

SCHOOLS

FOR HEALTH

How School Buildings Influence
Student Health, Thinking and
Performance



HARVARD T.H. CHAN
SCHOOL OF PUBLIC HEALTH



Guía en 5 pasos para medir la tasa de renovación de aire en aulas

Joseph Allen, Jack Spengler, Emily Jones, Jose Cedeno-Laurent
Harvard Healthy Buildings program | www.ForHealth.org
Traducción al español por María Cruz Minguillón, IDAEA-CSIC

Octubre, 2020

Guía en 5 pasos para medir la tasa de renovación de aire en aulas

1. Medir las dimensiones del aula
2. Realizar comprobaciones preliminares de audio y visuales
3. Medir o estimar la tasa de ventilación de aire exterior (usando uno de los cuatro métodos)
4. Comparar resultados con objetivos
5. Si es necesario, considerar estrategias complementarias de limpieza del aire para cumplir con los objetivos

Los ejemplos al final de esta guía muestran cómo seguir estos pasos para cumplir los objetivos de renovación de aire en diferentes escenarios.

Paso 0

Qué va a necesitar

Materiales necesarios

- Cinta métrica / láser métrico
- Papel o cartón y cinta para cubrir el ventilador o los difusores de la unidad
- Materiales adicionales que se enumeran a continuación según la opción seleccionada para realizar el Paso 3

Para el paso 3, opción A o B (medida de la ventilación de aire exterior con un balómetro)

- Balómetro* con capuchas de forma adecuada para los sistemas de su escuela (por ej. https://tsi.com/products/ventilation-test-instruments/alnor/alnor-capture-hoods/alnor-balometer-capture-hood-ebf731/?gclid=Cj0KCQjwhIP6BRCMARIsALu9LfkRMQI0LE9GDZvDC49MUbEbuomuj7B18MJR7XQKgB-PPO1IDSA5DnlaAt0yEALw_wcB)

Para el paso 3, opción C or D (estimación de la ventilación de aire exterior a partir de la concentración de CO₂)

- Medidor de dióxido de carbono, CO₂*, ** (por ej. CO2meter.com, www.getawair.com, Onsetcomp.com, <https://aranet.com>)

Para el paso 3, opción C (estimación de la ventilación de aire exterior a partir de la concentración de CO₂)

- Nevera portátil para transportar hielo seco
- Hielo seco (~ 10 libras funcionarán para aproximadamente cinco aulas de 1000 pies cuadrados) (5 kg para 5 aulas de 100 m²)
- Al menos dos ventiladores por habitación para mejorar la mezcla

El dióxido de carbono (CO₂) se utiliza a menudo como una medida indirecta de ventilación. Cuando un edificio está ocupado, las concentraciones de CO₂ en el interior son elevadas por el CO₂ exhalado por los ocupantes. Cuando los ocupantes se van y no hay otras fuentes de CO₂ presentes (por ejemplo, personas, fuentes de combustión, etc.), la tasa de disminución de la concentración de CO₂ se puede usar para estimar cómo de rápido el aire del exterior (a aproximadamente 400 ppm de CO₂) reemplaza el volumen de aire interior.

En ausencia de ocupantes, se puede utilizar hielo seco (la forma sólida de dióxido de carbono) para aumentar la concentración de CO₂ en el aire interior. Tenga cuidado al manipular hielo seco, ya que su baja temperatura (-78 °C) puede causar quemaduras. No toque el hielo seco con las manos desnudas. No permita que las concentraciones de CO₂ en interiores excedan el límite de exposición ocupacional de 5000 partes por millón (ppm).

* Nota: Estas recomendaciones no son respaldos de ninguna marca o producto en particular. Su objetivo es ayudar a los usuarios de esta guía a elegir el equipo necesario para realizar las medidas sugeridas. Hay varios proveedores alternativos de equipos confiables.

** Nota: Los sensores de dióxido de carbono se han vuelto mejores y menos costosos en los últimos años. Para los usos descritos aquí, es útil tener un sensor que pueda proporcionar los datos sin procesar. También es útil tener un sensor con una pantalla que muestre los niveles de CO₂ en tiempo real y que proporcione las medidas al menos una vez por minuto.

Paso 1

Medir las dimensiones del aula

Paso 1. Medir el aula

Objetivo: Obtener el volumen del espacio.

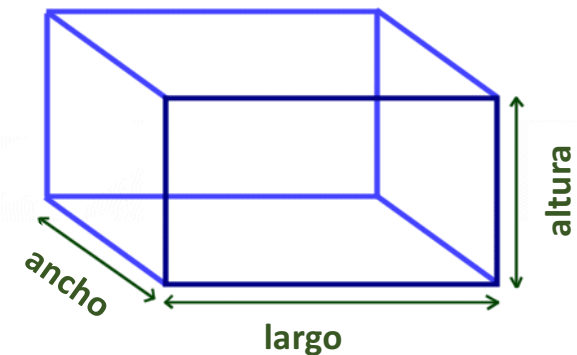
Cómo:

Medir el largo y ancho de la habitación, y la altura hasta el techo, para estimar el volumen en metros cúbicos, usando la fórmula:

$$\text{largo} \times \text{ancho} \times \text{altura}$$

Notas:

- Para espacios con geometrías complejas, use metros cuadrados de planos arquitectónicos y multiplique por la altura del suelo al techo.
- Si el espacio tiene un techo abovedado o inclinado, primero calcule el área de la pared y multiplique por la longitud del espacio.
- Si el espacio tiene muchos elementos empotrados (por ejemplo, una chimenea), intente tener en cuenta el volumen muerto, así como el volumen ocupado por los muebles. Podría ser que el volumen funcional sea ~ 80% del volumen total del espacio.
- Cuente el número de ventanas, mida su dimensión y su área de apertura.



Paso 2

Realizar comprobaciones preliminares de audio y visuales

Paso 2. Comprobaciones de audio y visuales

“Comprobación del tejido”

Objetivo: Asegurarse de que el sistema esté encendido y comprender la dirección del flujo de aire.

Cómo:

- 1. Comprobación de audio:** Escuchar el sonido que sale de las unidades del sistema y los ventiladores de suministro o extracción.
- 2. Comprobación visual:** Utilizar un trozo de tejido ligero, o un indicador de nube de polvo, para ver si se está suministrando aire (la nube de polvo o el tejido se mueven lejos del ventilador) o si se está extrayendo aire (la rejilla del ventilador succiona el tejido o la nube de polvo).



Notas:

- Algunos sistemas, como los aires acondicionados, pueden tener ventiladores tanto de suministro como de extracción; en este caso, hay que identificar qué área de la unidad realiza cada función.
- Se puede comprobar si el aire entra o sale de la habitación utilizando un pañuelo de papel para indicar la dirección del flujo de aire debajo de una puerta o con la puerta entreabierta. Esta verificación indica si la habitación está típicamente presurizada "positivamente" en relación con las áreas adyacentes (es decir, el tejido se mueve hacia fuera de la habitación) o "presurizada negativamente" en relación con las áreas adyacentes (es decir, el tejido se mueve hacia dentro de la habitación).

Paso 3

Medir o estimar la tasa de ventilación de aire exterior

Seleccione la opción para medir o estimar la ventilación del aula según su situación y tipo de sistema

	Situación del aula	Tipo de Sistema de ventilación	Materiales necesarios
Opción A	Ocupada o desocupada	Unidad individual (unit ventilator)	balómetro
Opción B	Ocupada o desocupada	Centralizado	balómetro
Opción C	Desocupada	Cualquiera	Medidor de CO ₂ & hielo seco
Opción D	Ocupada	Cualquiera	Medidor de CO ₂

Paso 3, Opción A

Medida de la ventilación de aire exterior con un balómetro

Materiales: Balómetro

Situación del aula: ocupada o desocupada

Tipo de sistema de ventilación: Sistema individual (unit ventilator en inglés)

Paso 3, Opción A. Determinar la tasa de ventilación de aire exterior (sistemas individuales)

Objetivo: Medir el flujo de aire exterior entrante por ventilación mecánica a través de los ventiladores de la unidad.

Cómo:

1. Elegir una campana de captura para el balómetro con el factor de forma más cercano para cubrir los difusores de aire (es decir, elegir una campana que tenga una forma similar a la forma del difusor de aire). En caso de que la campana de captura no cubra todo el difusor, utilizar un trozo de cartón y cinta para dirigir el flujo exclusivamente a través de la campana de captura.
2. Comenzar afuera y usar el balómetro para medir el flujo de aire (en m^3 por minuto) que entra al edificio a través de la rejilla donde se aspira el aire.
3. Dentro del aula, usar el balómetro para medir el flujo de aire en los difusores de aire donde se suministra o sopla aire a la habitación.



Paso 3, Opción A. Determinar la tasa de ventilación de aire exterior (sistemas individuales)

4. Calcular el porcentaje de aire exterior que entra como la relación entre la primera medición y la segunda. En los casos en los que parte del aire que entra al aula es recirculado, el % de aire exterior será inferior al 100%; en los casos en que todo el aire que entra al aula provenga directamente del exterior, el % de aire exterior será del 100%.

% aire exterior =

$$\frac{\text{Flujo de aire exterior que entra, medido fuera}}{\text{Flujo de aire total que entra, medido dentro}}$$

5. Calcular la tasa de renovación de aire (ACH, del inglés air changes per hour) a partir de las medidas del balómetro dividiendo el flujo de aire exterior que entra a la habitación (medido fuera) por el volumen de la habitación (largo * ancho * altura).

ACH =

$$\frac{\text{Flujo de aire exterior que entra (m}^3 \text{ por minuto)} * 60 \text{ (minutos por hora)}}{\text{Volumen del aula (m}^3 \text{)}}$$

Notas:

- Los sistemas de ventilación individuales son los más comunes que se encuentran en las aulas. Estos sistemas pueden proporcionar una combinación de aire exterior y aire recirculado en el espacio.
- En muchos casos, las compuertas de los conductos de aire no están completamente abiertas. Es importante verificar su posición comparando el flujo que entra a la unidad (difusor exterior) con el aire que se suministra al interior (difusor interior), como se describe en el Paso 4 anterior.
- Para maximizar la ventilación, y cuando el clima lo permita, abrir completamente las compuertas del ventilador de la unidad para proporcionar un 100% de aire exterior.
- No coloque libros u otros materiales delante de los difusores de flujo de aire.
- Los sistemas de ventilación generalmente están diseñados para promover la mezcla de aire en las áreas centrales de un aula, lo que puede conducir a una menor ACH en las esquinas u otras áreas periféricas.

Paso 3, Opción B

Medida de la ventilación de aire exterior

Materiales: Balómetro

Situación del aula: ocupada o desocupada

Tipo de sistema de ventilación: centralizado

Paso 3, Opción A. Determinar la tasa de ventilación de aire exterior (sistemas centralizados)

Objetivo: Medir el flujo de aire exterior entrante por ventilación mecánica a través del sistema centralizado.

Cómo:

1. Identificar los difusores de entrada en el aula (es decir, rejillas por donde el aire entra a la habitación) y usar el balómetro para medir los flujos, asegurándose de que la campana de captura cubra toda el área de cada difusor y cree un buen sello alrededor del difusor. En caso de que la campana de captura no cubra todo el difusor, utilizar cartón y cinta para dirigir el flujo exclusivamente a través de la campana de captura.
2. Determinar la posición de la compuerta en el sistema de aire central preguntando al equipo de instalaciones de la escuela o al equipo de mantenimiento del sistema de aire (HVAC, del inglés Heating, Ventilation, and Air Conditioning). La posición de la compuerta estará entre 0% y 100% abierta.
3. Calcular las tasas de renovación de aire (ACH) a partir de las medidas del balómetro. Para los sistemas centralizados, el flujo de aire exterior que entra al aula es la suma de las medidas de flujo de aire (m³ por minuto) de entrada de todos los difusores del aula multiplicada por la fracción de aire exterior permitida por la compuerta (por ejemplo, multiplicar por 0.2 si la posición de la compuerta es 20%) .

ACH =

$$\frac{\text{Flujo de aire total (m}^3 \text{ por minuto)} * 60 \text{ (minutos por hora)} * \text{fracción de aire exterior según compuerta}}{\text{volumen del aula (m}^3 \text{)}}$$

Paso 3, Opción C

Estimación de la ventilación de aire exterior

Materiales: Medidor de CO₂ & hielo seco

Situación del aula: desocupada (método de tasas de disminución de CO₂)

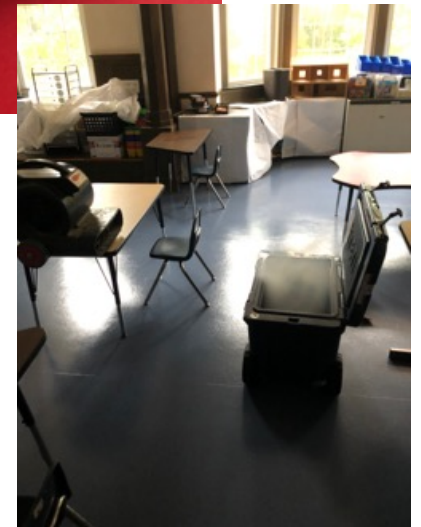
Tipo de sistema de ventilación: cualquiera

Paso 3, Opción C. Estimación de la ventilación de aire exterior a partir de la concentración de CO₂

Objetivo: Estimar el flujo de aire exterior entrante en un aula desocupada utilizando un medidor de CO₂.

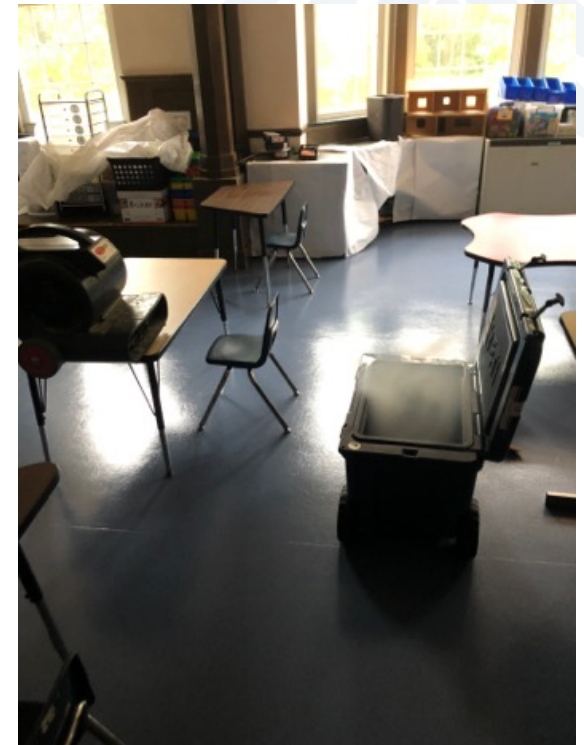
Cómo:

1. Seguir las instrucciones del fabricante para calibrar el sensor de CO₂.
2. Configurar el sensor de CO₂ para registrar medidas al menos una vez por minuto. Esto ayudará a seleccionar el comienzo y el final de un período de disminución de concentración con mayor precisión.
3. Medir la concentración de CO₂ al aire libre con el sensor de CO₂ durante al menos cinco minutos. (Nota: también debe volver a medir el CO₂ en exteriores una vez que haya terminado de realizar las medidas en interiores). Si bien la concentración de fondo en exteriores es de aproximadamente 400 ppm, en áreas urbanas más densas el CO₂ puede fluctuar a lo largo del día debido a las emisiones de las fuentes de combustión. Tome nota de las concentraciones en exteriores antes y después de sus mediciones en interiores, ya que necesitará el promedio para estimar la tasa de ventilación.



(continuación en siguiente página)

4. Colocar el sensor de CO₂ en el aula lejos de la ubicación del contenedor de hielo seco y aproximadamente a 1 metro sobre el suelo.
5. Usar hielo seco para hacer que la concentración de CO₂ aumente en el aula a aproximadamente 2000 ppm.
 - a. No tocar el hielo seco con las manos desnudas. Está muy frío y puede provocar quemaduras.
 - b. No permitir que las concentraciones de CO₂ excedan el límite de exposición ocupacional de 5000 ppm.
 - c. Reducir el flujo de aire de los sistemas mecánicos para acelerar el incremento de concentración. Idealmente, apagar los ventiladores y los extractores (solo durante este paso mientras se acumula la concentración de CO₂). Si esto no es posible, cubrir los difusores de aire con un papel y cinta adhesiva.
 - d. Colocar un recipiente abierto de hielo seco en el aula. Para un aula normal (50-100 m²), aproximadamente 5 kg de hielo seco deberían ser suficientes para elevar la concentración de CO₂ a 2000 ppm en menos de 15 minutos para cinco pruebas. Colocar un ventilador al lado del hielo seco para favorecer la sublimación del CO₂. Además, usar ventiladores para favorecer la mezcla del CO₂ del hielo seco en el aire del aula para asegurar una concentración uniforme en toda el aula. Esto es importante porque se está generando CO₂ desde un solo punto en el espacio y es un gas más pesado y frío que el aire del aula.
 - e. Ver la concentración de CO₂ en el sensor de CO₂. Cuando alcance al menos 2000 ppm, retirar el hielo seco o cerrar el contenedor de hielo seco, devolver el flujo de aire a las condiciones normales (es decir, deshacer las reducciones del flujo de aire en 5c) y hacer que todas las personas presentes en la habitación salgan de la habitación.



(continuación en siguiente página)

6. Dejar que la concentración de CO₂ en el aula se reduzca hasta que el incremento de CO₂ con respecto a la concentración inicial sea ~ 37% del incremento máximo que se ha conseguido con el hielo seco.

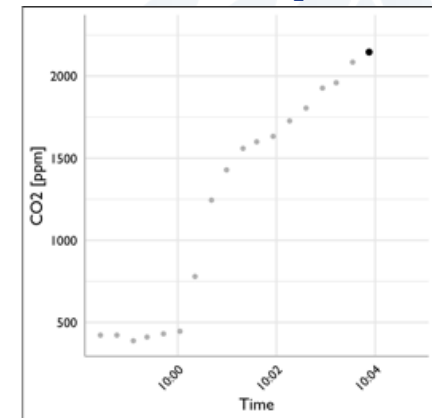
- La concentración de CO₂ comenzará a disminuir cuando se retire el hielo seco de la habitación y cuando las personas salgan de la habitación.
- Durante este periodo, intentar mantener la ventilación lo más constante posible dejando sin cambios el ajuste de los sistemas mecánicos y minimizar el número de veces y de personas que entran y salen de la sala de pruebas.
- La prueba puede finalizar cuando el nivel de CO₂ se acerque al 37% de su concentración máxima original por encima del fondo. Por ejemplo, si la concentración máxima es de 2500 ppm y la concentración exterior es de 400 ppm (exceso de CO₂ = 2500-400 = 2100 ppm), la prueba finaliza al alcanzar 1177 ppm (es decir, [2100 ppm * 0,37] + 400 ppm).

7. Repetir los pasos 5 y 6 para probar los siguientes escenarios, si procede, para comprender la ventilación en cada circunstancia

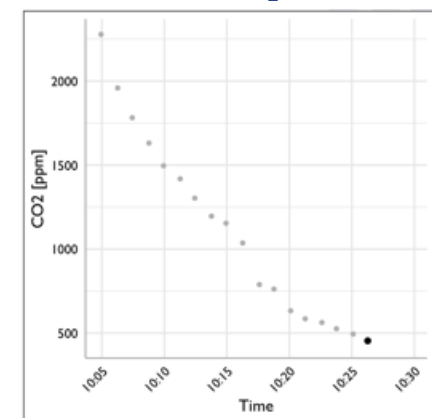
- Aula vacía con las puertas y ventanas cerradas y con las compuertas de aire exterior "fresco" abiertas (si las hay).
- Aula vacía con algunas puertas y/o ventanas abiertas para ventilación natural suplementaria. Se pueden probar múltiples configuraciones de puertas y ventanas abiertas. Incluso con las ventanas abiertas, es posible que sea necesario abrir las puertas interiores para permitir que el aire adicional fluya a través del aula.
- Probar otras aulas para comprender la influencia del viento sobre y alrededor del edificio y el efecto de la apertura de las ventanas.

(continuación en siguiente página)

Incremento de CO₂



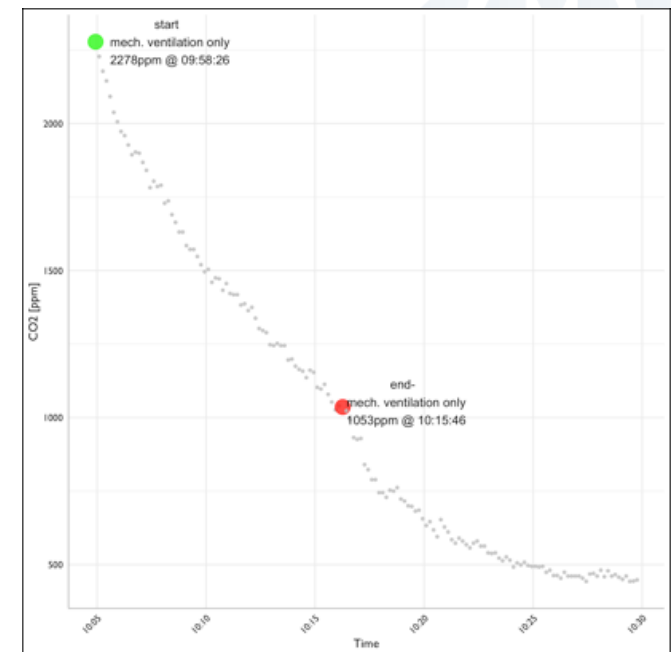
Descenso de CO₂



8. Utilizar los datos del sensor de CO₂ para calcular la renovación de aire (ACH) para cada prueba:

- Descargar o apuntar los datos medidos por el sensor de CO₂.
- Identificar el comienzo de la curva de disminución observando los datos y teniendo en cuenta el momento en que se ha hecho la prueba y marcar la concentración (C_{start}) y el tiempo correspondiente (t_{start}), que se muestra con el **punto verde** en el gráfico. Intentar evitar periodos en los que las concentraciones de CO₂ oscilen alrededor del mismo valor y elegir un punto que tenga una disminución de concentración clara y constante.
- Identificar el final de la curva de disminución observando los datos y teniendo en cuenta el momento en que se ha hecho la prueba y marcar la concentración (C_{end}) y el tiempo correspondiente (t_{end}), que se muestra con el **punto rojo** en el gráfico.
- Tomar el promedio de concentraciones en exteriores medidas con el sensor antes y después de las pruebas ($C_{ambient}$).
- Calcular la duración de la disminución de concentración en horas $t_{end}-t_{start}$. Por ejemplo, una disminución de 10 min equivale a $10/60 = 0,167$ horas
- Utilizar la siguiente ecuación para obtener las renovaciones de aire por hora (tener en cuenta que todas las concentraciones, C , estarán en ppm y todos los tiempos, t , estarán en horas:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}}$$



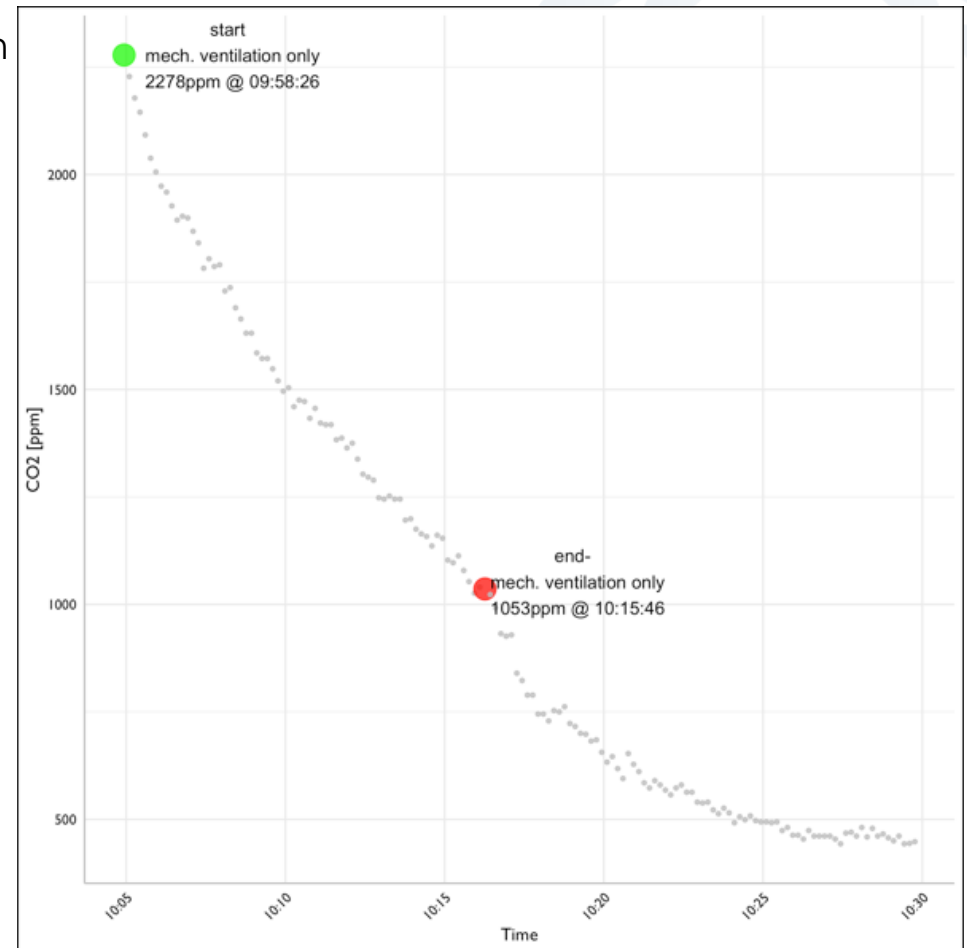
Ejemplo – prueba para el impacto de la ventilación mecánica

- Identificar el inicio de la disminución, $C_{start} = 2278$ ppm y $t_{start} = 09:58:26$
- Identificar el final de la disminución, $C_{end} = 1053$ ppm y $t_{end} = 10:15:46$.

(Nota: el punto final se ha elegido porque, en esta prueba, las ventanas se abrieron después de las 10:15:46 y queremos saber las renovaciones de aire por hora debidas únicamente a ventilación mecánica)

- Concentración exterior $C_{ambient} = 400$ ppm
- Tiempo $t_{end} - t_{start}$ es 17 minutos y 20 segundos. En horas son $17/60 + 20/3600 = 0.2889$ horas.

$$ACH = \frac{-1 \cdot \ln\left(\frac{1053 - 400}{2278 - 400}\right)}{0.2889} = 3.7 \text{ renovaciones por hora}$$



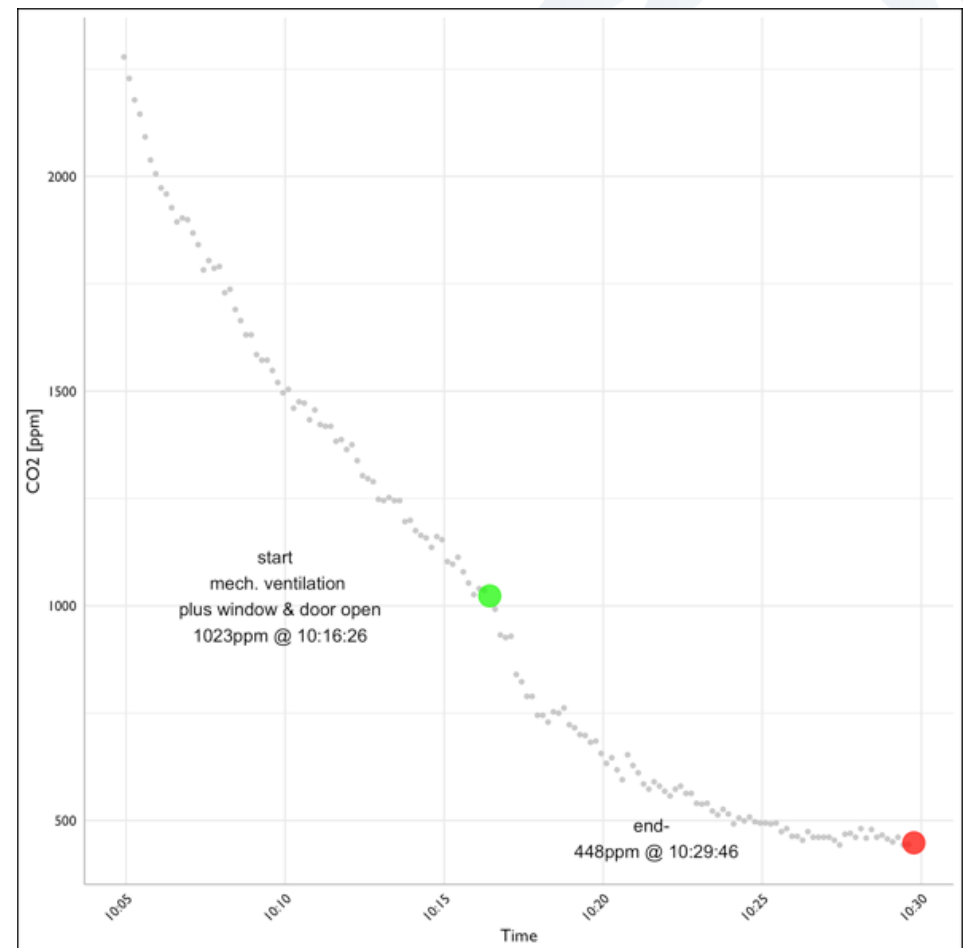
Ejemplo – prueba para el impacto adicional de apertura de ventanas y puertas

- Identificar el inicio de la disminución, $C_{start}=1023$ ppm y $t_{start}=10:16:26$.

(Nota: el punto de inicio se ha elegido porque en esta prueba las ventanas y puertas estaban cerradas antes de las 10:16:26 y queremos saber la renovación de aire por ventilación mecánica debida a la apertura de ventanas y puertas añadida a la ventilación del sistema mecánico)

- Identificar el final de la disminución, $C_{end}=448$ ppm and $t_{end}=10:29:46$
- Concentración exterior $C_{ambient} = 400$ ppm
- Tiempo $t_{end}-t_{start}$ es 13 minutos y 20 segundos. En horas son $13/60 + 20/3600 = 0.2222$ horas

$$ACH = \frac{-1 * \ln\left(\frac{448-400}{1023-400}\right)}{0.2222} = 11.5 \text{ renovaciones por hora}$$



Paso 3, Opción D

Estimación de la ventilación de aire exterior

Materiales: Medidor de CO₂

Situación del aula: ocupada (método de estado estable (Steady State) de CO₂)

Tipo de sistema de ventilación: cualquiera

Paso 3, Opción D. Estimación de la ventilación de aire exterior usando el método de Steady State CO₂

Objetivo: Estimar el flujo de aire exterior entrante en un aula ocupada utilizando un sensor de CO₂.

Con el aula ocupada, los sensores de CO₂ en el aula se pueden usar para saber la ventilación aproximada del aula. Por ejemplo, un aula de 50 metros cuadrados y 3 metros de altura con 15 estudiantes adolescentes y una tasa de renovación de aire de 4 ACH debe tener una concentración de estado estable (Steady State) de alrededor de 800 ppm. Esa concentración en estado estable cae a ~ 700 ppm y ~ 650 ppm para 5 y 6 ACH, respectivamente.

Cómo:

1. Seguir las instrucciones del fabricante para calibrar el sensor de CO₂.
2. Configurar el sensor de CO₂ para registrar medidas al menos 1 vez por minuto.
3. Medir la concentración de CO₂ al aire libre con el sensor de CO₂ durante al menos cinco minutos. Si bien la concentración de fondo al aire libre es de aproximadamente 400 ppm, en áreas urbanas más densas, el CO₂ puede fluctuar a lo largo del día debido a las emisiones de las fuentes de combustión. Tomar nota de la concentración exterior, ya que se necesitará este número para estimar la concentración en estado estable.
4. Estimar la tasa de generación de CO₂ multiplicando el número de ocupantes en el aula por su tasa de exhalación de CO₂. La tasa de generación de CO₂ por persona depende de la edad, el sexo, el peso y la actividad metabólica. Para estudiantes de 6-11 años, utilizar 0.18689 litros por minuto (lpm) por estudiante, y para adolescentes usar 0.24636 litros por minuto por adolescente. Multiplicar la tasa de generación correspondiente por el número de estudiantes en el aula. Para docentes (de pie y hablando, edad promedio de 30 a 40 años) usar 0.36812 litros por minuto.
 - Para un aula con 14 estudiantes adolescentes y 1 docente, la generación de CO₂ es $14 \times 0.24636 \text{ lpm} + 1 \times 0.36812 \text{ lpm} = 3.81716 \text{ lpm}$

(continuación en siguiente página)

5. Estimar el flujo objetivo de aire exterior. Multiplicar el volumen del aula (en metros cúbicos) por las renovaciones de aire objetivo por hora y dividir entre 60 minutos por hora.

- Ejemplo: para un objetivo de 4 ACH en un aula de 140 m³, $140 \times 4 / 60 = 9.3 \text{ m}^3/\text{min} = 9300 \text{ litros por minuto (lpm)}$

6. Estimar el estado estable (steady state) de CO₂ usando la siguiente fórmula

$$C_{\text{steady-state}} = \frac{\text{Generación de CO}_2 + \text{objetivo flujo aire exterior} * \text{conc CO}_2 \text{ exterior} * 1 * 10^{-6}}{\text{objetivo flujo aire exterior} * 1 * 10^{-6}}$$

$$\text{Continuando el ejemplo anterior, } C_{\text{steady-state}} = \frac{3.81716 \text{ lpm} + 9300 \text{ lpm} * 400 \text{ ppm} * 1 * 10^{-6}}{9300 \text{ lpm} * 1 * 10^{-6}} = 810 \text{ ppm CO}_2$$

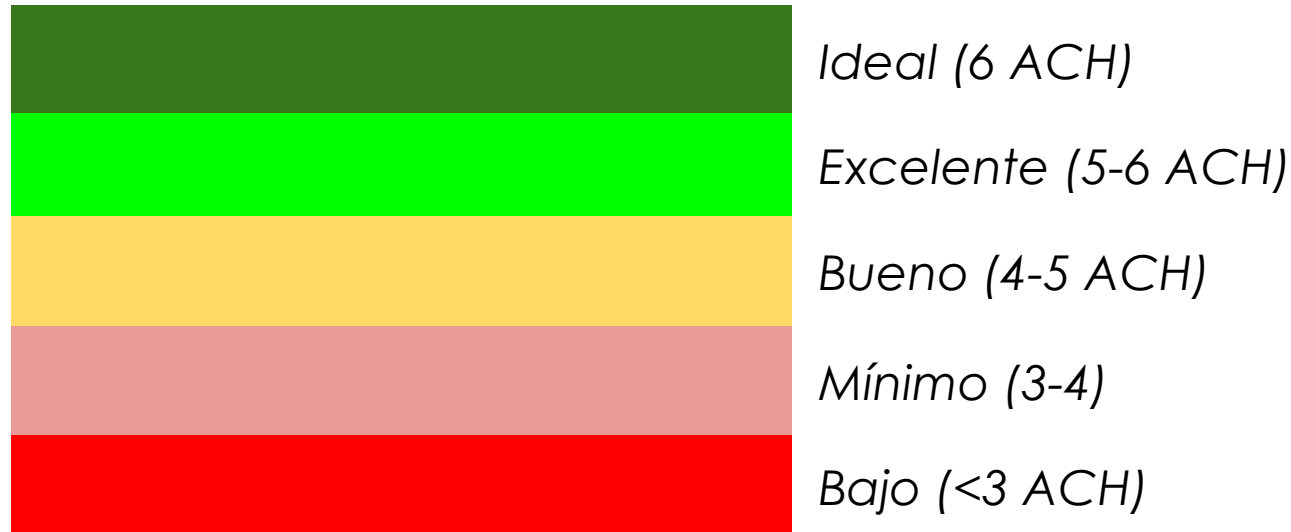
Este método solo considera el efecto de dilución debido al flujo de aire exterior. Si parte del aire se filtra a través de un filtro de eficiencia MERV 13 o superior, o un limpiador de aire portátil con un filtro HEPA, se puede usar un flujo objetivo de aire exterior más bajo para este cálculo siempre que el aire total renovado por hora cumpla con el objetivo de ACH recomendado. Por ejemplo, si la ventilación mecánica puede proporcionar 3 ACH, calcular la concentración en estado estable en 3 ACH considerando que podría agregar 2 ACH con purificadores de aire portátiles para cumplir con el objetivo de 5 ACH.

- Una vez realizado este cálculo, se puede usar el monitor de CO₂ durante la clase para evaluar si la ventilación es adecuada. En este ejemplo, si el sensor de CO₂ lee alrededor de 800 ppm mientras los 14 estudiantes y 1 docente están en clase, sabríamos que estamos cumpliendo el objetivo establecido de 4 ACH de ventilación de aire exterior. Si notamos que el sensor de CO₂ lee constantemente 1400 ppm mientras los 14 estudiantes y 1 docente están en clase, tendríamos que revisar la ventilación porque el aumento de la concentración de CO₂ en estado estable indica que la ACH real está por debajo del objetivo establecido de 4 ACH. De esta manera, los sensores de CO₂ se pueden usar para determinar cuándo la ventilación puede no ser adecuada.

Paso 4

Comparar resultados con objetivos

EL OBJETIVO ES AL MENOS 5 RENOVACIONES DE AIRE POR HORA



Estos objetivos de ventilación están basados en la densidad de ocupación estipulada en el estándar americano ASHRAE 62.1 para aulas (en escuelas de educación primaria y secundaria), de aproximadamente 25 estudiantes por cada 100 metros cuadrados. En otras circunstancias es aconsejable considerar como objetivo el doble de la ventilación por persona en dicho estándar, es decir aumentar de ~7 litros por segundo (lps) por persona a ~14 lps por persona.

Paso 5

Si es necesario, considerar estrategias complementarias de limpieza del aire



Estrategias a utilizar si el aula no alcanza el objetivo de ACH

1. Incrementar aire exterior
2. Usar filtros MERV13 filters (o mejores) para el aire recirculado
3. Añadir purificadores de aire portátiles con filtros HEPA en el aula

1. Incrementar aire exterior

Ventilación natural

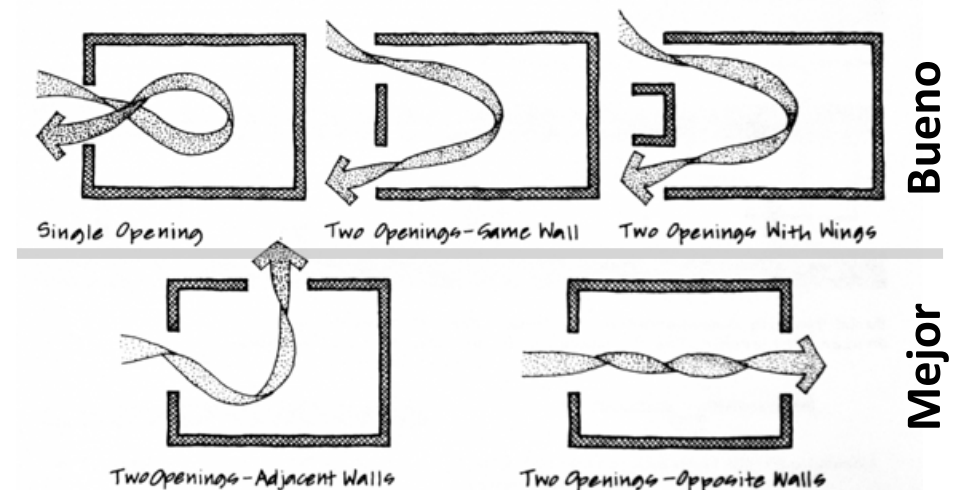
- Abrir ventanas y/o puertas para incrementar el flujo de aire

Ventilación mecánica

- Configurar el sistema de ventilación a la velocidad máxima de utilización de aire exterior que el sistema puede asumir según las condiciones de temperatura exterior

Nota:

- El aire exterior entra al aula debido a una diferencia de presión, causada por un movimiento masivo (viento), un gradiente de temperatura (flotabilidad) o un sistema mecánico (presión negativa debido a un extractor de aire)
- La ventilación cruzada es una estrategia preferida ya que desplaza el aire de manera más efectiva en una porción más grande del aula. Tener un extractor de aire funcional o abrir la puerta a un pasillo puede facilitar el flujo que entra por una ventana abierta.
- Realizar pruebas con diferentes configuraciones de apertura de ventanas / puertas podría sugerir la estrategia óptima para un aula.



Graphic reference unknown. Credits to the author

2. Usar filtros MERV13 filters (o mejores) para el aire recirculado

- En un sistema mecánico, un filtro MERV 13 (o mejor) puede ayudar a eliminar algunas partículas del aire que se recircula a través del sistema y se redistribuye en las aulas.
- Consultar con un técnico del sistema de ventilación instalado para determinar si su sistema mecánico puede soportar la caída de presión de instalar un filtro MERV 13.
- El flujo recirculado que pasa a través de un filtro de mayor eficiencia se puede agregar al flujo de aire en los cálculos de ventilación para alcanzar el objetivo de ACH.
- Recomendamos suponer una eficiencia de filtración del 80% para los cálculos que incluyen un filtro MERV 13.

3. Añadir purificadores de aire portátiles con filtros HEPA en el aula

- Si sus sistemas mecánicos no pueden acomodar un filtro de mayor eficiencia, puede usar limpiadores de aire portátiles con filtros HEPA.
- Para elegir un filtro de aire portátil con las dimensiones correctas para el tamaño de su aula y la tasa de suministro de aire limpio para cumplir con el objetivo de ventilación, use la Calculadora de filtro de aire portátil para aulas desarrollada por el equipo de Harvard Healthy Buildings y Shelly Miller en CU Boulder (tinyurl.com/portableaircleanertool)
- El centro del aula puede ser el lugar ideal. Si esto no es posible, elija una ubicación en la que el flujo del filtro de aire portátil no sople directamente a los ocupantes.

Ejemplo 1

Ventilación mecánica centralizada con filtros MERV 13

- Paso 1.** Las dimensiones de la habitación son:
Superficie = 65 metros cuadrados // Altura = 3 m // Volumen = 195 metros cúbicos (volumen = superficie * altura)
- Paso 2.** Se confirmó que los sistemas de ventilación estaban encendidos por comprobación visual y de audio.
- Paso 3.** Se seleccionó la opción B porque la escuela tenía acceso a un balómetro y tenía un sistema de ventilación central. El balómetro se usó para medir la tasa de ventilación de aire exterior de los difusores de suministro donde el aire entra a la habitación. El sistema de ventilación central utiliza un 20% de aire exterior.
- Caudal de aire medido dentro del aula (es decir, aire exterior + aire recirculado)... .. 21.5 m³/min (21500 lpm)
 - Porcentaje de aire exterior ... 20%
 - Tasa de ventilación del aire exterior... .. 21.5 m³/min * 20% = 4.3 m³/min
 - Renovaciones de aire por hora (4.3 m³/min * 60 minutos / hora) / 195 metros cúbicos)... .. **1.3 ACH**
- Paso 4.** El ACH de 1.3 es menor que el objetivo de 5 ACH

(continuación en siguiente página)

- Step 5.** Determinar qué estrategia suplementaria de ventilación o filtración se puede seguir.
1. ¿Se puede aumentar el aire exterior?
 - a través de un mayor % de aire exterior? En este ejemplo, no.
 - a través de ventanas que se abren? En este ejemplo, no.
 2. ¿Se pueden instalar filtros MERV13 en el aire recirculado? En este ejemplo, **sí**.
 3. ¿Se necesitan limpiadores de aire portátiles con filtros HEPA? Primero determinar si los filtros MERV13 se pueden usar para cumplir con la ACH objetivo

El siguiente paso será determinar el impacto de los filtros MERV 13

Caudal de aire medido dentro del aula (es decir, aire exterior + aire recirculado)	21.5 m ³ /min
Porcentaje de aire exterior	20%
Tasa de ventilación del aire exterior	$21.5 \text{ m}^3/\text{min} * 20\% = 4.3 \text{ m}^3/\text{min}$
Tasa de ventilación de aire recirculado	$21.5 - 4.3 = 17.2 \text{ m}^3/\text{min}$
Tasa de aire recirculado limpio a través de MERV 13	$17.2 \text{ m}^3/\text{min} * 0.8 \text{ eficiencia} = 13.8 \text{ m}^3/\text{min}$
Aire exterior + aire recirculado limpio a través del filtro MERV 13	$4.3 \text{ m}^3/\text{min} + 13.8 \text{ m}^3/\text{min} = 18.1 \text{ m}^3/\text{min}$
Cambios de aire por hora (18.1 m ³ /min * 60 minutos / hora) / 195 metros cúbicos)	5.6 ACH

Esta sala ahora cumple con el objetivo de 5 ACH. No se necesita ninguna otra acción.

Ejemplo 2

Sistema de ventilación individual + ventanas abiertas

- Paso 1.** Las dimensiones de la habitación son:
Superficie = 93.8 metros cuadrados // Altura = 2.9 metros // Volumen = 272 metros cúbicos (volumen = superficie * altura)
- Paso 2.** Se confirmó que los sistemas estaban encendidos por comprobación visual y de audio.
- Paso 3.** Se seleccionó la opción A porque la escuela tenía acceso a un balómetro y el aula tenía un sistema de ventilación individual. Se realizaron las siguientes medidas de balómetro:
- Caudal de aire medido fuera del aula (es decir, suministro de aire exterior al aula)... .. 6.54 m³/min
 - Caudal de aire medido dentro del aula (es decir, aire exterior + aire recirculado)... .. 22.65 m³/min
 - Porcentaje de aire exterior que ingresa al aula ... 29%
 - Cambios de aire por hora (6.54 m³/min * 60 minutos) / 272 metros cúbicos... .. **1.4 ACH**
- Paso 4.** El ACH medido de 1.4 es menor que el objetivo de 5 ACH. Esta aula necesita ventilación y/o filtración suplementaria.
- Paso 5.** Determinar qué estrategia suplementaria de ventilación o filtración se puede seguir.
1. ¿Se puede aumentar el aire exterior?
 - a través del sistema de ventilación individual? En este ejemplo, no.
 - a través de ventanas que se abren? En este ejemplo, **SÍ**.
 2. ¿Se pueden instalar filtros MERV13 en el aire recirculado? En este ejemplo, no.
 3. ¿Se necesitan limpiadores de aire portátiles con filtros HEPA? Primero determinar si las ventanas abiertas pueden cumplir con el ACH objetivo

(continuación en siguiente página)

El siguiente paso es volver al Paso 3 y evaluar la tasa de ventilación con las ventanas abiertas usando el método de reducción de CO₂ (Opción C)

Identificar el inicio de la disminución:

$C_{start}=1794\text{ppm}$ y $t_{start}=9:16:26$

Identificar el final de la disminución:

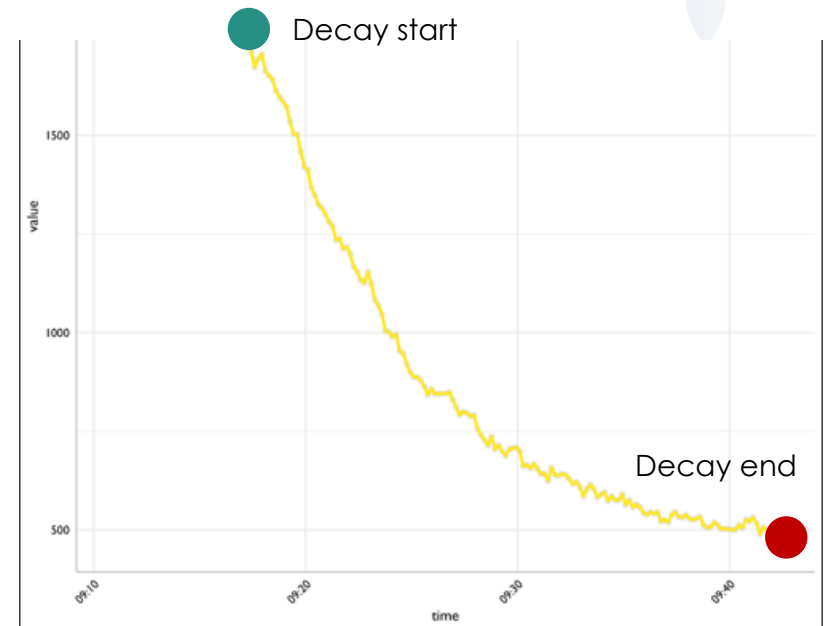
$C_{end}=475\text{ppm}$ y $t_{end}=9:42:46$

Concentración exterior: $C_{ambient}=400\text{ ppm}$

Tiempo: $t_{end}-t_{start}$ es 26 minutos y 20 segundos. En horas son $26/60 + 20/3600 = 0.4389$ horas

$$ACH = \frac{-1 * \ln\left(\frac{475\text{ ppm} - 400\text{ ppm}}{1794\text{ ppm} - 400\text{ ppm}}\right)}{0.4389\text{ horas}} = 6.7\text{ ACH}$$

6.7 ACH es mayor que el objetivo de 5 ACH. Esta aula con las ventanas abiertas cumple con la ventilación deseada. Aún se deben hacer esfuerzos para aumentar el % de aire exterior suministrado por el sistema de ventilación e instalar filtros de mayor calidad.



Ejemplo 3

Ventilación mecánica + purificador de aire portátil

- Paso 1.** Las dimensiones de la habitación son:
Superficie = 93.8 metros cuadrados // Altura = 2.9 metros // Volumen = 272 metros cúbicos (volumen = superficie * altura)
- Paso 2.** Se confirmó que los sistemas estaban encendidos por comprobación visual y de audio.
- Paso 3.** Se seleccionó la opción A porque la escuela tenía acceso a un balómetro y el aula tenía un sistema de ventilación individual. Se realizaron las siguientes medidas de balómetro:
- Caudal de aire medido fuera del aula (es decir, suministro de aire exterior al aula)... .. 11.33 m³/min
 - Caudal de aire medido dentro del aula (es decir, aire exterior + aire recirculado)... .. 22.65 m³/min
 - Porcentaje de aire exterior que ingresa al aula ... 50%
 - Cambios de aire por hora (11.33 m³/min * 60 minutos) / 272 metros cúbicos... .. **2.5 ACH**
- Paso 4.** El ACH medido de 2.5 es menor que el objetivo de 5 ACH.
- Paso 5.** Determinar qué estrategia suplementaria de ventilación o filtración se puede seguir.
1. ¿Se puede aumentar el aire exterior?
 - a través del sistema de ventilación individual? En este ejemplo, no.
 - a través de ventanas que se abren? En este ejemplo, no.
 2. ¿Se pueden instalar filtros MERV13 en el aire recirculado? En este ejemplo, no.
 3. ¿Se necesitan limpiadores de aire portátiles con filtros HEPA? En este ejemplo, **SÍ**.

(continuación en siguiente página)

El siguiente paso será determinar el tamaño correcto del purificador de aire portátil

Seleccionar el purificador de aire portátil del tamaño adecuado con esta herramienta: <https://tinyurl.com/portableaircleanertool>

- Cambios de aire necesarios para cumplir con el objetivo de ACH en este ejemplo = $5 - 2.5 = 2.5$ ACH adicional necesario
- Determinar la tasa de suministro de aire limpio (CADR) necesaria a partir del valor CADR del purificador de aire portátil requerido (las clasificaciones CADR se enumeran en la mayoría de los purificadores de aire portátiles disponibles comercialmente).
 - $2.5 \text{ ACH necesario} * 272 \text{ metros pies cúbicos} / 60 \text{ minutos} = 11.33 \text{ m}^3/\text{min}$
- **Esta aula cumplirá con el objetivo de 5 ACH si se utilizan limpiadores de aire portátiles con filtración HEPA y con un CADR total de $11.33 \text{ m}^3/\text{min}$ (equivalente a 400 cfm (cubic feet per minute)).**

Step	Question	Input	Output/Target
STEP 1: HOW BIG IS THE ROOM?	Select units of preference	feet	
	How big is your room?	400	Input your room size here in square feet
STEP 2: WHAT IS THE 'CLEAN AIR DELIVERY RATE' OF THE AIR PURIFIER?	What is the 'Clean Air Delivery Rate' of the air purifier?	300	Find the CADR from the manufacturer in units of cubic feet per minute, or cfm. If they report multiple numbers, use the one for 'best'
	How much outdoor air ventilation do you have?	2.5	Good ventilation: 3 ACH, Enhanced ventilation: 4 ACH, Typical school: 2.5 ACH, Low ventilation: 1 ACH
STEP 4: COMBINING AIR CLEANING AND VENTILATION, IS YOUR ROOM MEETING THE TARGET?	Air changes from outdoor air ventilation	2.5	TARGET IS AT LEAST 5 TOTAL AIR CHANGES PER HOUR Ideal (8 ACH), Excellent (6-8 ACH), Good (4-5 ACH), Bare minimum (3-4), Low (<3 ACH)
	Air changes from air cleaner	2.5	
STEP 5: WHAT SIZE ROOM WILL WORK FOR THIS PORTABLE AIR CLEANER?	Cubic feet per minute (cfm) of clean air from purifier	300	This is from the manufacturer (see unit list)
	Cubic feet per minute (cfm) of outdoor air from ventilation	67	This is calculated from air changes per hour and volume of room
	Total cfm of air cleaning and ventilation	367	
	Recommended room size for this air cleaner (in square feet)	367	This is the recommended maximum size of the room for this air purifier to achieve 5 total ACH

Herramienta para la selección del purificador de aire portátil adecuado:

<https://tinyurl.com/portableaircleanertool>

También disponible en:

<https://schools.forhealth.org/>

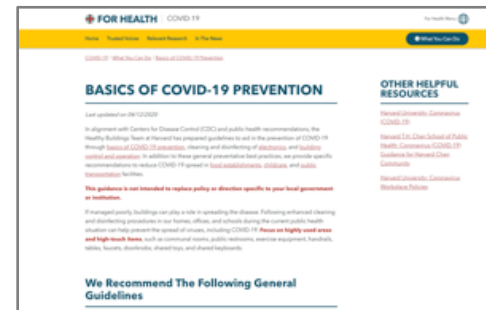
Recursos adicionales para la reapertura de
escuelas

Schools for Health

Recursos adicionales



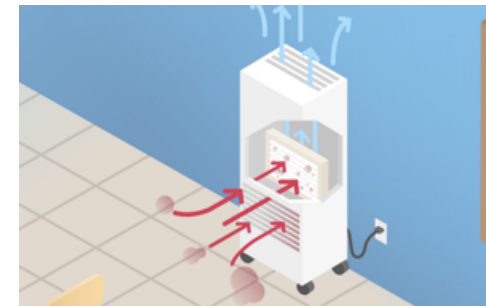
Estrategias de reducción de riesgos para la reapertura de escuelas



Cuándo abrir según la incidencia en la región



20 preguntas que todo padre debe hacer antes de enviar a sus hijos a la escuela



Herramienta para seleccionar purificadores de aire portátiles para aulas

Todos los recursos disponibles en: <https://schools.forhealth.org/>

Limitaciones

- Los valores medidos en un día reflejarán solo las condiciones experimentadas ese día, tanto dentro como fuera del edificio. La infiltración y el flujo de aire a través de las ventanas dependen en gran medida de las condiciones climáticas al aire libre, si las puertas del aula y del pasillo están abiertas y si el sistema de extracción de aire (bien sea por gravedad o mecánico) está funcionando según lo previsto.
- Abrir ventanas y puertas no es una solución permanente y no debe reemplazar los esfuerzos para garantizar que los sistemas de ventilación funcionen correctamente.
- No todas las áreas de la habitación pueden considerarse bien mezcladas. Por ejemplo, un sistema mecánico puede mezclar más eficientemente el área central de un aula y mezclar menos eficientemente las esquinas u otras áreas periféricas.
- Nuestros valores de cambios de aire objetivo por hora (ACH) (Paso 4) se basan en las densidades predeterminadas del aula, tal como se expresa en la Norma ASHRAE 62.1-2019 (25 estudiantes / 1000 pies cuadrados para niños de 5 a 8 años). Estas densidades no deben superarse no solo por una reducción efectiva de la tasa de ventilación equivalente por persona considerada en nuestros cálculos, sino también por el riesgo de transmisión de gotitas si no se conserva el distanciamiento físico recomendado.
- Limitaciones del uso de CO₂ para estimar la ventilación (Paso 3, Opción C o D):
 - Con el fin de controlar las enfermedades infecciosas, filtrar el aire recirculado con filtros de alta eficiencia (MERV 13 o mejores) o limpiadores de aire portátiles con filtros HEPA proporciona aire limpio adicional capaz de diluir los bioaerosoles. La estimación de las renovaciones de aire por hora con CO₂ solo es capaz de aproximar la tasa de suministro de aire exterior y NO tiene en cuenta ningún beneficio debido al aire filtrado. Para obtener más detalles sobre cómo combinar el flujo de aire adecuadamente filtrado, utilice nuestra calculadora de purificador de aire portátil (tinyurl.com/portableaircleanertool).
 - Los resultados son sensibles a errores debido a sensores de CO₂ mal calibrados, selección adecuada o no adecuada de los puntos de inicio y finalización de la disminución de la concentración, flujos desde o hacia otros espacios dentro del edificio, así como cambios en la tasa de ventilación durante la medición debido a cambios en las diferencias de presión dentro del edificio y en la envolvente del edificio.

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, y el usuario debe reconocer que no existe un escenario de "riesgo cero", que cada edificio y situación son únicos y algunas de las pautas contenidas en el documento no serán aplicables a todos los edificios o países fuera de los Estados Unidos.
- Además, 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, incluidos, entre otros, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, la Organización Mundial de la Salud, el Gobierno de los Estados Unidos y cualquier otro estado.
- La información contenida en este documento refleja la información disponible en el momento en que se creó el documento. El usuario reconoce que los detalles y la información cambian a diario, y la nueva información y/o los resultados de estudios futuros pueden requerir revisiones del documento (y la guía general contenida en el mismo) para reflejar nuevos datos.
- 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.