escolar sin ventilación y con ventilación forzada centralizada.



Medidas reales hechas por Mesura en aulas de la Comunidad Valenciana

mimoCO₂ *https://webmesura.org/mimoco2/*

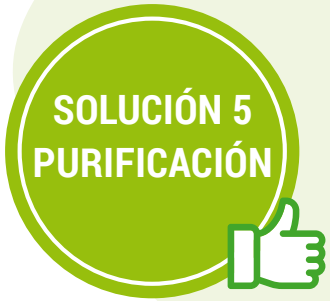
En este ejemplo, el aula tiene 148 m³ y hay 22 estudiantes de 14 años y 1 docente. Con esta densidad de estudiantes, serían recomendables más de 5 renovaciones por hora.

En la gráfica se indican las concentraciones de CO_2 en el interior en estado estable correspondientes a 5 y 8 renovaciones por hora (este último valor equivalente para estas condiciones a 14 litros por persona y segundo).

En el ejemplo la ventilación forzada está activa durante todo el tiempo. Las renovaciones por hora teóricas (según caudales del sistema) son de 11, que corresponden a unas 8 renovaciones por hora reales, tal como se ve reflejado en las concentraciones de CO_2, que se mantienen por debajo de los 690 ppm en todo momento.

(Para detalles de cálculos consultar métodos al final de la guía)

Solución 5. Purificación



Interior. No hay posibilidades de ventilación natural y/o forzada central o individual, o bien no son suficientes.

- La solución consiste en utilizar un purificador para eliminar las partículas susceptibles de contener virus del aire interior.
- Las renovaciones de aire conseguidas por diferentes medios en un mismo espacio simultáneamente son aditivas, es decir:

  $$ACHtotal = ACHventilación + ACHpurificación$$

- Por tanto, para tener una renovación de aire total (ACHtotal) que alcance la renovación objetivo (ACHobjetivo), se calcula la renovación de aire a proporcionar por el purificador (ACHpurificación) como:

  $$ACHpurificación = ACHobjetivo - ACHventilación$$

- El caudal de aire limpio proporcionado por los equipos comerciales se expresa como CADR, del inglés Clean Air Delivery Rate, y se suele expresar en m^3/h. Para conocer cual es el CADR que ha de tener el purificador para un ACHpurificación requerido, se calcula como:

  $$CADR = ACHpurificación * Volumen\ aula$$

- Para conocer qué renovación de aire proporciona un purificador con un CADR dado, se calcula como:

  $$ACHpurificación = CADR / Volumen\ aula$$

SOLUCIÓN 5 PURIFICACIÓN

- Se puede utilizar más de un purificador hasta sumar el caudal necesario.
- El purificador se debe colocar en el centro del aula si es posible y no ha de soplar directamente a los ocupantes.
- El sistema más eficaz es la filtración, que consiste en hacer pasar el aire 'contaminado' a través de un filtro de alto rendimiento, generalmente filtro HEPA (*High Efficiency Particulate Air*), que retiene las partículas y proporciona aire 'limpio'. Se recomienda HEPA H13 o superior (>99,95% de eficiencia).
- No son recomendables los sistemas con ionizadores o producción de ozono, ya que generan reacciones con otros elementos de la atmósfera que no se controlan y tienen consecuencias negativas de formación de contaminantes.
- Se han de cambiar los filtros siguiendo las recomendaciones del fabricante.
- Una versión simplificada es la utilización de un ventilador junto con un filtro MERV13. En este caso el caudal de aire limpio no se puede determinar de manera sencilla. Esta opción es menos eficiente que un purificador.

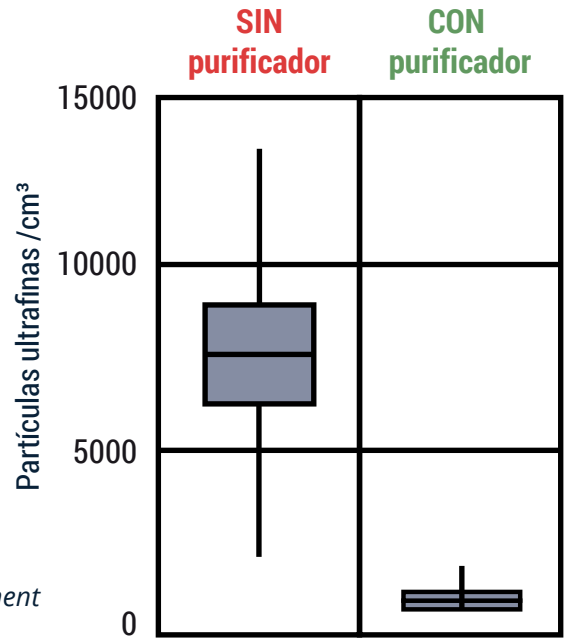
Nota: en el excel anexo existe una plantilla para realizer los cálculos de CADR y ACHpurificador

Ejemplo de purificación

SOLUCIÓN 5
PURIFICACIÓN

- **Variación de concentración de partículas ultrafinas en un gimnasio escolar con alumnos sin y con purificadores de aire con filtros HEPA.**

Medidas reales en un gimnasio en Barcelona:
Pacitto et al., 2020 Science of the Total Environment



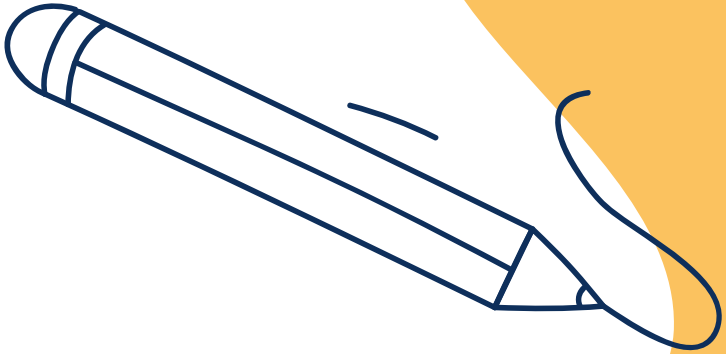
En el ejemplo, hay seis purificadores de aire, con un caudal de 660 m³/h cada uno en un gimnasio escolar de 430 m³ (150 m² * 2.9 m).

El caudal total es 660*6 = 3960 m³/h. La renovación de aire proporcionada por el conjunto de los seis purificadores es:

ACHpurificadores= 3960/430 = 11.6 renovaciones por hora.

Se observa disminución en la concentración de partículas en aire ambiente, susceptibles de contener virus.

Cómo verificar la solución elegida usando sensores de CO_2



Métodos para determinar la ventilación en aulas

Estos métodos tienen como finalidad determinar cuantitativamente la ventilación de un aula y poder comparar con las recomendaciones de ventilación establecidos: valor objetivo de ACH y/o de litros por persona y segundo.

Se incluyen dos métodos. Ambos se basan en medidas de dióxido de carbono (CO_2) en interiores, que se utiliza como una medida indirecta de ventilación.

En el exterior, las concentraciones de CO_2 son de aproximadamente 420 ppm.

Cuando un edificio está ocupado, las concentraciones de CO_2 en el interior son elevadas por el CO_2 exhalado por los ocupantes.

Ambos métodos solo consideran el efecto de dilución debido al flujo de aire exterior.
Si hay purificación de aire, los ACH son aditivos, es decir, si la ventilación proporciona 4 ACH y el purificador de aire proporciona 3 ACH, la tasa de renovación de aire sería de 7 ACH.

Método 1. Determinación de la tasa de renovación de aire

Se trata de determinar la tasa de renovación de aire (ACH). El experimento se ha de llevar a cabo sin ocupantes. Consiste en aumentar la concentración de CO_2 en el aula y posteriormente (en ausencia de ocupantes y otras fuentes de CO_2) determinar la velocidad de disminución de la concentración de CO_2 en las condiciones de ventilación a estudiar. Esta variación indica cómo de rápido el aire del exterior reemplaza el volumen de aire interior.

Experimento

- Medir la concentración de CO_2 al aire libre durante al menos cinco minutos. Esto se hará antes y después del experimento. Hacer el promedio de ambas medidas. El resultado será la concentración de CO_2 exterior.
- Colocar el sensor de CO_2 en el aula aproximadamente a 1 metro sobre el suelo.
- Incrementar la concentración de CO_2 en el aula a aproximadamente 2000 ppm. Opciones:
  - una o más personas están en el aula con ventanas y puertas cerradas. Esta situación se puede dar al final de una sesión de clase en caso de que no haya habido ventilación. Se puede iniciar el experimento en ese momento.
  - usar fuentes de emisión de CO_2 para aumentar la concentración rápidamente. Una opción es el uso de hielo seco.
- Controlar la concentración de CO_2 e iniciar el experimento cuando alcance al menos 2000 ppm. Se puede iniciar con otras concentraciones en caso de aprovechar por ejemplo el final de una sesión de clase sin ventilación:
  - retirar el hielo seco u otra fuente de CO_2 (si se ha usado)
  - hacer que todas las personas presentes salgan del aula
  - abrir ventanas y puertas según la configuración que se quiera probar
  - este momento será el inicio del experimento

- Dejar que la concentración de CO_2 en el aula se reduzca con la configuración de ventanas y puertas a probar. Evitar entrar y salir del aula durante este periodo
- Definimos el concepto de exceso de CO_2:

  Exceso de CO_2 = concentración CO_2 interior - concentración CO_2 exterior.

- La prueba finaliza cuando el exceso de CO_2 se acerque al 37% del exceso inicial.

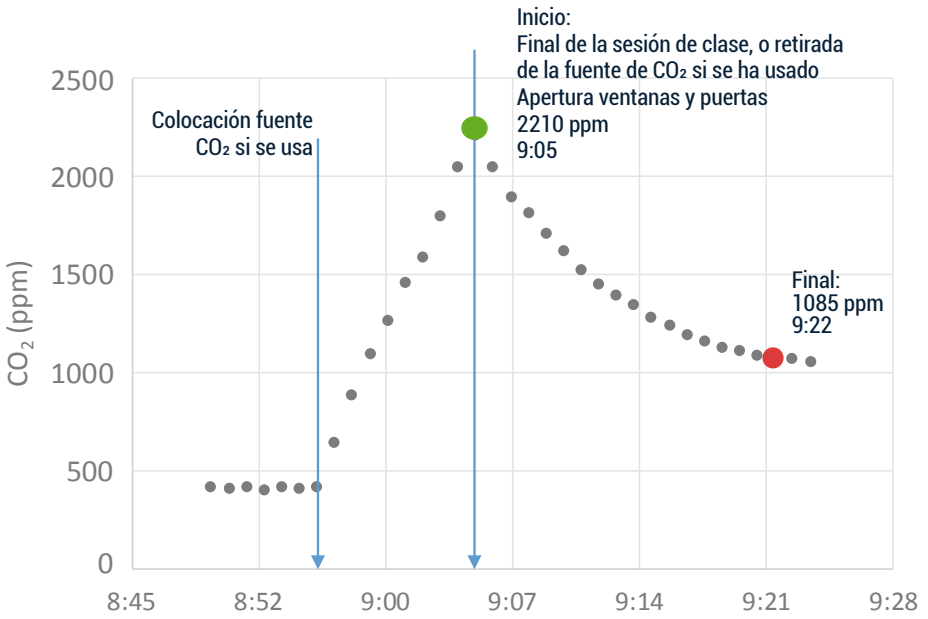
  Ejemplo:

  - concentración interior máxima inicial es de 2000 ppm
  - concentración exterior es de 420 ppm
  - exceso de CO_2 inicial= 2000-420 = 1580 ppm
  - exceso de CO_2 final= 37% del exceso de CO_2 inicial = 1580 * 0.37 = 585ppm
  - concentración interior final = 420 + 585 = 1005 ppm

- Repetir los pasos para probar otras configuraciones de puertas y ventanas.
- Comparar el valor de ACH con el valor objetivo, y tomar medidas adicionales si es necesario.

Cómo tratar los datos

- Descargar o apuntar los datos medidos por el sensor de CO_2.
- Identificar el comienzo de la curva de disminución teniendo en cuenta el momento del experimento. Evitar periodos en los que las concentraciones de CO_2 oscilen alrededor del mismo valor y elegir un punto con una disminución de concentración clara y constante. **Punto verde** en el gráfico indica la concentración (C_{inicio}) y el tiempo (t_{inicio}).
- Identificar el final de la curva de disminución según el cálculo de concentración final y observando los datos. **Punto rojo** en el gráfico indica la concentración (C_{final}) y el tiempo (t_{final}).



- Tomar el promedio de concentraciones en exteriores medidas con el antes y sensor después de las pruebas ($C_{exterior}$).
- Utilizar la siguiente ecuación, donde las concentraciones, C, estarán en ppm y los tiempos, t, estarán en horas:

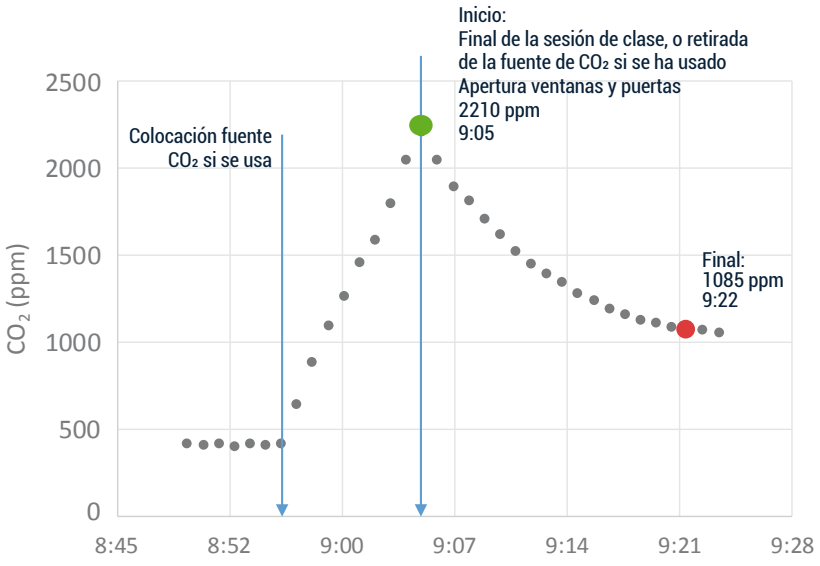
$$ACH = \frac{-1 * ln\left(\frac{C_{final} - C_{exterior}}{C_{inicio} - C_{exterior}}\right)}{t_{final} - t_{inicio}}$$

Nota: los cálculos se pueden realizar utilizando la plantilla Excel en el anexo de esta guía.

Ejemplo Método 1

- Inicio de la disminución, **C_{inicio}= 2210 ppm y t_{inicio}= 09:05**
- Identificar el final de la disminución, **C_{final}= 1085 ppm y t_{final}= 09:22**
- Concentración exterior, $C_{exterior}$ = 420 ppm
- Tiempo t_{final}-t_{inicio} es 17 minutos. En horas son 17/60 = 0.2833 horas

$$ACH = \frac{-1 * ln\left(\frac{1085-420}{2210-420}\right)}{0.2833} = \textbf{3.5 renovaciones por hora}$$



- Comparación del valor obtenido (ACH=3.5) con el valor objetivo.
  Se puede tomar ACHobjetivo = 5.
  Se puede tomar como objetivo 14 litros de aire por persona y segundo y calcular los ACH correspondientes.

  Ejemplo:
  23 personas en un aula de 70 m² y 2.8 m de altura (70*2.8=196 m³), correspondería a:
  ACH = 14 litros/persona/segundo * 23 personas * 3600 segundos/hora * 0.001 m³/litro / 196 m³ = 5.9
- Tomando ACHobjetivo=5, se necesitan 1.5 ACH adicionales (5.0-3.5)
- Opciones:
  - Modificar condiciones ventanas y/o puertas si es posible hasta alcanzar la ACH necesaria
  - Utilizar ventilación forzada individual que añada las 1.5 ACH que faltan. Caudal necesario = 1.5 *196 = 294 m³/h
  - Si no se puede determinar con exactitud el caudal generado por la ventilación forzada, se puede repetir el método 1 con la nueva configuración (natural+ forzada) y determinar las ACH totales conseguidas.
  - Poner un purificador de aire que añada las 1.5 ACH que faltan. El caudal necesario será CADR = 1.5 *196 = 294 m³/h

Método 2. Determinación de la concentración de CO_2 objetivo en estado estable estable.

Se trata de determinar la concentración de CO_2 objetivo con el aula ocupada. Se han de conocer las dimensiones del aula y su ocupación, y se ha de fijar el objetivo de renovación de aire. Con ello, se calcula la concentración de CO_2 en el aula para condiciones estables. Dicha concentración se compara con medidas continuas en el aula en condiciones estables, es decir, cuando la concentración de CO_2 se mantiene relativamente constante, tras el incremento del inicio de la clase.

- Medir las dimensiones del aula: ancho x largo x alto y calcular el volumen en metros cúbicos.
- Medir la concentración de CO_2 al aire libre durante al menos cinco minuto. Esto se hará antes y después del experimento. Hacer el promedio de ambas medidas. El resultado será la concentración de CO_2 exterior.
- Estimar lla generación de CO_2 como:

  Generación de CO_2 = número de ocupantes * tasa de exhalación de CO_2 por ocupante
- La tasa de generación de CO_2 por persona depende de la edad, el sexo, el peso y la actividad metabólica. Consultar las tablas siguientes para determinar la tasa de generación de CO_2 para cada caso.
- Algunos valores de situaciones frecuentes:
  - Estudiantes de 6-11 años, sentados: 0.0031 litros/segundo = 0.186 litros/minuto (lpm) por estudiante
  - Adolescentes: 0.0044 litros/segundo = 0.264 litros/minuto (lpm) por adolescente
  - Docentes (de pie y hablando, edad promedio de 30 a 40 años): 0.00361 litros/segundo = 0.366 litros/minuto (lpm)

- Calcular el caudal de aire exterior objetivo:

  Caudal aire exterior objetivo = ACH * Volumen aula

- Estimar la concentración de CO2 en estado estable usando la siguiente fórmula. La generación de CO2 y el caudal de aire exterior estarán en lpm, y la concentración de CO2 estará en ppm.

$$C_{\text{estado estable}} = \frac{\text{Generación de } CO_2 + \text{Caudal aire exterior objetivo} * \text{Cexterior } CO_2 * 1 * 10^{-6}}{\text{Caudal aire exteiror objetivo} * 1 * 10^{-6}}$$

- Se realizan medidas de CO2 para evaluar si la ventilación es adecuada. Si la concentración de CO2 , una vez es relativamente constante, es similar a la Cestado estable, sabríamos que estamos cumpliendo el objetivo de ventilación establecido. Si la concentración de CO2 es superior a Cestado estable, no se alcanza el objetivo de renovación de aire y habría que revisar la ventilación o desalojar el aula. Dadas las variaciones de concentraciones a lo largo del día, es razonable asumir un 20% de desviación del valor objetivo antes de tomar medidas drásticas.

Nota: los cálculos se pueden realizar utilizando la plantilla Excel en el anexo de esta guía.

Tasa de generación de CO2

TABLE 4 CO_2 generation rates at 273 K and 101 kPa for ranges of ages and level of physical activity (based on mean body mass in each age group)

Age (y)	Mean body mass (kg)	BMR (MJ/day)	CO_2 generation rate (L/s)						
			Level of physical activity (met)						
			1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	4.0
Males									
<1	8.0	1.86	0.0009	0.0011	0.0013	0.0014	0.0018	0.0027	0.0036
1 to <3	12.8	3.05	0.0015	0.0018	0.0021	0.0024	0.0030	0.0044	0.0059
3 to <6	18.8	3.90	0.0019	0.0023	0.0026	0.0030	0.0038	0.0057	0.0075
6 to < 11	31.9	5.14	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040	0.0050	0.0075	0.0100
11 to <16	57.6	7.02	0.0034	0.0041	0.0048	0.0054	0.0068	0.0102	0.0136
16 to <21	77.3	7.77	0.0037	0.0045	0.0053	0.0060	0.0075	0.0113	0.0150
21 to < 30	84.9	8.24	0.0039	0.0048	0.0056	0.0064	0.0080	0.0120	0.0160
30 to <40	87.0	7.83	0.0037	0.0046	0.0053	0.0061	0.0076	0.0114	0.0152
40 to <50	90.5	8.00	0.0038	0.0046	0.0054	0.0062	0.0077	0.0116	0.0155
50 to <60	89.5	7.95	0.0038	0.0046	0.0054	0.0062	0.0077	0.0116	0.0154
60 to <70	89.5	6.84	0.0033	0.0040	0.0046	0.0053	0.0066	0.0099	0.0133
70 to <80	83.9	6.57	0.0031	0.0038	0.0045	0.0051	0.0064	0.0095	0.0127
≥80	76.1	6.19	0.0030	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0120
Females									
<1	7.7	1.75	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0017	0.0025	0.0034
1 to <3	12.3	2.88	0.0014	0.0017	0.0020	0.0022	0.0028	0.0042	0.0056
3 to <6	18.3	3.59	0.0017	0.0021	0.0024	0.0028	0.0035	0.0052	0.0070
6 to < 11	31.7	4.73	0.0023	0.0027	0.0032	0.0037	0.0046	0.0069	0.0092
11 to < 16	55.9	6.03	0.0029	0.0035	0.0041	0.0047	0.0058	0.0088	0.0117
16 to <21	65.9	6.12	0.0029	0.0036	0.0042	0.0047	0.0059	0.0089	0.0119
21 to < 30	71.9	6.49	0.0031	0.0038	0.0044	0.0050	0.0063	0.0094	0.0126
30 to < 40	74.8	6.08	0.0029	0.0035	0.0041	0.0047	0.0059	0.0088	0.0118
40 to <50	77.1	6.16	0.0029	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0119
50 to <60	77.5	6.17	0.0030	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0120
60 to <70	76.8	5.67	0.0027	0.0033	0.0038	0.0044	0.0055	0.0082	0.0110
70 to <80	70.8	5.45	0.0026	0.0032	0.0037	0.0042	0.0053	0.0079	0.0106
≥80	64.1	5.19	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040	0.0050	0.0075	0.0101

Persily and de Jonge, 2017. Indoor Air

TABLE 3 Values of physical activity levels (*M*) from compendium [41]

Activity	*M* (met)	Range
Calisthenics—light effort	2.8	
Calisthenics—moderate effort	3.8	
Calisthenics—vigorous effort	8.0	
Child care		2.0 to 3.0
Cleaning, sweeping—moderate effort	3.8	
Custodial work—light	2.3	
Dancing—aerobic, general	7.3	
Dancing—general	7.8	
Health club exercise classes—general	5.0	
Kitchen activity—moderate effort	3.3	
Lying or sitting quietly		1.0 to 1.3
Sitting reading, writing, typing	1.3	
Sitting at sporting event as spectator	1.5	
Sitting tasks, light effort (e.g, office work)	1.5	
Sitting quietly in religious service	1.3	
Sleeping	0.95	
Standing quietly	1.3	
Standing tasks, light effort (e.g, store clerk, filing)	3.0	
Walking, less than 2 mph, level surface, very slow	2.0	
Walking, 2.8 mph to 3.2 mph, level surface, moderate pace	3.5	

Ejemplo Método 2. Aula secundaria

Aula de 65 m² con 16 estudiantes adolescentes y 1 docente.

- Dimensiones del aula: ancho x largo x alto: 6.5 x 10 x 2.9 = 188.5 m³
- Concentración de CO_2 exterior = 420 ppm
- Generación de CO_2 = 16*0.264 lpm +1*0.366 lpm = 4.59 lpm
- Renovaciones de aire por hora objetivo, ACH=5
- Se podrían calcular según objetivo de ventilación de litros por persona y segundo (lps): 14 lps

  ACH = 14 litros/persona/segundo * 17 personas * 3600 segundos/hora * 0.001 m³/litro / 188.5 m³ = 4.5
- Caudal de aire exterior necesario: 5 * 188.5 = 942.5 m³/h = 15708 lpm

$C_{estado\ estable}$ de CO_2 :

$$C_{estado\ estable} = \frac{4.59\ lpm + 15708\ lpm * 420 ppm * 1 * 10^{-6}}{15708\ lpm * 1 * 10^{-6}} = 712\ ppm\ CO_2$$

- Valores superiores a 712 ppm de CO_2 indicarían una renovación de aire inferior a la objetivo y por tanto la necesidad de implementar medidas adicionales o el desalojo del aula. Dadas las variaciones de concentraciones a lo largo del día, es razonable asumir un 20% de desviación del valor objetivo antes de tomar medidas drásticas.

Ejemplo Método 2. Aula infantil

Aula de 50 m² con 12 estudiantes infantiles y 2 docentes.

- Dimensiones del aula: ancho x largo x alto: 10 x 5 x 2.9 = 145 m³
- Concentración de CO_2 exterior = 420 ppm
- Generación de CO_2 = 12*0.186 lpm +2*0.366 lpm = 2.964 lpm
- Renovaciones de aire por hora objetivo, ACH=5
- Se podrían calcular según objetivo de ventilación de litros por persona y segundo (lps): 14 lps
  ACH = 14 litros/persona/segundo * 14 personas * 3600 segundos/hora * 0.001 m3/litro / 145 m3 = 4.9
- Caudal de aire exterior necesario: 5 * 145 = 725 m3/h = 12083 lpm

$C_{estado\ estable}$ de CO_2:

$$C_{estado\ estable} = \frac{2.964\ \text{lpm} + 12083\ \text{lpm} * 420\text{ppm} * 1 * 10^{-6}}{12083\ \text{lpm} * 1 * 10^{-6}} = 665\ \text{ppm}\ CO_2$$

- Valores superiores a 665 ppm de CO_2 indicarían una renovación de aire inferior a la objetivo y por tanto la necesidad de implementar medidas adicionales o el desalojo del aula. Dadas las variaciones de concentraciones a lo largo del día, es razonable asumir un 20% de desviación del valor objetivo antes de tomar medidas drásticas.

Limitaciones de los métodos

- No todas las áreas de la habitación pueden considerarse bien mezcladas. Tanto en condiciones de ventilación natural como forzada, es posible que el área central de un aula esté bien mezclada y que las esquinas u otras áreas periféricas lo estén menos eficientemente. Se pueden realizar las comprobaciones en diferentes puntos de la sala para identificar posibles 'zonas estancadas sin ventilación'.

- Los cálculos se han de adaptar en el caso de utilización de filtros en los sistemas de recirculación de aire o en el caso del uso de purificadores de aire. Los ACH proporcionados por ventilación y por purificación son aditivos.

- Los resultados son sensibles a errores debido a sensores de CO_2 mal calibrados.

- El CO_2 no se degrada con el tiempo, mientras que el virus en aire sí, por lo que las concentraciones de virus en aire decrecerán más rápidamente que las de CO_2. La diferencia depende de varios factores ambientales, tales como radiación UV o temperatura.

- La emisión de CO_2 y de partículas generada por las personas no son proporcionales. Al hablar fuerte, gritar o cantar se emiten más partículas, por tanto, con las mismas concentraciones de CO_2, el riesgo de contagio variará.

- Los valores de ACH medidos en un día según Método 1 reflejarán las condiciones de ese día, pudiendo variar según condiciones meteorológicas externas.

- Para el Método 1, los resultados se pueden ver afectados por selección adecuada de los puntos de inicio y finalización de la disminución de la concentración, flujos desde o hacia otros espacios dentro del edificio, y cambios en la ventilación durante el experimento debido a cambios en las diferencias de presión dentro el edificio y en la envolvente del edificio.

- Los valores de emisión de CO_2 de una persona varían con muchos factores, como edad, sexo, peso y actividad metabólica. Las estimaciones usadas pueden afectar a los resultados usados para el Método 2 (estado estable).

Características deseables de los medidores de CO_2

- Características deseables:
  - Capacidad de proporcionar los datos sin procesar descargables en archivo .txt, .xls, .csv o similar.
  - Resolución temporal de al menos un dato por minuto
  - Pantalla que muestre los niveles de CO_2 en tiempo real
  - Uso de tecnología NDIR (del inglés *nondispersive infrared*)
  - Coste entre 100 y 300 €

- Siempre hay que seguir las recomendaciones de uso del fabricante y las indicaciones de calibración, si las hay.

- Una forma de comprobar el buen funcionamiento es medir la concentración de CO_2 en el exterior, que ha de ser de aproximadamente 420 ppm, aunque en áreas urbanas densas puede fluctuar a lo largo del día debido a las emisiones de las fuentes de combustión.

Descargo de responsabilidad

Descargo de responsabilidad

- Este documento se proporciona únicamente con fines informativos y educativos. Su objetivo es ofrecer orientación con respecto a preguntas sobre las mejores prácticas con respecto a la evaluación de la ventilación en las aulas escolares en un esfuerzo por reducir el riesgo de transmisión de enfermedades, específicamente el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 y la enfermedad que causa, COVID-19.

- La adherencia a cualquier información incluida en este documento no garantizará un tratamiento exitoso en cada situación, cada situación y edificio son diferentes, y el usuario debe reconocer que no existe un escenario de "riesgo cero".

- El documento no debe considerarse exhaustivo en cuanto a la inclusión de todos los métodos adecuados ni es excluyente de otros métodos razonablemente diseñados para obtener los mismos resultados. El documento no tiene la intención de anular o reemplazar la orientación del gobierno y las organizaciones de salud.

- La información contenida en este documento refleja la información disponible en el momento en que se creó el documento. Nueva información y/o resultados de estudios futuros pueden requerir revisiones del documento.

- No garantizamos la precisión o integridad de la guía en este documento y no asumimos ninguna responsabilidad por cualquier lesión o daño a personas o propiedad que surja de o esté relacionado con cualquier uso del informe o por cualquier error u omisión.

Guía para ventilación en aulas

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

idaea
EXCELENCIA SEVERO OCHOA

MESURA
WEBMESURA.ORG