

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Propuesta de mejora de la calidad del aire interior en aulas de la Espol

INGE-3112

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Alvarado García José Naim

García Moscoso Andy Gabriel

Guayaquil – Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

Agradezco profundamente a mi familia, a mi madre Rina, mi padre Galo, mis hermanos Galito y Rinita, mi tía Nubia, mi tío Luis y mis abuelos Galo, Sonia y, desde el cielo, Clemencia, por el apoyo incondicional brindado durante toda mi formación universitaria. Su amor, paciencia y acompañamiento constante fueron fundamentales para afrontar las exigencias académicas y personales de esta etapa, y constituyeron un pilar esencial para la culminación de esta carrera universitaria.

Que este escrito pueda reflejar el profundo agradecimiento que siento desde lo más adentro de mi ser.

Con gran cariño, respeto y gratitud,

*Andy Gabriel García Moscoso*

## Dedicatoria

---

Dedico este trabajo a mis padres, por su apoyo incondicional, su paciencia y su confianza durante todo este proceso. Gracias por acompañarme en cada etapa y por enseñarme que el esfuerzo y la constancia siempre dan frutos.

A mi abuelita Odalia, quien, aun sin estar físicamente, permanece presente en cada uno de mis logros y en la persona que hoy soy.

Y a mis mascotas, en especial a Cachuflín y a todos los que han sido parte de mi vida, por su compañía silenciosa en tantas noches de esfuerzo y desvelo.

Este logro es reflejo del amor, la constancia y la fuerza que todos ustedes sembraron en mí.

*José Naim Alvarado García*

## Agradecimientos

---

Primero agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de formación profesional y por brindarme la fortaleza necesaria a lo largo de la carrera. Agradezco a mi familia por el apoyo y acompañamiento durante mi formación universitaria, los cuales fueron importantes para el desarrollo y finalización de este trabajo.

De manera especial, agradezco a mis grandes amigos y futuros colegas Teddy, Luis y Cristhian, por el compañerismo a lo largo de la carrera. Su presencia en los momentos de mayor exigencia académica hizo que las dificultades del proceso resultaran más llevaderas, y la combinación de trabajo, apoyo y risas fue clave para culminar satisfactoriamente esta etapa universitaria.

*Andy Gabriel García Moscoso*

## Agradecimientos

---

Agradezco primero a Dios, por darme fortaleza, la constancia y la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida, incluso en los momentos de mayor dificultad. Agradezco de manera especial al Dr. Soriano, a la Dra. Litardo y al Dr. Patiño, por su guía y disposición en el desarrollo de esta tesis.

Asimismo, agradezco a mis compañeros Anthony Alavera, Enrique Aguayo y Luis Lara por su compañerismo, apoyo y colaboración durante la carrera, los cuales hicieron más llevadero este proceso académico.

Finalmente, agradezco a mi familia y a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron apoyo a lo largo de este camino.

*José Naim Alvarado García*

## Declaración Expresa

---


Yo/Nosotros (nombre del o los estudiantes completos) acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.


La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 28 de enero del 2025.



Alvarado Garcia Jose  
Naim



García Moscoso Andy  
Gabriel

## **Evaluadores**

---

**Miguel Ángel Quilambaqui Jara, PhD**

Profesor de Materia

---

**Guillermo Soriano Idrovo, PhD**

Tutor de proyecto

## Resumen

En aulas universitarias con alta ocupación, la ventilación insuficiente puede generar una acumulación significativa de contaminantes en el aire interior, afectando tanto la salud como el desempeño de los estudiantes. Entre los principales indicadores de esta problemática se encuentran las elevadas concentraciones de dióxido de carbono y material particulado fino, especialmente durante jornadas académicas prolongadas. Ante esta situación, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar y mejorar la calidad del aire interior de un aula universitaria del Campus Gustavo Galindo de la ESPOL mediante el análisis y optimización de un sistema de ventilación y filtración.

El estudio se desarrolló a partir de mediciones experimentales de CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad relativa y PM<sub>2.5</sub> realizadas en condiciones reales de uso del aula. Con esta información se construyó un modelo de simulación multizonal en el software CONTAM, que permitió analizar el comportamiento del aire bajo distintos esquemas de ventilación. Se evaluaron alternativas de ventilación natural, de simple extracción y totalmente mecánica, considerando tanto el desempeño ambiental como criterios prácticos de consumo energético, costos y mantenimiento. La selección final se realizó mediante una matriz de decisión ponderada.

Los resultados obtenidos muestran que la alternativa de ventilación de simple extracción permite reducir de manera significativa las concentraciones de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, manteniéndolas dentro de rangos recomendados por normativas internacionales, sin requerir un alto consumo energético ni una inversión elevada. En conclusión, se demuestra que es posible mejorar la calidad del aire interior en aulas universitarias mediante soluciones técnicas viables, adaptadas a las condiciones locales y con un enfoque sostenible.

**Palabras clave:** calidad del aire interior, ventilación de simple extracción, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, simulación, aulas universitarias.

### ***Abstract***

*In university classrooms with high occupancy levels, insufficient ventilation often leads to the accumulation of indoor air pollutants, which can negatively affect occupants' health and learning conditions. Elevated carbon dioxide and fine particulate matter concentrations are commonly observed during long academic periods, highlighting the need for effective ventilation strategies. In this context, this thesis focuses on the evaluation and improvement of indoor air quality in a university classroom located at the Gustavo Galindo Campus of ESPOL through the analysis and optimization of a ventilation and filtration system.*

*The study was based on experimental measurements of carbon dioxide, temperature, relative humidity, and PM<sub>2.5</sub> under real operating conditions. Using this data, a multizone airflow model was developed in CONTAM to simulate different ventilation scenarios. Natural, hybrid, and fully mechanical ventilation alternatives were assessed, considering indoor air quality performance, energy consumption, implementation cost, and maintenance requirements. A weighted decision matrix was applied to identify the most suitable option.*

*The results indicate that the proposed hybrid ventilation system significantly reduces CO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations, keeping them within internationally recommended limits while maintaining moderate energy use and reasonable installation costs. These findings demonstrate that practical and technically sound solutions can effectively improve indoor air quality in university classrooms, contributing to healthier educational environments.*

***Keywords:*** *indoor air quality, hybrid ventilation, carbon dioxide, PM<sub>2.5</sub>, simulation, university classrooms.*

## Índice general

Resumen .....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	VI
Simbología .....	VII
Índice de figuras .....	VIII
Índice de tablas .....	IX
Capítulo 1 .....	1
1.    Introducción .....	2
1.1    Descripción del Problema.....	3
1.2    Justificación del Problema.....	3
1.3    Objetivos.....	4
1.3.1    Objetivo general .....	4
1.3.2    Objetivos específicos.....	4
1.4    Marco teórico.....	4
1.4.1    Calidad del aire interior (IAQ) y contaminantes relevantes.....	4
1.4.2    Contaminantes atmosféricos y material particulado .....	7
1.4.3    Normativas y estándares aplicables.....	8
1.4.4    Sistemas de ventilación .....	10
1.4.5    Tecnología aplicada para la mejora de calidad de aire.....	12
1.4.6    Software de simulación de sistemas de ventilación .....	13
1.4.7    Sistemas de filtración .....	15
Capítulo 2 .....	17
2.    Metodología. ....	18
2.1    Metodología de diseño.....	18

2.2	Requerimientos de diseño del proyecto.....	20
2.2.1	Normativas aplicadas .....	20
2.2.2	Condiciones iniciales de diseño del edificio y aulas de estudio.....	21
2.3	Factores de influencia en el estudio.....	22
2.4	Alternativas de solución .....	24
2.5	Criterios de diseño .....	27
2.6	Matriz de decisión .....	28
2.7	Diseño detallado .....	31
2.7.1	Renovación de aire por hora (ACH) .....	31
2.7.2	Caudal requerido según número de ocupantes.....	31
2.7.3	Balance general de contaminantes en una zona (modelo de mezcla) .....	32
2.7.4	Generación de CO <sub>2</sub> por ocupación.....	32
2.7.5	Modelo de infiltración (ventanas, puertas y fisuras).....	33
2.7.6	Modelo de depósito de partículas (PM <sub>2.5</sub> ) .....	33
2.7.7	Eficiencia de filtración (filtros MERV) .....	34
Capítulo 3	.....	35
3.	Resultados y análisis. ....	36
3.1	Análisis de monitoreo del aire interior y exterior.....	36
3.2	Resultados del modelado del aula en CONTAM .....	39
3.2.1	Valores calculados utilizados en la simulación.....	39
3.2.2	Simulación de la línea base .....	40
3.2.3	Simulación del escenario propuesto (ventilación por simple extracción).....	41
3.2.4	Comportamiento del caudal y la presión en el sistema .....	44
3.2.5	Comparación de resultados entre escenarios.....	45
3.3	Resultados del diseño del sistema de ventilación .....	46
3.3.1	Parámetros técnicos del sistema de ventilación .....	47
3.3.2	Selección de ventilador .....	48

3.3.3	Rejilla de retorno .....	50
3.3.4	Filtros .....	51
3.4	Resultados de la evaluación energética .....	52
3.4.1	Consumo eléctrico estimado .....	53
3.5	Presupuesto del sistema .....	54
Capítulo 4	.....	56
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	57
4.1.1	Conclusiones .....	57
4.1.2	Recomendaciones .....	58
Referencias	.....	60
Apéndice A	.....	64
Apéndice B	.....	66
Apéndice C	.....	67
Apéndice D	.....	68
Apéndice E	.....	69
Apéndice F	.....	70

### Abreviaturas

ACH	Air Changes per Hour (renovaciones de aire por hora)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAE	Calidad del Aire Exterior
CAI	Calidad del Aire Interior
CFD	Computational Fluid Dynamics (dinámica de fluidos computacional)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONTAM	Software de simulación multizona de flujo de aire y contaminantes (NIST)
EPA	Environmental Protection Agency
ESP	Presión Estática Externa
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IAQ	Indoor Air Quality (calidad del aire interior)
ISO	International Organization for Standardization
MERV	Minimum Efficiency Reporting Value
NEC-HS-CL	Norma Ecuatoriana de la Construcción – Higiene, Salud y Confort Lumínico
NIST	National Institute of Standards and Technology
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM	Material particulado
PM <sub>2.5</sub>	Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 µm
PM <sub>10</sub>	Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm
RH	Relative Humidity (humedad relativa)
SFP	Specific Fan Power (potencia específica del ventilador)
UMA	Unidad Manejadora de Aire

## Simbología

A	Área de apertura o fuga ( $m^2$ )
ACH	Tasa de renovación de aire por hora ( $h^{-1}$ )
C	Coefficiente de flujo en la ecuación general de flujo (–)
C(t)	Concentración del contaminante en el interior del recinto (ppm o $\mu g/m^3$ )
C <sub>in</sub>	Concentración del contaminante en el aire entrante (ppm o $\mu g/m^3$ )
C <sub>filtered</sub>	Concentración del contaminante después del proceso de filtración (ppm o $\mu g/m^3$ )
C <sub>d</sub>	Coefficiente de descarga de una abertura (–)
$\Delta CO_2$	Incremento de concentración de $CO_2$ respecto al nivel exterior (ppm)
$\Delta P$	Diferencia de presión (Pa)
G	Tasa total de generación de $CO_2$ (L/s)
G <sub>per</sub>	Tasa de generación de $CO_2$ por persona (L/(s·persona))
k <sub>d</sub>	Coefficiente de deposición de partículas ( $h^{-1}$ )
m	Flujo másico de aire (kg/s)
n	Exponente de flujo en la ecuación general de flujo (–)
N	Número de ocupantes (–)
P	Presión (Pa)
Q	Caudal volumétrico de aire ( $m^3/h$ o $m^3/s$ )
Q <sub>in</sub>	Caudal de aire entrante ( $m^3/s$ )
Q <sub>out</sub>	Caudal de aire saliente ( $m^3/s$ )
Q <sub>sim</sub>	Caudal obtenido mediante simulación en CONTAM ( $m^3/h$ )
R(t)	Tasa de remoción de contaminante por deposición o filtración (kg/s)
RH	Humedad relativa (%)
SFP	Potencia específica del ventilador (W/( $m^3/s$ ))
t	Tiempo (s)
T	Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )
v	Velocidad media del aire (m/s)
V	Volumen del recinto ( $m^3$ )
$\eta$	Eficiencia del filtro (–)
$\rho$	Densidad del aire (kg/m)

## Índice de figuras

Figura 1. <i>Fuentes de material particulado en aulas universitarias [Elaboración propia]</i> .....	7
Figura 2. <i>Tipos de ventilación [Elaboración propia]</i> .....	11
Figura 3. <i>Diagrama de flujo metodología del proyecto. Autoría propia [Elaboración propia]</i> ..	20
Figura 4. <i>Aula A206 durante un periodo típico de ocupación y ubicación de los sensores de CO2 y PM2.5</i> .....	22
Figura 5. <i>Propuesta 1: Esquema de ventilación natural por efecto chimenea mediante rejillas</i> .	25
Figura 6. <i>Propuesta 2: Esquema del sistema de ventilación de simple extracción con extracción mecánica y entrada natural de aire</i> .....	26
Figura 7. <i>Propuesta 3: Esquema del sistema de ventilación mecánica por inyección y extracción forzada de aire</i> .....	27
Figura 8. <i>Variación temporal de la concentración de CO2 obtenida en los sensores para el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]</i> .....	36
Figura 9. <i>Variación temporal de la concentración de PM2.5 interior y exterior obtenida en los sensores para el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]</i> .....	38
Figura 10. <i>Variación temporal de la concentración de CO2 obtenida mediante simulación en CONTAM para el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]</i> .....	40
Figura 11. <i>Variación temporal de la concentración de PM2.5 simulada en el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]</i> .....	41
Figura 12. <i>Variación temporal de la concentración de CO2 simulada en el aula A206 con el sistema de ventilación seleccionado [Elaboración propia]</i> .....	42
Figura 13. <i>Variación temporal de la concentración de PM2.5 simulada en el aula A206 con el sistema de ventilación seleccionado [Elaboración propia]</i> .....	43
Figura 14. <i>Caudal y diferencia de presión en la rejilla durante la simulación [Elaboración propia]</i> .....	44
Figura 15. <i>Caudal y diferencia de presión en el ventilador durante la simulación [Elaboración propia]</i> .....	45

## Índice de tablas

Tabla 1. <i>Agentes contaminantes relevantes para aulas universitarias [Elaboración propia]</i> .....	6
Tabla 2. <i>Clasificación de la calidad del aire interior según la norma ISO 17772-1:2017</i> .....	8
Tabla 3. <i>Tasas mínimas de ventilación recomendadas por la norma ASHRAE 62.1-2022</i> .....	9
Tabla 4. <i>Límite de CO2 sobre el exterior para alta ocupación</i> .....	9
Tabla 5. <i>Límite de CO2 sobre el exterior para alta ocupación</i> .....	10
Tabla 6. <i>Clases mínimas de filtración por categoría</i> .....	10
Tabla 7. <i>Comparación de herramientas para el análisis de dispersión de contaminantes y ventilación. [Elaboración propia]</i> .....	14
Tabla 8. <i>Resumen de sensores utilizados en el estudio</i> .....	18
Tabla 9. <i>Factores de influencia del proyecto [Elaboración propia]</i> .....	23
Tabla 10. <i>Parámetros iniciales y requerimientos de diseño [Elaboración propia]</i> .....	24
Tabla 11. <i>Criterios y ponderaciones para realizar la matriz de decisión [Elaboración propia]</i> .	28
Tabla 12. <i>Matriz de decisión [Elaboración propia]</i> .....	29
Tabla 13. <i>Matriz de decisión final con valores ponderados [Elaboración propia]</i> .....	30
Tabla 14. <i>Concentraciones de CO2 medidas en el aula A206 durante ocupación (08:00 – 17:00) [Elaboración propia]</i> .....	36
Tabla 15. <i>Concentraciones de PM2.5 medidas en el aula A206 durante ocupación (08:00 – 17:00) [Elaboración propia]</i> .....	37
Tabla 16. <i>Valores calculados utilizados en la simulación del aula A206 [Elaboración propia]</i> .	39
Tabla 17. <i>Concentraciones de resultados entre escenarios simulados (08:00 – 17:00) [Elaboración propia]</i> .....	46
Tabla 18. <i>Síntesis de parámetros finales de diseño [Elaboración propia]</i> .....	47
Tabla 19. <i>Parámetros de ventiladores [Elaboración propia]</i> .....	49
Tabla 20. <i>Parámetros de rejilla [Elaboración propia]</i> .....	50
Tabla 21. <i>Parámetros del filtro [Elaboración propia]</i> .....	51
Tabla 22. <i>Consumo eléctrico del diseño [Elaboración propia]</i> .....	54
Tabla 23. <i>Costos de implementación del sistema de ventilación de simple extracción [Elaboración propia]</i> .....	55

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El edificio de Admisiones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), las aulas presentan una alta densidad de ocupación y utilizan equipos de climatización tipo *split* que controlan la temperatura, pero no permiten la entrada de aire exterior ni garantizan una adecuada renovación del aire interior. Esta condición ha generado una acumulación progresiva de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) durante las jornadas académicas, afectando el confort térmico, la concentración y la salud de los estudiantes. Ante esta problemática, se propone una mejora de la calidad del aire interior mediante la incorporación de un sistema de ventilación y filtración adaptado a las características arquitectónicas y climáticas del campus.

La calidad del aire interior (IAQ, por sus siglas en inglés) es un factor clave para el diseño y funcionamiento de los edificios educativos donde muchas personas permanecen durante largos periodos de tiempo. La alta ocupación y la escasa renovación del aire favorecen la acumulación de contaminantes como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) (Álvarez, 2022). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), una exposición prolongada a concentraciones de PM<sub>2.5</sub> superiores a 15 µg/m<sup>3</sup> representa un riesgo para el sistema respiratorio. Además, cuando el CO<sub>2</sub> supera las 1000 ppm, se ha observado una disminución en la atención y el rendimiento cognitivo (Na et al., 2023).

Las normas internacionales de construcción y acondicionamiento ambiental, emitidas por entidades como la ASHRAE y la Organización Internacional de Normalización (ISO), establecen los parámetros necesarios para asegurar una adecuada calidad del aire interior y condiciones de confort térmico. La ASHRAE 62.1-2022 determina los requisitos mínimos de ventilación, mientras que la ASHRAE 52.2 y la ISO 16890 clasifican los filtros de aire de acuerdo con su eficiencia en la retención de partículas. En el ámbito nacional, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-HS-CL, 2020) regula los criterios de ventilación y filtración que deben cumplirse en edificaciones de uso educativo.

## 1.1 Descripción del Problema

El edificio de Admisiones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) dispone de aulas climatizadas mediante sistemas tipo split, los cuales controlan la temperatura, pero no incorporan aire exterior ni garantizan la renovación del aire interior. Esta condición favorece la acumulación de contaminantes y deteriora la calidad del aire, afectando el confort y la salud de los estudiantes.

Entre el 7 y el 11 de julio de 2025, en el horario de 08h00 a 17h00, se realizó un monitoreo en el aula A206, registrándose concentraciones de  $PM_{2.5}$  cercanos a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , superando el límite de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  recomendado por la OMS (2021), así como incrementos de  $CO_2$  cercanos a 5000 ppm durante los periodos de ocupación, muy por encima de los umbrales recomendados. Como se muestra en la Figura 4, la alta densidad de estudiantes y la ausencia de ventilación mecánica controlada propician estas condiciones, lo que motivó la selección de este espacio como caso de estudio.

## 1.2 Justificación del Problema

El diseño de un sistema de ventilación y filtración en las aulas del edificio de Admisiones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) permite mantener una adecuada calidad del aire interior y condiciones de confort térmico. La insuficiente ventilación actual provoca la acumulación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ), afectando la salud y el rendimiento académico de los estudiantes (Shabunko et al., 2025).

El proyecto busca implementar un sistema que incorpore aire exterior y filtración eficiente conforme a los estándares de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2020) y la ISO 16890, garantizando el control de contaminantes en los espacios interiores y contribuyendo al bienestar de los estudiantes.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema de ventilación y filtración para las aulas del edificio de Admisiones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), mediante la aplicación de normas y estándares de ingeniería, con el fin de garantizar un ambiente seguro.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Determinar los parámetros actuales de calidad del aire interior en las aulas del edificio de Admisiones de la ESPOL mediante la medición de niveles de CO<sub>2</sub> y material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) para definir los criterios de diseño del sistema de ventilación.
2. Diagnosticar las condiciones ambientales y de ocupación de las aulas para establecer los parámetros de diseño del sistema de ventilación y filtración conforme a las normativas de calidad del aire aplicables.
3. Validar la línea de calidad del aire interior mediante la replicación en CONTAM 3.4.0.6 de los niveles medidos y evaluar el desempeño del sistema de ventilación para obtener datos de caudal, volumen y concentración de contaminantes.
4. Estimar el presupuesto económico del sistema propuesto mediante el cálculo de costos de materiales y equipos requeridos para su implementación.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Calidad del aire interior (IAQ) y contaminantes relevantes**

La calidad del aire interior (IAQ, *indoor Air Quality*) describe el grado en que el aire de un espacio cerrado resulta saludable y confortable para sus ocupantes. En ambientes educativos, la alta densidad de personas y los periodos prolongados de ocupación favorecen a la acumulación de contaminantes cuando la ventilación es insuficiente o que no exista una filtración efectiva (Paute

Maldonado,2024). Existe indicadores para la calidad de aire, entre ellos la más utilizada es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), como trazador de ventilación y bioefluentes humanos (Fernández Lobo,2019). Y el material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$ ), asociado a fuentes externas (tránsito, polvo urbano) e internas (resuspensión por movimiento, limpieza y actividad en el aula) (Mendell et al., 2024).

De acuerdo con la norma ASHRAE 62.1-2022 de la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), la calidad del aire interior aceptable se alcanza cuando las concentraciones de contaminantes se mantienen dentro de los límites recomendados y se proveen tasas de ventilación de aire exterior suficientes para diluir los bioefluentes de los ocupantes y otras fuentes internas. Estos criterios se aplican considerando el tipo de espacio, la densidad de ocupación y la actividad metabólica, y se alinean con lineamientos locales como la NEC-HS-CL (2020) para el diseño y operación de sistemas de ventilación y climatización en edificaciones educativas.

Además de estos dos contaminantes principales, existen otros compuestos presentes en el ambiente interior que pueden afectar la salud o el confort térmico, como los compuestos volátiles (COV), el ozono ( $\text{O}_3$ ) y las partículas gruesas ( $\text{PM}_{10}$ ). La Tabla 1 resume los principales agentes contaminantes relevantes para el contexto educativo.

**Tabla 1.***Agentes contaminantes relevantes para aulas universitarias [Elaboración propia]*

Contaminante	Descripción	Fuente predominante en aulas	Efectos en la salud / confort	Tipo de documento
CO <sub>2</sub>	Gas indicador de ventilación insuficiente, producto de la respiración humana.	Ocupación humana (bioefluentes).	Fatiga y somnolencia	ASHRAE 62.1 - 2022
PM <sub>2.5</sub>	Partículas finas ≤ 2.5 μm con alta capacidad de penetración respiratoria.	Infiltración exterior y resuspensión interna.	Irritación respiratoria, efectos cardiovasculares, agravamiento de asma.	OMS (2021)
PM <sub>10</sub>	Partículas gruesas (2.5–10 μm).	Polvo de pisos, materiales, ingreso por puertas y ventanas.	Molestias respiratorias, irritación nasal.	OMS (2021)
COV	Vapores emitidos por materiales, pinturas y productos de limpieza.	Mobiliario, adhesivos, limpieza.	Irritación ocular, cefalea, efectos crónicos.	EPA (2022)
O <sub>3</sub>	Gas oxidante proveniente de equipos eléctricos o infiltración exterior.	Impresoras, equipos electrónicos.	Irritación de vías respiratorias.	OMS (2021)

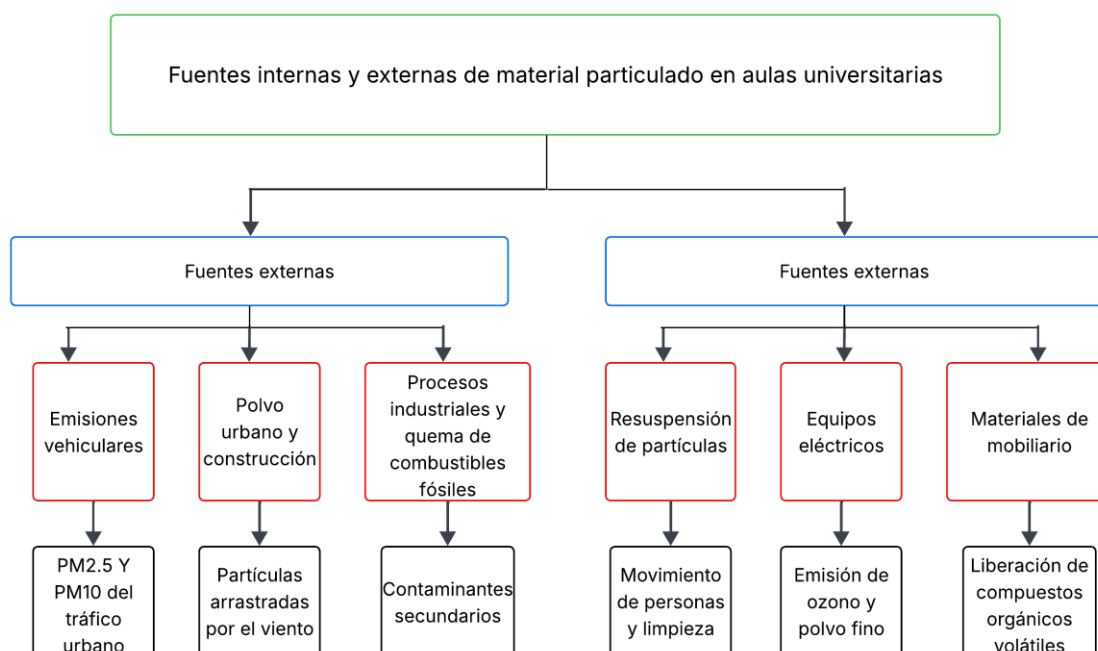
### 1.4.2 Contaminantes atmosféricos y material particulado

El material particulado (PM) es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, consideradas uno de los principales contaminantes que afectan la calidad del aire interior y exterior. Se clasifica principalmente en  $PM_{10}$  (diámetro  $\leq 10 \mu m$ ) y  $PM_{2.5}$  (diámetro  $\leq 2.5 \mu m$ ), siendo estas últimas las más peligrosas por su capacidad de penetrar en los alvéolos pulmonares e ingresar al torrente sanguíneo (OMS, 2021).

En entornos educativos, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  provenientes de fuentes externas, como emisiones vehiculares, polvo urbano e infiltración de aire exterior, y de fuentes internas, como la resuspensión de partículas por movimiento de personas, limpieza o ventilación deficiente (Benabd et al., 2022).

**Figura 1.**

*Fuentes de material particulado en aulas universitarias [Elaboración propia]*



La resuspensión ocurre cuando partículas previamente depositadas en superficies son levantadas nuevamente al aire por acción mecánica o flujos de ventilación.

La OMS (2021) establece límites de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio diario) y  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio anual) para el  $\text{PM}_{2.5}$ . Pero, en ciudades como Guayaquil, los valores exteriores pueden alcanzar  $35\text{--}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que incrementa el riesgo de infiltración en espacios interiores (OMS, 2021).

### 1.4.3 Normativas y estándares aplicables

El diseño y evaluación de la calidad del aire interior (IAQ, *indoor Air Quality*) en edificaciones educativas requiere basarse en normas que garanticen condiciones seguras para los ocupantes. Según Khovalyg et al. (2020), los estándares internacionales como ISO 17772-1 y ASHRAE 62.1 son utilizados para definir los parámetros de ventilación, concentración de  $\text{CO}_2$  y control de contaminantes en ambientes interiores.

**Tabla 2.**

*Clasificación de la calidad del aire interior según la norma ISO 17772-1:2017*

Categoría	$\text{CO}_2$ sobre nivel exterior (ppm)	Tasa mínima de aire exterior (L/s . persona)	Nivel de calidad del aire
I	350-550	3.5	Excelente
II	550-800	2.5	Buena
III	800-1000	12	Aceptable
IV	> 1000	1.8	Deficiente

*Nota.* Fuente: Norma ISO 17772-1:2017; Khovalyg et al. (2020).

**Tabla 3.**

*Tasas mínimas de ventilación recomendadas por la norma ASHRAE 62.1-2022*

Tipo de espacio	Tasa mínima de aire exterior (L/s . persona)	CO <sub>2</sub> máximo recomendado (ppm sobre exterior)
Aulas / Salones	4.2	~1000
Auditorios	2.7	~1000

*Nota.* Fuente: ASHRAE 62.1-2022; Khovalyg et al. (2020).

Además, el NEC establece para locales de alta ocupación (p.ej., auditorios, salas de clases con mucha densidad), el límite se expresa como incremento sobre el CO<sub>2</sub> exterior. A nivel del mar:

- CAI 1: 350 ppm sobre exterior
- CAI 2 (aulas): 500 ppm sobre exterior
- CAI 3 (auditorios): 800 ppm sobre exterior

**Tabla 4.**

*Límite de CO<sub>2</sub> sobre el exterior para alta ocupación*

Categoría CAI	CO <sub>2</sub> sobre nivel exterior (ppm)
CAI 2 (aulas)	500
CAI 3 (auditorios)	800

*Nota.* Fuente: NEC-HS-CL (2020, Tabla 4)

Para la selección de filtros depende de la calidad del aire exterior (CAE) por localización (rural, pueblo, ciudad) y la categoría interior CAI del local. Para entornos urbanos (campus en ciudad), los rangos referenciales de PM y gases se usan para dimensionar filtración. La clase mínima de filtración por CAI es:

- CAI 1: F9 (MERV 16)
- CAI 2 (aulas): F8 (MERV 14)
- CAI 3 (auditorios): F7 (MERV 13)
- CAI 4: F5 (MERV 10)

**Tabla 5.**

*Límite de CO<sub>2</sub> sobre el exterior para alta ocupación*

Categoría CAI	CO <sub>2</sub> sobre nivel exterior (ppm)
CAI 2 (aulas)	500
CAI 3 (auditorios)	800

*Nota.* Fuente: NEC-HS-CL (2020, Tabla 4)

**Tabla 6.**

*Clases mínimas de filtración por categoría*

Categoría CAI	Clase mínima	Equivalente MERV	Observaciones
CAI 2 (aulas)	F8	14	Prefiltrado recomendado (p. ej. F7 + F8); filtros finales después del tratamiento.
CAI 3 (auditorios)	F7	13	Prefiltrado según CAE; verificar con PM exterior del sitio.

*Nota.* Fuente: NEC-HS-CL (2020, Tabla 6)

#### **1.4.4 Sistemas de ventilación**

En el estudio de Tognon et al. (2023) se resalta la importancia de los sistemas de ventilación en la mejora de la calidad del aire interior. La ventilación se define como el proceso de movimiento, renovación y distribución del aire en espacios cerrados, cuyo fin es reducir la concentración de contaminantes y asegurar condiciones de confort térmico y ambiental mediante

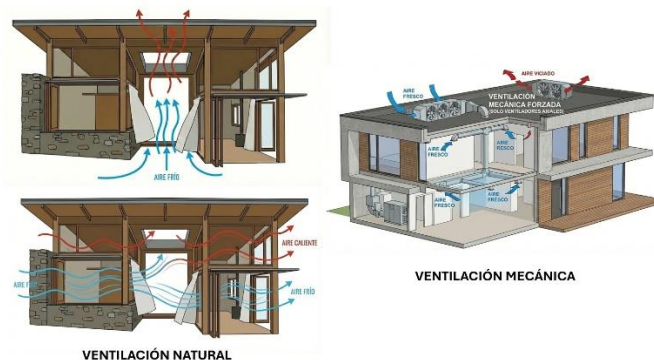
el control de temperatura y humedad. La seguridad y bienestar de los ocupantes dependen directamente del suministro de aire limpio y tratado. En este contexto, la ventilación implica la introducción controlada de aire exterior, preferiblemente natural y libre de impurezas, para diluir o eliminar los agentes nocivos del ambiente interior, manteniendo sus concentraciones por debajo de los límites permitidos por normas nacionales e internacionales.

Según Maggi (2020), la ventilación se clasifica en vertical, horizontal, natural y mecánica o forzada. Cada tipo responde a condiciones ambientales y funcionales específicas, por lo que la elección adecuada depende de variables como la geometría del recinto, la densidad de ocupación y la dirección del flujo de aire.

La ventilación horizontal se utiliza en espacios con aberturas opuestas que permiten el paso transversal del aire. La vertical aprovecha la diferencia de presión entre zonas de distinta altura para generar flujos ascendentes o descendentes. En la ventilación natural, el intercambio ocurre por puertas, ventanas o rejillas, diluyendo los contaminantes sin equipos mecánicos. Por último, la ventilación forzada o mecánica emplea ventiladores, extractores o unidades manejadoras de aire (UMA) para inducir el movimiento del aire, renovando el ambiente y permitiendo además procesos de filtración, calefacción, enfriamiento o deshumidificación, según las condiciones de diseño y los requerimientos normativos.

## Figura 2.

*Tipos de ventilación [Elaboración propia]*



Según Litiu (2012), los sistemas de ventilación mecánica se dividen en cuatro tipos principales, cuya selección depende del propósito funcional del sistema y de las condiciones climáticas del entorno. La ventilación por suministro introduce aire fresco desde el exterior mediante ventiladores o sopladores, generando una ligera presión positiva que evita la infiltración de aire no tratado. El flujo atraviesa filtros que retienen partículas y contaminantes, por lo que se emplea en espacios que demandan alta pureza, como laboratorios o áreas hospitalarias.

La ventilación por extracción elimina el aire contaminado del recinto mediante la creación de una presión negativa que favorece su salida al exterior. Este sistema utiliza extractores ubicados en puntos estratégicos donde se acumulan los contaminantes, siendo común en cocinas, talleres y laboratorios.

La ventilación equilibrada combina el suministro y la extracción de aire para mantener una presión interna neutra, garantizando una renovación continua mediante ventiladores de impulsión y extracción con tomas y rejillas distribuidas estratégicamente.

Finalmente, la ventilación con recuperación de calor incorpora un intercambiador térmico que transfiere energía del aire extraído al aire fresco de admisión sin mezclarlas, reduciendo la carga térmica del sistema HVAC y aumentando su eficiencia energética mediante intercambiadores de flujo cruzado o contracorriente.

#### **1.4.5 Tecnología aplicada para la mejora de calidad de aire**

De acuerdo con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, 2017), los ventiladores son los dispositivos fundamentales para generar el movimiento controlado del aire, facilitando su distribución, extracción o acondicionamiento según las necesidades del sistema.

Los ventiladores axiales dirigen el flujo de aire de forma paralela al eje del impulsor, funcionando de manera similar a una hélice. Se emplean en sistemas que requieren grandes caudales y bajas presiones, como la ventilación de espacios amplios, extractores de pared,

condensadores o sistemas de refrigeración. Sus principales variantes son de tipo helicoidales, tubos y paletas axiales, se diferencian por el diseño geométrico de las palas y su rendimiento aerodinámico.

Los ventiladores centrífugos o radiales desvían el flujo de aire en un ángulo de  $90^\circ$  respecto al eje de entrada, generando presión mediante la fuerza centrífuga del rodete. Alcanzan mayores presiones estáticas que los axiales y se utilizan en sistemas HVAC, cabinas de pintura, laboratorios y procesos industriales con pérdidas por ductería. Según la curvatura de sus palas, pueden ser curvados hacia adelante, hacia atrás o radiales.

Los ventiladores de flujo mixto combinan características de los axiales y centrífugos, desplazando el aire con componentes tanto axiales como radiales. Ofrecen un equilibrio entre caudal y presión, por lo que son comunes en unidades manejadoras de aire, túneles de viento y equipos compactos donde el espacio de instalación es limitado.

Por último, los ventiladores de flujo cruzado introducen el aire radialmente hacia el interior del rodete y lo descargan también de forma radial a lo largo de su ancho, generando un flujo uniforme y extendido. Se emplean en equipos de aire acondicionado, cortinas de aire, intercambiadores de calor y sistemas electrónicos que requieren una distribución homogénea del flujo.

#### **1.4.6 Software de simulación de sistemas de ventilación**

El uso de herramientas de simulación se ha vuelto fundamental en el diseño de sistemas de ventilación y climatización, ya que permiten predecir el comportamiento del aire antes de la instalación, optimizando costos y eficiencia. Estas plataformas posibilitan analizar la velocidad y dirección del flujo, el intercambio de masa y energía, y la distribución de contaminantes para garantizar condiciones adecuadas de confort y salubridad.

Entre las más empleadas destacan EnergyPlus, TRNSYS, OpenFOAM, Fluent y CONTAM, que utilizan distintos enfoques numéricos. Los programas basados en dinámica de

fluidos computacional (CFD) ofrecen alta precisión, mientras que los modelos multizona, como CONTAM, representan una alternativa más ligera al modelar edificaciones completas mediante el equilibrio de presiones entre zonas (NIST, 2020).

**Tabla 7.**

*Comparación de herramientas para el análisis de dispersión de contaminantes y ventilación.  
[Elaboración propia]*

Software	Tipo de modelo	Capacidades principales	Ventajas	Limitaciones
CONTAM (NIST)	Multizona	Flujos de aire, infiltración, exfiltración, ventilación mecánica y natural, dispersión de CO <sub>2</sub> y PM <sub>2.5</sub> , emisiones, resuspensión.	Ligero, rápido, ideal para edificios completos; amplias bases normativas; validado por literatura.	No resuelve dinámica de fluidos 3D; no modela turbulencias detalladas.
EnergyPlus	Multizona + dinámica térmica	Balance térmico, cargas HVAC, infiltración, ventilación y desempeño energético.	Excelente para análisis energético y cargas de ventilación.	Modelado de contaminantes limitado frente a CONTAM.
OpenFOAM / ANSYS Fluent (CFD)	CFD 3D	Campos de velocidad, turbulencia, trayectorias de partículas, aerosolización fina.	Altísima resolución; representa fenómenos locales con detalle.	Muy demandante computacionalmente; requiere mallado y mayor experticia.

TRNSYS	Simulación energética modular	Modelos térmicos, sistemas HVAC, ventilación.	Flexible y modular.	La dispersión de contaminantes es menos específica que CONTAM.
--------	-------------------------------	---	---------------------	--

### 1.4.7 Sistemas de filtración

La filtración del aire se define como el proceso de separación y retención de contaminantes suspendidos en el flujo de aire, tales como aerosoles, partículas sólidas y microorganismos, mediante el uso de medios filtrantes porosos o de fibras sintéticas que actúan como barreras físicas o electrostáticas. Su propósito principal es preservar la calidad del aire interior (IAQ), reducir los riesgos asociados a la exposición a agentes nocivos y asegurar el rendimiento óptimo de los sistemas de ventilación y climatización. De acuerdo con Liu et al. (2017), los sistemas de filtración constituyen un componente esencial dentro de la ventilación mecánica, ya que posibilitan la eliminación de contaminantes del ambiente interior y contribuyen significativamente a prevenir el deterioro de las condiciones ambientales en espacios confinados.

#### Tipos de sistemas de filtración

Según Liu et al. (2017), las tecnologías de filtración se dividen en tres grupos: filtros por etapas, filtros clasificados por eficiencia MERV y filtros de nueva generación. Esta clasificación facilita elegir el nivel de filtración según el tipo de recinto.

Los filtros MERV, definidos en ASHRAE 52.2, permiten comparar la eficiencia del medio filtrante. Estudios como Zhao, Liu y Wang (2024) muestran que un MERV 13 reduce el PM<sub>2.5</sub> mucho más que un MERV 6, y Gessner Filtration (2024) recomienda MERV 11 o 13 para uso residencial y comercial. Los filtros de nueva generación incorporan nanofibras o materiales híbridos que capturan partículas ultrafinas con menor pérdida de carga.

La NEC-HS-CL (MIDUVI, 2020) relaciona la calidad del aire interior (CAI) y exterior (CAE) para definir las etapas de filtración requeridas mediante las clases EEG y sus equivalentes MERV. Espacios de alta demanda sanitaria pueden requerir filtros F9 (MERV 16), mientras que oficinas y aulas suelen emplear combinaciones F5–F6 (MERV 10–11).

## Capítulo 2

## 2. METODOLOGÍA.

### 2.1 Metodología de diseño

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque analítico y experimental orientado al diseño y simulación de un sistema de ventilación y filtración para mejorar la calidad del aire en las aulas del edificio de Admisiones de la ESPOL. La metodología combinó análisis normativo, modelado computacional y evaluación de alternativas técnicas.

En la primera fase se realizó el levantamiento de información del aula, registrando dimensiones, materiales, área de fuga en ventanas y puertas, número de ocupantes y condiciones climáticas locales. Este diagnóstico permitió establecer la situación actual de ventilación y las limitaciones del sistema de aire acondicionado, el cual no aporta aire exterior.

Como parte del diagnóstico se obtuvieron datos reales de calidad del aire interior y exterior mediante sensores. Para, temperatura y humedad se utilizó el Testo 160 IAQ, y para interior el Dylos DC1700. Las concentraciones exteriores de PM 2.5 se obtuvieron del sensor PurpleAir más cercano. Estos datos permitieron definir las condiciones iniciales para la simulación en CONTAM.

**Tabla 8.**

*Resumen de sensores utilizados en el estudio*

Sensor	Variable medida	Rango	Precisión	Uso
Testo 160 IAQ	CO <sub>2</sub>	0 – 5000 ppm	±(50 ppm + 3% m.v.)	Interior
	Temperatura	0 – 50 °C	±0.5 °C	
	Humedad relativa	0 – 100 %RH	±2 %RH (20-80 %RH)	
Dylos DC1700	PM <sub>2.5</sub>	0 – 500 µg/m <sup>3</sup>	Error ±10 %	Interior
PurpleAir PA-II	PM <sub>2.5</sub>	0 – 500 µg/m <sup>3</sup>	Error ±10 %	Exterior

La información recopilada permitió identificar las variables determinantes del estudio, entre ellas la tasa de renovación de aire (ACH), la concentración de CO<sub>2</sub>, la temperatura, la humedad relativa y los niveles de PM<sub>2.5</sub>. Estas variables se utilizaron como parámetros de diseño

y validación. A partir de su análisis se formularon los requerimientos técnicos con base en ASHRAE 62.1, NEC-HS-CL e ISO 16890:2016.

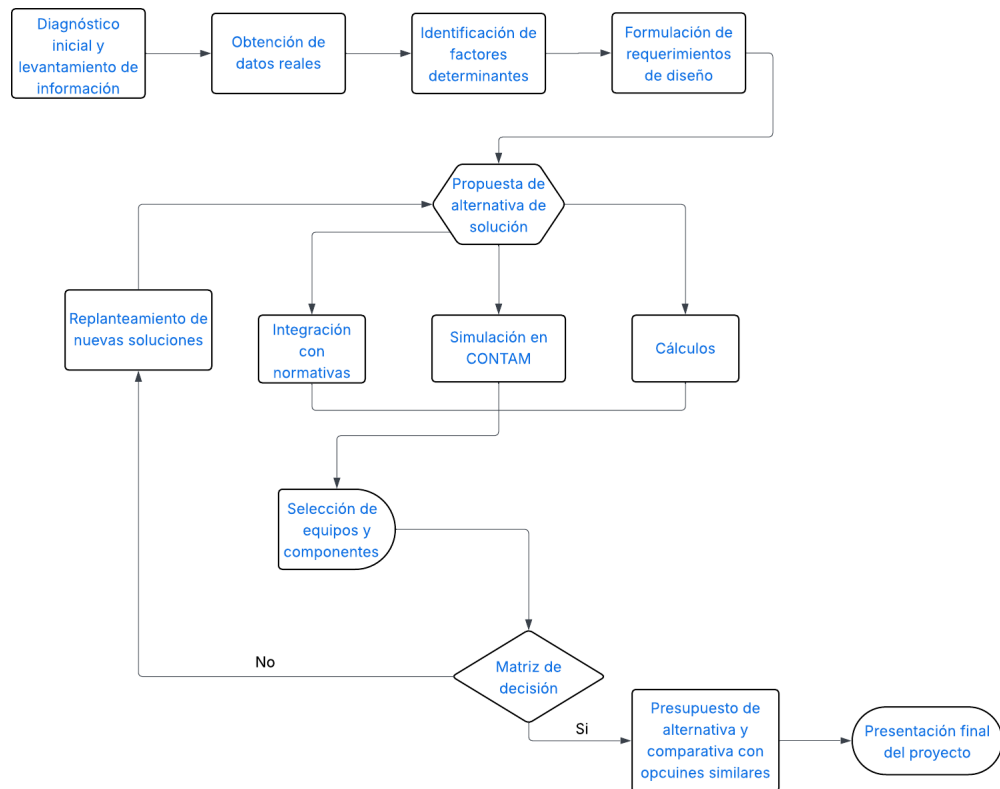
Con estos criterios se generaron alternativas de solución (ventilación natural mejorada, ventilación mecánica con extracción forzada y sistema híbrido con filtración), que fueron evaluadas mediante una matriz de decisión considerando eficiencia, viabilidad constructiva, consumo energético y cumplimiento normativo.

La alternativa seleccionada se modeló en CONTAM, simulando diferentes escenarios de ventilación y ocupación para analizar la distribución del aire, la evolución de CO<sub>2</sub>, la edad media del aire y el desempeño del sistema. Paralelamente se realizaron cálculos de caudal, ACH, requerimientos de aire exterior y pérdidas de presión por filtración.

Finalmente, se seleccionaron los componentes del sistema verificando que cumplieran las tasas de ventilación requeridas y fueran compatibles con la infraestructura existente. El modelo se validó comparando los resultados simulados con los límites normativos establecidos.

**Figura 3.**

*Diagrama de flujo metodología del proyecto. Autoría propia [Elaboración propia]*



## 2.2 Requerimientos de diseño del proyecto

### 2.2.1 Normativas aplicadas

El diseño y la evaluación del sistema de ventilación y filtración se apoyaron en normas técnicas que sirvieron como referencia para definir los criterios mínimos de confort térmico y calidad del aire requeridos en un aula universitaria. Para este estudio se utilizaron tres documentos principales: la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-HS-CL, la norma ASHRAE 62.1 y los lineamientos de la ISO 16890 relacionados con la filtración de partículas. Estas normas permitieron establecer los caudales mínimos de ventilación, los parámetros de confort interior y el

nivel de eficiencia de los filtros seleccionados. Toda esta base normativa formó parte del proceso de diseño y justificó las decisiones tomadas en la propuesta final del sistema.

La NEC-HS-CL (2020) fue tomada como referencia nacional, ya que define las categorías de calidad del aire interior (CAI) y los caudales mínimos de aire exterior necesarios por persona (Tabla 4). También establece los límites máximos permitidos de CO<sub>2</sub> según la categoría del recinto (Tabla 5). Además, la norma especifica las clases de filtración obligatorias de acuerdo con la calidad del aire exterior (CAE), presentadas en la Tabla 6. Esta información permitió determinar el nivel mínimo de filtración requerido para aulas ubicadas en zonas urbanas como Guayaquil, donde las concentraciones exteriores de partículas suelen ser más elevadas.

Por su parte, la norma ASHRAE 62.1-2022 complementó estos requisitos al ofrecer los procedimientos para calcular el caudal de ventilación tanto por persona como por área, además de aportar criterios técnicos para el control del CO<sub>2</sub> y la renovación de aire en espacios ocupados. Los valores de referencia establecidos por esta norma fueron incorporados en el capítulo 1 mediante la tabla 3.

Finalmente, la norma ISO 17772-1:2017 fue utilizada como referencia internacional para la clasificación de la calidad del aire interior en recintos educativos. A diferencia de la NEC y de ASHRAE 62.1, este estándar se enfoca en la percepción de la calidad del aire y en los niveles aceptables de CO<sub>2</sub> por encima del nivel exterior, estableciendo categorías que permiten evaluar el nivel de ventilación en un espacio ocupado.

## **2.2.2 Condiciones iniciales de diseño del edificio y aulas de estudio**

La investigación se enfoca en el análisis detallado del aula A206, situada en el Edificio de Admisiones del Campus Gustavo Galindo (ESPOL). La selección de este recinto como caso de estudio se fundamenta en su condición de arquetipo de los espacios de enseñanza de la institución. Sus características dimensionales, constructivas y, sobre todo, su régimen de ocupación, se

consideran representativos y replicables en la mayoría de las aulas del edificio. Esta representatividad es crucial, pues permite que los diagnósticos y soluciones propuestos puedan ser extrapolados al conjunto de espacios docentes de similares características

En términos físicos, el espacio presenta una superficie útil de 117 m<sup>2</sup> y una altura libre de piso a techo de 3 m, lo que resulta en un volumen interior aproximado de 351 m<sup>3</sup>. El aula está diseñada para una capacidad máxima de 62 estudiantes, además del docente. Esta configuración genera una alta densidad de ocupación, cercana a los 2 m<sup>2</sup> por persona, un valor intensivo que es habitual en la enseñanza universitaria y que representa un desafío significativo para la gestión del confort térmico y, especialmente, de la calidad del aire interior (CAI).

**Figura 4.**

*Aula A206 durante un periodo típico de ocupación y ubicación de los sensores de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>*



**2.3 Factores de influencia en el estudio**

La calidad del aire interior en aulas universitarias no depende únicamente del caudal de ventilación teórico, sino de un conjunto de variables acopladas que determinan la generación, transporte y remoción de contaminantes. Los factores de influencia más relevantes para el aula A206 fueron listados y descritos en la siguiente tabla.

**Tabla 9.***Factores de influencia del proyecto [Elaboración propia]*

Variables	Características
Actividad de los ocupantes	Nivel de actividad metabólica (sentados, hablando, exponiendo) que determina la generación de CO <sub>2</sub> , aerosoles respiratorios y calor sensible dentro del aula.
Número de personas	62 personas
Orientación del edificio	Ubicación y orientación del aula respecto a los puntos cardinales y a los vientos dominantes, lo que influye en las ganancias solares, la temperatura interior y las infiltraciones de aire exterior.
Condiciones de los alrededores	Presencia de vías de tráfico, áreas verdes y fuentes de polvo cercanas, que afectan directamente la calidad del aire exterior que ingresa al aula por ventilación o infiltración.
Consumo energético	Demanda de energía asociada al funcionamiento del aire acondicionado y de los equipos de ventilación, que condiciona la posibilidad de incrementar caudales de aire exterior sin penalizar en exceso el consumo.
Mantenimiento	Frecuencia y calidad de las labores de mantenimiento de equipos, filtros, ductos y limpieza de superficies, que inciden en la acumulación de polvo y en el desempeño real del sistema de ventilación y filtración.
Condiciones ambientales	Temperatura, humedad, calidad de aire exterior
Niveles de ruido	Ruido generado por ventiladores, unidades exteriores, tráfico u otras fuentes, que puede limitar el uso de determinadas velocidades de

	aire o configuraciones de ventilación por razones de confort acústico.
Disponibilidad de equipos	Acceso efectivo a equipos y componentes disponibles en el mercado

## 2.4 Alternativas de solución

Para evaluar la factibilidad de mejorar la ventilación y la calidad del aire en el aula de estudio, se definieron primero los parámetros iniciales y los requerimientos de diseño, los cuales se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 10.**

*Parámetros iniciales y requerimientos de diseño [Elaboración propia]*

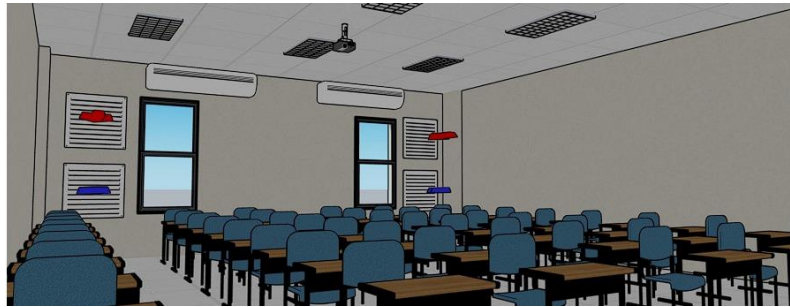
Categoría	Parámetro	Valor
Aula (A206)	Área del aula	117 m <sup>2</sup>
	Volumen del aula	351 m <sup>3</sup>
	Altura	3 m
Condiciones iniciales del aire interior	CO <sub>2</sub> interior	Promedio (2742 ppm)
	PM <sub>2.5</sub> interior	Promedio (14 µg/m <sup>3</sup> )
	Temperatura interior	Promedio (26 °C)
	Humedad relativa	Promedio (68 %)
Condiciones exteriores	CO <sub>2</sub> exterior	Promedio (420 ppm)
	PM <sub>2.5</sub> exterior	Promedio (15 µg/m <sup>3</sup> )
Ocupación	Número de ocupantes	62 estudiantes
	Perfil horario	08:00 – 17:00
Propiedades para modelado	Factor de penetración PM <sub>2.5</sub>	0.65
	Per unit área de la ventana	0.0009 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
	Per unit área de la puerta	0.001 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
	Coefficiente de flujo (C)	Valor estándar de CONTAM (0.6)
	Exponente de flujo (n)	0.65 – 0.70
Normativas aplicables	Ventilación mínima	ASHRAE 62.1

**Propuesta 1: Ventilación natural asistida**

El diseño de forma mostrado en la figura 4 propone instalar rejillas superiores para extracción natural y rejillas inferiores para ingreso de aire, generando un flujo vertical debido a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. El sistema se apoya en el efecto chimenea: el aire caliente asciende y se evacúa por las rejillas superiores, mientras que el aire fresco ingresa por las inferiores. Esta configuración permite aumentar la renovación de aire sin añadir carga térmica significativa al recinto y sin incorporar equipos mecánicos.

**Figura 5.**

*Propuesta 1: Esquema de ventilación natural por efecto chimenea mediante rejillas*

**Propuesta 2: Ventilación mecánica por simple extracción**

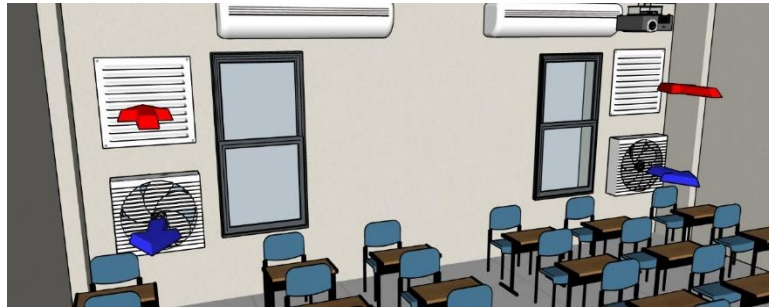
El diseño de forma mostrado en la figura 5 propone combinar la entrada natural de aire con la ayuda de un sistema mecánico de extracción. El ingreso de aire continúa realizándose por rejillas inferiores, mientras que la salida se incrementa mediante:

- Extractores mecánicos instalados en la parte superior del aula.
- Un flujo vertical más fuerte que mejora la renovación del aire.

- Uso de filtros de baja resistencia al flujo en la entrada de aire natural.

### Figura 6.

*Propuesta 2: Esquema del sistema de ventilación de simple extracción con extracción mecánica y entrada natural de aire*



### Propuesta 3: Ventilación mecánica balanceada

El diseño de forma mostrado en la figura 6 plantea un sistema completamente mecánico donde tanto el ingreso como la extracción del aire se realizan mediante ventiladores, sin depender de la ventilación natural. Este enfoque permite:

- Controlar de forma directa el caudal de aire exterior que ingresa.
- Mantener una tasa de ventilación constante, independiente de las condiciones climáticas.
- Permitir la incorporación de filtros de eficiencia alta en la entrada de aire, para reducir el  $PM_{2.5}$  proveniente del exterior.

### Figura 7.

*Propuesta 3: Esquema del sistema de ventilación mecánica por inyección y extracción forzada de aire*



### 2.5 Criterios de diseño

Los criterios de diseño son los parámetros fundamentales que guían las características más importantes que tendrá una solución importante. El diseño del sistema de ventilación y filtración para el proyecto se basa en los siguientes parámetros:

1. **Cumplimiento de niveles mínimos de ventilación:** Respetar las concentraciones mínimas establecidas de PM 2.5 y CO2 establecidos en la ASHRAE 62.1, ISO 17772-1 y NEC HS-CL y mantener los niveles de CO2 en rangos aceptables para actividades de enseñanza sin generar corrientes de aires molestas.
2. **Cumplimiento de niveles en material particulado:** Reducir las concentraciones de PM 2.5 a valores aceptables combinando ventilación y filtración de aire exterior e interior.
3. **Consumo energético:** Minimizar aumento de consumo eléctrico mediante selección eficiente de equipos y caudales.
4. **Costo del sistema:** Soluciones con inversión inicial moderada, costos de operación y mantenimiento asumibles para la institución.
5. **Mantenimiento:** Emplear equipos y filtros de fácil acceso y reemplazo, con modos de operación simples para personal no especializado.

## 2.6 Matriz de decisión

La matriz de decisión es un instrumento analítico que permite comparar alternativas mediante una ponderación cuantitativa de especificaciones de diseño más importantes para el proyecto. Se organiza opciones y criterios en una estructura tabular, asignando puntajes. Se elaboró la Tabla 11, en donde se realiza la ponderación de los criterios mencionados en la sección 2.5 y finalmente la Tabla 12 es la matriz de decisión que compara todas las alternativas y permite seleccionar la que cumple la mayoría de los criterios luego de haber realizado un análisis objetivo, sistemático y justificable.

**Tabla 11.**

*Criterios y ponderaciones para realizar la matriz de decisión [Elaboración propia]*

Criterios	Ponderación
Cumplimiento de niveles mínimos de ventilación	40%
Cumplimiento de niveles de material particulado	20%
Consumo energético	20%
Costo del sistema	10%
Mantenimiento	10%
Total	100%

La asignación de pesos se realizó en función del impacto directo de cada criterio en el desempeño del sistema. El confort interior recibe el mayor peso (25%) por su influencia en la estabilidad térmica y la calidad del ambiente. El control de material particulado y el consumo energético (20% cada uno) se consideran críticos para asegurar condiciones operativas adecuadas y eficiencia en el uso de recursos. El cumplimiento normativo (15%) mantiene una ponderación relevante, aunque menor, debido a que todas las alternativas deben cumplir obligatoriamente con las exigencias regulatorias. Finalmente, el costo del sistema y el mantenimiento (10% cada uno)

conservan valores más bajos, al tratarse de factores importantes pero secundarios frente a los requisitos funcionales y de rendimiento. Finalmente, en la Tabla 12 se detalla la matriz de decisión con sus alternativas ya ponderadas.

**Tabla 12.**

*Matriz de decisión [Elaboración propia]*

Criterio	Peso (%)	Propuesta 1 (Ventilación natural asistida)	Propuesta 2 (Ventilación mecánica por simple extracción)	Propuesta 3 (Ventilación mecánica balanceada)
Cumplimiento de niveles mínimos de ventilación	40	3	4	5
Cumplimiento de niveles de material particulado	20	2	4	5
Consumo energético	20	5	4	2
Costo del sistema	10	5	4	2
Mantenimiento	10	4	3	2

**Tabla 13.***Matriz de decisión final con valores ponderados [Elaboración propia]*

Criterio	Peso (%)	Propuesta 1 (Ventilación natural asistida)	Propuesta 2 (Ventilación mecánica por simple extracción)	Propuesta 3 (Ventilación mecánica balanceada)
Cumplimiento de niveles mínimos de ventilación	40	1.2	1.60	2.0
Cumplimiento de niveles de material particulado	20	0.40	0.80	1
Consumo energético	20	1	0.80	0.40
Costo del sistema	10	0.50	0.40	0.20
Mantenimiento	10	0.40	0.30	0.20
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>3.50</b>	<b>3.90</b>	<b>3.80</b>

La Tabla 13 resumió los puntajes ponderados de cada alternativa según los criterios definidos. Se observó que la Propuesta 2 alcanzó el mayor índice global de desempeño (3,90), superando a la Propuesta 3 (3,80) y a la Propuesta 1 (3,50). Esto se debe a que combinó buen cumplimiento normativo y confort térmico con un control adecuado del material particulado, manteniendo a la vez un consumo energético y costos moderados; por ello se seleccionó como la opción más equilibrada para el aula A206.

## 2.7 Diseño detallado

### 2.7.1 Renovación de aire por hora (ACH)

El ACH expresa cuántas veces se renueva completamente el volumen de aire de un recinto en una hora. Se usa para comparar la ventilación real o simulada contra valores recomendados por normas, y es una de las métricas principales de desempeño del sistema.

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

ACH: renovaciones por hora ( $h^{-1}$ )

Q: caudal de ventilación ( $m^3/h$ )

V: volumen del aula ( $m^3$ )

### 2.7.2 Caudal requerido según número de ocupantes

La mayor parte de normas (ASHRAE 62.1 y NEC-HS-CL) establecen el caudal mínimo en función del número de personas. Este valor garantiza aire exterior suficiente para diluir los contaminantes generados por ocupación humana.

$$Q = N \cdot q_p \quad (2.2)$$

Q: caudal total requerido ( $L/s$  o  $m^3/h$ )

N: número de ocupantes ( $h^3/h^3$ )

$q_p$ : caudal mínimo por persona ( $L/s \cdot person$ )

### 2.7.3 Balance general de contaminantes en una zona (modelo de mezcla)

Esta ecuación diferencia la evolución temporal de  $CO_2$  o  $PM_{2.5}$  en el aula. CONTAM resuelve esta ecuación con integración numérica en cada paso de tiempo. Representa la base para las simulaciones.

$$V \frac{dC(t)}{dt} = \sum Q_{in}(t)C_{in}(t) - \sum Q_{out}(t)C(t) + G(t) - R(t) \quad (2.3)$$

$C(t)$ : concentración dentro del aula

$Q_{in}$ : caudal entrante ( $m^3/s$ )

$Q_{out}$ : caudal saliente ( $m^3/s$ )

$C_{in}$ : concentración del aire entrante

$G(t)$ : generación interna

$R(t)$ : eliminación por depósito/filtrado

$V$ : volumen ( $m^3$ )

### 2.7.4 Generación de $CO_2$ por ocupación

La producción metabólica de  $CO_2$  es proporcional al número de ocupantes y su nivel de actividad. Este valor es una entrada directa al modelo CONTAM.

$$G = N \cdot G_{per} \quad (2.4)$$

$G$ : caudal total de  $CO_2$  ( $L/s$  o  $m^3/h$ )

N: número de personas

$G_{per}$ : caudal mínimo por persona (para estudiantes: 0.0049 L/s · persona)

### 2.7.5 Modelo de infiltración (ventanas, puertas y fisuras)

Este modelo físico usado por CONTAM para aperturas simples. Esta ecuación se aplica en ventanas abiertas, puertas entreabiertas, ranuras y cualquier "flow path" sin componentes mecánicos. Es crucial para simular infiltración.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.5)$$

Q: caudal a través de la abertura ( $m^3/s$ )

$C_d$ : coeficiente de descarga ( $\approx 0.6$  estándar en CONTAM)

A: área de fuga ( $m^2$ )

$\Delta P$ : diferencia de presión (Pa)

$\rho$ : densidad del aire ( $kg/m^3$ )

### 2.7.6 Modelo de depósito de partículas (PM<sub>2.5</sub>)

Este modelo representa la eliminación de PM<sub>2.5</sub> de una zona debido a deposición sobre superficies mediante una tasa de decaimiento de primer orden, expresada en unidades de 1/h.

CONTAM aplica esta tasa como un proceso continuo de reducción proporcional a la concentración presente.

$$R(t) = k_d \cdot C(t) \cdot V \quad (2.6)$$

$R(t)$ : masa removida por deposición (kg/s)

$k_d$ : tasa de deposición (0.04 1/h; Na et al., 2023)

$V$ : volumen del aula ( $m^3$ )

### 2.7.7 Eficiencia de filtración (filtros MERV)

Normativa ISO 16890 y módulo de filtración de CONTAM.

Cuando el aire exterior pasa por un filtro antes de ingresar al aula, CONTAM aplica esta reducción sobre el flujo entrante. Se utiliza la normativa ISO 16890.

$$C_{filtered} = C_{in}(1 - \eta) \quad (2.7)$$

$C_{filtered}$ : concentración después del filtro ( $h^{-1}$ )

$C_{in}$ : concentración antes del filtro

$\eta$ : eficiencia del filtro (MERV 13 con  $\eta$ : 0.75 - 0.85)

## Capítulo 3

### 3. Resultados y análisis.

#### 3.1 Análisis de monitoreo del aire interior y exterior

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones experimentales de calidad de aire interior, realizadas como parte del desarrollo metodológico del estudio (Figura 3). Estos datos permiten caracterizar el estado actual del aula mediante el análisis de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$ ).

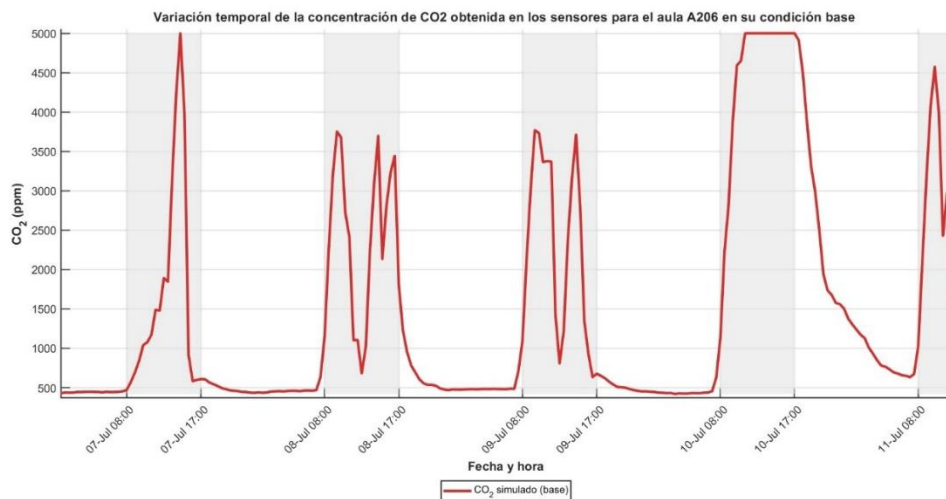
**Tabla 14.**

*Concentraciones de  $\text{CO}_2$  medidas en el atula A206 durante ocupación (08:00 – 17:00)*  
[Elaboración propia]

Fecha / hora	$\text{CO}_2$ mínimo (ppm)	$\text{CO}_2$ promedio (ppm)	$\text{CO}_2$ máximo (ppm)
07-Julio-2025	470	1722.2	5000
08-Julio-2025	682	2428.5	3752
09-Julio-2025	633	2347.4	3768
10-Julio-2025	1131	4405.1	5000
11-Julio-2025	1032	2882.7	4575

**Figura 8.**

*Variación temporal de la concentración de  $\text{CO}_2$  obtenida en los sensores para el aula A206 en su condición base* [Elaboración propia]



De acuerdo con la metodología planteada en la Figura 3, la obtención de datos reales permite identificar los factores que controlan el comportamiento del CO<sub>2</sub> en el aula A206. La Tabla 14 y la Figura 7 constituyen la base experimental para evaluar el efecto de las características físicas del recinto, la ocupación y las condiciones de uso sobre la concentración de CO<sub>2</sub>.

Estos resultados muestran que el incremento de CO<sub>2</sub> está directamente asociado a la tabla 10 que conforman datos como el volumen del aula (351 m<sup>3</sup>), a la alta densidad de ocupación (62 y 63 estudiantes), al horario continuo de uso (08:00 a 17:00) y al intercambio limitado de aire con el exterior debido a áreas de fuga pequeñas en ventanas y puertas. Durante la jornada académica, la puerta del aula se abre en los cambios de hora, generando renovaciones de aire breves que no compensan la generación continua de CO<sub>2</sub> durante la ocupación. En consecuencia, se observa que no existe una renovación efectiva del aire, lo que provoca acumulaciones progresivas y picos que alcanzan valores cercanos a 5000 ppm, evidenciando un régimen de ventilación insuficiente de acuerdo a la tabla 3 y 5.

**Tabla 15.**

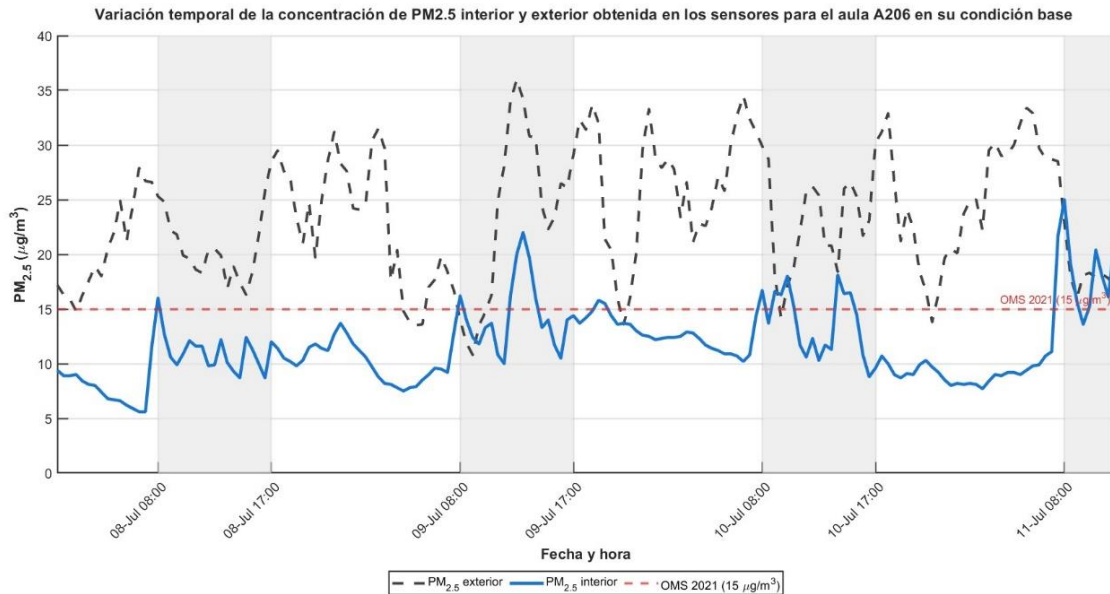
*Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> medidas en el aula A206 durante ocupación (08:00 – 17:00)*

*[Elaboración propia]*

Fecha / hora	PM <sub>2.5</sub> interior promedio (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> interior máximo (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> exterior promedio (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> exterior máximo (µg/m <sup>3</sup> )
08-Julio-2025	11.00	16.00	20.37	25.8
09-Julio-2025	14.42	22.00	23.48	36.00
10-Julio-2025	13.87	18.10	22.72	29.90
11-Julio-2025	18.26	25.00	18.22	22.90

**Figura 9.**

Variación temporal de la concentración de  $PM_{2.5}$  interior y exterior obtenida en los sensores para el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]



Los resultados de  $PM_{2.5}$  muestran que la concentración interior sigue de forma cercana el comportamiento del ambiente exterior, con valores promedio interiores entre 11 y 18  $\mu g/m^3$  y picos que alcanzan hasta 25  $\mu g/m^3$  durante la ocupación. Esta tendencia indica que el aula A206 no cuenta con un mecanismo efectivo de filtración del aire entrante y que el intercambio con el exterior ocurre de manera no controlada a través de micro-fugas en ventanas y puertas.

Durante la jornada de clases, la apertura intermitente de la puerta en los cambios de hora genera renovaciones breves que permiten el ingreso directo de material particulado, sin que exista un proceso de filtración o dilución sostenida. En consecuencia, el aula presenta concentraciones interiores comparables a las del entorno exterior, superando en varios intervalos el valor guía de 15  $\mu g/m^3$  recomendado por la OMS.

### 3.2 Resultados del modelado del aula en CONTAM

#### 3.2.1 Valores calculados utilizados en la simulación

De acuerdo con la metodología de la Figura 3, los resultados experimentales de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> (Tablas 14 y 15) definen el problema de calidad de aire interior en el aula A206. A partir de estos datos se construye una línea base en CONTAM que replica las condiciones reales del aula, incluyendo geometría, ocupación, fugas y horarios de uso. Esta línea base permite verificar que el modelo reproduce el comportamiento observado en campo y constituye el punto de partida para evaluar la alternativa de ventilación híbrida propuesta.

**Tabla 16.**

*Valores calculados utilizados en la simulación del aula A206 [Elaboración propia]*

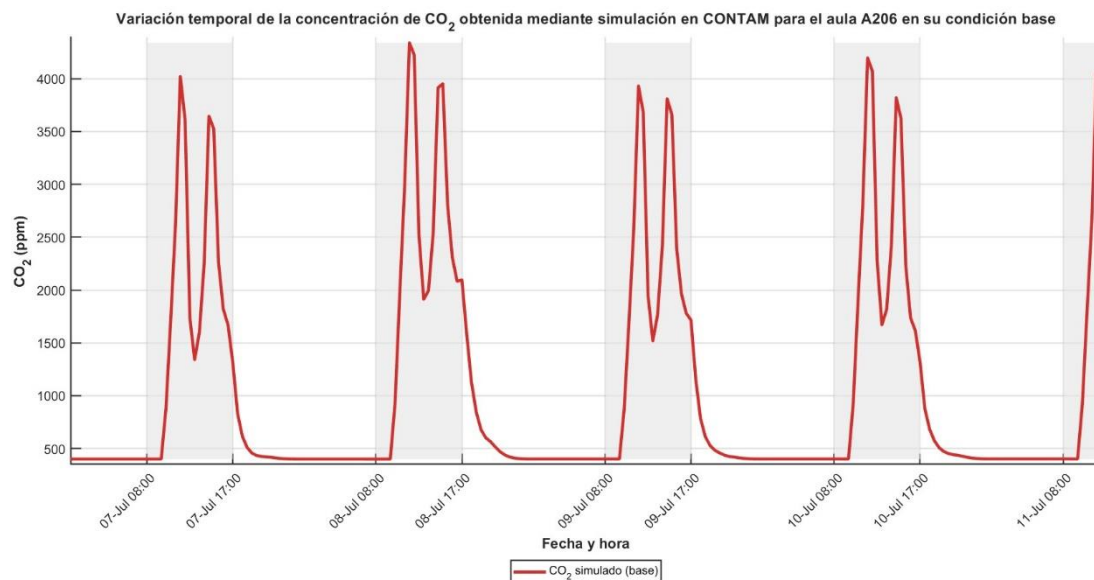
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Uso en CONTAM
Volumen del aula	V	351	m <sup>3</sup>	Definición de la zona
Número de ocupantes	N	63	-	Fuente de CO <sub>2</sub>
Generación total de CO <sub>2</sub>	G	0.3087	L/s	Source (CO <sub>2</sub> )
Caudal total de ventilación	Q	952.6	m <sup>3</sup> /h	Ventilación mecánica
Tasa de renovación de aire	ACH	2.71	h <sup>-1</sup>	Indicador de desempeño
Caudal obtenido en CONTAM	$Q_{sim}$	492	m <sup>3</sup> /h	Validación del modelo
Velocidad en rejillas	v	1.48	m/h	Validación del diseño

### 3.2.2 Simulación de la línea base

La simulación de línea base se utiliza para validar el modelo mediante la comparación entre los valores simulados y las mediciones reales, asegurando que el comportamiento del  $CO_2$  y del  $PM_{2.5}$  es consistente con las condiciones experimentales.

#### Figura 10.

*Variación temporal de la concentración de  $CO_2$  obtenida mediante simulación en CONTAM para el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]*



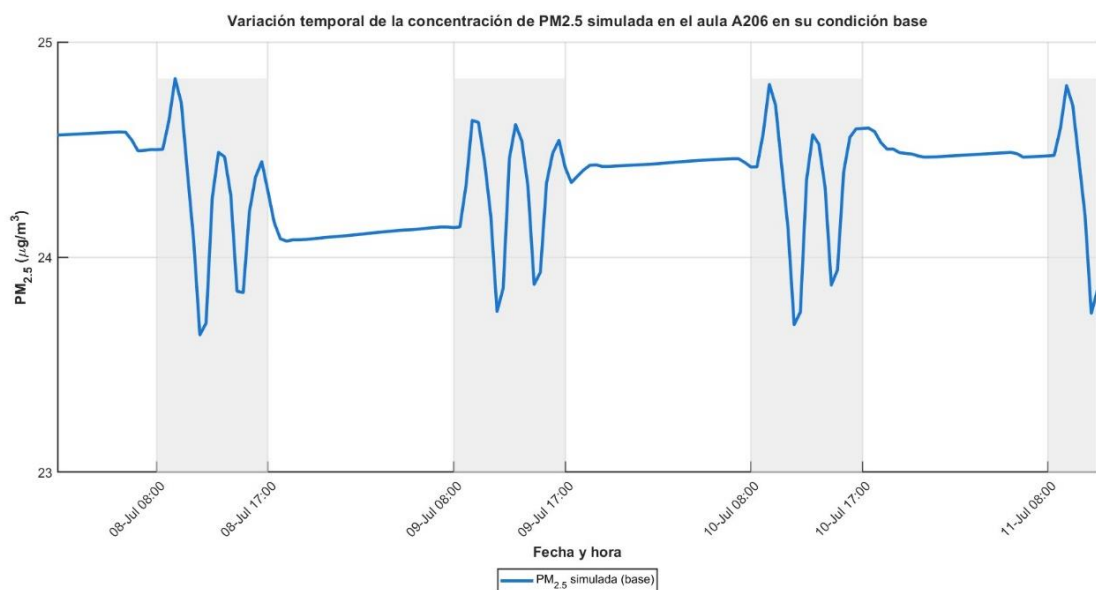
De acuerdo con la metodología en la Figura 3, la simulación de la línea base se construye a partir de los parámetros calculados en la Tabla 16 y de las condiciones reales del aula A206 definidas en la Tabla 10. Con todo esto nos permite simular en CONTAM el comportamiento observado durante las mediciones experimentales, estableciendo una representación gráfica del estado actual del aula.

Esta línea base tiene como objetivo verificar que el modelo sea capaz de replicar el problema real identificado en la etapa experimental, particularmente el comportamiento del  $CO_2$  y

del  $PM_{2.5}$  durante los periodos de ocupación. Para ello, se incorporan en el modelo la geometría del recinto, el volumen, la ocupación, las áreas de fuga, los horarios de uso y las tasas de generación de contaminantes derivadas de las mediciones.

**Figura 11.**

*Variación temporal de la concentración de  $PM_{2.5}$  simulada en el aula A206 en su condición base [Elaboración propia]*



La figura 10 muestra la evolución de la concentración de  $PM_{2.5}$  simulada en el aula A206 bajo su condición base, construida a partir de los parámetros definidos en la Tabla 16 y de las condiciones reales del aula presentadas en la Tabla 10. Esta simulación representa el comportamiento del aula sin intervención, es decir, bajo un régimen de ventilación natural limitada y sin filtración.

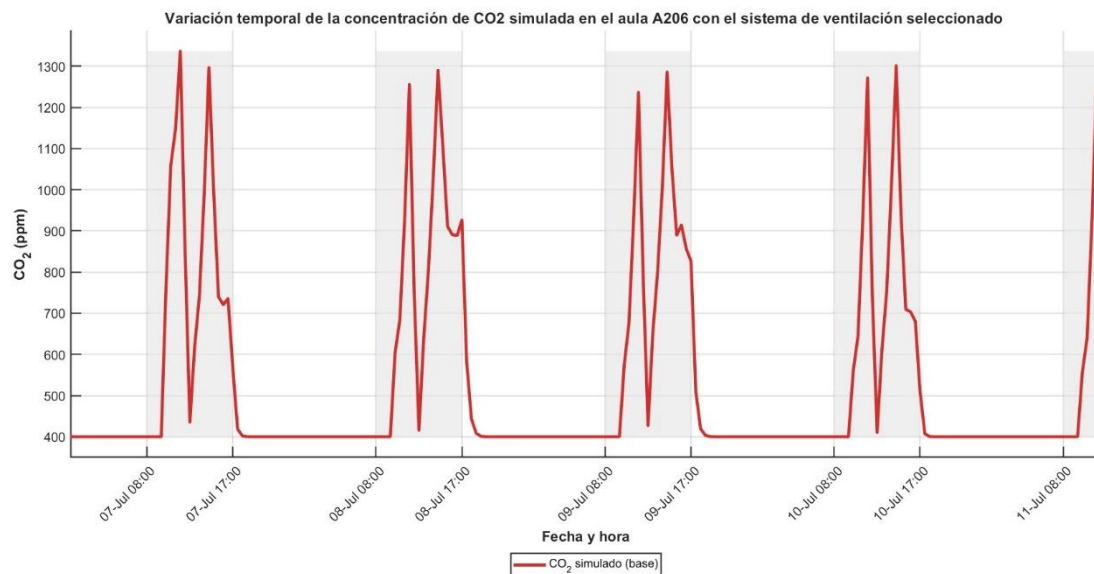
### 3.2.3 Simulación del escenario propuesto (ventilación por simple extracción)

En esta sección se presentan los resultados de la simulación correspondientes al escenario propuesto, definido a partir de la metodología mostrada en la Figura 3 y del análisis de los datos

experimentales del aula A206. El escenario evaluado corresponde a la propuesta 2 mostrada en la Figura 5, basada en un sistema de ventilación por simple extracción con entrada natural de aire. Este sistema se implementa mediante ventiladores y rejillas dimensionados con base en los parámetros establecidos en las Tablas 10 y 16. El objetivo es corregir el régimen de ventilación insuficiente identificado en la línea base y evaluar su impacto sobre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> bajo condiciones reales del uso del aula.

### Figura 12.

*Variación temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> simulada en el aula A206 con el sistema de ventilación seleccionado [Elaboración propia]*

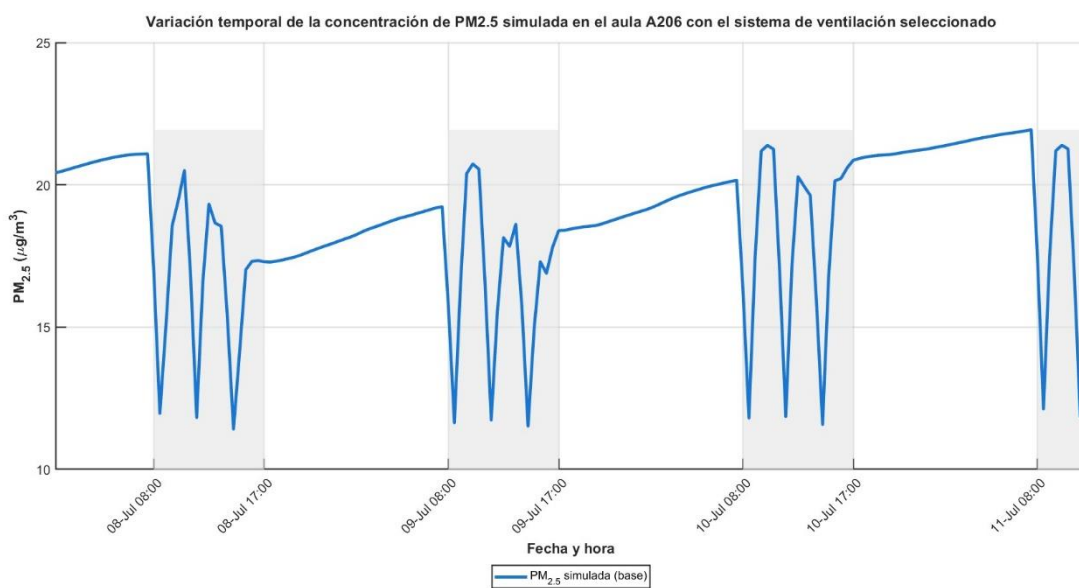


La Figura 11 muestra la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante una semana de clases en el aula A206 con el sistema de ventilación propuesto. Durante los períodos de ocupación se registran valores entre 1200 y 1300 ppm, superando al umbral referencial de 1000 ppm únicamente en intervalos breves asociados a la máxima ocupación. Una ventilación adecuada en espacios ocupados se asocia a concentraciones interiores de CO<sub>2</sub> del orden de 700 ppm por encima

del nivel exterior, criterio derivado de un balance de masa basado en la generación metabólica de  $\text{CO}_2$  (ASHRAE, 2022, Appendix C).

**Figura 13.**

*Variación temporal de la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  simulada en el aula A206 con el sistema de ventilación seleccionado [Elaboración propia]*



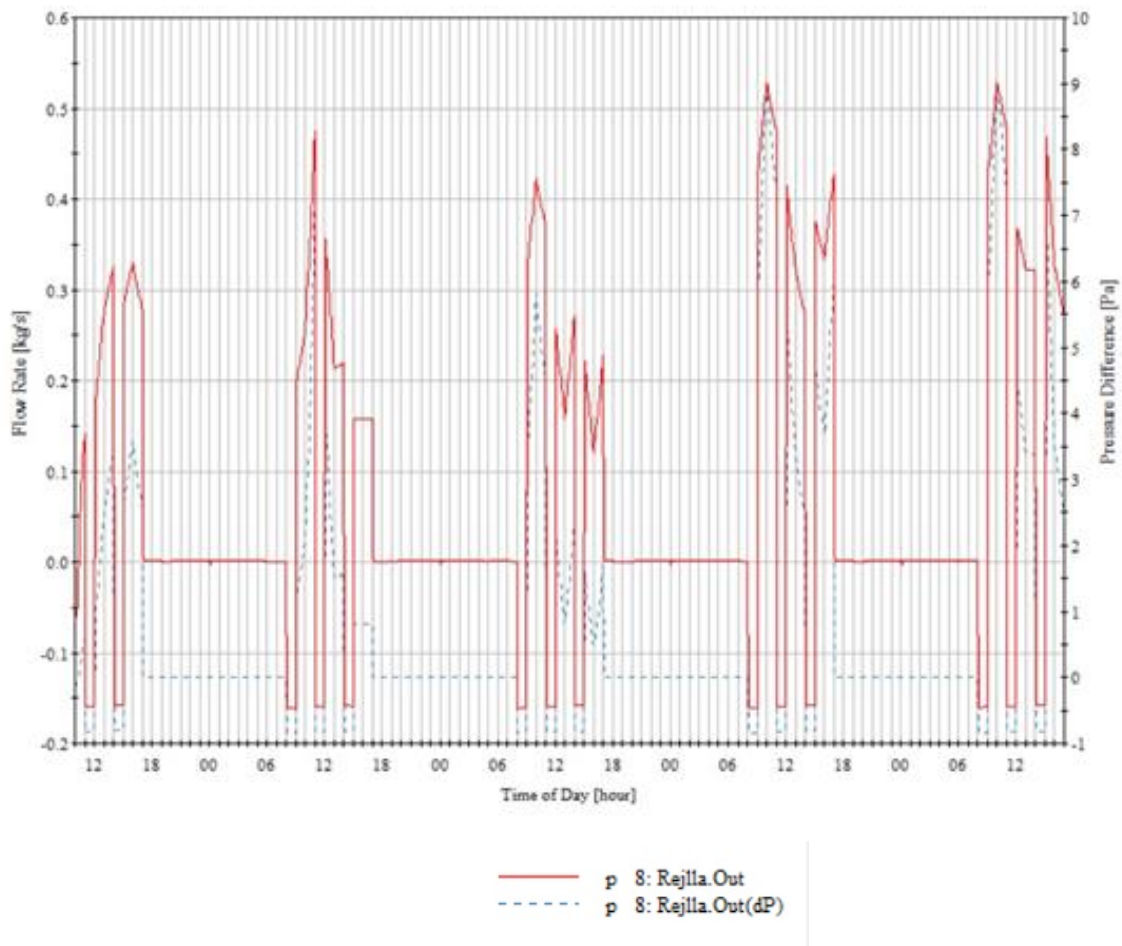
En la figura 12 se observa que durante los periodos de ocupación se presentan incrementos puntuales en la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ , mientras que fuera de estos intervalos los valores se mantienen cercanos a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Con la incorporación del filtro MERV 11, las concentraciones interiores permanecen controladas y se limitan los picos asociados a la actividad en el aula, manteniendo niveles estables a lo largo de los días simulados.

### 3.2.4 Comportamiento del caudal y la presión en el sistema

En esta sección se presenta el comportamiento del caudal y la diferencia de presión a través de las rejillas y ventiladores considerados en el modelo, con el fin de verificar la coherencia del flujo de aire durante los periodos de operación del sistema de ventilación.

**Figura 14.**

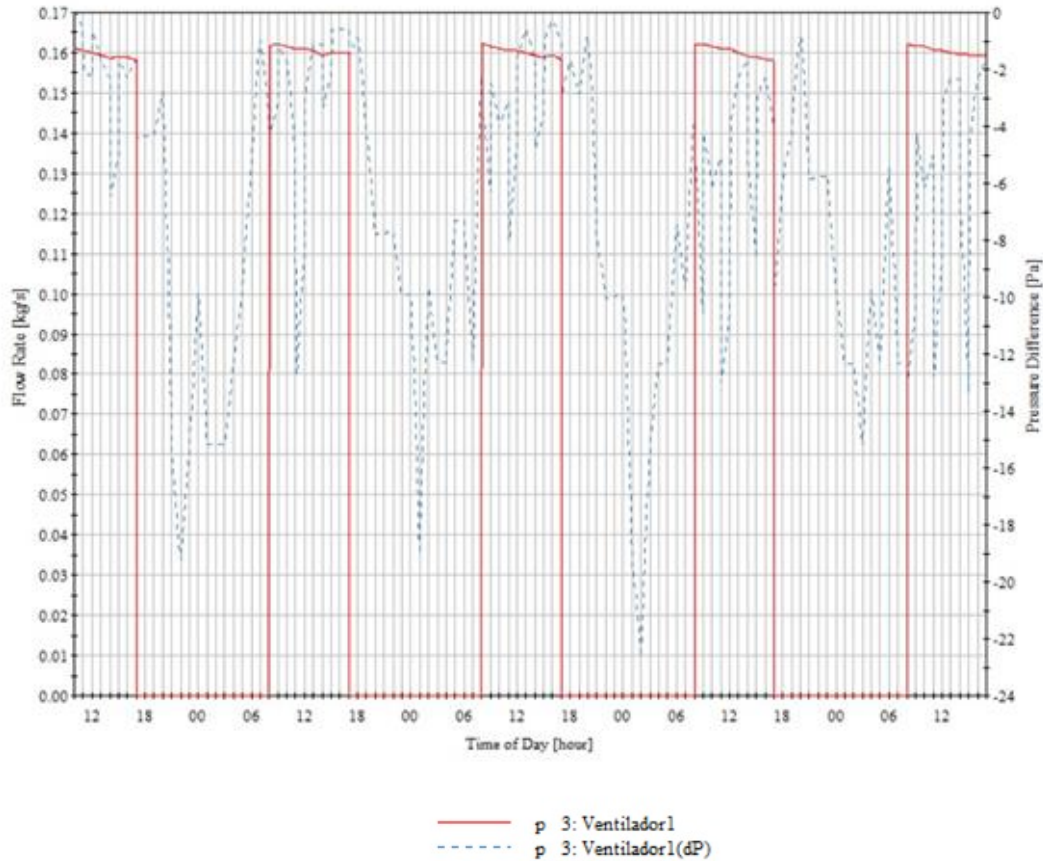
*Caudal y diferencia de presión en la rejilla durante la simulación [Elaboración propia]*



La figura 13 muestra la variación del caudal y la diferencia de presión en el sistema de ventilación. Durante los periodos de operación, el flujo alcanza valores del orden de 0.4 a 0.5 kg/s, mientras que la diferencia de presión se sitúa entre 6 y 9 Pa. Fuera de estos intervalos, ambos parámetros permanecen cercanos a cero, coincidiendo con la inactividad del sistema.

**Figura 15.**

*Caudal y diferencia de presión en el ventilador durante la simulación [Elaboración propia]*



La figura 14 presenta el comportamiento del ventilador durante los periodos de operación. El caudal suministrado se mantiene cercano a 0.17 kg/s, con variaciones menores asociadas a las condiciones de presión del sistema, mientras que fuera del horario de funcionamiento el flujo es prácticamente nulo. La diferencia de presión registrada oscila entre -5 y -15 Pa durante la operación, reflejando el régimen de trabajo del ventilador en cada jornada simulada.

### 3.2.5 Comparación de resultados entre escenarios

La comparación entre escenarios se realiza tomando como referencia una semana completa de clases (lunes a viernes), correspondiente al periodo real de medición con sensores en el aula

A206. Este intervalo representa el patrón típico de ocupación académica y permite evaluar los valores extremos de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> bajo condiciones reales de uso.

**Tabla 17.**

*Concentraciones de resultados entre escenarios simulados (08:00 – 17:00) [Elaboración propia]*

Variable	Escenario sin ventilación	Escenario con ventilación de simple extracción
CO <sub>2</sub> máximo (ppm)	4500	1300
CO <sub>2</sub> mínimo (ppm)	400	400
PM <sub>2.5</sub> máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	25	22
PM <sub>2.5</sub> mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	23	12

En el escenario sin ventilación, el CO<sub>2</sub> alcanza valores de 4000 a 4500 ppm durante los periodos de ocupación. Con el sistema de ventilación, los picos se limitan a 1200 a 1300 ppm y la concentración retorna rápidamente a niveles cercanos al exterior.

Para el PM<sub>2.5</sub>, el escenario base mantiene concentraciones entre 23 y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que con ventilación se observan descensos hasta valores del orden de 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y una reducción de los picos durante la jornada.

### 3.3 Resultados del diseño del sistema de ventilación

Con base en los resultados del escenario con ventilación de simple extracción, el sistema propuesto evidencia una reducción sustancial de los contaminantes indicadores de calidad del aire interior en el aula A206. En particular, las concentraciones máximas de CO<sub>2</sub> disminuyen de 4500 ppm (escenario base sin ventilación) a aproximadamente 1300 ppm (escenario con ventilación de simple extracción), mientras que el PM<sub>2.5</sub>, máximo se reduce de 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el periodo de análisis.

### 3.3.1 Parámetros técnicos del sistema de ventilación

El dimensionamiento del sistema se fundamenta en el balance entre el caudal efectivamente inducido por los elementos mecánicos y la contribución de la ventilación natural propia del esquema de simple extracción. Bajo operación del sistema, el comportamiento del flujo a través de la rejilla se mantiene cercano a 0.145 kg/s, con una diferencia de presión de 0.65 a 0.69 Pa, lo cual refleja un régimen estable durante los periodos simulados. El caudal a través del ventilador se mantiene aproximadamente en 0.16 kg/s en el periodo evaluado, con variaciones pequeñas asociadas a intervalos de funcionamiento.

Considerando condiciones típicas de densidad del aire a temperatura ambiente, este flujo másico es consistente con un caudal volumétrico de 492 m<sup>3</sup>/h, el cual se adopta como caudal de diseño para el sistema escogido. Este valor se interpreta como el aporte del componente mecánico, mientras que el resto de la renovación proviene del intercambio a través de aberturas y fugas modeladas.

Para referencia del recinto, el aula A206 presenta un volumen del orden de 321 m<sup>3</sup>, por lo que el caudal mecánico definido representa una renovación aproximada de 2.71 ACH, la cual se suma el intercambio natural propio del esquema de simple extracción.

#### Tabla 18.

*Síntesis de parámetros finales de diseño [Elaboración propia]*

Parámetro	Valor	Sustento en resultados
Volumen del aula A206	351 m <sup>3</sup>	Caracterización del aula
Caudal en rejilla (operación)	0.145 kg/s	Estabilidad de flujo y $\Delta P$ en rejilla
$\Delta P$ en rejilla (operación)	0.65–0.69 Pa	Coherencia del régimen de ventilación
Caudal en ventilador (operación)	0.16 kg/s	Estabilidad de caudal mecánico

Caudal mecánico de diseño (equivalente)	492 m <sup>3</sup> /h	Derivado del caudal simulado del ventilador
CO <sub>2</sub> máximo (con sistema)	1150 ppm	Comparación entre escenarios
PM <sub>2.5</sub> máximo (con sistema)	17 µg/m <sup>3</sup>	Comparación entre escenarios

### 3.3.2 Selección de ventilador

La selección del ventilador de extracción para el esquema de simple extracción se fundamenta en el caudal obtenido en la simulación y en la necesidad de garantizar una operación estable frente a las resistencias del sistema (rejilla, accesorios y, principalmente, filtración). En el modelo CONTAM, el ventilador mantiene un caudal aproximadamente constante de 0,16 kg/s durante todo el periodo simulado, con una diferencia de presión cercana a - 0,10 Pa, lo que confirma estabilidad del flujo bajo las condiciones y horarios de operación definidos. El caudal volumétrico validado en el modelo se reporta como  $Q_{sim} = 492 \frac{m^3}{h}$ , valor que se adopta como caudal nominal de diseño para la selección del equipo.

Sin embargo, la presión diferencial indicada por el componente del ventilador en CONTAM no debe interpretarse como la presión estática requerida por un equipo real, debido a que el desempeño en campo incorpora pérdidas adicionales por elementos terminales, accesorios y filtración. De acuerdo con la norma ASHRAE, las pérdidas de presión asociadas a elementos terminales como rejillas y accesorios en sistemas de ventilación de baja presión se sitúan típicamente en el rango de 0,03 a 0,10 in c.a., dependiendo de la velocidad frontal y la geometría del elemento (ASHRAE, 2021). Asimismo, el *ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment* indica que los filtros de eficiencia media presentan una caída de presión inicial comprendida entre 0,15 y 0,30 in c.a. bajo condiciones de operación limpia a media. Considerando estos rangos, la caída total de presión del sistema de extracción se estimó en aproximadamente 0,26 in c.a. (65.19 Pa).

En consecuencia, y con el fin de incluir márgenes por montaje, dispersión de pérdidas y variación de resistencia del filtro con el uso, se adopta como criterio de selección una presión estática externa mínima (ESP)  $\geq 100$  Pa a caudal nominal.

En la implementación del sistema de simple extracción propuesto se establece la selección de ventiladores axiales, considerando que este tipo de equipos se emplean cuando se requieren grandes caudales con bajas presiones estáticas, siendo comunes en ventilación de espacios amplios.

**Tabla 19.**

*Parámetros de ventiladores [Elaboración propia]*

Característica	Detalle
Cantidad y configuración	2 ventiladores en paralelo (extracción)
Caudal nominal total de diseño	492 m <sup>3</sup> /h
Caudal nominal por ventilador	246 m <sup>3</sup> /h
Presión estática externa de diseño	65.19 Pa
Presión estática con margen de selección	71.70 Pa (65.19 $\times$ 1,10)
Tensión de alimentación	220–240 V AC
Frecuencia	60 Hz
Grado de protección mínimo	IP54
Nivel sonoro máximo recomendado	$\leq 70$ dB(A)
Tipo de montaje	Pared (placa)
Material de carcasa	Acero galvanizado o inoxidable
Material de hélice	Aluminio
Certificación/ensayo recomendado	Datos de desempeño conforme a AMCA 210 / ISO 5801

**Nota.** Los parámetros de caudal y presión se obtuvieron a partir de los resultados de la simulación desarrollada en este estudio. Las especificaciones eléctricas, constructivas y de montaje fueron verificadas mediante catálogos técnicos de fabricantes y distribuidores industriales. Los

criterios de margen de selección, nivel sonoro y verificación del desempeño del ventilador se basan en normas de ensayo AMCA 210 e ISO 5801.

### 3.3.3 Rejilla de retorno

La rejilla de retorno constituye el principal elemento de paso del aire hacia el sistema de extracción. De acuerdo con la simulación, para el caudal total de diseño (492 m<sup>3</sup>/h), la rejilla presenta una velocidad media del aire baja, lo que se traduce en una pérdida de presión reducida del orden de 0,65 a 0,69 Pa. Este comportamiento confirma que la rejilla no representa una restricción significativa al flujo y que su contribución a la pérdida total del sistema es secundaria frente a la filtración.

**Tabla 20.**

*Parámetros de rejilla [Elaboración propia]*

Característica	Valor
Tipo de elemento	Rejilla de retorno
Configuración	Aletas fijas
Material	Aluminio
Dimensiones nominales	20 in × 20 in
Área nominal	0,312 m <sup>2</sup>
Área libre efectiva	0,251 m <sup>2</sup>
Caudal que atraviesa la rejilla	492 m <sup>3</sup> /h (caudal total del sistema)
Caudal másico de referencia	0,145 kg/s
Velocidad media del aire	1.48 m/h
Diferencia de presión en operación	0,65 - 0,69 Pa

Tipo de montaje

Empotrado en muro

### 3.3.4 Filtros

Para la etapa de filtración del aire exterior se selecciona un filtro tipo bolsa, ensayado bajo la norma ANSI/ASHRAE 52.2, con clasificación MERV 11. Este tipo de filtro es comúnmente utilizado en sistemas de ventilación general y permite una reducción significativa del material particulado fino, con eficiencias típicas cercanas al 60 % para PM<sub>2.5</sub>, manteniendo una caída de presión compatible con el uso de ventiladores axiales.

A diferencia de la rejilla, el filtro introduce una resistencia aerodinámica relevante, la cual aumenta progresivamente con la colmatación del medio filtrante.

#### Tabla 21.

*Parámetros del filtro [Elaboración propia]*

Característica	Valor
Tipo de filtro	Filtro tipo bolsa
Norma de ensayo	ANSI/ASHRAE 52.2
Clasificación de eficiencia	MERV 11
Eficiencia típica frente a PM <sub>2.5</sub>	60 %
Aplicación	Filtración de aire exterior en sistemas de ventilación
Dimensiones nominales	22 × 22 × 2 in
Material del medio filtrante	Fibra sintética
Caudal nominal de operación	<500 m <sup>3</sup> /h

Caída de presión (filtro limpio)	30 Pa
Caída de presión (condición media de uso)	60 Pa
Caída de presión máxima admisible (reemplazo)	200 Pa
Temperatura máxima de operación	$\leq 80$ °C
Tipo de montaje	Bastidor o marco metálico sellado
Función en el sistema	Reducción de material particulado fino previo al ingreso al aula

### 3.4 Resultados de la evaluación energética

La evaluación energética del sistema de ventilación propuesto se realizó con el objetivo de cuantificar la potencia eléctrica requerida para su operación, utilizando un enfoque normativo basado en el indicador de potencia específica del ventilador (SFP). Este criterio permite estimar el consumo eléctrico del sistema a partir del caudal volumétrico de diseño.

El caudal volumétrico adoptado para el análisis corresponde a  $0,136 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor obtenido a partir de la simulación del sistema en CONTAM bajo las condiciones de operación definidas para el aula. Este caudal representa el requerimiento efectivo de aire para garantizar el desempeño del sistema de ventilación propuesto y fue utilizado como base para la estimación energética.

Considerando que el sistema incorpora filtración de aire exterior y que su operación real está sujeta a incrementos de resistencia asociados al ensuciamiento progresivo del filtro y a pérdidas locales propias de la instalación, se adoptó un escenario conservador correspondiente a la categoría SFP2, utilizando un valor de  $750 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{s})$ . Este criterio asegura que la potencia

estimada no sea subdimensionada para el sistema y refleja condiciones realistas de operación a lo largo de su vida útil.

A partir de estos parámetros, se obtuvo una potencia eléctrica estimada de aproximadamente 102 W por ventilador. Dado que el sistema contempla la operación simultánea de dos ventiladores en paralelo, la potencia eléctrica total instalada del sistema asciende a aproximadamente 204 W.

En términos globales, los resultados indican que el sistema de ventilación propuesto presenta un requerimiento energético reducido, compatible con esquemas de ventilación mecánica eficientes, y que su operación puede integrarse sin impactos significativos en el consumo eléctrico total del edificio. El desarrollo detallado del procedimiento de cálculo y la justificación normativa completa se presentan en el Apéndice A, manteniendo en el cuerpo principal del capítulo únicamente los resultados finales y su interpretación técnica.

### **3.4.1 Consumo eléctrico estimado**

Con base en la potencia eléctrica total del sistema de ventilación, obtenida mediante el método de potencia específica del ventilador (SFP) conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-HS-CL, numeral 6.2.2.5 “Eficiencia energética de los equipos para el transporte de fluidos”, se procedió a estimar el consumo eléctrico asociado a su operación. El sistema considerado está conformado por dos ventiladores axiales operando en paralelo, con una potencia eléctrica total instalada de 0,204 kW. Para la estimación del consumo, se asumió un régimen de funcionamiento representativo del uso académico del aula, correspondiente a 8 horas diarias de operación durante 5 días a la semana.

**Tabla 22.***Consumo eléctrico del diseño [Elaboración propia]*

Parámetro	Valor
Potencia eléctrica total instalada	0,204 kW
Número de ventiladores	2
Horas de operación diaria	8 h/día
Días de operación semanal	5 días/semana
Consumo eléctrico diario	1,63 kWh/día
Consumo eléctrico semanal	8,15 kWh/semana
Consumo eléctrico mensual (promedio)	32,6 kWh/mes
Consumo eléctrico anual (32 semanas académicas)	261 kWh/año

### 3.5 Presupuesto del sistema

El presupuesto del sistema de ventilación propuesto se elaboró con el objetivo de estimar el costo total asociado a la implementación de la solución técnica planteada para el aula A206. Para ello, se consideraron los principales componentes del sistema, incluyendo equipos de ventilación, elementos de filtración y accesorios de instalación. La Tabla 23 corresponden a valores referenciales de mercado, obtenidos a partir de catálogos comerciales, se expresan en dólares estadounidenses (USD). El presupuesto se plantea como una estimación preliminar, adecuada para evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto.

**Tabla 23.***Costos de implementación del sistema de ventilación de simple extracción [Elaboración propia]*

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario (USD)	Subtotal (USD)
1	Ventilador axial oblongo Dayton (429–496 CFM)	unidad	2	132,68	265,36
2	Rejilla de retorno metálica 20" × 20"	unidad	2	32,17	68,82
3	Filtro MERV 11 (22" × 22" × 2")	unidad	2	12,14	24,28
4	Marco Porta filtro metálico	unidad	2	47,20	94,40
5	Tornillería, sellos y accesorios de montaje	lote	1	20,00	20,00
6	Cableado eléctrico y protecciones básicas	lote	1	30,00	30,00
7	Mano de obra instalación mecánica y eléctrica	jornada	1	73,60	73,60
Total					576,46

Como referencia económica se utilizó el estudio de Toftum y Wargocki (2017), en el cual se evalúan soluciones de ventilación mecánica para aulas educativas. En dicho trabajo, la alternativa de ventilación mecánica descentralizada presenta un costo total cercano a US\$ 8.646 por aula. En comparación, la solución propuesta en esta tesis, basada en ventilación mecánica de simple extracción con filtración, presenta un costo aproximado de US\$ 577 por aula, resultando del orden de 15 veces más económica.

## Capítulo 4

## 4.1 Conclusiones y recomendaciones

### 4.1.1 Conclusiones

Una vez aplicadas las fases metodológicas planteadas para el diseño, modelado y evaluación del sistema de ventilación y filtración propuesto para el aula A206, se obtuvieron las siguientes conclusiones principales, las cuales se encuentran directamente relacionadas con los objetivos general y específicos del proyecto.

- Las mediciones realizadas durante una semana lectiva completa (lunes a viernes) evidenciaron que el aula A206 presenta concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>, alcanzando valores del orden de 4000–4500 ppm durante los periodos de ocupación, así como concentraciones de PM<sub>2.5</sub> superiores a los valores recomendados. Estos resultados confirman la existencia de una ventilación insuficiente bajo las condiciones actuales de operación del aula.
- El modelo multizonal desarrollado en CONTAM se logró de manera coherente el comportamiento observado en las mediciones reales, tanto en la evolución temporal de CO<sub>2</sub> como en la dinámica del PM<sub>2.5</sub>. Esta concordancia valida el uso del modelo como herramienta para evaluar estrategias de ventilación en espacios educativos con alta densidad de ocupación.
- El sistema de ventilación de simple extracción seleccionado reduce de forma significativa las concentraciones de contaminantes, sin modificaciones complejas en la infraestructura del edificio ni instalación de un sistema de mayor complejidad. En particular, los picos de CO<sub>2</sub> disminuyen desde valores superiores a 4000 ppm hasta un rango aproximado de 1200 a 1300 ppm durante ocupación, mientras que el PM<sub>2.5</sub> se mantiene generalmente entre 10 y 20 µg/m<sup>3</sup> con la incorporación de

filtración MERV. Estos niveles se mantienen controlados a lo largo de la jornada académica simulada.

- Los resultados obtenidos se basan en un periodo representativo de una semana académica, lo cual permite caracterizar el comportamiento típico del aula bajo condiciones reales de uso. No obstante, este intervalo no captura variaciones estacionales, cambios en la ocupación a lo largo del semestre ni condiciones climáticas extremas. En consecuencia, los valores obtenidos deben interpretarse como representativos de un escenario operativo típico y no como una caracterización anual completa.
- La estimación del presupuesto económico del sistema propuesto permitió determinar que la implementación del sistema de ventilación mecánica de simple extracción con filtración presenta un costo aproximado de US\$ 595, considerando materiales, equipos, accesorios y mano de obra básica de instalación. Este valor resulta significativamente menor en comparación con soluciones convencionales de ventilación mecánica reportadas en la literatura, lo que evidencia la viabilidad económica de la propuesta para su aplicación en aulas universitarias existentes.

#### **4.1.2 Recomendaciones**

Una vez culminado el desarrollo del presente proyecto y considerando los resultados obtenidos, así como las limitaciones inherentes al alcance del estudio, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a la ampliación y profundización del trabajo realizado.

- Se recomienda complementar las mediciones puntuales de calidad del aire interior con campañas de monitoreo de mayor duración, incorporando periodos académicos completos y distintas épocas del año, con el fin de capturar variaciones estacionales en las

concentraciones de CO<sub>2</sub> y material particulado fino que permitan refinar los criterios de diseño del sistema de ventilación.

- Es aconsejable realizar un levantamiento detallado de las condiciones de uso y ocupación real de las aulas, incluyendo variaciones en la densidad de estudiantes y patrones de apertura de puertas y ventanas, de manera que los parámetros de diseño definidos puedan ajustarse a escenarios operativos más representativos.
- Se recomienda validar experimentalmente el desempeño del sistema de ventilación propuesto mediante una implementación piloto, comparando los resultados simulados en CONTAM con mediciones reales de caudal, presión y concentración de contaminantes, lo cual permitiría fortalecer la confiabilidad del modelo y reducir incertidumbres asociadas a la simulación.
- Como trabajo futuro, se sugiere evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes niveles de filtración, tales como filtros de mayor eficiencia (por ejemplo, MERV 13), analizando su impacto en la caída de presión, el consumo energético y la calidad del aire interior, especialmente en contextos de alta contaminación exterior.
- Se recomienda incorporar en estudios posteriores un análisis acústico del sistema de ventilación, considerando el impacto sonoro de los ventiladores en el confort global del aula, aspecto que no fue abordado en el presente trabajo debido a limitaciones de alcance y disponibilidad de datos
- Finalmente, se sugiere extender la metodología desarrollada a otras aulas del campus, evaluando la replicabilidad del sistema propuesto y su adaptación a recintos con diferentes volúmenes, configuraciones geométricas y condiciones de ocupación, con el objetivo de establecer lineamientos generales para la mejora de la calidad del aire interior en edificios universitarios existentes.

## Referencias

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation for acceptable indoor air quality*. ASHRAE.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. ASHRAE.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2020). *ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment*. ASHRAE.
- Kutsuma Ogata, M. J. (2011). *Diseño de un sistema de climatización para un aula universitaria [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]*
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2020). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-HS-CL: Higiene, salud y confort – Climatización*. MIDUVI
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. OMS.
- Paute Maldonado, M. S. (2024). *Diseño en concepto de un sistema de ventilación de aire para el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Internacional SEK [Trabajo de titulación de grado, Universidad Internacional SEK]*.

- Pérez Gil, M. A. (2013). *Diseño de sistemas de ventilación industrial para los ambientes de trabajo de una empresa dedicada a la elaboración y comercialización de productos cosméticos* (Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral). Guayaquil, Ecuador.
- Kumar, A., Moreno-Rangel, A., Khan, M. A. I., & Piasecki, M. (2022). Ventilation and indoor air quality. *Atmosphere*, 13(10), 1730. <https://doi.org/10.3390/atmos13101730>
- Buonanno, G., Ricolfi, L., Morawska, L., & Stabile, L. (2022). *Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region*. *Frontiers in Public Health*, 1087087. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1087087>
- Fernández Lobo, A. (2019). *Simulación y optimización de la ventilación en un bloque quirúrgico durante la apertura de puertas* (Trabajo de fin de grado). Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/37351>
- Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L., Pan, S., Wu, J., Tang, L., & Clements-Croome, D. (2017). *A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation*. *Sustainable Cities and Society*, 32, 375–396. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.011>
- Toftum, J., & Wargocki, P. (2017). *Effective energy-efficient classroom ventilation for temperate zones*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering
- Air Movement and Control Association International. (2016). *ANSI/AMCA Standard 210-16: Laboratory methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating*. AMCA.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 5801:2017: Fans—Performance testing using standardized airways*.

Grainger. (2024). *Round compact axial fans – Dayton* [Catálogo comercial]. Recuperado el 15 de enero de 2026, de

<https://www.grainger.com/category/hvac-and-refrigeration/cooling-fans/equipment-cooling-axial-fans/compact-axial-fans>

McMaster-Carr. (2025). *Return air grilles* [Catálogo comercial]. Recuperado el 15 de enero de 2026, de

<https://www.mcmaster.com/products/grilles/return-grilles-2/>

McMaster-Carr. (2025). *Panel air filter frames (galvanized steel)* [Catálogo comercial]. Recuperado el 15 de enero de 2026, de

<https://www.mcmaster.com/air-filter-housings/>

McMaster-Carr. (2025). *High-efficiency pleated panel air filters (MERV 11)* [Catálogo comercial]. Recuperado el 15 de enero de 2026, de

<https://www.mcmaster.com/products/filters/merv-filter-rating~11/>

Cámara de la Construcción de Guayaquil. (2019). *Precios unitarios – rubros referenciales* (abril 2019). Guayaquil, Ecuador.

ASHRAE. (2019). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

National Institute of Standards and Technology. (2020). *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity* (Version 1.1) (NIST CSWP 041620). U.S. Department of Commerce. <https://www.nist.gov/cyberframework>

Persily, A. (2022). Development and application of an indoor carbon dioxide metric. *Indoor Air*, 32(7), e13059.

Khovalyg, D., Kazanci, O. B., Halvorsen, H., Gundlach, I., Bahnfleth, W. P., Toftum, J., & Olesen, B. W. (2020). Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. *Energy and Buildings*, 213, 109819.

Organización Mundial de la Salud. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen ejecutivo*. Organización Mundial de la Salud.  
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

## Apéndice A

### Evaluación energética del sistema de ventilación propuesto

La evaluación energética del sistema de ventilación propuesto se realizó con el objetivo de estimar la potencia eléctrica requerida durante su operación en condiciones conservadores. Para ello, se adoptó un enfoque normativo y trazable empleando como indicador principal la potencia específica del ventilador (SFP), definido como la relación entre la potencia eléctrica absorbida por el motor y el caudal volumétrico de aire transportado, expresada en unidades de  $W \left( \frac{m^3}{s} \right)$ .

De acuerdo con lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-HS-CL, numeral 6.2.2.5, el uso del indicador SFP (Specific Fan Power) es obligatorio para la justificación energética de sistemas de ventilación y extracción, permitiendo evaluar su desempeño sin recurrir a estimaciones individuales de pérdidas de carga por componentes. La norma establece dos rangos principales:

- $SFP_1 \left( \leq 500 \left[ \frac{W}{\frac{m^3}{s}} \right] \right)$
- $SFP_2 \left( 500 \leq 750 \left[ \frac{W}{\frac{m^3}{s}} \right] \right)$

Dichos rangos aplicables son aplicables a ventilación mecánica. Considerando que el sistema incorpora filtración de aire exterior y que, en condiciones reales de operación puede presentarse incrementos de resistencia asociados al ensuciamiento del filtro y a pérdidas locales por instalación, es decir el SFP escogido es:

$$\omega_{exp} = 750 \left[ \frac{W}{\frac{m^3}{s}} \right]$$

El caudal volumétrico de diseño obtenido mediante simulación del sistema es:

$$Q = 492 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

Transformando las unidades de caudal de diseño a unidades equivalentes con SFP:

$$Q = 492 \left[ \frac{m^3}{h} \right] \times 0.0002777 = 0.1366 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

A partir del caudal volumétrico transformado en las unidades correctas, se procede a calcular la potencia que consumiría un ventilador:

$$P_{el,1} = \omega_{esp} * Q = 750 \left[ \frac{W}{\frac{m^3}{s}} \right] * 0.1361 \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 102,1 [W]$$



Dado que el sistema contempla dos ventiladores en un arreglo paralelo, la potencia eléctrica total sería:

$$P_{el,total} = P_{el,1} * 2 = 102,1 [W] * 2 = 204,2 [W]$$

## Apéndice B

### Costo ventiladores

Costo referencial de ventilador con características establecidas en los criterios de diseño (Grainger- Oblong Compact Axial Fans)

Standard Oblong Axial Fans						
 <p>Standard oblong axial fans are used in dry locations to cool equipment within an enclosure. These equipment-cooling fans have an oblong housing that fits into a matching cutout for installation.</p>						
<b>115V AC , Lead Wires</b>						
↑ Height	Depth	CFM @ 0.000-in. SP	IP Rating	Housing Material	Brand	Price
6-3/4 in	2 in	200 cfm	IP20	Aluminum	DAYTON	\$74.27
—	1-1/2 in	240 cfm	None	Cast Aluminum	HOFFMAN	\$628.44
<b>120V AC , Terminals</b>						
↑ Height	Depth	CFM @ 0.000-in. SP	IP Rating	Housing Material	Brand	Price
6-3/4 in	2 in	232 cfm	IP33	Aluminum	DAYTON	\$69.15
<b>230V AC , Terminals</b>						
↑ Height	Depth	CFM @ 0.000-in. SP	IP Rating	Housing Material	Brand	Price
6-3/4 in	2 in	229 cfm	IP33	Aluminum	DAYTON	\$70.96
Standard Oblong Axial Fan Kits						
 <p>Standard oblong axial fan kits include an oblong-shaped fan plus a power cord for making an electrical connection and a guard for shielding the fan blades. These equipment-cooling fans are used in dry locations to cool equipment within an enclosure. They have an oblong housing that fits into a matching cutout for installation. The fan guard allows airflow while helping to protect the blades from damage and prevent injuries from accidental contact.</p>						
↑ Height	Depth	CFM @ 0.000-in. SP	IP Rating	Housing Material	Brand	Price
6-3/4 in	2 in	180/195 cfm	20	Cast Aluminum	DAYTON	\$139.32
6-3/4 in	2 in	180/195 cfm	20	Cast Aluminum	DAYTON	\$134.37
6-3/4 in	2 in	429/496 cfm	20	Cast Aluminum	DAYTON	\$132.68

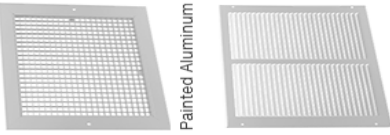
## Apéndice C

### Costo rejillas

Costo referencial de rejillas con características establecidas en los criterios de diseño (McMaster-Carr)

35 Products

**Return Grilles**



Cover the opening where air is pulled into your HVAC system.

For  Duct  Faceplate

HT.	Wd.	Color	HT.	Wd.	Mounting Location	Mounting Fasteners Included	Each
<b>Painted Aluminum</b>							
6"	6"	White	7 3/4"	7 3/4"	Wall	Yes	1847K11 \$31.67
8"	8"	White	9 3/4"	9 3/4"	Wall	Yes	1847K13 41.94
10"	10"	White	11 3/4"	11 3/4"	Wall	Yes	1847K16 45.16
12"	12"	White	13 3/4"	13 3/4"	Wall	Yes	1847K19 55.00
<b>Painted Steel</b>							
6"	12"	White	7 3/4"	13 3/4"	Wall	Yes	2009K1 5.59
6"	14"	White	7 3/4"	15 3/4"	Wall	Yes	2009K5 5.16
8"	12"	White	9 3/4"	13 3/4"	Wall	Yes	2009K2 9.33
8"	14"	White	9 3/4"	15 3/4"	Wall	Yes	2009K6 9.56
10"	12"	White	11 3/4"	13 3/4"	Wall	Yes	2009K3 13.72
10"	14"	White	11 3/4"	15 3/4"	Wall	Yes	2009K7 15.65
12"	12"	White	13 3/4"	13 3/4"	Wall	Yes	2009K4 11.48
12"	14"	White	13 3/4"	15 3/4"	Wall	Yes	2009K8 16.89
14"	14"	White	15 3/4"	15 3/4"	Wall	Yes	2009K18 15.13
16"	16"	White	17 3/4"	17 3/4"	Wall	Yes	2009K43 33.33
16"	20"	White	17 3/4"	17 3/4"	Wall	Yes	2009K36 24.45
16"	24"	White	17 3/4"	17 3/4"	Wall	Yes	2009K23 30.70
20"	20"	White	21 3/4"	21 3/4"	Wall	Yes	2009K37 29.97
20"	20"	White	21 3/4"	21 3/4"	Wall	Yes	2009K19 32.17
24"	14"	White	29 3/4"	19 3/4"	Wall	Yes	2009K31 32.62
24"	24"	White	25 3/4"	25 3/4"	Wall	Yes	2009K87 59.34
30"	14"	White	31 3/4"	15 3/4"	Wall	Yes	2009K32 41.29


lobie App | Solidworks Add-In | eProcurement | API | Help | Settings

**Filter-Ready Return Grilles**

Add a filter (not included) to these grilles for protection against dust and debris entering your HVAC system. Select a filter that matches your duct size.

For  Duct  Faceplate

HT.	Wd.	Color	HT.	Wd.	Mounting Location	Mounting Fasteners Included	Mounting Hole Dia.	Each
<b>Painted Steel</b>								
14"	14"	White	16 13/16"	16 13/16"	1"	Wall	No	20105K32 \$27.71
14"	20"	White	16 13/16"	22 13/16"	1"	Wall	No	20105K52 53.59
14"	30"	White	16 13/16"	32 13/16"	1"	Wall	No	20105K72 76.74
16"	16"	White	18 13/16"	18 13/16"	1"	Wall	No	20105K42 53.49
16"	20"	White	18 13/16"	22 13/16"	1"	Wall	No	20105K53 57.98
16"	25"	White	18 13/16"	27 13/16"	1"	Wall	No	20105K62 76.08
20"	14"	White	22 13/16"	16 13/16"	1"	Wall	No	20105K34 36.47



Apéndice D

Costo de porta filtros

Costo referencial de porta filtros con características establecidas en los criterios de diseño (McMaster-Carr)

Panel Air Filter Frames



Hold panel filters in place. The frames can be welded together to hold multiple filters. The trade size is the actual size of the frame.



Replacement Clip

For HVAC Filter Trade Size	Frame Material	Frame Ga.	Frames Mounting Hardware		Includes	Each	Replacement Clips		
			Frame Included	Mounting Hardware Included			Pkg. Qty.	Pkg.	
6 x 6	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	\$43.14	2	20615K85	\$6.50
8 x 8	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	43.14	2	20615K85	6.50
10 x 10	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	38.80	2	20615K85	6.50
10 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	47.97	2	20615K85	6.50
12 x 12	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	45.74	2	20615K85	6.50
12 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	48.63	2	20615K85	6.50
12 x 24	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	45.74	2	20615K85	6.50
14 x 14	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	47.29	2	20615K85	6.50
14 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	40.91	2	20615K85	6.50
14 x 24	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	50.66	2	20615K85	6.50
14 x 25	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	51.00	2	20615K85	6.50
14 x 30	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	57.37	2	20615K85	6.50
15 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	40.62	2	20615K85	6.50
16 x 16	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	48.63	2	20615K85	6.50
16 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	44.91	2	20615K85	6.50
16 x 24	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	51.34	2	20615K85	6.50
16 x 25	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	47.20	2	20615K85	6.50
16 x 30	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	53.34	2	20615K85	6.50
18 x 18	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	49.97	2	20615K85	6.50
18 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	50.66	2	20615K85	6.50
18 x 24	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	52.00	2	20615K85	6.50
18 x 25	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	52.34	2	20615K85	6.50
18 x 30	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	57.37	2	20615K85	6.50
20 x 20	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	47.20	2	20615K85	6.50
20 x 22	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	51.00	2	20615K85	6.50
20 x 24	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	49.47	2	20615K85	6.50
20 x 25	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	49.46	2	20615K85	6.50
20 x 30	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	59.66	2	20615K85	6.50
22 x 22	Galvanized Steel	16	Yes	Yes	Retaining Clips, Sealing Gasket	53.37	2	20615K85	6.50

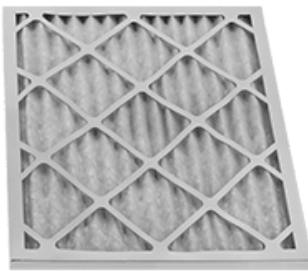
Apéndice E

Costo de filtros

Costo referencial de Filtros MERV11 (McMaster-Carr)

115 Products

High-Efficiency Pleated Panel Air Filters



Hvac Filter Trade Size	MERV Rating	Filter Rating	Max. Temp., °F	Specs. Met	Small Pack		Large Pack	
					Pkg. Qty.	Pkg.	Pkg. Qty.	Pkg.
<b>1" Thick</b>								
12 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T41	4	3881T2
14 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T42	2	3881T2
15 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T43	2	3881T3
16 x 16	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T214	2	3881T4
16 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T44	2	3881T215
16 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T45	2	3881T5
16 x 30	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T216	2	3881T6
18 x 18	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T218	2	3881T217
18 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T46	2	3881T219
20 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T51	2	3881T7
20 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T52	2	3881T8
20 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T56	2	3881T9
20 x 30	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T221	2	3881T11
24 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T57	2	3881T22
<b>2" Thick</b>								
10 x 10	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T223	2	3881T24
12 x 12	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T225	2	3881T226
12 x 16	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T227	2	3881T228
12 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T229	2	3881T231
12 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T61	2	3881T15
14 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T62	2	3881T16
15 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T63	2	3881T17
16 x 16	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T232	2	3881T233
16 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T64	2	3881T18
16 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T65	2	3881T19
16 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T234	2	3881T235
18 x 18	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T236	2	3881T237
18 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T66	2	3881T21
20 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T67	2	3881T22
20 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T68	2	3881T23
20 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T69	2	3881T24
20 x 30	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T238	2	3881T239
24 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T71	2	3881T25
<b>4" Thick</b>								
12 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T241	2	3881T242
14 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T243	2	3881T244
16 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T245	2	3881T246
16 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T73	2	3881T27
18 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T247	2	3881T248
20 x 20	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T74	2	3881T28
20 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T75	2	3881T29
20 x 25	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T76	2	3881T31
24 x 24	11	UL 900	150	UL 900	2	3881T77	2	3881T32

## Apéndice F

### Cálculos utilizados como entrada para el modelo CONTAM

- **Volumen del aula A206**

**Datos:**

$$A = 117 \text{ m}^2$$

$$h = 3 \text{ m}$$

$$V = A \cdot h = 117 \cdot 3 = 351 \text{ m}^3$$

- **Caudal mínimo de aire exterior por ocupación (criterio normativo)**

**Normativo:** tasa mínima para aulas  $q_p = 4.2 \text{ L/s} \cdot \text{per person}$  (ANSI/ASHRAE 62.1-2019)

**Datos:**

$$N = 63 \text{ personas}$$

$$q_p = 4.2 \text{ L/s} \cdot \text{per person}$$

$$Q = N \cdot q_p = 63 \cdot 4.2 = 264.6 \text{ L/s} \approx 952.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Renovaciones de aire por hora (ACH)**

$$ACH = \frac{Q}{V} = \frac{952.6 \text{ m}^3/\text{h}}{351 \text{ m}^3} = 2.71 \text{ h}^{-1}$$

$$N = 63 \text{ personas}$$

$$q_p = 4.2 \text{ L/s} \cdot \text{per person}$$

$$Q = N \cdot q_p = 63 \cdot 4.2 = 264.6 \text{ L/s} \approx 952.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Caudal por ventilador (diseño del sistema)**

$$Q_{fan} = \frac{Q}{2 \text{ ventiladores}} = \frac{952.6 \text{ m}^3/\text{h}}{2 \text{ ventiladores}} = 480 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Velocidad promedio del aire en rejilla**

**Datos:**

$$Q_{fan} = 480 \text{ m}^3/h$$

$$A = 0.09 \text{ m}^2$$

**Conversión:**

$$480 \text{ m}^3/h = \frac{480}{3600} = 0.1333 \text{ m}^3/s$$

**Velocidad:**

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.1333}{0.09} = 1.48 \text{ m/s}$$