



Universidad de Oviedo

**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**ÁREA DE EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES A PARTIR DE LOS  
DATOS OBTENIDOS POR SENSORES DE MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE  
AIRE**

**D. Piñera García, María del Pilar  
TUTOR: D. Rubio García, Ramón**

**FECHA: Mayo de 2024**

**MEMORIA**

# Resumen

El objetivo de este trabajo fin de grado es utilizar los datos proporcionados por los sensores de CO<sub>2</sub>, para tomar decisiones sobre la ventilación y la estimación del número de personas en espacios interiores. Esto incluye comprender la normativa detrás de los sensores, recopilar y analizar los datos obtenidos, interpretar las gráficas resultantes y estimar el número de personas en las estancias. Se espera que este estudio contribuya a mejorar la comprensión y la gestión de la calidad del aire interior.

# Abstract

*The objective of this thesis is to utilize the data provided by CO<sub>2</sub> sensors to make decisions regarding ventilation and estimate the number of people in indoor spaces. This includes understanding the regulations behind the sensors, collecting and analyzing the obtained data, interpreting the resulting graphs, and estimating the number of people in the rooms. It is expected that this study will contribute to enhancing the understanding and management of indoor air quality.*

# Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a todos los profesores que participaron en este experimento, cuya colaboración fue fundamental para el desarrollo y la realización del proyecto.

Asimismo, deseo agradecer a MediaLab por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Su apoyo fue crucial para la adquisición del equipo y material, los cuales fueron esenciales para la ejecución de las pruebas y experimentos.

También quiero expresar mi gratitud al personal de limpieza y a las conserjes por su amabilidad y disposición para permitirme acceder a las aulas y realizar el mantenimiento de los sensores. Su colaboración fue fundamental para garantizar el buen funcionamiento de los equipos y la realización exitosa de las mediciones.

# ÍNDICE

<b>1. Introducción.....</b>	<b>12</b>
1.1.- Motivación.....	12
1.2.- Objetivos.....	13
1.3.- Medidor de CO <sub>2</sub> .....	13
1.3.1.- Hardware.....	14
1.3.1.1.- Sensor SCD 30.....	14
1.3.1.2.- Zumbador.....	14
1.3.1.3.- Tira LED.....	15
1.3.1.4.- Microprocesador.....	15
1.3.2.- Funcionamiento.....	16
1.3.3.- Software.....	17
1.3.3.1.- Programación del ESP32.....	17
1.3.3.2.- Base de datos.....	18
1.3.3.3.- Aplicación Web.....	18
<b>2. Estado del arte.....</b>	<b>20</b>
2.1.- Variables del sensor de CO <sub>2</sub> .....	20
2.1.1.- Concentración de CO <sub>2</sub> .....	20
2.1.2.- Temperatura.....	21
2.1.3.- Humedad relativa.....	22
2.1.4.- Relación entre la temperatura y la humedad relativa.....	23
2.2.- Norma RITE.....	24
2.2.1.- Temperatura y Humedad.....	24
2.2.2.- Concentración de CO <sub>2</sub> .....	25
2.3.- Sistemas de Ventilación.....	26
2.3.1.- Ventilación natural.....	27
2.3.2.- Ventilación mecánica.....	28
2.3.3.- Ventilación híbrida.....	31
2.4.- Big Data.....	31
2.4.1.- Introducción al Big Data.....	31
2.4.2.- Big Data para el Sensor de CO <sub>2</sub> .....	33
2.5.- Sistemas de conteo de personas.....	34

2.5.1.- Conteo por Infrarrojos .....	34
2.5.2.- Conteo por cámara 3D.....	35
2.5.3.- Conteo mediante Inteligencia Artificial .....	35
2.5.4.- Conteo por Wifi .....	36
2.5.5.- Conteo por alfombra .....	36
2.6.- Estimación del número de personas.....	36
<b>3. Diseño del experimento .....</b>	<b>39</b>
3.1.- Recopilación de datos.....	39
3.1.1.- Primera toma de datos .....	41
3.1.2.- Segunda Toma de datos .....	41
3.1.3.- Tercera toma de datos .....	42
3.2.- Estimación del número de personas con sensor de CO <sub>2</sub> .....	43
3.2.1.- Tasa de renovación de aire.....	43
3.2.1.1.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basado en Diferencia de CO <sub>2</sub> .....	43
3.2.1.2.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basada en la velocidad del viento .....	44
3.2.1.3.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basado en el Número de Personas.....	45
3.2.1.4.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basado en el tiempo de exposición.....	45
3.2.2.- Ecuaciones de Número de Personas .....	46
3.2.2.1.- Modelo del artículo de Salud Ambiental .....	46
3.2.2.2.- Modelo del artículo de Iñigo Martínez .....	47
3.2.2.3.- Modelo del artículo de Ivonne Serna sin ACH .....	48
3.2.2.4.- Modelo del artículo de Ivonne Serna con ACH .....	49
3.2.3.- Mejora de las fórmulas.....	50
<b>4. Resultados del Experimento .....</b>	<b>52</b>
4.1.- Códigos de Limpieza y de Correlación .....	52
4.2.- Código de Excel.....	56
4.3.- Análisis de los Datos.....	58
4.4.- Estimación del número de personas.....	61
4.4.1.- Análisis de las ecuaciones del número de personas.....	63
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro .....</b>	<b>67</b>
5.1.- Conclusiones .....	67
5.2.- Trabajo futuro .....	68

<b>6. Bibliografía</b> .....	<b>69</b>
------------------------------	-----------

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.-Sensor de CO <sub>2</sub> .....	14
Figura 1.2.- Sensor SCD 30.....	14
Figura 1.3.-Altavoz Buzzer KY-006 .....	15
Figura 1.4.- Tira Led WS2812B.....	15
Figura 1.5.- Microprocesador ESP32.....	16
Figura 1.6.- Sensor CO <sub>2</sub> decretando que urge ventilar .....	16
Figura 1.7.- Sensor de CO <sub>2</sub> decretando que urge abrir ventanas.....	17
Figura 1.8.- Jerarquía de la Base de Datos .....	18
Figura 1.9.- Aplicación Web del Sensor de CO <sub>2</sub> .....	19
Figura 2.1.- Límites de CO <sub>2</sub> .....	21
Figura 2.2.- Límites de la Temperatura.....	22
Figura 2.3.- Límite de la Humedad Relativa .....	22
Figura 2.4.- Comparación de la Temperatura y la Humedad .....	23
Figura 2.5.- Límite Anual de la concentración de CO <sub>2</sub> .....	26
Figura 2.6.- Ventilación Natural.....	27
Figura 2.7.- Ventilación Mecánica por Admisión .....	28
Figura 2.8.- Ventilación Mecánica por Extracción con Rejillas .....	29
Figura 2.9.- Ventilación Mecánica por Extracción de caudal Variable .....	30
Figura 2.10.- Ventilación Mecánica de doble flujo .....	30
Figura 2.11.- Big Data .....	32
Figura 2.12.- Gráfica con el Lenguaje en R.....	34

Figura 2.13.- Gráfica con Python .....	34
Figura 2.14.- Control por Infrarrojos.....	35
Figura 2.15.- Control por cámara 3D.....	35
Figura 2.16.- Control por IA .....	36
Figura 2.17.-Control por alfombra .....	36
Figura 2.18.- Correlación de las Variables.....	38
Figura 3.1.- Plantilla del registro del Número de personas .....	40
Figura 3.2.- Medidor laser TECCPO .....	40
Figura 3.3.- Recopilación de los sensores .....	41
Figura 3.4.- Sensores para triangulación.....	42
Figura 3.5.- Sensores para Tercera Toma.....	42
Figura 4.1.-Diagrama Bloques Limpieza.....	52
Figura 4.2.- Tres primeras filas del CSV.....	52
Figura 4.3.- Gráficos Comparación Resultados .....	53
Figura 4.4.- Diagrama de Caja con <i>Outliers</i> .....	54
Figura 4.5.- Diagrama de Caja Sin <i>Outliers</i> .....	55
Figura 4.6.- Gráfica Comparación .....	55
Figura 4.7.- Diagrama de bloques Unión Archivos .....	56
Figura 4.8.- Diagrama de Bloques de Visual Basic.....	56
Figura 4.9.- Imagen Botones de acceso rápido .....	58
Figura 4.10.- Sensor Calibrado.....	58
Figura 4.11.- Sensor No Calibrado .....	58
Figura 4.12.- Valores atípicos .....	59

<b>Figura 4.13.- Datos de cuatro meses en MediaLab .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 4.14.- Sensor con <i>Outlier</i>. .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 4.15.- Gráfica sin ventilación. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 4.16.- Gráfica con ventilación. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 4.17.- Gráfica Sin Ventilación Final. ....</b>	<b>61</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Límites de la Temperatura y la Humedad.....	25
Tabla 3.1.- Tabla Volúmenes Primera Toma .....	41
Tabla 3.2.- Tabla Volúmenes Tercera Toma.....	43
Tabla 4.1.- Recopilación datos en Excel .....	62
Tabla 4.2.- Recopilación Preliminar de los Métodos.....	63
Tabla 4.3.- Recopilación del Error de la Fórmula .....	64
Tabla 4.4.- Recopilación de los Métodos según su error.....	64
Tabla 4.5.- Recopilación de media de K1 .....	65
Tabla 4.6.- Recopilación de media de K2 .....	65
Tabla 4.7.- Recopilación de Constante K1.....	66
Tabla 4.8.- Recopilación de Constante K2.....	66



# 1. Introducción

## 1.1.- Motivación

Durante la pandemia del COVID-19 hubo un creciente auge sobre la importancia de la ventilación en espacios cerrados, ya que el virus se transmite principalmente por vía aérea, tal y como se detalla en el artículo de David Marín García de 2020 [\[1\]](#). No obstante, no solo el COVID-19 se transmite de esta manera, sino también hay otros virus como la gripe, el resfriado o la neumonía, entre otros como se puede observar en la investigación de Mosso de 2002 [\[2\]](#).

A pesar de que estas enfermedades han afectado a la población desde hace décadas, fue la pandemia la que detonó la importancia de la ventilar de manera adecuada las estancias, sobre todo aquellas donde la probabilidad de contagio se multiplica debido a su carácter hermético o la insuficiente posibilidad de crear una corriente de aire que las ventile, como por ejemplo en un avión o una sala de espera del centro sanitario.

Debido a esto, los sensores de dióxido de carbono resultaron fundamentales durante el confinamiento y la posterior incorporación a la nueva realidad, plagada de normas y distancias, ya que permitían medir el nivel de CO<sub>2</sub> en el ambiente, evaluando el grado necesario de ventilación de una sala.

Teniendo en cuenta que a mayor concentración de CO<sub>2</sub> aumenta el riesgo de contagio, y tomando como referencia la norma RITE sobre el bienestar e higiene en los edificios, los niveles de CO<sub>2</sub> aceptables deben mantenerse entre 500 partes por millón (ppm) y 900 ppm en caso de oficinas y residencia.

El objetivo de este trabajo es realizar una toma de decisiones partiendo de los datos obtenidos por los sensores de CO<sub>2</sub> instalados en diferentes estancias del Edificio Polivalente de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, contemplando la evaluación de los diversos métodos de ventilación y la estimación del número de personas en espacios cerrados mediante el uso de dichos sensores de CO<sub>2</sub>.



## 1.2.- Objetivos

- Entender la normativa relacionada con la concentración de CO<sub>2</sub>: Comprender en profundidad las regulaciones con relación a la concentración del dióxido de carbono, temperatura y humedad relativa.
- Recopilación y análisis de los datos de los sensores: Recoger valores en diversos entornos, con el propósito de realizar un análisis posterior. Los datos incluirán mediciones de CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad relativa y número de personas. Esta información permitirá obtener una visión más completa y representativa de las condiciones ambientales.
- Interpretación de gráficas generadas por los sensores de CO<sub>2</sub>: Entender y relacionar en profundidad las gráficas y los datos proporcionados por los sensores.
- Estimación del número de personas en espacios interiores: Proponer el mejor método para estimar el número de personas presentes en una estancia.

## 1.3.- Medidor de CO<sub>2</sub>

Antes de empezar a explicar el experimento, es fundamental examinar el sensor empleado. Es el sensor que César Silva López, un antiguo residente de MediaLab, hizo para su trabajo fin de grado.

Este opera según un principio simple pero eficaz. Cuando los niveles de CO<sub>2</sub> están dentro del rango óptimo de 400 a 700 ppm garantiza una calidad de aire adecuada, en este rango los LEDs se iluminarían en color verde. A medida que la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta, el color cambia a amarillo y finalmente a rojo, señalizando la urgencia de ventilar. Además, el dispositivo cuenta con un zumbador que emite un tono suave cada vez que cambia de color.

Es relevante señalar que el sensor de CO<sub>2</sub> lleva a cabo aproximadamente 2880 mediciones a lo largo del día, ya que toma medidas cada 30 segundos aproximadamente.

Figura 1.1.-Sensor de CO<sub>2</sub>

### 1.3.1.- Hardware

#### 1.3.1.1.- Sensor SCD 30

Se utilizaron los sensores de la compañía suiza Sensirion para ser más exactos el sensor SCD30. El cual es capaz de dar medidas de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire con un bajo error, además de medir la temperatura y la humedad relativa. Se usa este sensor, no solo por su capacidad sino por su nivel de error. La precisión es de  $\pm (30 \text{ ppm} + 3\% \text{ de la medida de CO}_2)$ , esto quiere decir que el error base es de 30ppm, al que se le suma el 3% de la medida. Es decir, una concentración de 700 ppm nos da un error de  $\pm 51 \text{ ppm}$ , 30ppm por el error base y 21ppm debido al porcentaje de 3.



Figura 1.2.- Sensor SCD 30

#### 1.3.1.2.- Zumbador

La alarma utilizada es un altavoz Buzzer KY-006, el cual es un zumbador pasivo que nos permite emitir sonidos en diferentes frecuencias. Este módulo está conectado al microprocesador para así poder gestionar cuando se activa y la frecuencia de sonido que emitirá. Está configurado de tal manera que, al cambiar los rangos de luces, pita avisando de dicho cambio.



Figura 1.3.-Altavoz Buzzer KY-006

#### 1.3.1.3.- Tira LED

Para visualizar los diferentes rangos de concentración de CO<sub>2</sub> se necesitan una tira de leds RGB, con la posibilidad de que cada led individual pueda mostrar diferentes colores. Los leds WS2812B son elegidos por su capacidad de variar el color aplicando el código RGB con facilidad.



Figura 1.4.- Tira Led WS2812B

Para controlar la señal de la tira, se requiere una resistencia de limitación, ya que estos LEDs necesitan muy poca corriente para funcionar correctamente. Se recomienda usar una resistencia de entre 300  $\Omega$  a 500  $\Omega$  para dichos LEDs, por lo que se ha optado por una resistencia normalizada de 470  $\Omega$ .

#### 1.3.1.4.- Microprocesador

El microprocesador es una parte fundamental del sistema, por lo cual se debe encontrar un modelo que pueda satisfacer las necesidades de diseño requeridas por el resto de los componentes. Se encargará de gestionar y controlar las medidas del sensor de CO<sub>2</sub>, enviar los datos mediante conexión Wifi, enviar señales de control para las alertas sonoras y los cambios de color de la tira led.

El modelo ESP32 del fabricante AZ-Delivery cumple con todas las características impuestas anteriormente.



Figura 1.5.- Microprocesador ESP32

### 1.3.2.- Funcionamiento

El sensor de CO<sub>2</sub> obtiene medidas cada dos segundos, las cuales se guardarán hasta obtener 15 medidas y con ellas se obtendrá la mediana. El valor de la mediana es el que se utilizará para encender los leds en un color u otro dependiendo de la concentración de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, si la concentración es inferior a 700 ppm se muestra el color verde, si la concentración de CO<sub>2</sub> se sitúa entre 700 y 1000 ppm se muestra en ámbar y si la concentración es superior a 1000 ppm se muestra en rojo.

A parte del cambio de color, el pitido también funciona cuando cambia de rango, ya sea de uno inferior a uno superior o viceversa. La alerta sonora se activa una vez de verde a ámbar y dos veces si pasa de rojo a verde.

Figura 1.6.- Sensor CO<sub>2</sub> decretando que urge ventilar



Figura 1.7.- Sensor de CO<sub>2</sub> decretando que urge abrir ventanas

### 1.3.3.- Software

#### 1.3.3.1.- Programación del ESP32

El ESP32 es compatible con el programa Arduino, esto facilita mucho el trabajo, ya que Arduino tiene una amplia disponibilidad de librerías y diferentes atajos que permiten trabajar con los elementos hardware seleccionados de forma completa y flexible.

Es necesario diferenciar entre dos códigos que se podrán implementar para el medidor de CO<sub>2</sub>, debido al funcionamiento local y código Wifi.

**Código Local:** Este código es el necesario para tomar las medidas de CO<sub>2</sub>, cambiar el color de los leds dependiendo de la concentración y de emitir las alertas sonoras cuando este valor asciende o desciende en los diferentes umbrales. Funciona de manera aislada y es necesario una toma de corriente para alimentar el sistema.

**Código Wifi:** Al igual que el código local, también requiere de una toma de corriente, además de una conexión Wifi, ya que con esta se enviarán la información a la base de datos para su posterior gestión y visualización. Parte del código local, añadiéndole la conexión Wifi, la cual le otorga las credenciales de la red empleada y el envío de datos a la base de datos. El código está escrito en dos ficheros diferentes: un .ino con el código y un .h el cual es un archivo de cabecero en el que se deberán introducir las credenciales de la red wifi a la que se desea conectar. A diferencia del Código Local el Código Wifi guarda la media de los 15 valores a una tabla y esta se sube a la base de datos.



### 1.3.3.2.- Base de datos

Con la función de recopilar y almacenar los datos de forma ordenada, se utilizó una base de datos MySQL proporcionada por el servicio de hosting IONOS. La base de datos estará dividida en dos secciones principales:

- Sección de procedimientos: Se almacenarán pequeños scripts, los cuales permitirán realizar acciones dentro de la base de datos, como limpieza de datos.
- Sección de tablas: Se trata de la parte principal de la base de datos, en esta sección se almacenarán los datos de manera organizada y jerárquica. Dicha jerarquía se refiera a la organización de 1 a “n”, donde hay un número finito de espacios, cada uno con “n” sensores, y cada sensor con “n” medidas, como se ve en la figura 1.8.

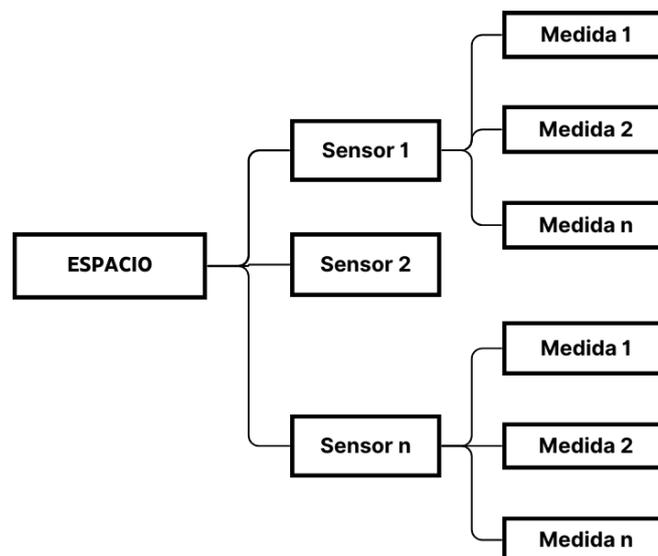


Figura 1.8.- Jerarquía de la Base de Datos

### 1.3.3.3.- Aplicación Web

Para ver los datos recogidos del sensor se utilizó una aplicación Web, con la que se podrá acceder a dichos datos y mostrarlos de manera ordenada para cada uno de los diferentes espacios donde se encuentren los sensores. Cada espacio dispone de su propia cuenta con sus credenciales para poder acceder a todos los sensores que se encuentran disponibles. Dicha aplicación esta alojada en la página Web de la cátedra MediaLab, en una sección dedicada al sensor de CO<sub>2</sub>.

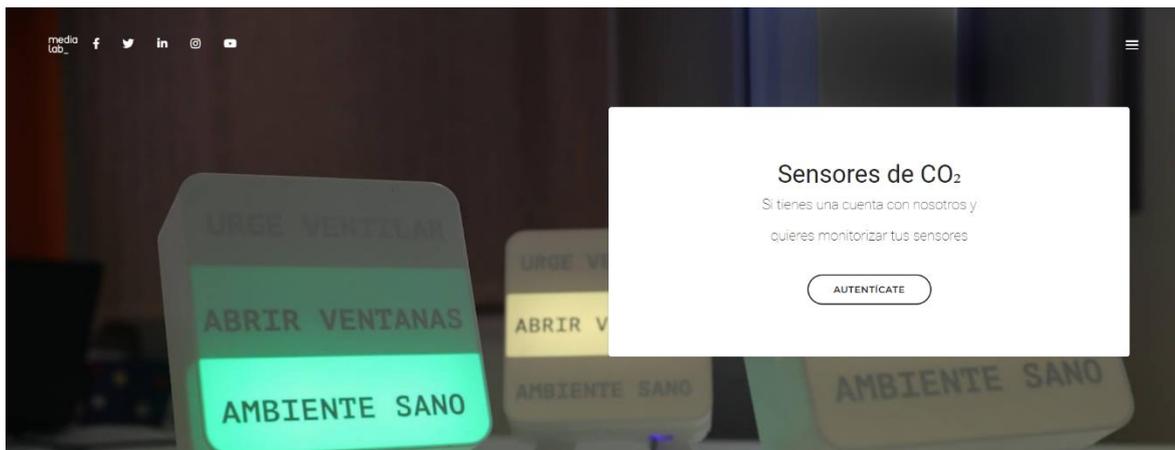


Figura 1.9.- Aplicación Web del Sensor de CO<sub>2</sub>

En esta aplicación se muestran las gráficas de las diferentes variables y se guardan los datos en archivos CSV de los últimos cuatro meses.



## 2. Estado del arte

### 2.1.- Variables del sensor de CO<sub>2</sub>

El sensor nos da tres parámetros: concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa. Es importante saber las consecuencias que tiene sobrepasar los límites recomendables con cada una de ellas, para asegurar que la calidad del aire es excepcional.

#### 2.1.1.- Concentración de CO<sub>2</sub>

Antes de empezar con las consecuencias del CO<sub>2</sub>, es importante saber que es el CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono, también conocido como CO<sub>2</sub>, es un gas incoloro e inodoro que se encuentra en la atmósfera de la tierra, forma parte de la naturaleza y es indispensable para la vida en la Tierra. Sin embargo, en grandes excesos es perjudicial, no solo para la propia vida, sino también para el planeta.

La cantidad de CO<sub>2</sub> que se encuentra en la atmósfera es de 380 ppm, pero esto en una media, dependiendo de donde te encuentres puede aumentar a disminuir. Aunque esta media ha ido aumentando con el pasar de los años.

Teniendo en cuenta estos datos, en los espacios cerrados con personas en su interior el CO<sub>2</sub> aumenta, debido principalmente a que los humanos emiten cierta cantidad de CO<sub>2</sub>, unos 12,5 l/s aproximadamente. Las personas no son el único centro de emisión en una habitación, la presencia de ordenadores o si está encendida la calefacción también emite CO<sub>2</sub>, aunque en menor medida.

Los niveles de CO<sub>2</sub> pueden afectar perjudicialmente a la salud de las personas, es a partir de los 1000 ppm de concentración cuando empiezan a aparecer consecuencias. Entre los 1000 a 1500 ppm, el ambiente es aceptable, pero ya empieza a verse afectadas las capacidades de las personas, entre los 1500 a 2000 ppm se producen dolores de cabeza y a niveles más altos de concentración puede producir náuseas, aumento del ritmo cardíaco o pérdida de la conciencia. Toda esta sintomatología va a depender del tiempo de exposición de estos niveles, cuanto más alto sea el tiempo mayor serán las consecuencias.

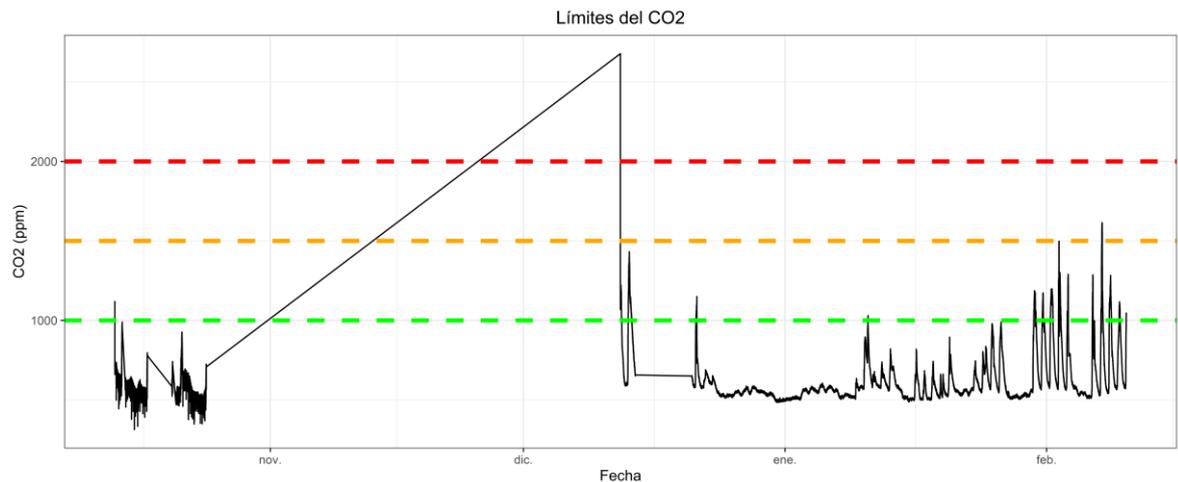


Figura 2.1.- Límites de CO<sub>2</sub>

### 2.1.2.- Temperatura

La temperatura es una magnitud física que expresa el grado o nivel de calor o frío de los cuerpos o del ambiente, dependiendo de varios factores. Por ejemplo, dentro de las habitaciones no solo variara en función del tiempo exterior, sino también de la calefacción o de la cantidad de personas que haya en la estancia.

Teniendo en cuenta todas las variables existe la posibilidad de que la temperatura cause consecuencia en los sujetos. Con una temperatura demasiado alta se puede producir deshidratación y golpes de calor, en casos extremos llegando incluso a causar la pérdida del conocimiento. Mientras que, con una temperatura demasiado baja, su consecuencia es indirecta y al encender la calefacción la mucosidad de las fosas nasales se reduce causando que sea más prolifero para ciertas enfermedades. Al igual que el CO<sub>2</sub>, el tiempo de exposición es fundamental a la hora de conocer los efectos en la salud. Como se verá más adelante, el límite recomendable para la temperatura está entre 25 °C y 21 °C, aunque este depende de la estación del año en la que nos encontremos.

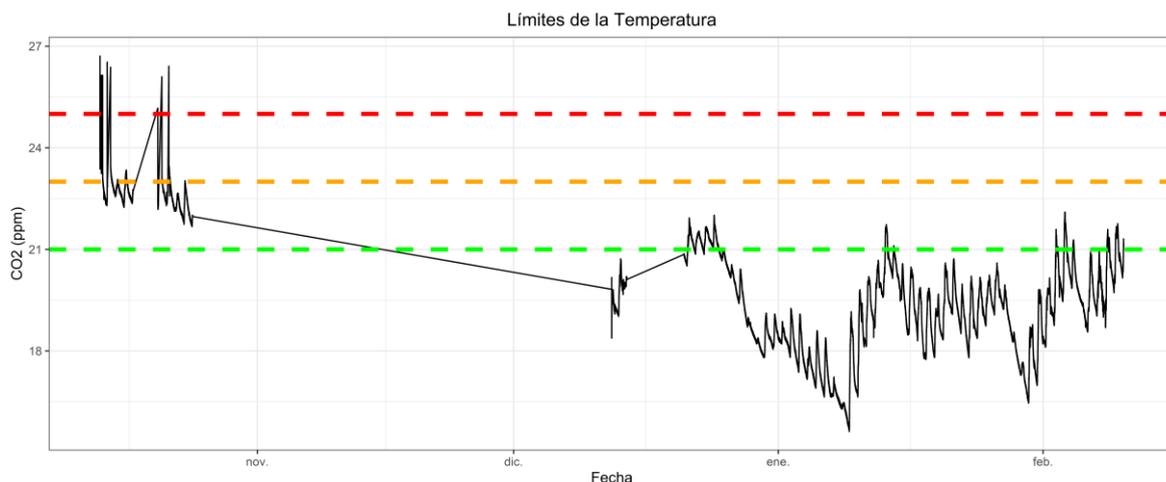


Figura 2.2.- Límites de la Temperatura

### 2.1.3.- Humedad relativa

La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. Dicho eso, hay que tener en cuenta que, desde el punto de la salud, la humedad puede ser más peligrosa que la temperatura, al menos, presentar mayores consecuencias.

Cuando la humedad relativa se encuentra por debajo del 40% genera un ambiente muy seco, donde aumenta la concentración de polvo, puede producir más sequedad de ojos y de garganta, así como molestias cutáneas. Por otro lado, cuando supera el 60% de humedad genera dificultades respiratorias, minimiza la sensación térmica y aumenta la proliferación de bacterias, hongos, mohos o ácaros. La humedad relativa no está absenta al tiempo y al igual que los demás factores, mayor tiempo de exposición más consecuencias.

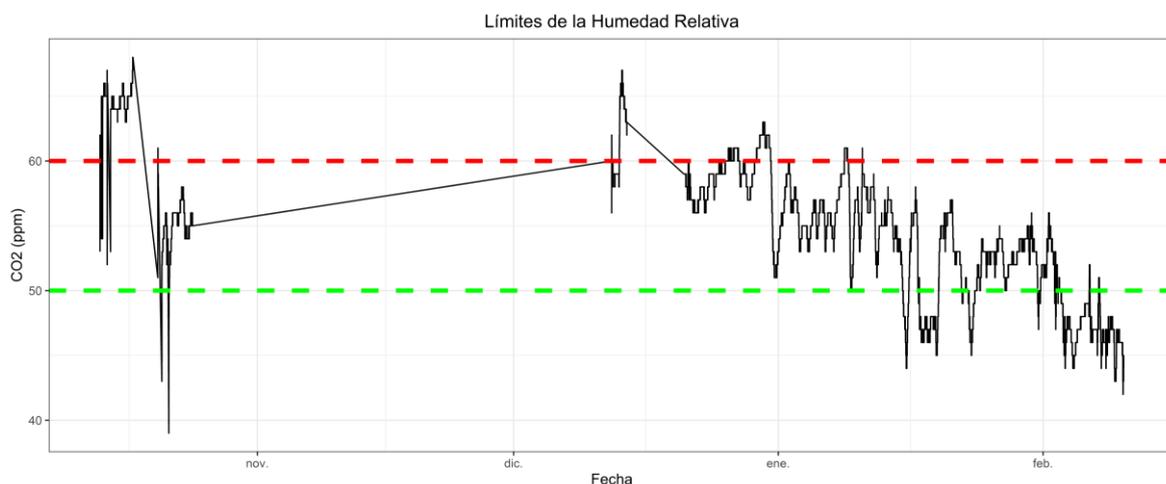


Figura 2.3.- Límite de la Humedad Relativa



### 2.1.4.- Relación entre la temperatura y la humedad relativa

En la figura 2.4 se puede observar que la temperatura y la humedad están correlacionadas entre sí de manera inversa, es decir cuando la temperatura sube la humedad relativa baja.

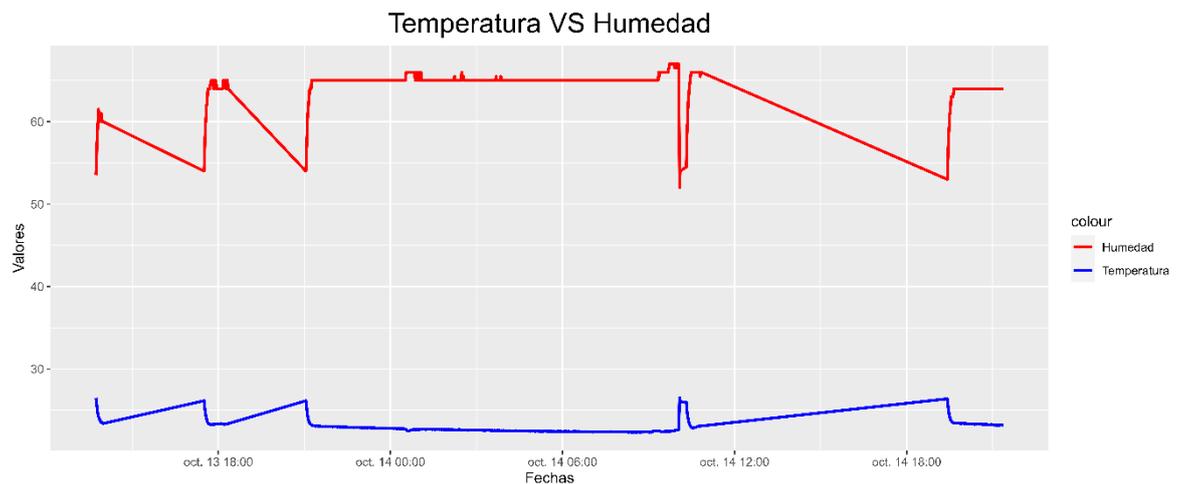


Figura 2.4.- Comparación de la Temperatura y la Humedad

Esta correlación entre temperatura y humedad relativa es debida a la propia fórmula de la humedad relativa. La cual es la división de la presión de vapor entre presión de vapor saturada, como se puede ver en fórmula siguiente. La presión de vapor está relacionada con la temperatura de rocío, mientras que la presión de vapor satura con la temperatura del aire, Ya que la temperatura de rocío se define como la temperatura más baja en la que el aire se enfría, siendo siempre menor que la temperatura del aire. Por lo tanto, el divisor siempre será mayor que el dividendo, esto da como resultado que cuanto mayor sea la temperatura del aire menor será la humedad relativa.

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \cdot 100 = \frac{6.112 \cdot e^{\left(\frac{17.7 \cdot T_d}{T_d + 243.5}\right)}}{6.11 \cdot e^{\left(\frac{17.7 \cdot T}{T + 237.3}\right)}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.1.})$$

Siendo:

$P_v$  = Presión de vapor

$P_{vs}$  = Presión de vapor saturado

$T$  = Temperatura del aire en  $C^\circ$

$T_d$  = Temperatura de rocío en  $C^\circ$



## 2.2.- Norma RITE

Una vez descrito el sensor de CO<sub>2</sub> que se va a utilizar y las consecuencias de cada factor, es importante mencionar la norma detrás de la concentración de CO<sub>2</sub> en los espacios cerrados. Dicha norma es el reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, o también llamada la norma RITE. Es un reglamento español, en el cual se establecen las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar, tanto térmico como higiénico, a través de equipos y sistemas de climatización, ya sea de calefacción, ventilación o refrigeración, y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía.

Teniendo en cuenta la definición de la norma mencionada anteriormente, se puede considerar que es indispensable para un buen bienestar, o en este caso para una buena calidad del aire, ya que en la norma explica cuáles son los límites de CO<sub>2</sub> recomendados dependiendo de cómo sea la habitación, ya sea aulas o industrias.

En este apartado se explicará los límites recomendables de los diferentes factores: temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>; los requisitos para cuando aplicarlos; y de los diferentes parámetros que hay en ellos.

### 2.2.1.- Temperatura y Humedad

Las condiciones interiores de diseño de la temperatura y la humedad relativa se basan en la actividad metabólica de las personas, su grado de vestimenta y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD).

Antes de empezar con las condiciones de la temperatura y humedad relativa hay que entender bien el grado de vestimenta y el porcentaje estimado de insatisfechos.

Para el grado de vestimenta, se establecen los valores dependiendo del aislamiento térmico (clo) de la vestimenta y dependiendo de la estación del año, se tienen los siguientes valores:

- Solo en pantalón corto= 0,1 clo
- Vestimenta tropical: pantalón corto, camisa manga corta y sandalias= 0,3 clo
- Vestimenta de verano ligera: Pantalón largo ligero, camisa de manga corta, calcetines ligeros y zapatos= 0,5 clo



- Vestimenta de trabajo= 0,7 clo
- Vestimenta de invierno ligera: Camisa de manga larga, pantalón grueso, jersey, calcetines gruesos y zapatos= 1,0 clo
- Vestimenta de invierno= 1,5 clo

Hablando del porcentaje estimado de insatisfechos (PPD) hasta el 10% es una situación satisfactoria, ya que el 90% de las personas están satisfechas. Sin embargo, valores superiores indicarán una situación de incomodidad térmica.

Teniendo esto en cuenta, para personas con actividad metabólica sedentaria, con grado de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1,0 clo en invierno y un PPD menor a 10%, los valores límites de temperatura y humedad relativa están indicados en la tabla 2.1.

Estación	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
Verano	23°C / 25°C	45% / 60%
Invierno	21°C / 23°C	40% / 50%

Tabla 2.1.- Límites de la Temperatura y la Humedad

Para los valores diferentes de la actividad metabólica, grado de vestimenta, velocidad del aire y PPD se tiene que seguir la norma UNE.

Al cambiar las condiciones exteriores, la temperatura operativa se podrá variar entre los dos valores calculados para las condiciones extremas de diseño. Es decir, para invierno se podrá admitir una humedad relativa del 35 % con las condiciones extremas durante cortos periodos de tiempo.

#### 2.2.2.- Concentración de CO<sub>2</sub>

La calidad del aire interior (IDA) depende del uso del edificio o local, sin embargo, hay unos mínimos que se deben alcanzar. Se tiene cuatro categorías diferentes de IDA, dependiendo del edificio donde se estén analizando los datos.

- IDA 1: El aire debe tener una calidad óptima. Cuando se habla de esta categoría suele referirse a hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías. El nivel recomendable de concentración de CO<sub>2</sub> para esta categoría es de 350 ppm.



- IDA 2: El aire debe tener una calidad buena. Suele referirse a oficinas, residencias, salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza o similares y piscinas. El nivel recomendable para la concentración de CO<sub>2</sub> es de 500 ppm.
- IDA 3: El aire debe tener una calidad media. Suele referirse a edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles, sala de ordenadores, bares o similares a todos estos sitios. El nivel de CO<sub>2</sub> recomendable para esta categoría es de 800 ppm.
- IDA 4: En esta categoría están los sitios que la calidad de aire es baja. En la norma no especifica ninguno, pero podrían ser sitios como grandes industrias donde las máquinas de por si expulsan un alto nivel de CO<sub>2</sub>. La concentración de CO<sub>2</sub> recomendable para esta categoría es de 1200 ppm.

A parte de la concentración de CO<sub>2</sub> en cada momento, es interesante tener en cuenta la concentración media anual de CO<sub>2</sub>. Esta no debe de sobrepasar los 900 ppm. En el caso de la figura 2.5 la media de concentración de CO<sub>2</sub> es de 567.5 ppm.

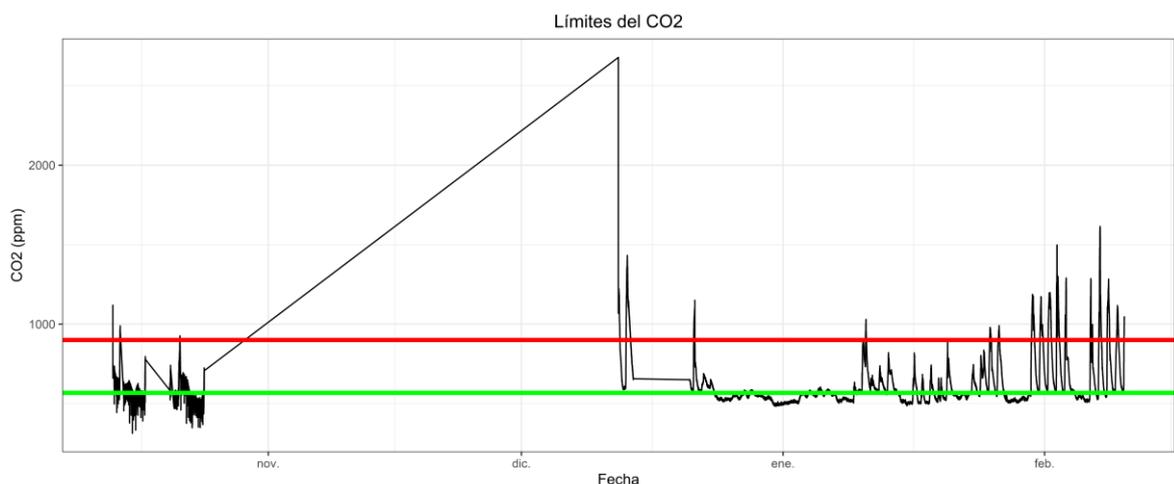


Figura 2.5.- Límite Anual de la concentración de CO<sub>2</sub>

### 2.3.- Sistemas de Ventilación

Como se explica en el artículo de Cronembold Landivar del 2009 sobre el estudio de ventilación [10], una correcta ventilación ayuda a la salud y al confort de las personas en estancias cerradas. A parte de esto, también ayuda a reducir la concentración de CO<sub>2</sub> que haya en el ambiente.

Existen varios tipos de ventilación: natural, forzada o mecánica e híbrida.



### 2.3.1.- Ventilación natural

Esta ventilación es la más simple de las tres, ya que no necesita un aporte de energía artificial, la corriente se formaría mediante la apertura de ventanas o puertas. De esta manera, la diferencia de temperaturas y presiones entre el interior y el exterior generan las fuerzas que permite el movimiento del aire necesario para renovar las estancias. Con este método también depende la orientación y la superficie de las ventanas.

A pesar de su enorme ventaja debido al innecesario consumo energético, este método tiene una importante desventaja, ya que depende de la cantidad de contaminación ambiental en la estancia y la situación climatológica. Por lo general la ventilación natural es suficiente para locales donde los focos de contaminación, como son los ordenadores, radiadores o las propias personas, son pocos y en pequeñas cantidades. Sin embargo, en espacios con un número grande de personas en un reducido espacio, la ventilación natural se queda escasa.



Figura 2.6.- Ventilación Natural

Dentro de la ventilación natural, existen diferentes modelos:

- Ventilación cruzada: También conocida como ventilación transversal, consiste en hacer circular el aire mediante ventanas colocadas a lados opuestos de la habitación. Para que esta ventilación sea lo más eficaz posible, no solo tienen que estar opuestas, sino que no puede haber ningún obstáculo para impida el cambio del aire, además es conveniente que las fachadas sean transversales a la dirección de los vientos dominantes.



- Ventilación convectiva: Este tipo de ventilación se basa en un fenómeno natural llamado convección, el cual consiste en la ascensión del aire caliente y el descenso del aire frío. Pasando este concepto a los espacios cerrados, el aire caliente tiende a ir las partes de arriba mientras que el frío va a las partes de abajo. Si hay aperturas en la parte alta de la habitación, el aire caliente escaparía por estas dejando entrar el aire frío por aperturas bajas. De esta manera a diferencia de la ventilación cruzada las ventanas no tienen que estar necesariamente opuestas.

### 2.3.2.- Ventilación mecánica

La ventilación mecánica implica la creación artificial de corrientes de aire mediante el uso de ventiladores, extractores u otros dispositivos mecánicos. En comparación con la ventilación natural, este método ofrece ventajas significativas al mejorar el flujo de aire y la calidad, filtrándolo, además de reducir el ruido que puede provenir del exterior. Otra ventaja es la aplicación en locales que no comunican directamente con el exterior, ya que su ventilación solo puede lograrse mediante conductos. Sin embargo, una importante desventaja es su consumo energético.

La ventilación mecánica puede implementarse por admisión, extracción y doble flujo.

- Admisión: En el sistema de ventilación mecánica en admisión la entrada de aire se produce mecánicamente mediante el uso de un ventilador, de manera que la distribución del aire se realiza generalmente por conductos. La salida del aire se produce de manera natural a través de las rejillas. En este tipo de ventilación, de manera resumida, el aire se impulsa mediante un ventilador y se expulsa a través de las ventanas o rejillas que tenga la estancia.

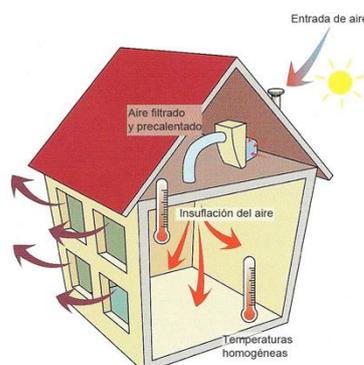


Figura 2.7.- Ventilación Mecánica por Admisión



- Extracción: En el sistema de ventilación mecánica mediante extracción se realiza a través de un ventilador que está conectado a una red de conductos, los cuales extrae el aire de las zonas húmedas de una vivienda, como pueden ser los baños o las cocinas, y lo expulsa al exterior. El aire de admisión entra de forma natural al edificio por las zonas seca, como las habitaciones o el salón, mediante rejillas o ventanas. Como variantes a este sistema podemos tener:
  - Rejillas de admisión reguladas, activas o pasivas: la admisión del aire se realiza mediante rejillas, las cuales se regulan de forma automática en base a parámetros como pueden ser los niveles de contaminantes en el aire, por ejemplo, el dióxido de carbono.

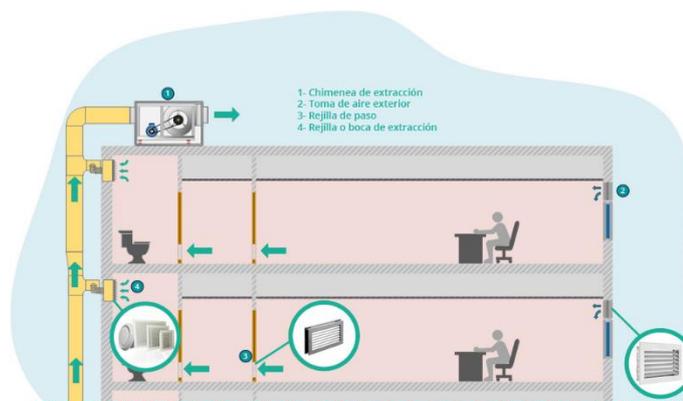


Figura 2.8.- Ventilación Mecánica por Extracción con Rejillas

- Extracción con caudal variable de ventilación: Este tipo de rejillas como bien dice el nombre dependen de diferentes parámetros de la calidad del aire interior, como son la humedad o el dióxido de carbono. Este sistema de ventilación regula el caudal de aire ya sea mediante las rejillas de extracción o directamente del ventilador. El sistema de ventilación mediante extracción proporciona confort y un alto ahorro energético, ya que garantiza un caudal renovado adecuado en cada instante.

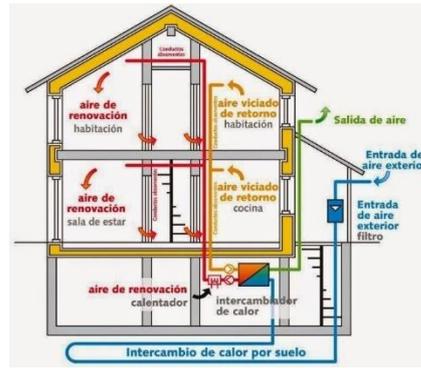


Figura 2.9.- Ventilación Mecánica por Extracción de caudal Variable

- Doble flujo: En este tipo de ventilación tanto la impulsión como la extracción disponen cada uno de un ventilador, estos aseguran que el caudal de aire limpio sea renovado continuamente. Este sistema nos permite modificar la configuración de la admisión y de la extracción, mediante la centralización o descentralización según interese. Una de las ventajas de este tipo de sistemas es que establece la posibilidad de instalar un recuperador de energía, el cual aprovecha parte de la energía contenida en el aire de extracción cediéndosela al aire de admisión. El sistema de doble flujo funcionaría tanto en invierno, precalentando el aire de entrada, como en verano refrescándolo. En este tipo de sistemas, igual que lo indicado anteriormente en extracción, se puede plantear un sistema de caudal variable cuando el caudal fijo suponga un gasto excesivo. Estos sistemas modifican el caudal en función de diferentes parámetros como pueden ser la humedad relativa, VOC, etc.

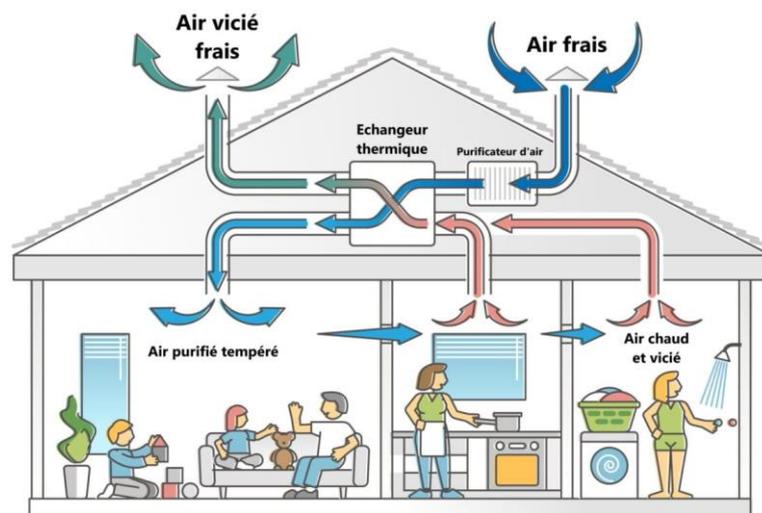


Figura 2.10.- Ventilación Mecánica de doble flujo



### 2.3.3.- Ventilación híbrida

Los sistemas de ventilación mecánica ofrecen una amplia gama de soluciones tecnológicas y constructivas para su implantación en todo tipo de viviendas y edificios, ya sea utilizando uno de los sistemas expuestos anteriormente o combinado varios de ellos, mientras que la ventilación natural promueve una renovación de aire constante sin consumo energético. No obstante, se pueden combinar ambos sistemas para crear la ventilación mixta o híbrida.

La ventilación híbrida aprovecha las ventajas de ambos sistemas, permitiendo una adaptación dinámica a las condiciones ambientales. Cuando las condiciones exteriores son favorables en términos de temperatura, humedad y presión, la renovación del aire se lleva a cabo principalmente a través de la ventilación natural, aprovechando la diferencia de temperaturas y presiones entre el interior y el exterior. Sin embargo, cuando las condiciones son desfavorables en el exterior, como períodos de alta contaminación exterior o cambios bruscos de temperatura, se activa la ventilación mecánica para garantizar una adecuada circulación de aire y mantener la calidad del aire interior. Esto puede lograrse mediante sensores que monitorean las condiciones ambientales y activan los ventiladores cuando sea necesario.

## 2.4.- Big Data

### 2.4.1.- Introducción al Big Data

Big Data es un conjunto de datos cuyo tamaño, complejidad y velocidad de crecimiento dificultan su captura, gestión, procesamiento o análisis mediante tecnologías y herramientas convencionales, tales como bases de datos relacionales y estadísticas convencionales o paquetes de visualización, dentro del tiempo necesario para que sean útiles.



Figura 2.11.- Big Data

Cuando se habla de Big Data se suele conocer como “las tres V” de Volumen, Velocidad y Variedad. Aunque en estos últimos años al ir aumentando cada vez más este concepto, aumentaron las variables, pasando a ser también Variabilidad y Veracidad.

- Volumen: Cuando se suele usar Big Data se habla de grandes volúmenes de datos no estructurados, estos volúmenes suelen ser entre 30 y 50 Terabytes a varios Petabytes.
- Velocidad: La velocidad es el ritmo al que se reciben los datos y al que se le aplica alguna acción. La mayor velocidad de los datos normalmente se transmite directamente a la memoria, en vez de escribirse en un disco. Algunos productos inteligentes habilitados para Internet funcionan prácticamente en tiempo real y requieren una evaluación y actuación en tiempo real.
- Variedad: La variedad hace referencia a los diversos tipos de datos disponibles. Los datos convencionales eran estructurados y podían organizarse claramente en una base de datos relacional. Con el auge del Big Data, estos se presentan en nuevos tipos de datos no estructurados, es decir, difíciles de procesar y analizar. Los tipos de datos no estructurados y semiestructurados, como el texto, audio o video, requieren un preprocesamiento adicional para poder obtener significado y habilitar los métodos.
- Variabilidad: Además de las crecientes velocidades y variedades de datos, los flujos de datos son impredecibles, cambian a menudo y varían mucho. Es un reto, pero las empresas necesitan saber cuándo algo está de moda en los medios sociales, y cómo gestionar los picos de carga de datos diarios, estacionales y desencadenados por eventos.



- Veracidad: La veracidad se refiere a la calidad de los datos. Debido a que estos provienen de tantas fuentes diferentes, es difícil vincular, comparar, limpiar y transformar los datos a través de los sistemas. Las empresas necesitan conectar y correlacionar las relaciones, las jerarquías y los múltiples vínculos de datos. De lo contrario, pueden salirse de control rápidamente.

Big Data se dividen en varias especialidades dependiendo del nivel de capacitación técnica del profesional. En cuanto a la tecnología, se utiliza para gestionar cantidades enormes de información, todo ello con distintos sistemas. Los especialistas en Big Data construyen y trabajan con almacenes de datos donde se guarda la información estructurada para facilitar su procesamiento. Entre las especialidades se encuentran los analistas de Big Data y Ciencia de datos o *Data Science*. Los analistas se encargan de extraer, procesar y almacenar los datos que afectan a la empresa para después crear informes con ellos. Por tanto, su labor se centra en dos áreas: la ingeniería de datos y la ciencia de datos computacional. Mientras que *Data Science* se encarga de convertir esos datos en información valiosa para la gestión del negocio. Este especialista debe de contar con una mentalidad abierta orientada al análisis, la búsqueda de patrones y la resolución de problemas.

#### 2.4.2.- Big Data para el Sensor de CO<sub>2</sub>

Aunque el experimento cuenta con una cantidad de datos relativamente pequeña en comparación con los grandes volúmenes típicos de Big Data, se seguirán los principios fundamentales de este campo: se extraerán, procesarán, agruparán y analizarán los datos obtenidos del sensor de CO<sub>2</sub>.

Lo primera tarea consistiría en limpiar los datos, para ello se pueden utilizar diferentes lenguajes de programación como R, C o Python. En este experimento, se propuso realizar la limpieza mediante Python o el lenguaje R, evaluando cuál de los dos es más efectivo. Aunque ambos lenguajes permiten la limpieza de datos, por ejemplo, eliminar datos duplicados u *outliers*, la calidad de las gráficas del lenguaje R es superior. En la figura 2.12 y 2.13 se puede observar la diferencia de nitidez entre ambos lenguajes.

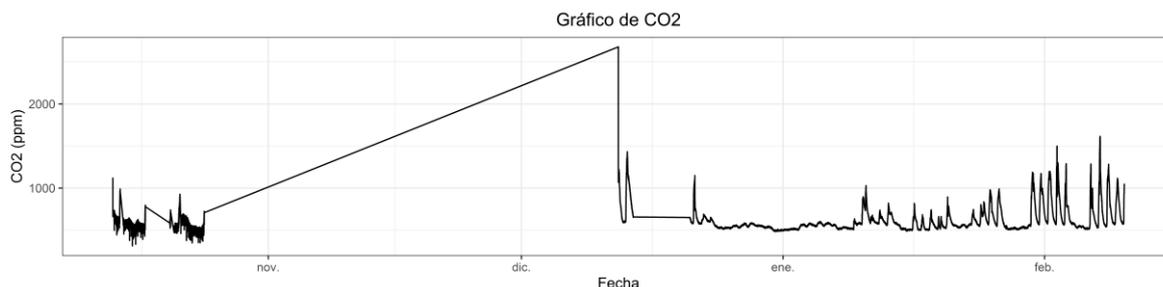


Figura 2.12.- Gráfica con el Lenguaje en R

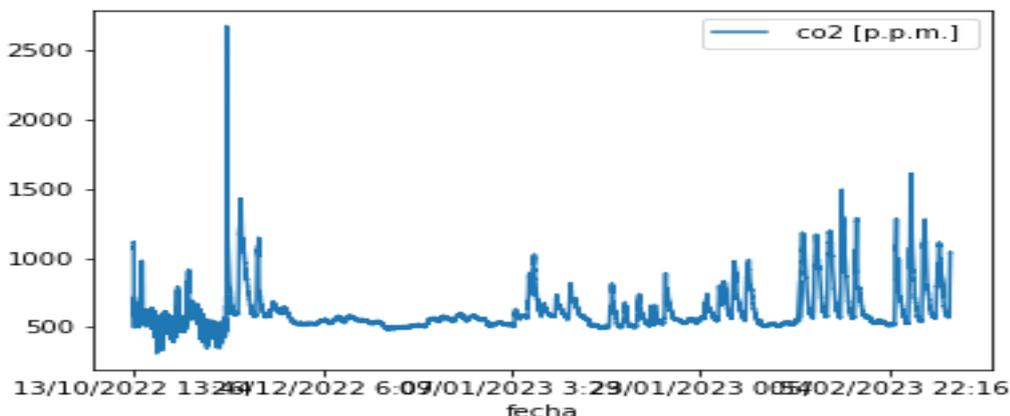


Figura 2.13.- Gráfica con Python

Como se puede apreciar en las figuras, la gráfica generada en R presenta una mayor nitidez en la línea y los ejes. Por lo tanto, dado que el procedimiento para la limpieza de los datos es similar en ambos lenguajes, se recomienda utilizar el lenguaje R para realizar la limpieza y el análisis de los datos.

## 2.5.- Sistemas de conteo de personas

Los sistemas de conteo de personas tienen un papel crucial en la seguridad y gestión de espacios públicos y privados, al asegurar que no se exceda el aforo máximo permitido. Estos comprenden una amplia gama de dispositivos y software, diseñados para monitorear y registrar el flujo de personas. Dependiendo del tipo de dispositivo, pueden instalarse en la entrada de la estancia o a través de conexiones wifi.

### 2.5.1.- Conteo por Infrarrojos

Uno de estos dispositivos utiliza infrarrojos. Se instala en la entrada de la estancia, con el receptor y el transmisor enfrentados. Cuando entra una persona, bloquea la señal infrarroja entre el receptor y el transmisor, indicando el dispositivo que una persona está cruzando la entrada. Además de detectar la presencia de la persona, también puede



determinar la dirección en la que se mueve, lo cual permite realizar un conteo preciso de entrada y salida.

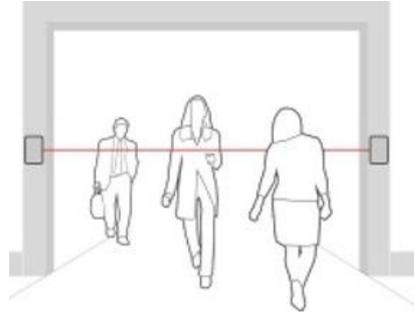


Figura 2.14.- Control por Infrarrojos

### 2.5.2.- Conteo por cámara 3D

Los contadores por cámara 3D son dispositivos que utilizan tecnología estereoscópica, la cual nos permite captar información visual tridimensional. Detecta los movimientos de las personas y distingue a cada individuo, ya sea a la entrada o salida de la estancia. Suelen instalarse sobre los accesos de las habitaciones. Funcionan mediante un software, el cual analiza el video y cuenta las entradas y salidas durante un determinado periodo de tiempo.



Figura 2.15.- Control por cámara 3D

### 2.5.3.- Conteo mediante Inteligencia Artificial

Este tipo de sistemas utiliza una cámara, la cual emplea algoritmos para detectar y contar personas dentro de su campo de visión. La cámara con IA es capaz de analizar las formas que estén en su rango de visión, distinguiendo entre adultos, animales o cochecitos de bebe. Una vez identifica las formas de las personas, el sistema realiza el conteo y transmite los datos a la red central para su análisis.



Figura 2.16.- Control por IA

#### 2.5.4.- Conteo por Wifi

Este sistema se basa en la detección de las señales emitidas por los dispositivos Wifi dentro del área de cobertura. Mediante un algoritmo identifica y contabiliza los dispositivos basados en sus direcciones MAC únicas. El mayor problema es su precisión, ya que al contar los dispositivos si una sola persona está conectada con dos dispositivos simultáneamente, contará a la misma persona dos veces.

#### 2.5.5.- Conteo por alfombra

El sistema de conteo por alfombra consiste en placas inteligentes equipadas con sensores de presión. Dichas placas se colocan en la entrada de las estancias simulando una alfombra. Los sensores de presión captan e interpretan las diferentes presiones ocurridas en la placa, contando así el número de personas.

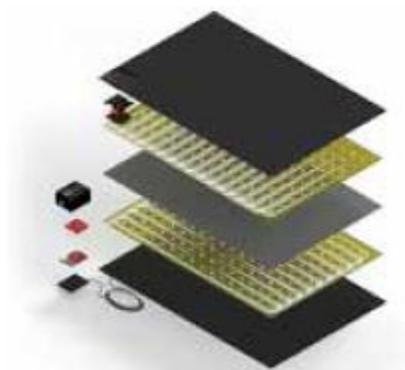


Figura 2.17.-Control por alfombra

### 2.6.- Estimación del número de personas

En diversos estudios, como el artículo de Salud Ambiental del 2024 [29], se ha observado que es posible estimar la concentración de dióxido de carbono en un ambiente



interior a partir del número de personas presentes. Sin embargo, también es factible invertir este enfoque y calcular la estimación ideal del número de personas en función de la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente. Estas ecuaciones de estimación, además del CO<sub>2</sub> y el número de personas, también consideran el volumen del espacio y la temperatura del ambiente interior.

Este enfoque proporciona una herramienta poderosa para la evaluación y control de la ocupación de espacios interiores, contribuyendo así a la creación de ambientes más saludables y confortables.

La correlación entre las variables mencionadas puede observarse en la figura 2.18, que muestra el coeficiente de Pearson entre ellas. Como se analizó anteriormente, la humedad relativa muestra una correlación negativa moderada, de -0.64, con respecto a la temperatura, lo que indica que a medida que la temperatura aumenta, la humedad relativa tiende a disminuir y viceversa.

Por otro lado, tanto el CO<sub>2</sub> como el número de personas presenta una correlación positiva baja, de 0.37. Esto implica que un mayor número de personas en una sala resulta en una concentración más alta de dióxido de carbono, aunque dependen otros factores como presencia de ordenadores o radiadores encendidos.

Similarmente, el volumen y el CO<sub>2</sub> también muestran una correlación positiva baja, con una correlación de 0.32. Esto significa que a medida que aumenta el volumen del espacio, puede haber una mayor concentración de dióxido de carbono en la estancia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta relación está vinculada al número de personas en la sala, ya que por sí solo, el volumen no implica una mayor presencia de CO<sub>2</sub>, sino que aumenta la posibilidad de que haya más dióxido de carbono en la estancia.

Es importante destacar la correlación positiva moderada, de un 0.53, entre el volumen y el número de personas. Esto sugiere que a medida que aumenta el volumen de la estancia, puede albergar un mayor número de personas. Sin embargo, no es válido afirmar lo contrario, ya que el volumen de las estancias es fijo.

Estas relaciones son cruciales para comprender cómo interactúan diversas variables en la gestión del control de la calidad del aire en diferentes entornos. Específicamente, la



relación entre el volumen, el número de personas y la concentración de CO<sub>2</sub> proporciona información valiosa para garantizar ambientes interiores seguros y saludables, además de ayudar en la estimación del número de personas presentes.

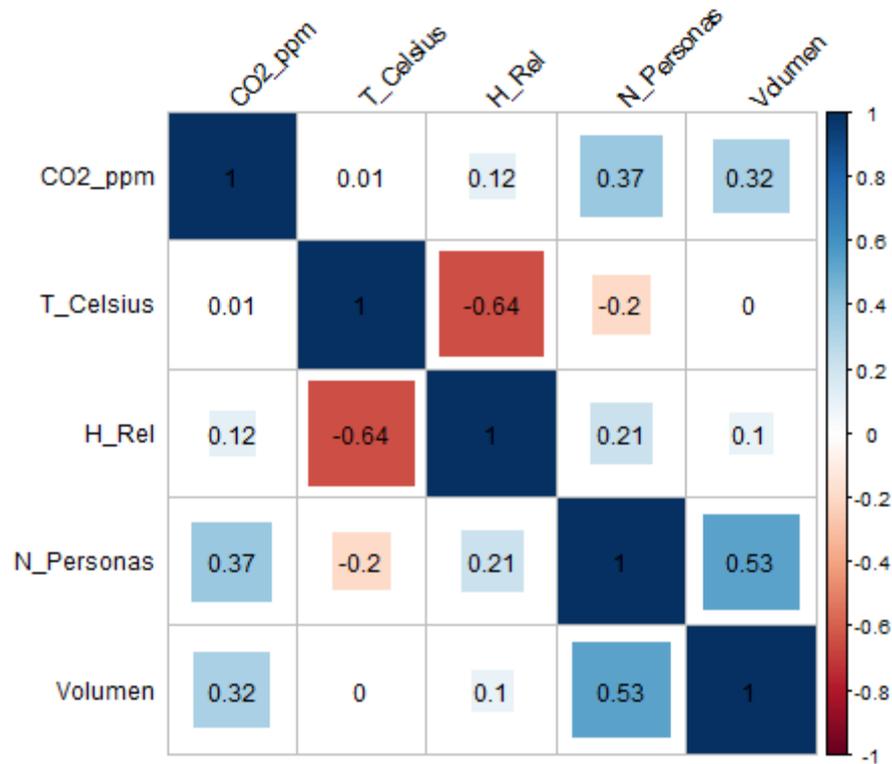


Figura 2.18.- Correlación de las Variables



## 3. Diseño del experimento

### 3.1.- Recopilación de datos

Para la recopilación de datos, se diseñó un experimento, el cual involucró la instalación de sensores de CO<sub>2</sub> en varias aulas y espacios dentro del edificio polivalente de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Dichas ubicaciones fueron seleccionadas estratégicamente debido a las variaciones del flujo en el número de personas y los diferentes volúmenes de los espacios. Se llevaron a cabo tres sesiones de toma de datos a lo largo del experimento, capturando mediciones en diferentes estancias.

Para garantizar la calidad y relevancia de los datos recopilados, se limitó el número de sensores a ocho, basándose en la capacidad proporcionada por MediaLab. Esta selección se realizó cuidadosamente para cubrir adecuadamente las áreas de interés y maximizar la utilidad de los datos recopilados.

Además de la instalación de los sensores, se proporcionó un sistema de registro que incluyó la recopilación de personas presentes en cada sala, así como la información sobre la apertura de ventanas, como se puede ver en la figura 3.1. Estos datos adicionales facilitarían la validación de los métodos de estimación del número de personas en cada espacio.

Esta estrategia de toma de datos garantizó la disponibilidad de datos precisos y relevantes para la investigación, permitiendo una evaluación de los métodos propuestos de estimación.





### 3.1.1.- Primera toma de datos

En esta primera toma de datos se realizó en MediaLab, el taller de impresión 3D de MediaLab, la secretaría de dirección, la consejería y las aulas 1.3.03, B1, B8 y A3. Estas ubicaciones fueron seleccionadas con el propósito de observar cómo varía la concentración de CO<sub>2</sub> con diferentes flujos de gente y volúmenes del espacio. Tanto en consejería como en el taller de MediaLab representan entornos con bajo volumen y fluctuación de personas en comparación con las aulas del edificio. Esta selección nos permite observar cómo se comportan los datos en distintos entornos y condiciones.

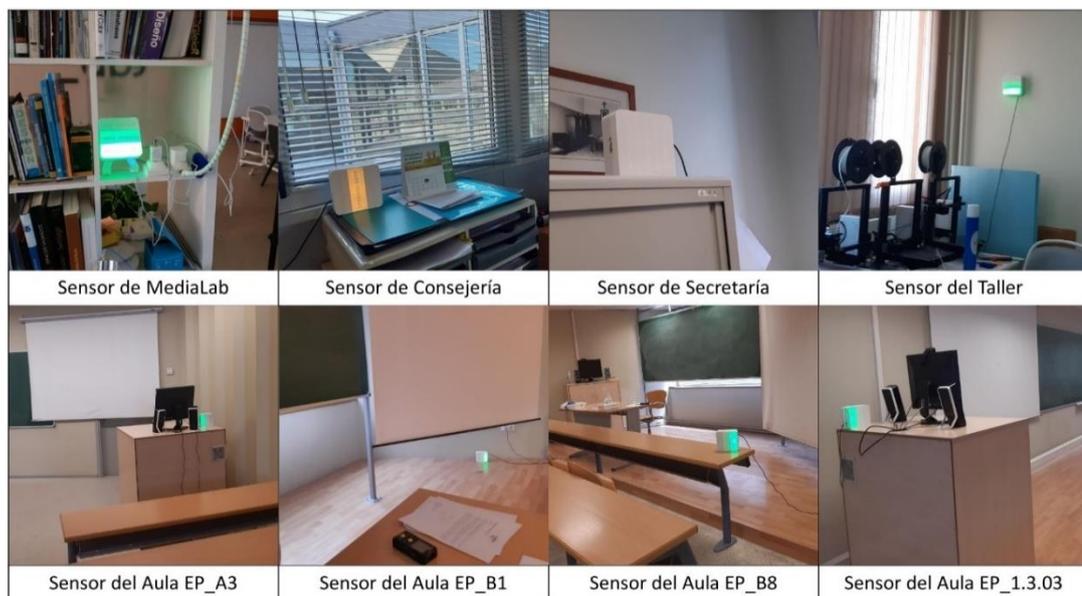


Figura 3.3.- Recopilación de los sensores

	MediaLab	Consejería	Secretaría	Taller	EP_A3	EP_B1	EP_B8	EP_1.3.03
Volumen (m <sup>3</sup> )	392,516	27,728	127,560	66,362	377,956	279,290	266,341	337,777

Tabla 3.1.- Tabla Volúmenes Primera Toma

### 3.1.2.- Segunda Toma de datos

En la segunda toma de datos se decidió hacer por triangulación en MediaLab. Se colocaron tres sensores de CO<sub>2</sub> en diferentes ubicaciones dentro de la estancia: uno de ellos alejado del flujo de gente, mientras que los otros dos estaban cerca de personas en ciertas ocasiones. Esta disposición permitió amortiguar el efecto que causa una o varias personas cerca del sensor, ya que si una persona está cerca del sensor su emisión de CO<sub>2</sub> afecta en gran medida a los valores, causando que no sean del todo exactos. En la toma que se realizó en MediaLab, no se tuvo que medir el volumen ya que se midió en la primera toma de datos.



Figura 3.4.- Sensores para triangulación

### 3.1.3.- Tercera toma de datos

En la tercera toma de datos se optó por tomarlos únicamente en aulas, en concreto la 1.3.01, 1.3.03, A2, A3, A4, B1 y B8, las cuales son las aulas con mayor flujo de gente. Con el objetivo de minimizar efecto de la proximidad de personas sobre el sensor de CO<sub>2</sub>, se colocaron en el suelo y lo más alejado posible de grupos números de gente. A parte de eso, para no interrumpir el desarrollo de las actividades de los alumnos, se desactivaron los LEDs y el zumbador mediante la modificación del código base. Al cargar nuevamente el código en el microprocesador, tanto los leds como el zumbador quedaron inactivos. Se utilizó una plantilla parecida a la mostrada en la figura 3.1 para la toma de datos, sin embargo, esta vez para simplificar la tabla no se puso la columna de “ventanas abiertas”, ya que esta información se podía observar en las gráficas.

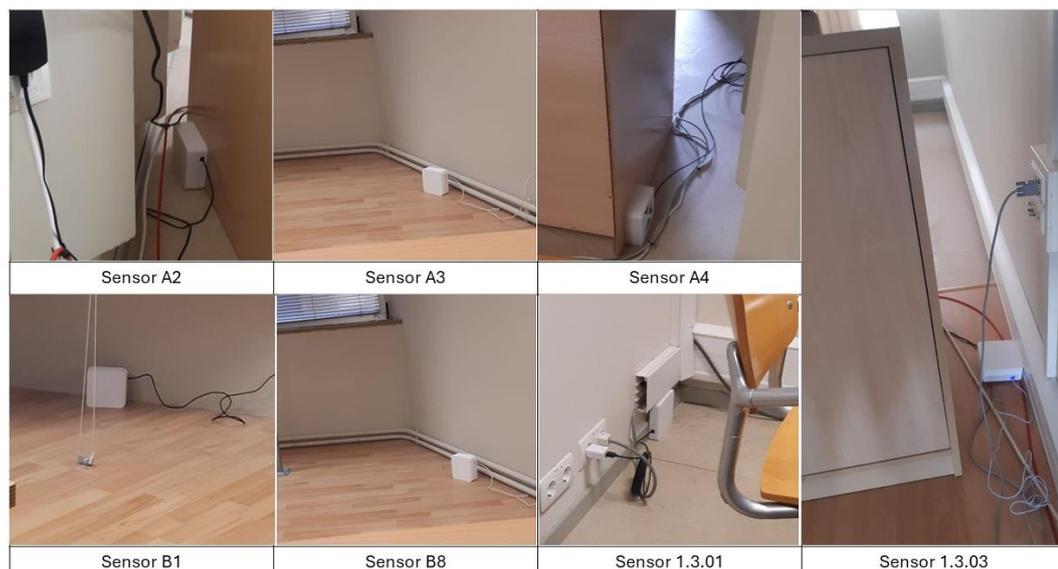


Figura 3.5.- Sensores para Tercera Toma



	EP_1.3.01	EP_1.3.03	EP_B1	EP_B8	EP_A2	EP_A3	EP_A4
Volumen (m <sup>3</sup> )	180,843	337,777	279,290	266,341	417,549	377,956	338,566

Tabla 3.2.- Tabla Volúmenes Tercera Toma

### 3.2.- Estimación del número de personas con sensor de CO<sub>2</sub>

Además de desarrollar la fórmula para estimar el número de personas, también se calcularán los errores asociados a estas estimaciones. Dichos errores se determinan utilizando una fórmula derivada de las variables involucradas en el cálculo, junto con los datos recopilados durante el experimento. Este enfoque permitirá evaluar la precisión de las estimaciones y comprender mejor los factores que influyen en la calidad del aire en espacios interiores. La fórmula del error utilizada es la siguiente:

$$\Delta y = \left| \frac{df}{dx_1} \right| \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{df}{dx_2} \right| \cdot \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{df}{dx_n} \right| \cdot \Delta x_n \quad (\text{Ecuación 3.1.})$$

Siendo:

$\Delta y$ = Error final de la fórmula.

$df/dx_n$ = Derivada parcial respecto a una variable.

$\Delta x_n$ = Error de la variable.

#### 3.2.1.- Tasa de renovación de aire

La tasa de renovación de aire es un parámetro fundamental en el contexto de ventilación, ya que representa la velocidad a la que el aire contaminado con CO<sub>2</sub> se reemplaza por un aire fresco y limpio en un espacio cerrado. Esta tasa se expresa en h<sup>-1</sup> y es crucial para garantizar la calidad del aire interior. Cada una de las fórmulas se basa principalmente en el principio de conservación de la masa, el cual establece que la cantidad total de masa permanece constante en el tiempo en sistemas cerrados. En este contexto, el sistema cerrado se refiere a la estancia interior donde se mide la concentración de CO<sub>2</sub>.

##### 3.2.1.1.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basado en Diferencia de CO<sub>2</sub>

Según se puede ver en la referencia [25] se tiene una tasa de renovación que depende del tiempo, así como de la diferencia de concentración de CO<sub>2</sub> que hay en la estancia. Teniendo en cuenta el principio de conservación de la masa, esta fórmula tiene en cuenta la



entrada de aire fresco desde el exterior como la salida de aire contaminado en un periodo de tiempo, manteniendo así la conservación de masa del sistema.

$$ACH_1 = \frac{-1 \cdot \ln\left(\frac{C_f - C_{amb}}{C_i - C_{amb}}\right)}{t_f - t_i} \quad (\text{Ecuación 3.2.})$$

Siendo:

ACH= Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$C_f$ = Concentración de  $CO_2$  final en ppm.

$C_i$ = Concentración de  $CO_2$  inicial en ppm.

$C_{amb}$ = Concentración de  $CO_2$  ambiental exterior en ppm.

$t_f$ = Tiempo final en horas,  $t_i$ = Tiempo inicial en horas.

$$\Delta ACH_1 = \frac{1}{t_f - t_i} \cdot \left( \left| \frac{\Delta C_f}{C_f - C_{amb}} \right| + \left| \frac{\Delta C_i}{C_i - C_{amb}} \right| \right) \quad (\text{Ecuación 3.3.})$$

Siendo:

$\Delta ACH$ = Error de la fórmula de ACH.

$\Delta C_f$ = Error en la medida de  $CO_2$  final en ppm.

$\Delta C_i$ = Error en la medida de  $CO_2$  inicial en ppm.

### 3.2.1.2.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basada en la velocidad del viento

En este caso, según la referencia [26], no depende directamente de la concentración de  $CO_2$  en el aire, sino que se centra en la cantidad de aire fresco que entra en la estancia a través de las ventanas y de la velocidad del viento. Hay que tener en cuenta que el factor 0.65 es un coeficiente de ajuste de la propia fórmula y el factor 3600 es un cambio de conversión de segundos a horas.

$$ACH_2 = \frac{0.65 \cdot v_{viento} \cdot A_{ventana} \cdot 3600}{V} \quad (\text{Ecuación 3.4.})$$

Siendo:

ACH= Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$v_{viento}$ =Velocidad del viento en m/s.

$A_{ventana}$ =Área de la ventana más pequeña de la estancia en  $m^2$ .

$V$ =Volumen de la estancia en  $m^3$ .



$$\Delta ACH_2 = \frac{0.65 \cdot V_{viento} \cdot 3600}{V} \cdot \left( \Delta A_{ventana} + \left| \frac{A_{ventana}}{V} \right| \cdot \Delta V \right) \quad (\text{Ecuación 3.5.})$$

Siendo:

$\Delta ACH$ = Error de la fórmula.

$V_{viento}$ =Velocidad del viento en m/s.

$A_{ventana}$ =Área de la ventana más pequeña de la estancia en  $m^2$ .

$V$ =Volumen de la estancia en  $m^3$ .

$\Delta A_{ventana}$ = Error del área de la ventana más pequeña de la estancia en  $m^2$ .

$\Delta V$ = Error del volumen de la estancia en  $m^3$ .

### 3.2.1.3.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basado en el Número de Personas

Esta es una de las ecuaciones de renovación de aire donde tenemos menos parámetros, se encuentra en la referencia [27], se tiene el volumen y el número de personas. Como este último dato es lo que se quiere calcular, se ha propuesto ponerle el valor 1, el cual posteriormente se ajustara con el coeficiente, K, en las ecuaciones de estimación del número de personas.

$$ACH_3 = \frac{40.5 \cdot N_f}{V} \quad (\text{Ecuación 3.6.})$$

Siendo:

$ACH$ = Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$N_f$ =Número de personas, valor 1.

$V$ =Volumen de la estancia en  $m^3$ .

$$\Delta ACH_3 = \left| \frac{40.5}{V^2} \right| \cdot \Delta V \quad (\text{Ecuación 3.7.})$$

Siendo:

$\Delta ACH$ = Error de la fórmula de  $ACH$ .

$V$ =Volumen de la estancia en  $m^3$ .

$\Delta V$ = Error del volumen de la estancia en  $m^3$ .

### 3.2.1.4.- Modelo de Tasa de Renovación de Aire basado en el tiempo de exposición

Esta ecuación es muy parecida a la primera con la peculiaridad de que esta es el tiempo de exposición de la sala, es decir, en un aula normalmente las clases son de una hora o la



jornada laboral en una oficina entre 6 o 8 horas, ese será el tiempo que se colocará en el parámetro. La encontramos en la referencia [28].

$$ACH_4 = \frac{1}{t} \cdot \ln \left( \frac{C_i - C_{amb}}{C_f - C_{amb}} \right) \quad (\text{Ecuación 3.8.})$$

Siendo:

ACH= Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$C_f$ =Concentración de  $CO_2$  final en ppm.

$C_i$ =Concentración de  $CO_2$  inicial en ppm.

$C_{amb}$ =Concentración de  $CO_2$  ambiental exterior en ppm.

$t$ =Tiempo de exposición en horas.

$$\Delta ACH_4 = \frac{1}{t} \cdot \left( \left| \frac{\Delta C_i}{C_i - C_{amb}} \right| T + \left| \frac{\Delta C_f}{C_f - C_{amb}} \right| \right) \quad (\text{Ecuación 3.9.})$$

Siendo:

$\Delta ACH$ = Error de la fórmula.

$C_f$ =Concentración de  $CO_2$  final en ppm.

$\Delta C_f$ = Error de la Concentración de  $CO_2$  final en ppm.

$C_i$ =Concentración de  $CO_2$  inicial en ppm.

$\Delta C_i$ = Error de la Concentración de  $CO_2$  inicial en ppm.

$C_{amb}$ =Concentración de  $CO_2$  ambiental exterior en ppm.

$t$ =Tiempo de exposición en horas.

### 3.2.2.- Ecuaciones de Número de Personas

En esta sección se presentarán los diversos métodos identificados para estimar el número de personas presentes en un ambiente, junto con el cálculo del error asociado a cada fórmula.

#### 3.2.2.1.- Modelo del artículo de Salud Ambiental

La fórmula se encuentra detallada en la referencia [29]. Según lo explicado en el artículo de Salud Ambiental (2024), este modelo se basa en el principio de conservación de la masa en una estancia cerrada. Esta ecuación proporciona una estimación del número de personas presentes en función del volumen de la estancia, la tasa de renovación y las concentraciones de  $CO_2$ .



$$N_p = \frac{V \cdot ACH \cdot [CO_2 - CO_{2(aire)}]}{R_{CO_2}} \quad (\text{Ecuación 3.10.})$$

Siendo:

$N_p$  = Número de personas.

$CO_2$  =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2\text{aire}}$  =  $CO_2$  del aire exterior en ppm.

$V$  = Volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

$ACH$  = Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$R_{CO_2}$  = Rapidez de producción de  $CO_2$  por persona por hora, considerando el valor típico de tasa de producción de  $CO_2$  de adultos con un peso corporal promedio de 70 kg = 28.88 g $CO_2$ /(persona\*h).

$$\Delta N_p = \frac{1}{R_{CO_2}} \cdot (|ACH \cdot [CO_2 - CO_{2\text{aire}}]| \cdot \Delta V + |V \cdot [CO_2 - CO_{2\text{aire}}]| \cdot \Delta ACH + |V \cdot ACH| \cdot \Delta CO_2) \quad (\text{Ecuación 3.11.})$$

Siendo:

$\Delta N_p$  = Error de la fórmula del número de personas.

$CO_2$  =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$\Delta CO_2$  = Error del  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2\text{aire}}$  =  $CO_2$  del aire exterior en ppm.

$V$  = Volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

$\Delta V$  = Error del volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

$ACH$  = Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$\Delta ACH$  = Error de la Tasa de renovación de aire en  $h^{-1}$ .

$R_{CO_2}$  = Rapidez de producción de  $CO_2$  por persona por hora, kg = 28.88 g $CO_2$ /(persona\*h).

### 3.2.2.2.- Modelo del artículo de Iñigo Martínez

Esta fórmula, basada en las condiciones de temperatura y presión dentro del edificio como se especifica en el artículo de Iñigo Martínez (2022) [30], proporciona una estimación del número de personas en función de la concentración de  $CO_2$  y los parámetros especificados anteriormente. Aunque no tiene en cuenta el volumen de la estancia, el cual es una correlación importante con respecto al número de personas, junto con la concentración de  $CO_2$ .



$$N_p = \frac{CO_2}{CO_{2amb}} \cdot P \cdot \frac{273.15}{(273.15+T)} \quad (\text{Ecuación 3.12.})$$

Siendo:

$N_p$ = Número de personas.

$CO_2$ =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2amb}$ =  $CO_2$  del aire exterior en ppm.

T= Temperatura en Celsius.

P=Presión en atm.

$$\Delta N_p = \frac{P \cdot 273.15}{CO_{2amb} \cdot (273.15+T)} \cdot \left( \Delta CO_2 + \left| \frac{CO_2}{(273.15+T)} \right| \cdot \Delta T \right) \quad (\text{Ecuación 3.13.})$$

Siendo:

$\Delta N_p$ = Error de la fórmula.

$CO_2$ =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$\Delta CO_2$ = Error del  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2amb}$ =  $CO_2$  del aire exterior en ppm.

T= Temperatura en Celsius.

$\Delta T$ = Error de la temperatura en Kelvin.

P=Presión en atm.

### 3.2.2.3.- Modelo del artículo de Ivonne Serna sin ACH

En el artículo de Ivonne Serna Bonilla de 2022 [31], se presenta una fórmula basada en el principio de conservación de masa para hallar la concentración de  $CO_2$ , sin considerar la tasa de renovación de aire. En la fórmula del artículo, el valor de 410 representa la concentración de  $CO_2$  en el ambiente. En esta fórmula se considera  $CO_{2amb}$  en vez del valor numérico 410 ppm.

$$N = \frac{V \cdot P}{54.3 \cdot T \cdot t} \cdot (CO_2 - CO_{2amb}) \quad (\text{Ecuación 3.14.})$$

Siendo:

$N_p$ = Número de personas.

$CO_2$ =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2amb}$ =  $CO_2$  del aire exterior en ppm.

V= Volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

P=Presión en atm.



T=Temperatura en Celsius.

t=tiempo de exposición en horas.

$$\Delta N_p = \frac{P}{54.3 \cdot T \cdot t} \cdot \left( |V| \cdot \Delta CO_2 + \left| \frac{(CO_2 - CO_{2amb}) \cdot V}{T} \right| \cdot \Delta T + |(CO_2 - CO_{2amb})| \cdot \Delta V \right)$$

(Ecuación 3.15.)

Siendo:

$\Delta N_p$ = Error de la fórmula.

$CO_2$ =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$\Delta CO_2$ = Error del  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2amb}$ =  $CO_2$  del aire exterior en ppm.

V= Volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

$\Delta V$ = Error del volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

P=Presión en atm.

T=Temperatura en Celsius.

$\Delta T$ = Error de la temperatura en Celsius.

t=tiempo de exposición en horas.

### 3.2.2.4.- Modelo del artículo de Ivonne Serna con ACH

En el artículo mencionado en el apartado anterior [\[31\]](#), también se presenta otra fórmula para hallar la concentración de  $CO_2$ , con la diferencia que esta tiene en cuenta la tasa de renovación de aire. Se basa en el mismo principio que la ecuación anterior.

$$N = \frac{V \cdot P \cdot ACH}{54.3 \cdot T} \cdot (CO_2 - CO_{2amb}) \quad (\text{Ecuación 3.16.})$$

Siendo:

$N_p$ = Número de personas.

$CO_2$ =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2(aire)}$ =  $CO_2$  del aire en ppm.

V= Volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

P=Presión en atm.

T=Temperatura en Celsius.

t= Tiempo de exposición.



$$\Delta N_p = \frac{P}{54.3 \cdot T} \cdot \left( |V| \cdot ACH \cdot \Delta CO_2 + \left| \frac{(CO_2 - CO_{2amb}) \cdot V \cdot ACH}{T} \right| \cdot \Delta T + |(CO_2 - CO_{2amb}) \cdot ACH| \cdot \Delta V + |V \cdot (CO_2 - CO_{2amb})| \cdot \Delta ACH \right) \quad (\text{Ecuación 3.17.})$$

Siendo:

$\Delta N_p$ = Error de la fórmula.

$CO_2$ =  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$\Delta CO_2$ = Error del  $CO_2$  en la hora a la que lo quieras calcular en ppm.

$CO_{2(\text{aire})}$ =  $CO_2$  del aire en ppm.

$V$ = Volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

$\Delta V$ = Error del volumen de las instalaciones en  $m^3$ .

$P$ =Presión en atm.

$T$ =Temperatura en Celsius.

$\Delta T$ = Error de la temperatura en Celsius.

$t$ = Tiempo de exposición.

$ACH$ = Tasa de renovación del aire en  $h^{-1}$

### 3.2.3.- Mejora de las fórmulas

En el transcurso del experimento, se observó que algunas de las fórmulas utilizadas presentaban un porcentaje significativo bajo de aciertos. Este fenómeno, en parte, se atribuye a la variabilidad en la tasa de renovación de aire, la cual está influenciada por factores atmosféricos difíciles de controlar en tiempo real. Para amortiguar esta dificultad y mejorar la precisión de las fórmulas, en un inicio se implementó la estrategia de incluir una constante multiplicadora.

Sin embargo, los resultados obtenidos a partir de esta modificación mostraron solo una ligera mejoría en algunas de las fórmulas, y como se puede ver en el artículo de Gómez de 2024 [32], esta no es la mejor manera. En vista de los resultados, se propuso una alternativa, la cual sería en la aplicación de un modelo de regresión lineal. Esta manera implica el uso de dos constantes, una que multiplique y la otra que sume, como se observa en la siguiente fórmula:

$$N = K_1 \cdot F + K_2 \quad (\text{Ecuación 3.18.})$$

Siendo:

$N$ = el número estimado de personas.



K1 y K2= las constantes halladas

F= la fórmula de la estimación del número de personas.



## 4. Resultados del Experimento

### 4.1.- Códigos de Limpieza y de Correlación

En la limpieza de datos se recurrió al lenguaje de programación R, como se comentó anteriormente en el capítulo [2.4.2](#) “Big Data para el Sensor de CO<sub>2</sub>”. Antes de realizar el código se seguirá el diagrama de bloques que se muestra en la figura 4.1.

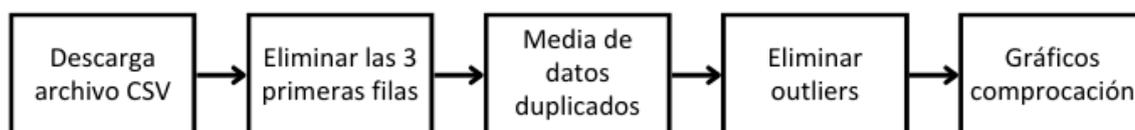


Figura 4.1.-Diagrama Bloques Limpieza

Para realizar la limpieza de datos, el primer paso es descargar el archivo CSV de la página web del sensor. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este CSV contiene información adicional en las tres primeras filas como se muestra en la figura 4.2. Estas tres primeras filas no tienen relevancia alguna, y además causan errores a la hora de que RStudio lea el archivo. Por ello se tienen que eliminar utilizando el parámetro “skip” de la función “read.csv”. Este parámetro indica a RStudio que omita un cierto número de filas al principio del archivo, en este caso las tres primeras filas.

	A	B	C	D	E
1	Sensor:	AULA_01			
2	Ubicado en:	1.3.03			
3					
4	fecha	co2 [p.p.m.]	temperatura [	humedad relativa [%]	

Figura 4.2.- Tres primeras filas del CSV

Antes de empezar a desarrollar el código de limpieza de los datos, se examinaron los archivos CSV en busca de posibles anomalías. Durante este proceso, se observó que en algunos momentos se registraban dos medidas de CO<sub>2</sub> en el mismo minuto. Esto se debe a la frecuencia de muestreo del sensor, el cual está programado para tomar medidas cada 30 segundos aproximadamente. Para resolver este problema y obtener mediciones más precisas, se propuso calcular la media de las medidas de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa.

El primer paso consistiría en convertir la columna fecha en formato POSIXct de ambos archivos, el cual representa la fecha y hora en un formato adecuado para el análisis en



RStudio. El siguiente paso sería reagrupar los datos según la fecha utilizando “group\_by()”. En la misma línea de código se calculan las medias de las tres variables del sensor. Posteriormente se eliminan posibles duplicados de las fechas que puedan quedar en el conjunto de datos utilizando la función “distinct()”, para conservar las columnas originales del archivo se tiene que usar el argumento “.keep\_all=TRUE”.

Para comprobar que tanto han variado las gráficas, configuramos las funciones para que las extraigan y así poder compararlas. En la figura 4.3 se puede observar que, aún eliminando los datos duplicados, los gráficos no son tan diferentes. Sin embargo, en el archivo CSV si se nota una gran diferencia cuando se junta con el archivo CSV del número de personas.

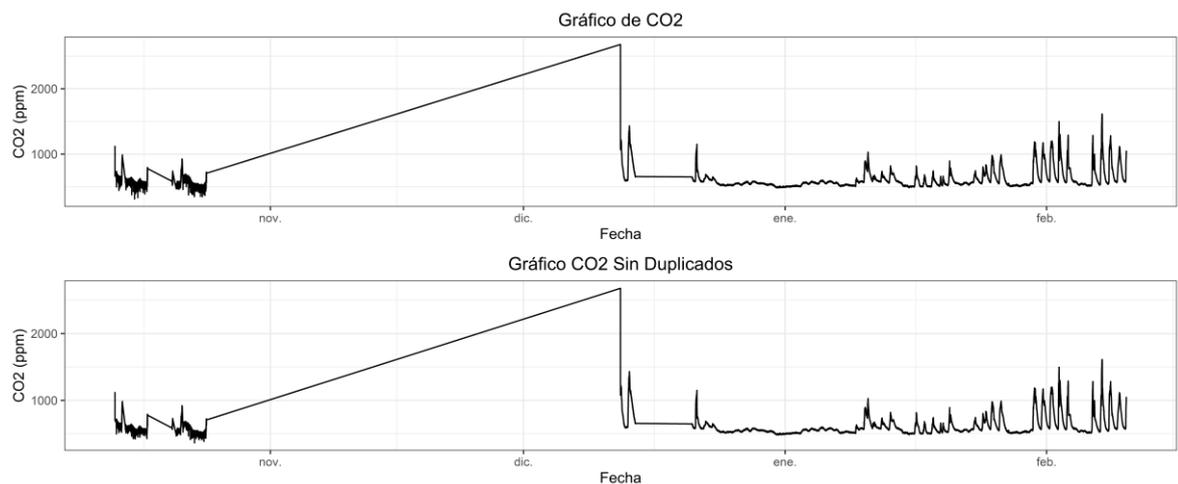


Figura 4.3.- Gráficos Comparación Resultados

Una vez los datos duplicados son eliminados y ordenados por fecha se tienen que eliminar los datos anómalos o *outliers*. Estos se definen como atípicos ya que se alejan significativamente de la mayoría del conjunto de valores, esta variación puede ser tanto positiva como negativa, además pueden llevar a error a la hora del análisis. En el caso de los sensores de CO<sub>2</sub>, se observó que estos *outliers* son debidos a la calibración que tienen a la hora de conectarlos a la red, el primer valor suele ser alto llegando en algunas ocasiones a los 4000 ppm, para después bajar a valores más correctos entre 400 a 1000 ppm. Este valor inicial es demasiado alto para los lugares donde se va a hacer el experimento, en estos sitios la concentración de CO<sub>2</sub> no debería de sobrepasar los 1600 ppm. Para identificar estos puntos se usará en un diagrama de caja, como el de la figura 4.4.

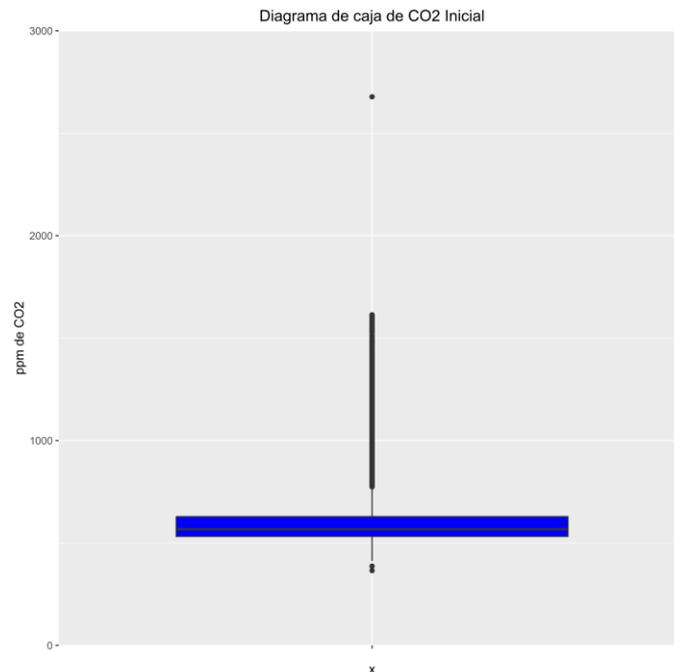
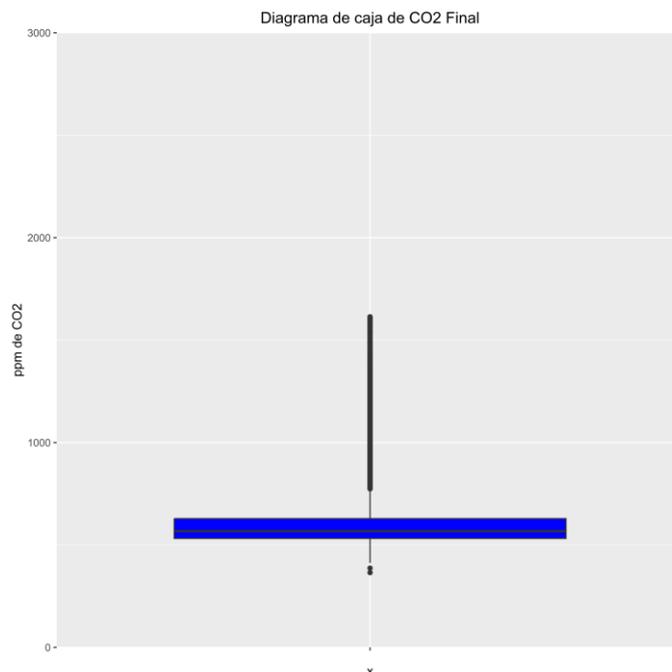


Figura 4.4.- Diagrama de Caja con *Outliers*

Como se puede observar en la figura 4.4 hay varios puntos atípicos, estos valores se pueden identificar fácilmente ya que se encuentran muy alejados de la franja azul. Se pueden eliminar dichos *outliers* mediante un comando para eliminar todos los valores que no perezcan al rango cercano a la franja azul. Usando esto se corre el riesgo de eliminar datos que puedan interesar, ya que el diagrama de caja toma como valores correctos los que estén cerca de dicha franja, estando los muy próximos a 1000 ppm fuera de ese rango. Sin embargo, muchos de los valores que están lejos son interesantes y válidos, como por ejemplo valores de 1200 ppm. Para ello, se pondrá un límite de 1800 ppm, ya que el lugar del experimento es en aulas y no debería de pasar ese umbral o sería un ambiente demasiado perjudicial para las personas. Con este límite la gráfica de caja quedaría como se observa en la figura 4.5. Como se puede observar ya no existen esos valores atípicos.

Figura 4.5.- Diagrama de Caja Sin *Outliers*

Por último, se eliminan las filas que contengan datos nulos del archivo CSV del número de personas, para posteriormente juntar ambos archivos CSV, siguiendo como parámetro común la fecha. Con la finalidad de comprobar que los datos han sido limpiados, se programaron diferentes gráficas, para posteriormente juntarlas en una. De esta manera, en la figura 4.6, se puede observar los cambios. Aunque en la gráfica “Sin Duplicados” no se pueda apreciar un notable cambio, será indispensable para la estimación del número de personas. En la gráfica “Con el límite” se nota que el pico, producido al conecta el sensor a la red, ya no está, quedando una gráfica más limpia.

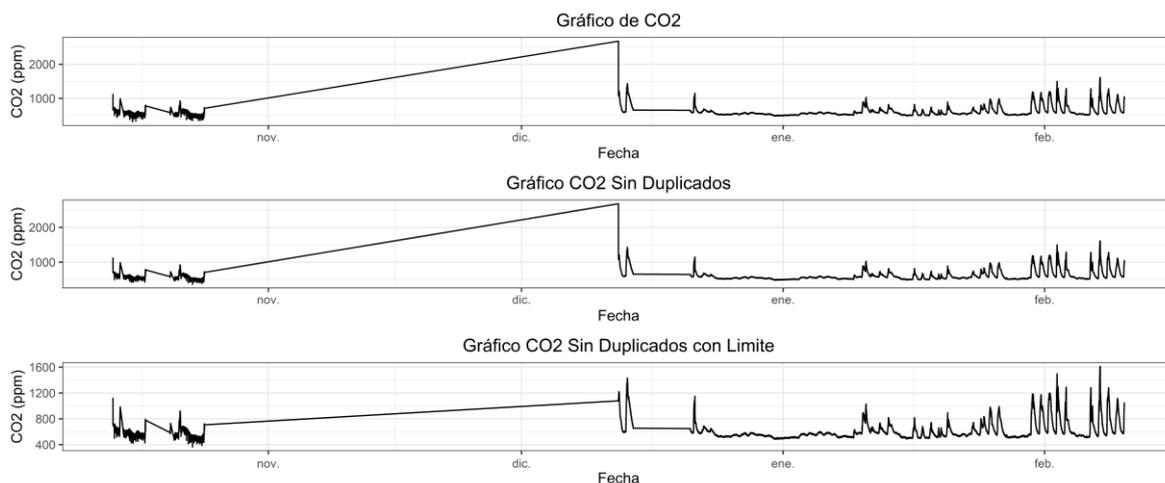


Figura 4.6.- Gráfica Comparación



Una vez se ha llevado a cabo la limpieza, se realizó otro código para meter el volumen, además de la gráfica de correlación. Este código siguió la estructura que se muestra en la figura 4.7.

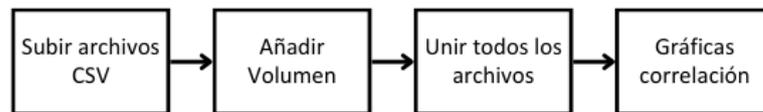


Figura 4.7.- Diagrama de bloques Unión Archivos

A la hora de unir los archivos CSV de las diferentes clases se detectó un error. Este error es debido a que RStudio, si alguna de las columnas es totalmente de números enteros, identifica esta columna como datos de tipo entero, mientras que las demás columnas son de tipo carácter. A la hora de unir los archivos, si una columna es entera, no deja unir el CSV con los demás de tipo carácter. Para ello hay que convertir ese archivo CSV que da error, en tipo carácter usando el comando “as.character”. Antes de unir los diferentes archivos, se ha de añadir una columna con el volumen. De esta manera se tiene un archivo CSV con las columnas de fecha, CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad, número de personas y volumen. Una vez obtenido este archivo, se puede sacar un gráfico de correlación utilizando la función “rcorr”, por defecto el programa hace la correlación de Pearson, pero igualmente sirve para identificar las correlaciones de las diferentes variables.

## 4.2.- Código de Excel

Para determinar las constantes necesarias, se optó por utilizar la búsqueda objetivo de Excel. Sin embargo, esta función solo permite seleccionar una celda a la vez, lo cual se convierte en una dificultad cuando se trabaja con grandes volúmenes de datos. Para evitar esta limitación, se recurrió al uso de Visual Basic, el entorno de programación de Excel. Esto permite realizar un código que automatiza el proceso de búsqueda objetivo en múltiples celdas.

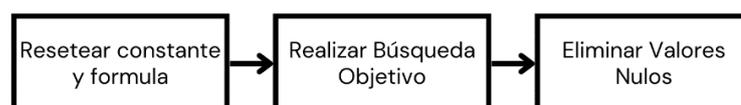


Figura 4.8.- Diagrama de Bloques de Visual Basic



Para realizar el código mencionado, se siguió el diagrama de bloques de la figura 4.8. Además, en el anexo II se proporciona el código utilizado en cada etapa del proceso. La estructura del código se diseñó de acuerdo con las distintas fases del diagrama de bloques.

Para restablecer los valores, lo primero fue poner las celdas en blanco tanto del ACH como del número de personas a valor 1. Esto es indispensable, ya que, para simplificar la búsqueda objetivo, se definió un rango de valores que abarca las fórmulas utilizadas en el cálculo. Es crucial que estas celdas mantengan una fórmula asignada en todo momento para evitar posibles errores durante la búsqueda objetivo. En caso de que alguna de las celdas dependientes esté vacía, lo cual puede ocurrir debido a que algunas de las fórmulas están vinculadas a un intercalo de tiempo, la búsqueda objetivo iterara indefinidamente sin encontrar ningún valor válido, lo cual resultaría en un aumento significativo del tiempo de procesamiento.

Una vez asegurado que todas las celdas tengan un valor asignado, se eliminan los posibles datos que puedan estar presentes en las columnas “K1”. Posteriormente restablecer las columnas del número de personas para que todas las celdas tengan fórmulas.

El siguiente paso es realizar la búsqueda objetivo. Para ello, lo primero es definir las dimensiones que se van a utilizar. Con el comando “Array” se definen las columnas tanto para calcular la constante como para las fórmulas. Estas son diferentes columnas ya que se tienen diferentes fórmulas para cada una. Una vez definidos todos los rangos, se procede a iterar, se realizan diversos bucles.

El primer bucle recorre cada elemento del rango, Usando los comandos “LBound”, y “UBound”, los cuales devuelven el primer y último elemento respectivamente, permite recorrer todo el rango de valores de las columnas de las fórmulas. Después de especificar el rango de fórmulas y constantes, se ejecuta el segundo bucle, el cual realiza la búsqueda objetivo con la función “GoalSeek”. Este último bucle aplica la función en todas las filas de la primera columna y cuando termina, se activa el primer bucle para pasar a la segunda columna, así sucesivamente hasta que ambos bucles recorran todos los elementos de los rangos.

Como último paso, se deben eliminar los valores nulos, los cuales corresponden a los valores iniciales de cada día y que no deben considerarse debido al intervalo de tiempo de



algunas fórmulas. Para ello, se utiliza en la función “Union” para especificar los rangos de los valores nulos que se desean eliminar, incluyendo tanto las columnas de las fórmulas como las columnas de las constantes de las fórmulas. Aunque este procedimiento puede parecer un poco tedioso, se puede simplificar utilizando la herramienta “Reemplazar” para cambiar rápidamente las letras de las columnas y definir diversos rangos, debido a que las filas se mantienen constantes en todos los rangos. Para no tener que entrar en Visual Basic se colocaron unos botones que acceder a los códigos, como se muestra en la figura 4.9.

		Restablecer Valores				Iteración 1				Borrar Valores Nulos									
Cálculo del número de personas																			
Ecuación 1								Ecuación 2				Ecuación 4							
ACH1		ACH2		ACH3		ACH4						ACH1		ACH2		ACH3		ACH4	
K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P	K1	Nº P
		0,333	3	3	3			1,5	3	3	3			0,33	3	3	3		
2,00	2	0,154	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	0,15	2	2	2	2	2
1,00	1	0,125	1	1	1	1	1	0,5	1	1	1	1	1	0,13	1	1	1	1	1

Figura 4.9.- Imagen Botones de acceso rápido

### 4.3.- Análisis de los Datos

Es fundamental verificar si el sensor utilizado está correctamente calibrado. Ya que esto garantiza la precisión de las mediciones. Para determinar la calidad de la calibración, es necesario examinar las gráficas generadas en el sitio web de MediaLab. Una señal deficiente se evidencia en las gráficas con mucho ruido y picos irregulares como se ve en la figura 4.11. Sin embargo si la gráfica muestra una tendencia clara y limpia como se ilustra en la figura 4.10, es indicativo de que el sensor está bien calibrado y proporciona mediciones precisas. Es importante tener en cuenta estas diferencias visuales al interpretar los datos recopilados por el sensor.



Figura 4.10.- Sensor Calibrado

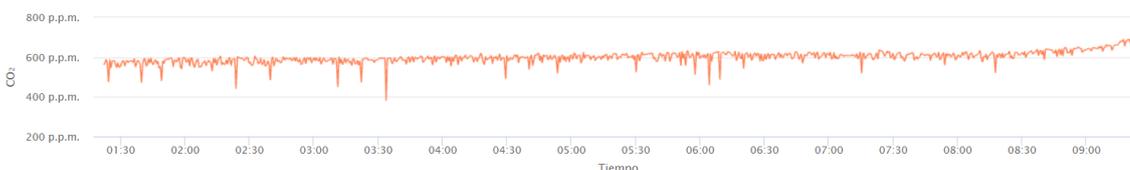


Figura 4.11.- Sensor No Calibrado



Además, es importante considerar la posibilidad de que el sensor se descalibre con el tiempo, incluso si estaba inicialmente bien calibrado. Esto puede manifestarse en lecturas continuamente atípicas, como valores de dióxido de carbono persistentemente altos, incluso en momentos en que se espera niveles sean bajos, como durante la noche cuando no hay presencia humana en la zona monitorizada. La figura 4.12, muestra un ejemplo de este fenómeno, donde no solo se observan picos irregulares, sino también lecturas elevadas de CO<sub>2</sub> durante la noche. Uno de estos picos se puede observar antes del inicio del día 26 de abril, donde se encuentra un pico anómalo a horas tardías cuando no había nadie. Esto sugiere una descalibración del sensor. Estar alerta a estos patrones anómalos es crucial para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones proporcionadas por el sensor.



Figura 4.12.- Valores atípicos

La página web de los sensores nos proporciona datos de hasta cuatro meses atrás. Al principio del experimento se descargaron dichos datos y se encontró una serie de anomalías. La más destacada fue un pico de actividad el 12 de diciembre, con una concentración de CO<sub>2</sub> de 2678 ppm, como se muestra en la gráfica 4.13. En este caso, esta anomalía donde mejor se podía ver era en las gráficas, mientras que otras se ven mejor en el archivo CSV que te proporciona.

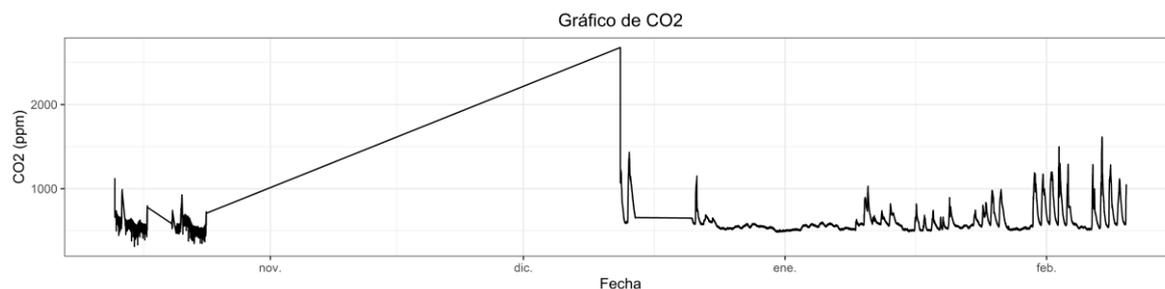


Figura 4.13.- Datos de cuatro meses en MediaLab

Revisando las fechas del archivo CSV, se puede observar que hay un periodo de tiempo en el que no se registran datos, el cual va desde el 13/02/2023 al 15/02/2023. Esto se debe a que en ese tiempo o bien el sensor estuvo desconectado de la red o no emitía



correctamente los datos a la red. Al volver a conectarlo, como primera lectura fue de 2678 ppm y después se reguló correctamente. Una medida parecida paso con uno de los sensores de las aulas, donde al volver a conectarlo tuvo un pico anómalo de 3000 ppm y después se estabilizó.

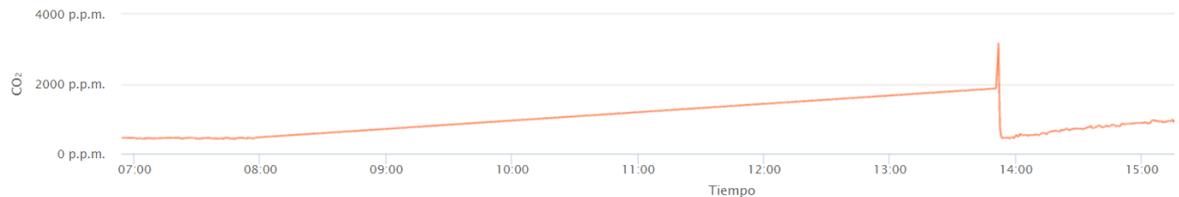


Figura 4.14.- Sensor con *Outlier*.

Además de las anomalías, al observar las gráficas podemos apreciar otros datos interesantes. Entre ellos lo que ocurre cuando se abre o no una ventana o cuando la habitación está durante mucho tiempo cerrada. A continuación, se mostrarán algunas observaciones:

- Si la zona está completamente cerrada sin ventilación alguna y sin haber sido expuesta antes a factores que suban el nivel de CO<sub>2</sub>, como la calefacción o presencia de personas, la estancia se mantendrá en niveles buenos para la salud del individuo en torno a 400 ppm o 500 ppm.
- Si la zona sigue completamente cerrada sin ventilación alguna, pero esta vez hay gente en la estancia, el nivel de CO<sub>2</sub> aumentará progresivamente hasta un nivel máximo. Este nivel va a depender de las personas, el medio calefactor y la presencia de ordenadores. En caso de MediaLab no sobrepasa los 1200 ppm aproximadamente.



Figura 4.15.- Gráfica sin ventilación.

- Si la zona está correctamente ventilada, es decir, abrimos un par de ventanas para que haya una corriente continua de aire, ventilación natural. El nivel de CO<sub>2</sub> bajará de una manera bastante rápida, póngase un lapso de unos 30 o 40 min. Aun así, si el número de personas es bastante alto, el nivel de CO<sub>2</sub> todavía podría seguir en niveles preocupantes, necesitando más ventilación.

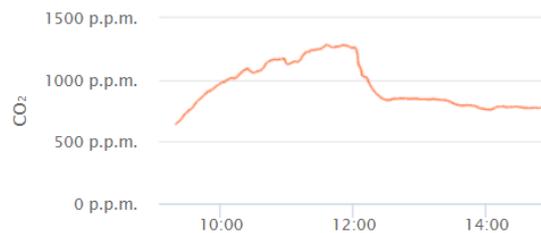


Figura 4.16.- Gráfica con ventilación.

- Si la zona, vuelve a cerrarse, esta vez tanto ventanas como puertas, después de que todas las personas hayan salido. El nivel de CO<sub>2</sub> irá bajando, pero de una manera lenta, a diferencia de cuando están abiertas las ventanas este lapso puede ser de 1 o 2 horas.

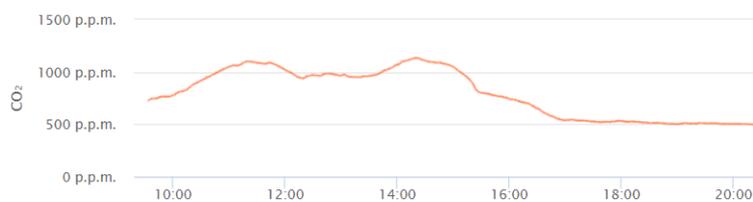


Figura 4.17.- Gráfica Sin Ventilación Final.

Estas observaciones son fundamentales para comprender el impacto de la ventilación en los niveles de CO<sub>2</sub> y su relevancia para la salud y el bienestar de las personas en el entorno monitoreado.

#### 4.4.- Estimación del número de personas

La estimación del número de personas presentes en un espacio interior es fundamental para evaluar la calidad del aire y su impacto en la salud y el bienestar de los ocupantes. Utilizando los datos recopilados de diferentes ubicaciones donde se colocaron los sensores de CO<sub>2</sub>, se realizaron estimaciones preliminares considerando la concentración de CO<sub>2</sub> y la presencia de ventilación.

Los datos se organizaron en una tabla detallada, como se muestra en la tabla 4.1, que incluye la fecha, hora, número de personas, indicación de ventana abierta, nivel de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa. Cabe destacar que la para detallar si había ventanas abiertas o no, cuando estas estaban abiertas se puso una "X". A partir de estos datos, se pudo observar



la relación entre la concentración de CO<sub>2</sub> y el número de personas presentes en el ambiente, así como el impacto de la ventilación en la calidad del aire interior.

Sensor 14	Hora	Nº P Aprox	Ventana abierta	Nvl CO <sub>2</sub> (ppm)	T (°C)	Hr (%)
02/03/2023	10:00	13	X	992	24,00	41
	11:00	15		1237	23,50	43
	12:00	13		1182	23,97	42
	13:00	12		1205	24,75	41
	13:30	12	X	876	24,89	39

Tabla 4.1.- Recopilación datos en Excel

Observando dicha tabla, se establecieron umbrales de concentración de CO<sub>2</sub> para determinar la calidad del aire en función de la presencia o ausencia de ventilación:

- Sin ventilación
  - 400 a 700 ppm: 0 a 3 personas
  - 700 a 1000 ppm: 3 a 10 personas
- Con ventilación:
  - 400 a 700 ppm: 0 a 15 personas
  - 700 a 1000 ppm: 15 a 30 personas.

Cuando hay presencia de ventilación, especialmente en ventilación natural a través de ventanas abiertas, contribuye significativamente a mantener una calidad del aire aceptable incluso en presencia de un mayor número de personas. Esto es una muestra más de que la ventilación es realmente importante sobre todo en lugares de trabajo o estudio, donde la densidad de ocupación puede variar ampliamente.

Sin embargo, se reconoce que estas estimaciones son simplificadas y que otros factores, como el volumen del espacio interior y la duración de la ventilación, influye en la calidad del aire. En el caso de que haya ventilación, es crucial considerar que cuanto más tiempo permanezcan las ventanas abiertas, la concentración de CO<sub>2</sub> tendrá a disminuir hasta alcanzar un nivel más o menos estable, incluso si hay una alta densidad de gente. Del mismo modo, el volumen del espacio interior desempeña un papel crucial, ya que cuanto mayor sea este volumen, más personas podrán ocupar el espacio sin necesidad de ventilar constantemente.



Todas estas conclusiones se sacaron observando los datos obtenidos a lo largo del experimento en cada uno de los espacios donde se colocaron los sensores. Para las observaciones con mayor número de personas se utilizaron los datos obtenidos en MediaLab, ya que es el lugar donde más variación de personas, obteniendo un día un pico de 27 personas. Los datos en consejería y secretaría son los mejores para observar la variación de concentración de dióxido de carbono cuando hay pocas personas.

#### 4.4.1.- Análisis de las ecuaciones del número de personas

Después de la recopilación de los códigos de R, se procede a su importación a una hoja de cálculo de Excel donde se encuentran los códigos de Visual Basic. Una vez todos los datos se encuentren en el Excel se puede empezar a calcular tanto las fórmulas sin modificar con sus errores, como las constantes propuestas para la mejorar de las fórmulas. Con el fin de evaluar su efectividad y determinar cuál de ellas es más adecuada y en qué condiciones.

El análisis preliminar de la tabla 4.2 revela un porcentaje de aciertos notablemente bajo en todas las fórmulas. Es importante destacar que en este análisis preliminar no se consideraron los errores. Sin embargo, destaca que las ecuaciones 1 y 4 con ACH1 y ACH4, las cuales muestran una dependencia significativa respecto al tiempo. Hay que tener en cuenta que estas ecuaciones representan una estimación ideal del número de personas, por lo tanto, comprender su margen de error es fundamental para una interpretación más precisa.

	Preliminar									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Verdaderos	178	50	181	171	230	176	174	30	182	171
Incorrectos	867	1381	1250	874	1201	1255	871	1401	1249	874
Totales	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045
Error Abso	17,03%	3,49%	12,65%	16,36%	16,07%	12,30%	16,65%	2,10%	12,72%	16,36%

Tabla 4.2.- Recopilación Preliminar de los Métodos.

Además de evaluar el número de aciertos, es crucial considerar el error asociado con las fórmulas, como se dijo anteriormente. Este error depende del volumen de la habitación, para que sea utilizado en cualquier estancia. Es importante destacar que en las ecuaciones donde se involucran un intervalo de dióxido de carbono, se observaron errores significativamente, con algunos valores alcanzando 7 personas de error. Estos valores de error son demasiado elevados y podrían comprometer la precisión de las estimaciones.



El problema radica en que algunas de las mediciones de CO<sub>2</sub> están demasiado cerca del valor de ambiental, lo que resulta en errores considerables. Para abordar este problema, se propuso hacer que el error máximo sea de 3. Cabe destacar que esta limitación se puso antes de general la media que se observa en la tabla 4.3. Esta limitación permitirá obtener estimaciones más razonables y coherentes, al tiempo que garantiza una precisión más aceptable.

Como se puede observar en la tabla 4.3, aquellas fórmulas con menor margen de error están vinculadas principalmente a la ecuación 4 y la ecuación 3. Este aspecto tiene gran importancia, ya que, a pesar de la efectividad aparente de una fórmula, un margen de error elevado podría comprometer su utilidad práctica.

	Error Fórmula/Volumen									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Media De K	0,0055	0,0076	0,00040	0,0076	0,00074	0,0000033	0,00154	0,000028	0,000028	0,000039

Tabla 4.3.- Recopilación del Error de la Fórmula

Considerando el margen de error en cada una de las estancias del experimento, se calcularon las nuevas tasas de precisión, las cuales se muestran en la tabla 4.4. Se observa que, al añadir el margen de error, los porcentajes mejoran considerablemente, alcanzando incluso que algunas de las ecuaciones superen el 40% de los aciertos. En este caso, la ecuación 1 con ACH1 muestra el mejor desempeño, con un 43,73% de aciertos. Aunque este porcentaje no alcanza el nivel ideal, representa una mejora notable con respecto a los resultados presentados en la tabla 4.2.

	Inicial									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Verdaderos	457	265	425	420	481	415	384	116	418	372
Incorrectos	588	1166	1006	625	950	1016	661	1315	1013	673
Totales	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045
Error Abso	43,73%	18,52%	29,70%	40,19%	33,61%	29,00%	36,75%	8,11%	29,21%	35,60%

Tabla 4.4.- Recopilación de los Métodos según su error

Para un análisis más detallado, se adjuntan en el Anexo III las tablas correspondientes a las diferentes estancias con sus tasas de precisión. Se destaca que los porcentajes más altos de precisión se encuentran en estancias menores a 150 m<sup>3</sup>, donde la mayoría de las fórmulas



logran un índice de aciertos superior al 90%. Específicamente, las ecuaciones más relevantes en este contexto son la ecuación 1 y la ecuación 4, ambas con la tasa de renovación 3.

Como se detalló en el capítulo [3.2.3](#) “Mejora de las fórmulas“, se planteó la optimización de las ecuaciones mediante constantes. A través de la utilización de los códigos de Visual Basic en Excel, se generaron los resultados mostrados en la tabla 4.5 para la constante multiplicadora, K1, y en la tabla 4.6 para la constante sumada, K2. Al igual que en el error, estas constantes también dependen del volumen para generalizarlas y ser utilizadas en cualquier estancia.

	Constante K1/Volumen									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Media DE K	0,029	0,004	0,035	0,024	0,021	0,042	0,030	0,005	0,038	0,025

Tabla 4.5.- Recopilación de media de K1

	Constante K2/Volumen									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Media De K	-0,043	-0,020	-0,0061	-0,0091	-0,0033	-0,0047	-0,038	-0,036	-0,0080	-0,034

Tabla 4.6.- Recopilación de media de K2

Siguiendo la metodología propuesta anteriormente, se incorporaron estas constantes ajustables multiplicándolas en caso de K1 y sumándola en caso de K2, ambas dos por el volumen, para posteriormente obtener los nuevos porcentajes de aciertos de las diferentes estancias.

En estas nuevas tablas 4.7 y 4.8, se implementó un formato condicional para resaltar cuales de las ecuaciones mejoran con respecto a las ecuaciones iniciales, representadas en la tabla 4.2. Cabe destacar que en estos porcentajes se tiene en cuenta el error. Aunque estas mejoras no abarcan todas las ecuaciones iniciales, si tienen un impacto positivo en aquellas que tienen los peores porcentajes de aciertos.

Como se puede apreciar en las tablas, la introducción de las constantes mejora el rendimiento de algunas de las ecuaciones. sin embargo, los porcentajes de aciertos aún no alcanzan el umbral del 50%. A pesar de este hecho, es importante destacar que la ecuación 1 con ACH4 logra mejorar hasta un 44,63% de aciertos. Esto la convierte en la ecuación con el mayor número de aciertos, incluso al considerar las ecuaciones sin modificar.



	Iteración 1									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Verdaderos	306	390	333	337,9	337	303,3149	266,27	297	336	265
Incorrectos	739	1041	1098	707,1	1094	1127,685	778,73	1134	1095	780
Totales	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045
Error Abso	29,28%	27,25%	23,27%	32,34%	23,55%	21,20%	25,48%	20,75%	23,48%	25,36%

Tabla 4.7.- Recopilación de Constante K1

	Iteración 2									
	Ecuación 1				Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4			
	ACH1	ACH2	ACH3	ACH4			ACH1	ACH2	ACH3	ACH4
Verdaderos	77	512,97	367,97	466,34	343	341,2232	61,878	254	364,971	66
Incorrectos	968	918,03	1063	578,66	1088	1089,777	983,12	1177	1066,03	979
Totales	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045	1431	1431	1045
Error Abso	7,37%	35,85%	25,71%	44,63%	23,97%	23,85%	5,92%	17,75%	25,50%	6,32%

Tabla 4.8.- Recopilación de Constante K2

Al examinar detalladamente el desglose en el Anexo III, se evidencia una mejora significativa en los resultados de las diversas estancias con esta nueva postura. Es notable que, en comparación con el caso inicial, la inclusión de la constante K1 ha llevado a una mejora significativa en algunas de las estancias, permitiendo que algunas de las ecuaciones superen el umbral del 50% de aciertos. No obstante, no se observa una mejora significativa de manera individual como era en el caso de las ecuaciones con volúmenes pequeños.

En resumen, considerando todas las observaciones realizadas, se concluye que para volúmenes menores de 150 m<sup>3</sup>, las ecuaciones más adecuadas son la ecuación 1 con ACH3 o la ecuación 4 con ACH3, ambas sin la necesidad de incluir las constantes. Estas ecuaciones han demostrado ofrecer resultados más precisos en este rango de volúmenes.

Por otro lado, para volúmenes mayores, se recomienda utilizar la ecuación 1 con ACH4, complementada la constante multiplicadora K1 y la constante sumada K2. Estas constantes han demostrado que de manera general mejoraron significativamente en un rango de volumen mayor al 150 m<sup>3</sup>.



## 5. Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1.- Conclusiones

En el estudio realizado sobre ventilación interior, se distinguen tres tipos: la natural, la mecánica y la mixta. Si bien la ventilación natural destaca por su bajo costo operativo al no requerir consumo de energía, su disponibilidad limitada en muchos establecimientos plantea desafíos significativos. Por consiguiente, en términos generales, se considera que la ventilación mixta es la opción más viable y versátil. Esta ventilación permite la combinación flexible de ambos sistemas, adaptándose a las condiciones ambientales específicas de cada momento. Además de optimizar la calidad del aire interior, la ventilación mixta ofrece un equilibrio entre eficacia y eficiencia energética al minimizar el consumo de energía, especialmente en comparación con los sistemas mecánicos que pueden tener un alto consumo energético de hasta 2000 W por hora.

Al analizar los resultados obtenidos y los datos recopilados en el estudio, se concluye que, de manera general, para volúmenes superiores a 150 m<sup>3</sup>, la ecuación 1 con ACH4, complementada tanto la constante K1 multiplicadora como la constante K2 sumada, representa la mejor opción. Esta ecuación, al ser ajustada con las constantes, logra una tasa de aciertos del 44,63% con un error que no supera  $\pm 3$  personas en las estancias analizadas.

No obstante, para volúmenes inferiores a 150 m<sup>3</sup>, es más recomendable utilizar la ecuación 4 con ACH3 o bien la ecuación 1 con ACH3, ambas sin la necesidad de introducir las constantes. Como se evidenció en el capítulo [4.4.1](#) “Análisis de las ecuaciones del número de personas”, estas dos ecuaciones presentan las tasas de precisión más altas, con una tasa de aciertos de más del 90%. Se optó por seleccionar la ecuación 4 con ACH3 como la opción preferida debido a su menor margen de error, siendo en su mayoría de  $\pm 1$  personas en espacios inferiores a 150 m<sup>3</sup>.

En conclusión, este estudio ha proporcionado información relevante sobre la toma de decisiones de los datos obtenidos en un sensor de CO<sub>2</sub>, especialmente en lo que respecta a la ventilación y la estimación del número de personas. La ventilación mixta emerge como una opción versátil y eficaz, especialmente en entornos donde la ventilación natural presenta limitaciones. Mientras que la aplicación de ecuaciones específicas, adaptadas al volumen de



las estancias y con la inclusión de las constantes cuando es necesario, puede mejorar significativamente la precisión en la estimación del número de personas.

## 5.2.- Trabajo futuro

Los resultados presentados en las tablas revelan un porcentaje de aciertos general notablemente bajo, del menos del 50%, en las ecuaciones propuestas, lo cual se atribuye a la complejidad de ciertos parámetros, como la tasa de renovación de aire. Se observa que las ecuaciones utilizadas en este experimento dependen de factores ambientales variables, como la velocidad del viento o la concentración de CO<sub>2</sub> exterior en cada instante de tiempo. Además, es importante tener en cuenta que el error del sensor utilizado para la toma de datos aumenta con la magnitud de la medida, lo que puede influir en la precisión de las ecuaciones.

Para un trabajo futuro en este campo, se recomienda abordar la variabilidad de estos parámetros atmosféricos y su influencia en las ecuaciones propuestas. Además, se sugiere explorar la utilización de sensores de CO<sub>2</sub> con una mayor precisión en sus medidas, lo que podría mejorar significativamente la calidad de los datos y, en consecuencia, mejora de la precisión y robustez de dichas ecuaciones.

En resumen, abordar estos aspectos en futuras investigaciones podría conducir a mejoras significativas en la precisión y fiabilidad de las ecuaciones utilizadas para la estimación del número de personas en entornos interiores.



## 6. Bibliografía

- [1] Marín García, D. (2020). Del COVID-19 -SARS-CoV-2- y su relación con la ventilación y la climatización en edificación. *Aparejadores*, 87, 43-50. <https://www.riarte.es/handle/20.500.12251/1665>
- [2] Mosso, M. A., Ullán, C., & De La Rosa Localización, M. C. (2002). El aire hábitat y medio de transmisión de microorganismos. Autores: M. No. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2147812>
- [3] Sensirion, A. G. (n.d.). *SCD30*. Sensirion AG. Retrieved April 15, 2024, from <https://www.sensirion.com/products/catalog/SCD30/>
- [4] *Dióxido de carbono*. (2022, July 13). Instituto para la Salud Geoambiental. <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2/>
- [5] Euroinnova Business School. (2021, November 24). *los niveles de co2*. Euroinnova Business School. <https://www.euroinnova.edu.es/blog/los-niveles-de-co2>
- [6] Yuste, P. S. (n.d.). *Concentración de CO2 en viviendas y su limitación en el CTE*. *Certificadosenergeticos.com*. Retrieved April 15, 2024, from <https://www.certificadosenergeticos.com/concentracion-de-co2-viviendas-limitacion-cte>
- [7] Tutiempo Network, S. L. (n.d.). *Fórmulas y más fórmulas*. *Www.tutiempo.net*. Retrieved April 15, 2024, from <https://www.tutiempo.net/meteorologia/ecuaciones.html>
- [8] *¿Cuál es el punto de rocío?* (n.d.). Labomat Essor. Retrieved April 15, 2024, from <https://labomat.eu/es/preguntas-frecuentes-sobre-pruebas-de-corrosion/708-cual-es-el-punto-de-rocio.html>
- [9] BOE-A-2007-15820 Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. (n.d.). *Boe.es*. Retrieved April 15, 2024, from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-15820>
- [10] Cronembold Landivar, S. (2009). *Estudio de ventilación en viviendas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103496>
- [11] *Ventilación mecánica controlada para viviendas*. (2023, February 2). *Hogarsense.es*; DAA GmbH. <https://www.hogarsense.es/aire-acondicionado/ventilacion-mecanica-aire-acondicionado>
- [12] *Big Data: ¿En qué consiste? Su importancia, desafíos y gobernabilidad*. (n.d.). *Powerdata.es*. Retrieved April 17, 2024, from <https://www.powerdata.es/big-data>
- [13] *Big Data: Qué es y por qué importa*. (2021, November 5). *Sas.com*. <https://www.sas.com/es/es/insights/big-data/what-is-big-data.html>
- [14] *Formación en Big Data archivos*. (n.d.). *Datahack*. Retrieved April 17, 2024, from <https://www.datahack.es/category/articulo/formacion-en-big-data/>



- [15] Gualda, M. (2023, January 25). *Analista de datos y Científico de datos: Diferencias y habilidades*. Tecon. <https://www.tecon.es/analista-de-datos-y-cientifico-de-datos-diferencias-y-habilidades/>
- [16] Seguridad®, A. (2023, May 12). *¿Qué es y cómo funciona un sistema de control de aforo?* Altaico Seguridad®. <https://www.altaico.es/control-de-aforo-y-de-conteo-de-personas/>
- [17] *Sistemas de conteo*. (n.d.). Affluences.com. Retrieved April 25, 2024, from <https://www.pro.affluences.com/es/post/sistemas-conteo-personas-tecnologias>
- [18] *Contador de personas por infrarrojos CDPC015S*. (n.d.). C.D. Products S.A. - CDP. Retrieved April 25, 2024, from <https://www.cdpsa.eu/producto/contador-de-personas-por-infrarrojos-cdpc015s/>
- [19] Affluences. (2022, September 29). *¿Por qué elegir las cámaras de conteo de personas para gestionar los flujos de visitantes?* Affluences Pro. <https://www.pro.affluences.com/es/post/cámaras-de-conteo-de-personas>
- [20] Mira, A. R. (2020, August 18). *La visión estereoscópica en sistemas de realidad virtual*. Tokio School. <https://www.tokioschool.com/noticias/vision-estereoscopica-realidad-virtual/>
- [21] ▷ *Teccpo TDLM26P*. (n.d.). Medidores láser. Retrieved April 17, 2024, from <https://medidor-laser.net/teccpo-ip54/>
- [22] Santos, P. G. (2023, March 23). *Renovación de aire en oficinas, ¿cuándo es necesario ventilar?* Envira. <https://envira.es/renovacion-de-aire-en-oficinas/>
- [23] *Conservación de La Masa y Sistemas Cerrados*. (n.d.). Scribd. Retrieved April 17, 2024, from <https://es.scribd.com/document/332189028/Conservacion-de-La-Masa-y-Sistemas-Cerrados>
- [24] Allen, J., Spengler, J., Jones, E., & Cedeno-Laurent, J. (n.d.). *Guía en pasos para medir la tasa de renovación de aire en aulas*. Andefil.com. Retrieved April 17, 2024, from [https://andefil.com/wp-content/uploads/2020/09/guia\\_ventilacion.pdf](https://andefil.com/wp-content/uploads/2020/09/guia_ventilacion.pdf)
- [25] *de La Concentración de Dióxido de Carbono En, E*. (n.d.). *ESPACIOS INTRAMURALES EN RELACIÓN CON LAS MEDIDAS DE BIOSEGURIDAD*. Edu.Co. Retrieved April 17, 2024, from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/48512/2022ivonneserna.pdf?sequence=12&isAllowed=y>
- [26] J. E. Pachón, N. Y. Rojas, D. A. Castañeda, L. R. Villamizar, O. Ramírez and L. V. Dimas, "Mathematical modeling of ventilation in classrooms as decrease in the risk of contagion by COVID-19," 2021 Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASAP), Bogota, Colombia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CASAP54985.2021.9703383. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9703383>
- [27] *de la qualité de l'air interieur Carbon dioxide in evaluating indoor air quality*, L. D. de C. P. la É. (n.d.). *NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior*. Insst.Es. Retrieved April 17, 2024, from [https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp\\_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-](https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-)



- [1d08b22e1074#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20como%20contaminante&text=Es%20un%20componente%20del%20aire,valores%20de%20hasta%20550%20ppm](#)
- [28] SAIASeguir, S. A. (n.d.). *Correlación PEARSON*. SlideShare. Retrieved April 29, 2024, from <https://es.slideshare.net/ShowBlade/correlacin-pearson>
- [29] de Salud Ambiental (SESA), S. E. (n.d.). Vista de Estimación del aforo en un salón de clases según su tamaño y capacidad de ventilación en tiempos de pandemia por el coronavirus SARS-CoV-2. Diffundit.com. Retrieved April 17, 2024, from <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1151/1171>
- [30] Iñigo Martínez, Jan L. Bruse, Ane M. Florez-Tapia, Elisabeth Viles, Igor G. Olaizola, ArchABM: An agent-based simulator of human interaction with the built environment. CO2 and viral load analysis for indoor air quality, *Building and Environment*, Volume 207, Part B, 2022, 108495, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108495>.
- [31] Serna Bonilla, I. (2022). Evaluación de la concentración de dióxido de carbono (CO2) en espacios intramurales en relación con las medidas de bioseguridad de la Universidad Santo Tomás, Villavicencio. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/48512>
- [32] Gómez, E. L. (n.d.). *ESTUDIO DE CONSISTENCIA DE ECUACIONES DE ESTADO APLICADAS A FÍSICA DE ALTA DENSIDAD DE ENERGÍA (HEDP)*. Upm.Es. Retrieved April 28, 2024, from [https://oa.upm.es/57018/1/TFG\\_ELISA\\_LOPEZ\\_GOMEZ.pdf](https://oa.upm.es/57018/1/TFG_ELISA_LOPEZ_GOMEZ.pdf)
- [33] *Qué es Outliers Concepto y definición. Glosario*. (n.d.). GAMCO, SL. Retrieved April 20, 2024, from <https://gamco.es/glosario/outliers/>
- [34] Paradis, E. (n.d.). *R para Principiantes*. R-project.org. Retrieved April 29, 2024, from <https://cran.r-project.org/doc/contrib/rdebut.es.pdf>
- [35] *RPubs - Gráficos con ggplot2*. (n.d.). Rpubs.com. Retrieved April 29, 2024, from <https://rpubs.com/dsulmont/37913>
- [36] *RPubs - Lubridate en R*. (n.d.). Rpubs.com. Retrieved April 29, 2024, from <https://rpubs.com/alcisner/lubridate>
- [37] *Función merge en R*. (2020, July 19). RCODER. <https://r-coder.com/funcion-merge-r/>
- [38] *RPubs - Uso de la librería Corrplot*. (n.d.). Rpubs.com. Retrieved April 29, 2024, from <https://rpubs.com/FEBE/676895>
- [39] KathleenDollard. (n.d.). *Tipo de datos - Visual Basic*. Microsoft.com. Retrieved April 29, 2024, from <https://learn.microsoft.com/es-es/dotnet/visual-basic/programming-guide/language-features/data-types/>
- [40] o365devx. (n.d.). *Propiedad Workbook.Worksheets (Excel)*. Microsoft.com. Retrieved April 29, 2024, from <https://learn.microsoft.com/es-es/office/vba/api/excel.workbook.worksheets>
- [41] o365devx. (n.d.-a). *Propiedad Range.Value (Excel)*. Microsoft.com. Retrieved April 29, 2024, from <https://learn.microsoft.com/es-es/office/vba/api/excel.range.value>



- [42] Archived. (n.d.). *GoalSeek method [excel 2003 VBA language reference]*. Microsoft.com. Retrieved April 29, 2024, from [https://learn.microsoft.com/es-es/previous-versions/office/developer/office-2003/aa195749\(v%3Doffice.11\)](https://learn.microsoft.com/es-es/previous-versions/office/developer/office-2003/aa195749(v%3Doffice.11))
- [43] *Qué gasta más: ¿un aire acondicionado o un ventilador?* (2023, April 28). REPSOL; Repsol España. <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/que-consume-mas-ventilador-aire-acondicionado/>