



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ventilación y COVID-19

Proyecto de Ingeniería Mecánica

Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Wener

Tutores

Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo, Uruguay

Febrero 2022

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DEL PROYECTO DE GRADO

Dr. Ing. Gabriel Usera

Mag. Ing. Sofía Gervaz

Mag. Ing. Mauro D'Angelo

RESUMEN

La pandemia de COVID-19 ha destacado la importancia de la Calidad de Aire Interior (IAQ), particularmente debido a la posibilidad de contagio por vía aérea de larga distancia. En consecuencia, estimar la tasa de ventilación y el riesgo de contagio se ha convertido en una tarea de primordial importancia.

El presente proyecto estudia la IAQ en una escuela pública de Montevideo (Uruguay) con ventilación natural, basándose en una campaña de medidas llevada a cabo entre julio y diciembre de 2021. Se midieron las concentraciones de material particulado (PM) y dióxido de carbono (CO_2) dentro de un salón de clase y fuera de la escuela, así como algunas variables meteorológicas. Asimismo, se estimaron la tasa de ventilación y el riesgo de contagio por vía aérea de larga distancia mediante el uso de modelos de caja con mezcla perfecta y de las medidas de CO_2 . En particular, se utilizaron modelos de Wells-Riley para la estimación del riesgo de contagio.

Por otra parte, se analizó la relación entre el confort térmico de los ocupantes y la tasa de ventilación mediante la implementación de un modelo BEM (*Building Energy Modeling*) en EnergyPlus y se propuso un sistema de HVAC centralizado para mejorar el confort térmico y la IAQ durante la temporada de calefacción.

ABSTRACT

The importance of Indoor Air Quality (IAQ) has been highlighted by the COVID-19 pandemic, particularly due to the possibility of long-distance airborne contagion. Consequently, assessment of ventilation rates and estimation of contagion risk has become a matter of the utmost importance.

This project focuses on the assessment of IAQ at a public school building in Montevideo (Uruguay) with natural ventilation, based on a measurement campaign conducted between July and December of 2021. Both Particulate Matter (PM) and carbon dioxide (CO_2) concentrations were measured inside a classroom and outside the school, as well as some meteorological variables. Furthermore, ventilation rates and long-distance contagion risk were assessed through the use of fully-mixed box models and CO_2 measurements. In particular, Wells-Riley models were used for risk assessment.

Additionally, the interaction between occupants' thermal comfort and ventilation rates was explored by implementing a BEM (*Building Energy Modeling*) model in EnergyPlus, and a central HVAC system was proposed in order to improve thermal comfort and IAQ during the heating season.

Agradecimientos

Appreciation is a wonderful thing. It makes what is excellent in others belong to us as well.

— Voltaire (atribuida)

El presente trabajo no habría sido posible sin el apoyo de diversas personas e instituciones. Nos resulta indispensable expresarles nuestro más sentido agradecimiento.

En primer lugar, quisiéramos agradecer a nuestros tutores, Mariana y Martín. Su asertividad, amabilidad y dedicación han sido fundamentales para nuestro trabajo diario. Han sabido levantarnos los ánimos en muchas oportunidades.

Por otra parte, muchas gracias a todas las personas que se han visto involucradas en el quehacer de nuestro trabajo. En especial, gracias a Ignacio Franchi, que nos ha ayudado muchísimo en el trabajo de campo y en diversos aspectos instrumentales, y nos ha convencido desde el primer día del rol *sine qua non* que tienen los precintos en la vida diaria de un ingeniero.

Gracias también a Mauro D'Angelo, quien también fue una gran ayuda para el trabajo de campo e instrumental, y a Daniel Barboza, del taller del IMFIA, que construyó diversos soportes en tiempo récord. Además, gracias a Pablo Pais y Paula La Paz, que nos ayudaron a utilizar las instalaciones del Canal de Pruebas Navales y Pesqueras del IMFIA para calibrar los anemómetros.

Vaya también nuestro agradecimiento a muchos docentes e investigadores de la FING, que nos han aconsejado y guiado en varias ocasiones. A Gabriel Pisciotto, gran profesor con quien tenemos el gusto de seguir aprendiendo constantemente. A Sofía Gervaz, por su generosidad y disponibilidad para atender nuestras dudas. Y a Gabriel Usera, a quien admiramos profundamente, por su constante apoyo.

Gracias también a Juan Pablo Oliver y a su equipo del IIE, que nos ha ayudado con la implementación de sensores. En particular, muchas gracias a Leandro Díaz.

Agradecemos además a Lucía Gutiérrez, María Noel López y Magdalena Camacho, docentes de FADU que participaron en el proyecto de extensión asociado a nuestro proyecto de grado.

Además, quisiéramos agradecer a toda la comunidad educativa de las escuelas N° 32 y N° 83 de Montevideo, que nos han permitido trabajar a su alrededor y se han interesado por nuestras actividades. En particular, muchas gracias a Adriana Escutary y a Lethizia Sofía por su constante y generosa disposición.

También agradecemos a la Comisión de Extensión de la Facultad de Ingeniería, que ha financiado el proyecto de extensión en el cual se ha enmarcado el presente proyecto de grado, y al Plan Ceibal, que generosamente nos ha prestado algunos equipos.

Por último, queremos expresar nuestro agradecimiento a nuestras familias, por su apoyo permanente a lo largo de todos nuestros años de estudio y, en particular, durante nuestro proyecto final.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Contextualización y justificación	1
1.1.1	La pandemia de COVID-19	1
1.1.2	El contexto de las escuelas uruguayas: posibles problemáticas para la correcta ventilación	2
1.1.3	La calidad de aire como problemática general a nivel mundial	3
1.1.4	Oportunidad coyuntural para el proyecto	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estructura del trabajo	4
1.4	Notación	4
I	Trabajo de campo y diagnóstico de la calidad de aire	5
2	Introducción al trabajo de campo	7
2.1	Objetivos específicos	7
2.2	Antecedentes	7
2.2.1	Justificación	7
2.2.2	Campañas de medida en escuelas	8
2.3	Normativa de referencia	10
2.3.1	Concentraciones límite de contaminantes aéreos	10
2.3.2	Guías de ventilación en escuelas	12
2.4	Base de datos y programas	12
3	Relevamiento	13
3.1	Contextualización del edificio	13
3.2	Relevamiento del edificio	13
3.2.1	Descripción general	13
3.2.2	Elaboración de modelo CAD y documentación edilicia	16
3.3	Operativa diaria y ocupación nominal	19
3.4	Selección de un salón para medición continua	19
3.4.1	Características del salón elegido	19
4	Instrumental	21
4.1	Introducción	21
4.2	Variables de interés	21
4.3	Instrumentos y sensores disponibles	22
4.3.1	Monitores Aeroqual 500	22
4.3.2	Monitores AirCO ₂ ntrol 5000	23
4.3.3	Estación Met One E-Sampler 9800	24
4.3.4	Estación meteorológica Davis Instruments Vantage Pro2	25
4.3.5	Sensores Modern Device Wind Rev C y Wind Rev P	26

4.3.6	Sensores Winsen MH-Z19B	27
4.4	Armado de instrumentos en base a placas Arduino	28
4.4.1	Aspectos generales	28
4.4.2	Armado y características particulares	29
4.4.3	Resumen de partes y costo estimado	34
4.4.4	Software de adquisición de datos	34
4.4.5	Ajuste	34
4.5	Disponibilidad de instrumentos	35
4.6	Instalación de los instrumentos	35
4.6.1	Monitores Aeroqual	35
4.6.2	Estación Met One	39
4.6.3	Estación meteorológica	42
4.6.4	Anemómetros	43
4.7	Limitaciones y problemas	45
4.7.1	Monitores Aeroqual 500	45
4.7.2	Monitores AirCO ₂ ntrol	46
4.7.3	Monitores basados en sensores Winsen MH-Z19B	48
4.7.4	Estación Met One E-Sampler 9800	49
4.7.5	Anemómetros basados en sensores Modern Device Rev C y Rev P	50
4.8	Otras instancias de medición	52
4.9	Otros comentarios	52
5	Análisis descriptivo de los resultados	53
5.1	Introducción	53
5.2	Medidas de CO ₂	53
5.2.1	Medidas en el salón 2	53
5.2.2	Medidas en el pasillo	56
5.2.3	Medidas en el salón 11	58
5.3	Medidas de material particulado	62
5.4	Otras medidas	66
5.4.1	Dirección y velocidad de viento	66
5.4.2	Temperatura	67
5.4.3	Humedad	69
5.4.4	Otras magnitudes	69
6	Estimación de la tasa de ventilación	71
6.1	Introducción	71
6.1.1	Motivación	71
6.2	Modelos	72
6.2.1	Modelos CFD	72
6.2.2	Modelos de caja	73
6.3	Metodología	77
6.3.1	Adaptación del modelo de caja general	77
6.3.2	Datos analizados	80
6.3.3	Verificación de la hipótesis de mezcla perfecta	81
6.4	Resultados	82
6.4.1	Ajuste de los datos diarios del salón 2	82
6.4.2	Experimentos controlados	91
6.4.3	Evaluación de la hipótesis de mezcla perfecta	99
6.5	Conclusiones	108

7	Estimación del riesgo de contagio	111
7.1	Introducción	111
7.2	Antecedentes y modelos de contagio	111
7.2.1	Los modelos de Wells-Riley	112
7.2.2	Los modelos de respuesta a la dosis	118
7.2.3	Selección de un modelo de contagio	118
7.3	Metodología	119
7.3.1	Base metodológica	119
7.3.2	Parámetros del modelo	120
7.3.3	Determinación del número básico de reproducción	122
7.3.4	Adaptación a la disponibilidad de datos	123
7.4	Resultados y discusión	124
7.4.1	Cálculo del riesgo de contagio a partir de los datos de campo	124
7.4.2	Análisis paramétrico en la tasa de ventilación	130
7.4.3	Regímenes de ventilación	132
7.5	Conclusiones	134
II	Sistema de acondicionamiento térmico invern	135
8	Introducción al acondicionamiento térmico	137
8.1	Motivación	137
8.2	Objetivos específicos	138
8.3	Referencias de diseño	138
9	Modelado térmico del edificio	139
9.1	Introducción	139
9.2	EnergyPlus	139
9.3	Montaje del modelo en EnergyPlus	140
9.3.1	Armado del archivo <code>idf</code>	141
9.3.2	Armado del archivo <code>epw</code>	144
9.4	Resultados del EnergyPlus	144
9.4.1	Simulación de ventilación natural	144
9.4.2	Simulación para dimensionamiento del sistema de HVAC	148
9.5	Verificación de los resultados de diseño	151
9.5.1	Verificación para el salón 2	151
9.5.2	Otros salones	157
9.5.3	Comparación con los resultados del EnergyPlus	157
9.6	Conclusiones	158
10	Diseño del sistema de HVAC	159
10.1	Introducción	159
10.1.1	Requisitos de operación	159
10.2	Diseño de ductos	159
10.2.1	Instalación A	160
10.2.2	Instalación B	163
10.3	Modelo CAD	165
10.4	Selección de un equipo comercial	167
10.4.1	Parámetros de selección	167
10.4.2	Tipos de equipos	168
10.4.3	Selección	168
10.4.4	Instalación y suministro eléctrico	169

10.5	Costos de operación	169
10.5.1	Costo de operación del sistema proyectado	169
10.5.2	Comparación con el costo de operación con gas natural	170
10.5.3	Comparación con el actual sistema de <i>splits</i>	171
10.6	Operación en verano	171
10.7	Comentarios finales	171
11	Conclusiones	173
	Referencias	175
	Apéndices y anexos	I
A	Apéndices	III
A.1	Referencia general de notación	III
A.1.1	Siglas y abreviaturas	III
A.1.2	Símbolos	VI
A.1.3	Subíndices	IX
A.2	Planos estructurales de la escuela	XI
A.3	Ocupación de los salones	XXV
A.4	Planos del soporte del escritorio para los sensores AQ1 y AQ3	XXVII
A.5	Planos de la ménsula del Met One E-Sampler 9800	XXXIII
A.6	Calendario de medidas	XLI
A.7	Gráficos de ajuste del modelo de caja	XLV
A.8	Gráficos de riesgo semanal	XLIX
A.8.1	Turno matutino	XLIX
A.8.2	Turno vespertino	LI
A.9	Planos del sistema de HVAC proyectado	LIII
B	Anexos	LXI
B.1	Plano catastral de la escuela	LXI
B.2	Certificados de calibración de los cabezales Aeroqual 500	LXV
B.3	Informe de calibración del módulo de anemómetros Rev C y Rev P	LXXIII
B.4	Estimación de la tasa de generación de dióxido de carbono	LXXVII
B.5	Ábaco de pérdida de carga distribuida para ductos de sección circular	LXXIX
B.6	Tabla para selección de secciones rectangulares equivalentes	LXXXIII
B.7	Tablas de coeficientes de pérdida de carga localizada	LXXXV
B.8	Guía técnica del equipo para la instalación A	LXXXVII
B.9	Guía técnica del equipo para la instalación B	XCVII

Índice de figuras

3.2.1	Fotografías del exterior de la escuela	14
3.2.2	Imagen satelital del la manzana de la escuela	15
3.2.3	Fotografías de los alrededores de la escuela	16
3.2.4	Renderizaciones del exterior del modelo de la escuela	17
3.2.5	Renderizaciones del interior del modelo de la escuela	18
3.4.1	Fotografía de salón 2	20
4.3.1	Fotografías de los monitores Aeroqual 500	23
4.3.2	Fotografía de los monitores AirCO ₂ ntrol 5000	24
4.3.3	Fotografía de la estación Met One E-Sampler 9800	25
4.3.4	Fotografía de la estación Davis Instruments Vantage Pro2	26
4.3.5	Fotografías de los sensores Modern Device Rev C y Rev P	26
4.3.6	Fotografía del sensor Winsen MH-Z19B	27
4.4.1	Fotografías de algunos componentes de los montajes Arduino	29
4.4.2	Conversor DC <i>step-up</i> para módulos con sensores Rev P	30
4.4.3	Diagrama de conexión de los equipos con dos sensores Modern Device Rev C .	30
4.4.4	Diagrama de conexión de los equipos con dos sensores Modern Device Rev P .	31
4.4.5	Diagrama de conexión de los equipos con sensores Modern Device Rev C y Rev P	31
4.4.6	Fotografía de un módulo Arduino con anemómetros Rev C y Rev P	32
4.4.7	Diagrama de conexión de los equipos con el sensor Winsen MH-Z19B	33
4.4.8	Fotografía de los dispositivos Arduino de CO ₂	33
4.6.1	Diseño del soporte para los sensores Aeroqual 500 del escritorio	37
4.6.2	Fotografías de la instalación del escritorio	38
4.6.3	Diseño de la ménsula para la estación Met One	41
4.6.4	Fotografía de la instalación de la estación Met One	42
4.6.5	Fotografías de la instalación de la estación meteorológica	43
4.6.6	Fotografías de la instalación de los anemómetros Arduino	44
4.7.1	Regresión lineal para la corrección del monitor AQ2 por el AQ1	45
4.7.2	Regresión lineal para la corrección de los monitores AC1 y AC2 por el AQ1 . .	47
4.7.3	Regresión lineal para la corrección de los monitores AR1 y AR2 por el AC2 .	49
4.7.4	Fotografías de la calibración de un módulo de anemómetros	51
5.2.1	Diagrama de caja mensual de la concentración media diaria de CO ₂	54
5.2.2	Curva media diaria de CO ₂ al frente del salón	55
5.2.3	Diagrama de dispersión de la concentración de CO ₂ en función de la temperatura	56
5.2.4	Comparación entre la concentración de CO ₂ en el interior del salón y en el pasillo	57
5.2.5	Ubicación de sensores durante la prueba en el salón 11	59
5.2.6	Fotografías del salón 11	60
5.2.7	Resultados de concentración de CO ₂ en función del tiempo en el salón 11 . . .	61
5.3.1	Diagrama de caja mensual de la concentración de PM _{2.5}	62
5.3.2	Diagrama de caja mensual de la concentración de PM ₁₀	63
5.3.3	Curva media diaria de PM _{2.5} en el interior y en el exterior	64
5.3.4	Curva media diaria de PM ₁₀ en el interior y en el exterior	65

5.4.1	Rosas de viento	67
5.4.2	Diagrama de caja mensual de la temperatura	68
5.4.3	Registro histórico de temperatura en Montevideo para el 2021	68
5.4.4	Diagrama de caja mensual de la humedad relativa	69
6.4.1	Ejemplo de ajuste diario del modelo de caja	82
6.4.2	Histograma de resultados de ACH y RMSE en horas de ocupación	83
6.4.3	Histograma de resultados de ACH y RMSE en horas de desocupación	85
6.4.4	Histogramas de duración de las ventanas de ajuste, estratificado por ACH	88
6.4.5	Histogramas de ACH diaria ponderada	89
6.4.6	Diagrama de caja mensual de ajustes de ACH	90
6.4.7	Diagrama de caja mensual de ACH media diaria ponderada	90
6.4.8	Posiciones de los sensores durante las pruebas controladas	91
6.4.9	Evolución temporal durante las pruebas controladas (10/09/21)	94
6.4.10	Evolución temporal durante las pruebas controladas (15/10/21)	94
6.4.11	Ajuste del modelo de caja para las pruebas controladas	97
6.4.12	Comparativa temporal diaria entre el fondo y el frente del salón (11/08/21)	99
6.4.13	Comparativa temporal diaria entre el fondo y el frente del salón (02/09/21)	100
6.4.14	Comparativa temporal diaria entre el fondo y el frente del salón (05/10/21)	100
6.4.15	Histograma de diferencias de concentración entre el fondo y el frente del salón	101
6.4.16	Frecuencia acumulada de diferencias de concentración entre el fondo y el frente del salón	102
6.4.17	Evolución mensual de la diferencia de concentraciones entre el fondo y el frente del salón	102
6.4.18	Evolución mensual de la diferencia de concentraciones entre el fondo y el frente del salón (%)	103
6.4.19	Proceso de mezcla durante la generación de CO ₂ de la prueba 1A	104
6.4.20	Diferencias de concentración en los decaimientos de las pruebas controladas	106
6.4.21	Diferencias de concentración en los decaimientos de las pruebas controladas (%)	107
7.3.1	Error relativo de linealización del modelo de Rudnick y Milton entorno al origen	124
7.4.1	Evolución temporal del riesgo de contagio entre el 09/08/21 y el 13/08/21	127
7.4.2	Evolución temporal del riesgo de contagio entre el 29/11/21 y el 03/12/21	128
7.4.3	Análisis de riesgo en función de la tasa de ventilación	130
7.4.4	Mitigación del riesgo de contagio por apertura periódica de ventanas	132
9.3.1	Modelo del edificio en SketchUp	141
9.3.2	Definición de las zonas térmicas en el modelo de SketchUp	142
9.4.1	Resultados del EnergyPlus sin acondicionamiento térmico (salones sobre el corredor del primer piso)	145
9.4.2	Resultados del EnergyPlus sin acondicionamiento térmico (salones sobre el corredor del segundo piso)	146
9.4.3	Resultados del EnergyPlus sin acondicionamiento térmico (salones del norte)	147
9.4.4	Potencia de flujo demandada por los salones sobre los corredores principales	148
9.4.5	Potencia de flujo demandada por los salones del norte	149
9.4.6	Potencia de calefacción demandada por los salones sobre los corredores principales	150
9.4.7	Potencia de flujo demandada por los salones sobre los corredores principales (media para la temporada de calentamiento)	150
9.4.8	Potencia de flujo demandada por los salones del norte (media para la temporada de calentamiento)	151
9.5.1	Esquema de flujos de calor sensible y latente	152
9.5.2	Diagrama de resistencias para los flujos de calor sensible	156

10.2.1	Diagrama de ductos para la instalación A	160
10.2.2	Diagrama de ductos para la instalación B	163
10.3.1	Renderizaciones del exterior del modelo de la escuela con el sistema de HVAC	166
A.7.1	Ajustes de la tasa de ventilación entre el 09/08/21 y el 13/08/21	XLV
A.7.2	Ajustes de la tasa de ventilación entre el 09/08/30 y el 03/09/21	XLVI
A.7.3	Ajustes de la tasa de ventilación entre el 04/10/21 y el 08/10/21	XLVII
A.7.4	Ajustes de la tasa de ventilación entre el 29/11/21 y el 03/12/21	XLVIII
A.8.1	Riesgo de contagio entre el 09/08/21 y el 13/08/21 (turno matutino)	XLIX
A.8.2	Riesgo de contagio entre el 30/08/21 y el 03/09/21 (turno matutino)	XLIX
A.8.3	Riesgo de contagio entre el 27/09/21 y el 01/10/21 (turno matutino)	XLIX
A.8.4	Riesgo de contagio entre el 25/10/21 y el 29/10/21 (turno matutino)	XLIX
A.8.5	Riesgo de contagio entre el 22/11/21 y el 26/11/21 (turno matutino)	L
A.8.6	Riesgo de contagio entre el 29/11/21 y el 03/12/21 (turno matutino)	L
A.8.7	Riesgo de contagio entre el 06/12/21 y el 10/12/21 (turno matutino)	L
A.8.8	Riesgo de contagio entre el 13/12/21 y el 17/12/21 (turno matutino)	L
A.8.9	Riesgo de contagio entre el 09/08/21 y el 13/08/21 (turno vespertino)	LI
A.8.10	Riesgo de contagio entre el 06/09/21 y el 10/09/21 (turno vespertino)	LI
A.8.11	Riesgo de contagio entre el 27/09/21 y el 01/10/21 (turno vespertino)	LI
A.8.12	Riesgo de contagio entre el 29/11/21 y el 03/12/21 (turno vespertino)	LI
A.8.13	Riesgo de contagio entre el 06/12/21 y el 10/12/21 (turno vespertino)	LII
B.4.1	Variabilidad de la tasa de generación de CO ₂ por persona	LXXVII
B.6.1	Tabla de ductos rectangulares equivalentes	LXXXIII
B.7.1	Coefficientes de pérdida de carga	LXXXVI

Índice de tablas

2.3.1	Valores Guía de Calidad de Aire y Objetivos Intermedios de la OMS para el material particulado	12
4.3.1	Características metrológicas de los monitores Aeroqual 500 (CO ₂ y PM) . . .	22
4.3.2	Características metrológicas de los monitores AirCO ₂ ntrol 5000	23
4.3.3	Características metrológicas de la estación Met One E-Sampler 9800	24
4.3.4	Características metrológicas de la estación meteorológica	25
4.3.5	Características metrológicas de los sensores Winsen MH-Z19B	27
4.4.1	Costo de las partes de los equipos Arduino	34
5.2.1	Cronología de eventos durante las medidas en el salón 11	61
6.4.1	Cobertura temporal de los ajustes del modelo de caja	86
6.4.2	Posiciones de los sensores durante las pruebas controladas	92
6.4.3	Cronología de eventos durante las pruebas controladas	93
6.4.4	Resultados de ajuste por sensor para cada prueba controlada	96
6.4.5	Resumen de resultados para cada prueba controlada	98
7.3.1	Distribución de la tasa de emisión de quanta para SARS-CoV-2	121
7.4.1	Estimación semanal del número básico de reproducción	126
7.4.2	Estimación mensual del número básico de reproducción	129
7.4.3	Estimación del riesgo en función de la tasa de ventilación	131
7.4.4	Análisis comparado de riesgo para regímenes de ventilación intermitentes . . .	133
9.5.1	Estructura de las paredes y resistencia térmica asociada	153
9.5.2	Resultados de temperatura y humedad para los salones del norte	157
9.5.3	Comparación de los resultados de T_{in}	157
10.2.1	Resultados del dimensionamiento de secciones de la instalación A	161
10.2.2	Pérdidas de carga localizadas de la instalación A	162
10.2.3	Longitudes estimadas para la instalación A	162
10.2.4	Resultados del dimensionamiento de secciones de la instalación A	164
10.2.5	Pérdidas de carga localizadas de la instalación B	164
10.2.6	Longitudes estimadas para la instalación B	165
A.1.1	Referencia general de siglas y abreviaturas	V
A.1.2	Referencia general de símbolos y variables	VIII
A.1.3	Referencia general de subíndices	X
A.3.1	Ocupación nominal para el turno vespertino	XXV

Capítulo 1

Introducción

Lasciate ogne speranza, o voi ch' intrate.

— Dante Alighieri, *Divina Commedia*, canto III

El presente trabajo se enmarca en la Unidad Curricular “Proyecto de Ingeniería Mecánica” del Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial (IIMPI) de la Facultad de Ingeniería (FING) de la Universidad de la República (UDELAR). Se trata del proyecto final de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial Mecánico.

En términos generales, el proyecto caracteriza experimentalmente y analiza la ventilación, la calidad de aire interior¹ (IAQ, *Indoor Air Quality*) y el acondicionamiento térmico del edificio donde funcionan las escuelas N° 32 (Simón Bolívar) y N° 83 (Martín Echegoyen) de Montevideo. Se presta especial atención al análisis de la suficiencia de la ventilación durante la temporada invernal en el contexto de la pandemia de COVID-19. Asimismo, se presenta un proyecto de instalación de un sistema de acondicionamiento térmico centralizado, con el fin de compatibilizar los requisitos de confort térmico y sanitarios durante la temporada invernal.

Se destaca que la temática de estudio es un área en constante desarrollo, que ha presentado una muy rápida evolución. Se ha intentado exponer información lo más actualizada posible, pero inevitablemente puede que ciertos aspectos no contemplen los últimos avances.

1.1 Contextualización y justificación

A continuación se exponen brevemente diversos aspectos que han motivado el presente proyecto.

1.1.1 La pandemia de COVID-19

El 31 de diciembre de 2019, la comisión municipal de salud de la ciudad de Wuhan (China) comunicó casos de “neumonía viral” de origen desconocido. Luego, el 9 de enero, la Organización Mundial de la Salud (OMS), indicó que el brote de casos se debía a un nuevo tipo de coronavirus, posteriormente llamado SARS-CoV-2². Cuatro días después, se reportó el primer caso fuera de China, en Tailandia. Posteriormente, el 11 de marzo, la OMS categorizó la enfermedad como una pandemia (WHO, 2021b). Dos días después, con el advenimiento de los primeros cuatro infectados en Uruguay, se promulgó el decreto N° 93/020 que declaró el estado de emergencia sanitaria (IMPO, 2020). Desde entonces, en Uruguay ha habido más de 417.000 infectados y 6.000 muertos por COVID-19 (SINAE, s.f.), y en total en el mundo ha habido más de 293

¹A los efectos del presente trabajo, se entenderá por calidad de aire la presencia de cualquier tipo de contaminante que pueda afectar la salud humana. Una calidad de aire pobre implica una alta concentración de contaminantes nocivos.

²*Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus*, Coronavirus de Síndrome Respiratorio Agudo Severo.

millones de infectados y 5,45 millones de muertos (Our World in Data, s.f.) a lo largo de diversas “olas” de infección³. Asimismo, nuevas variantes han surgido a lo largo de dos años, algunas particularmente agresivas y contagiosas⁴.

Entre las diversas complicaciones que ha provocado la pandemia, el cierre de escuelas y centros educativos como medida de contención del virus ha sido uno de los puntos de mayor discusión. Diversos autores han expresado su preocupación sobre el posible impacto negativo que la no presencialidad pudiera tener sobre niños y adolescentes (Kuhfeld *et al.*, 2020). Resulta importante entonces implementar medidas que minimicen el riesgo de contagio en las escuelas y permitan el retorno a la presencialidad.

La relevancia de los aspectos mencionados ha sido evidenciada por el gran número de investigaciones, publicaciones técnicas y guías de recomendaciones al respecto (EPA, 2009; E. Jones *et al.*, 2020; Minguillón *et al.*, 2020; Muelas *et al.*, 2020). Dichos trabajos se han enfocado en el análisis de las vías de contagio del virus y en cómo cortarlas. Inicialmente, la OMS reconoció el contagio por vía aérea “de cercanía”, a través de pequeñas gotículas emitidas por los infectados, cuyo alcance es limitado debido a que, dado su tamaño, se depositan rápidamente. Esto motivó la implementación de medidas de distanciamiento social (conservar distancias mínimas entre individuos, que superen el alcance de las gotículas de mayor tamaño) y de desinfección de superficies. Posteriormente, y bajo la sostenida y fuerte insistencia de la comunidad científica⁵, la OMS reconoció la posibilidad de contagio por vía de aerosoles, gotas más pequeñas que pueden permanecer en suspensión y ser transportadas grandes distancias (OMS, s.f.). Esto terminó de apuntalar la importancia de medidas complementarias con foco en la buena ventilación de los salones para evitar la alta concentración de aerosoles, las que ya venían siendo promovidas por diversas instituciones como la ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) (ASHRAE Epidemic Task Force, 2021).

Concomitantemente con el comienzo del presente proyecto, surgieron diversas vacunas contra el COVID-19 en el mundo. Uruguay comenzó su campaña de vacunación en los últimos días de febrero de 2021 y logró inmunizar a un alto porcentaje de su población. Al momento de escribir el presente trabajo, el 75,5% de la población completó el esquema básico de vacunación (dos dosis) y el 43,3% recibió una dosis de refuerzo (MSP, s.f.). No obstante, la población vacunada no abarca a los menores de 12 años, esto es, a los niños en edad escolar⁶. Asimismo, el surgimiento de nuevas variantes más agresivas de coronavirus ha disminuido la eficacia de las vacunas (El Observador, 2021a, 2021c). Esta situación destaca la relevancia de las medidas no farmacológicas de protección.

1.1.2 El contexto de las escuelas uruguayas: posibles problemáticas para la correcta ventilación

La ventilación en las escuelas uruguayas presenta ciertas particularidades y problemáticas propias. La mayor parte de los edificios donde operan escuelas de primaria no cuenta con sistemas de acondicionamiento térmico ni con sistemas de ventilación forzada (extractores, distribución centralizada de aire limpio, etc.). En cambio, suelen depender de sistemas de ventilación natural (renovación de aire a través de las aberturas inducida por el viento exterior y por diferencias de temperatura).

La ventilación natural puede significar un ahorro energético y ser suficiente en varios contextos. Empero, es un modo de ventilación de alta variabilidad, dependiente de las condiciones

³Estadísticas actualizadas al día 4 de enero de 2022.

⁴Al momento de escribir el presente documento ha surgido la variante Ómicron, que parece estar desplazando a la variante Delta.

⁵De particular relevancia es la carta abierta escrita por los investigadores Lidia Morawska y Donald K. Milton, que fue secundada por 239 científicos, donde se insiste en la importancia de reconocer la viabilidad de infección por medio de aerosoles (Morawska y Milton, 2020).

⁶Recientemente el plan de vacunación fue extendido para abarcar a niños de entre 5 y 12 años, pero recién comenzarán a ser vacunados durante la segunda quincena de enero de 2022 (El Observador, 2021b).

climáticas y de la operación de las aberturas. Asimismo, puede ser que las condiciones climáticas exteriores vuelvan inviable la operación de un sistema de ventilación natural por ser incompatible con el confort térmico de los ocupantes. Esto es de particular importancia durante la temporada invernal.

En lo que refiere a los aspectos normativos en el contexto uruguayo, la Administración Nacional de Educación Pública (ANEP) desarrolló un protocolo para el retorno a las actividades presenciales en el 2020, que fue reeditado para el año 2021 (ANEP, 2020, 2021). El mismo establece medidas preventivas de contagio como distanciamiento social (entre 1 m y 1,5 m), limpieza y desinfección de superficies, uso de tapabocas (obligatorio sólo para niños de más de 6 años a menos de 1 m de distancia) y promoción de la ventilación. En lo que respecta a este último punto, se establece en el artículo 21 del protocolo que

21 – (Ventilación) - Se controlará que la ventilación en los distintos espacios del centro educativo sea adecuada, de ser posible mantener las ventanas y puertas abiertas de los salones, siempre que estén supervisados por personal del centro y oficinas correspondientes. No se podrán utilizar los aires acondicionados. Se desaconseja el uso, para cualquier actividad que incluya congregación de personas, de los salones / espacios sin ventanas o con ventanas que no aseguren adecuada ventilación.

Durante los recreos y en otros momentos del día, es importante ventilar los ambientes, siendo recomendable si la condición climática y de seguridad lo permite, dejar la puerta abierta de entrada al edificio y a los salones.

De esta forma, se estimula mantener ventilación natural y se prohíbe el uso de aires acondicionados. Sin embargo, la reducción del riesgo de contagio podría ser insuficiente.

1.1.3 La calidad de aire como problemática general a nivel mundial

Más allá de la pandemia en curso (y de otras que pudieran ocurrir en el futuro), la calidad de aire interior y la correcta ventilación para su mantenimiento es un tema que ha tomado cada vez mayor relevancia. En particular Morawska *et al.* (2020) insisten en la necesidad de un “cambio de paradigma” en cómo la sociedad percibe la calidad de aire interior, señalando que dicho cambio trasciende a cómo se operan los sistemas de ventilación y que debe alcanzar aspectos educativos (la calidad de aire debe enseñarse a niños de la misma forma que se les enseña la importancia de, por ejemplo, lavarse las manos) y de percepción económica (no debe verse como un gasto o un lujo, sino como algo económicamente ventajoso por todos los beneficios sanitarios que genera).

Asimismo, el cambio de paradigma pregonado por Morawska *et al.* (2020) implica que la calidad de aire sea considerada en los procesos de diseño, operación y mejora de los sistemas edilicios y, en particular, de sus sistemas de ventilación. Los autores apuntan a que esto sea recogido por la normativa existente (Kurnitski *et al.*, 2021).

En virtud de lo anterior, se considera que el estudio y la promoción de la calidad de aire interior en escuelas es de particular importancia.

1.1.4 Oportunidad coyuntural para el proyecto

A principios de 2021, el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la FING presentó al llamado de proyectos de extensión 2021 una propuesta para trabajar sobre la ventilación en la escuela N° 83. Dicho proyecto fue aprobado, lo que posibilitó un vínculo formal con la institución mencionada, la adquisición de instrumental y la disponibilidad de diversos recursos institucionales.

Asimismo, el IMFIA ha presentado otras propuestas de investigación en el área de calidad de aire interior y ventilación. Existe pues un interés institucional en consolidar una línea de investigación sobre la temática en cuestión, motivado por los aspectos coyunturales de la pandemia, pero que trasciende a estos.

Dado el contexto descrito, fue particularmente pertinente el desarrollo del presente proyecto de grado.

1.2 Objetivos

En virtud de lo expuesto en la sección anterior, se enumeran a continuación los objetivos generales del trabajo.

1. Desarrollar una campaña de medidas que permita caracterizar cualitativa y cuantitativamente la ventilación y la calidad de aire del edificio donde operan las escuelas N° 32 y N° 83 de Montevideo.
2. Analizar la aptitud del esquema de ventilación existente en dicho edificio desde los puntos de vista sanitario y del confort térmico. En particular:
 - (a) Estimar la probabilidad de contagio aéreo de COVID-19.
 - (b) Determinar si el esquema de ventilación existente permite satisfacer simultáneamente requisitos sanitarios y de confort térmico.
3. Proyectar un sistema de ventilación y acondicionamiento térmico centralizado, que permita mejorar aspectos sanitarios y de confort térmico.

Cada uno de los puntos anteriores comprende diversos objetivos específicos, que serán detallados en las correspondientes partes del presente documento.

1.3 Estructura del trabajo

El presente documento se estructura en dos partes. En primer lugar, se desarrolla el trabajo de campo en el edificio de las escuelas N° 32 y N° 82 de Montevideo. El capítulo 2 introduce el trabajo de campo y presenta algunos antecedentes en escuelas. En el capítulo 3 se describe el edificio y se presentan las actividades de relevamiento realizadas y el salón elegido como centro de la campaña de medidas. El capítulo 4 presenta el instrumental disponible, sus principales características metrológicas y su instalación en campo. Los siguientes tres capítulos se encuentran dedicados al análisis y procesamiento de los datos experimentales relevados. El capítulo 5 presenta un breve análisis descriptivo de los datos registrados, el capítulo 6 estima la tasa de ventilación del salón elegido y el capítulo 7 analiza el riesgo de contagio de COVID-19 por vía aérea.

La segunda parte del documento, introducida por el capítulo 8, presenta un posible sistema acondicionamiento térmico para la escuela. El capítulo 9 presenta un modelo térmico de la escuela. Por otra parte, el capítulo 10 proyecta los principales componentes de un sistema de ventilación forzada y de acondicionamiento térmico para la escuela. Además, se evalúan los costos de operación del sistema proyectado.

Por último, el capítulo 11 resume los principales resultados del trabajo y destaca algunos temas que podría ser interesante abordar o profundizar a futuro.

1.4 Notación

Con el fin de simplificar el texto y de facilitar su lectura, se ha incluido una referencia general para la notación y para las siglas utilizadas, disponible en el apéndice A.1

Parte I

Trabajo de campo y diagnóstico de la calidad de aire

Capítulo 2

Introducción al trabajo de campo

Of course we don't know what we are doing, that's why it's called research.

— Albert Einstein

Entre el 20 de julio y el 17 de diciembre de 2021 se desarrolló una campaña continua de medidas en el edificio que alberga las escuelas N° 32 (Simón Bolívar, turno matutino) y N° 83 (Martín Echegoyen, turno vespertino) de Montevideo, con el fin de caracterizar la calidad de aire interior y la ventilación.

2.1 Objetivos específicos

Los objetivos específicos asociados a la campaña de medidas fueron los siguientes.

- Relevar y documentar el edificio en estudio, tanto su geometría interna (distribución de habitaciones, posición y tipo de aberturas, etc.) como externa (orientación del edificio, identificación de construcciones aledañas, etc.).
- Identificar las variables físicas de interés, en particular aquellas relacionadas con la calidad de aire, medirlas y generar una base de datos sistematizada.
- Estimar la tasa de ventilación.
- Estimar el riesgo de contagio aéreo de COVID-19.

2.2 Antecedentes

2.2.1 Justificación

La motivación para estudiar y mejorar la calidad de aire es, principalmente, sanitaria. Dado el prolongado tiempo que las personas suelen pasar en ambientes interiores, una calidad de aire pobre puede tener efectos nocivos significativos sobre la salud. Diversos autores se han preocupado por investigar la calidad de aire interior y la ventilación como factor determinante de ésta (por ejemplo, Fischer *et al.*, 2015; Liu, Lv *et al.*, 2020; Persily y Polidoro, 2020; Rosbach *et al.*, 2016; H. Zhang *et al.*, 2021).

El diagnóstico de la calidad de aire interior requiere un enfoque experimental. Algunos investigadores han complementado dicho enfoque con herramientas de carácter predictivo, como simulaciones numéricas (Liu, Peng *et al.*, 2020; Pelliccioni *et al.*, 2020). Sin embargo, si bien estas últimas han resultado ser de gran utilidad, su calibración y validación depende de la obtención de datos experimentales. Esto pone de manifiesto la relevancia del trabajo experimental propuesto.

Lograr una calidad de aire aceptable en un cierto ambiente interior suele estar asociado a lograr una tasa de ventilación mínima. Se entiende por ventilación la sustitución de parte del aire interior por otro de mayor calidad, en general exterior¹. Esto idealmente remueve y diluye los contaminantes que pudiera haber en el aire interior, lo que disminuye la exposición de los ocupantes a sustancias nocivas. A su vez, la ventilación afecta directamente aspectos térmicos. El aire exterior podría ser más adecuado desde el punto de vista sanitario que el removido, pero a su vez podría afectar negativamente el confort térmico de los ocupantes. Este efecto crece en importancia en la medida en que aumentan las tasas de ventilación, por lo que en sistemas sin acondicionamiento térmico del aire de reposición (por ejemplo con ventilación natural) es necesario equilibrar los objetivos sanitarios y los de confort. En consecuencia, el presente proyecto pretende evaluar si la ventilación existente en el edificio en estudio es suficiente para evitar contagios aéreos de COVID-19 y si el nivel de ventilación necesario para obtener un riesgo de contagio aceptable es compatible en la temporada invernal con el confort térmico de los ocupantes. El trabajo de campo permite evaluar la situación real para proyectar posibles medidas de mejora de la calidad del aire.

2.2.2 Campañas de medida en escuelas

Desde la primera mitad del siglo XX los investigadores fueron conscientes de la posibilidad de transmisión viral aérea². Asimismo, el interés por la calidad de aire interior en escuelas se remonta, al menos, a la década de 1970, motivado principalmente por aspectos sanitarios. Por ejemplo, el trabajo de Riley *et al.* (1978)³ analizó y modeló un brote de sarampión en una escuela de Nueva York en 1974 en base a observaciones de campo.

Actualmente existen diversas regulaciones para ciertos contaminantes⁴ aéreos, tanto interiores como exteriores, que estipulan concentraciones máximas admisibles para diversos períodos de exposición y constituyen una referencia para evaluar cuantitativamente la calidad del aire (OMS, 2006). No obstante lo anterior, la medida de varios de estos contaminantes en campo puede ser problemática y los instrumentos de medida costosos, lo que dificulta el desarrollo de campañas de gran porte. Dos excepciones notables son el material particulado (PM, *Particulate Matter*) y el dióxido de carbono (CO₂). Ha habido un importante avance instrumental que ha permitido el desarrollo de sensores de bajo costo de PM y de CO₂ (H. Zhang y Srinivasan, 2020; H. Zhang *et al.*, 2021). En consecuencia, estos han sido utilizados recientemente como trazadores para estimar la tasa de ventilación de uno o varios ambientes. Asimismo, varios investigadores han propuesto el uso de CO₂ para evaluar cuantitativamente el riesgo de contagio de enfermedades de transmisión aérea (Rudnick y Milton, 2003).

En el contexto del presente trabajo se utilizaron medidas de CO₂ para estimar la tasa de ventilación y el riesgo de contagio aéreo de COVID-19 en un salón de clase utilizado por las escuelas N° 32 y N° 83 de Montevideo. Asimismo, se midió el material particulado como indicador de la calidad de aire.

¹El aire exterior a un edificio podría ser de peor calidad que el aire interior en entornos altamente contaminados. Sin embargo, el presente trabajo se centra en el riesgo sanitario por transmisión aérea de enfermedades infecciosas, por lo que es razonable suponer que el aire exterior es de mayor calidad que el interior.

²Considérense, por ejemplo, los trabajos de Wells (1934), Wells y Brown (1936) y Wells y Stone (1934).

³La importancia de este trabajo para el estudio cuantitativo de enfermedades de transmisión aérea en espacios cerrados es discutida en profundidad en el capítulo 7.

⁴Se consideran algunos “contaminantes criterio”, que son aquellos que se encuentran comúnmente en la tropósfera y son perjudiciales para la salud o el bienestar de los seres humanos. Los principales contaminantes que han sido tomados como referencia en estudios sobre calidad de aire a nivel internacional son el material particulado, los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (NO₂) y el monóxido de carbono (CO) (WHO, 2006).

Dióxido de carbono

El CO₂ es un gas incoloro e inodoro que normalmente se encuentra presente en la atmósfera en concentraciones⁵ en el entorno de 400 ppm (NOAA, 2022), con ciertas variaciones regionales. Es un gas de efecto invernadero, cuya concentración ha ido en aumento en las últimas décadas. Es generado, entre otros, por procesos de combustión. Además, el CO₂ es producido por el metabolismo celular y es espirado al respirar.

El dióxido de carbono no es considerado un contaminante en sí mismo desde el punto de vista sanitario, en la medida en que la concentración atmosférica típica no afecta a los seres humanos. En consecuencia, en general no es monitoreado ni incluido en los índices de calidad de aire. Sin embargo, su medición en ambientes interiores se ha popularizado por diversos motivos. En primer lugar, si la ventilación es insuficiente y hay una alta tasa de ocupación, es esperable encontrar concentraciones elevadas de CO₂. Si bien las mismas pueden no alcanzar umbrales de toxicidad, puede ser suficiente como para causar síntomas indeseables en los ocupantes. Asimismo, dado que cuanto mayor sea la ventilación de un ambiente con aire exterior menor será la concentración media de CO₂, se han propuesto diversos límites de concentración para identificar niveles satisfactorios de ventilación.

En segundo lugar, el registro de CO₂ en un ambiente y su comparación con la concentración del aire de reposición permite inferir, bajo ciertas hipótesis, la tasa de ventilación de un ambiente. Este es un parámetro de gran interés puesto que puede ser utilizado para controlar sistemas de ventilación y acondicionamiento térmico de demanda variable. Asimismo, la tasa de ventilación es el parámetro regulado por los estándares de ventilación y participa de modelos de contagio por vía aérea. Como se presentará en el capítulo 7, algunos modelos incluso permiten inferir el riesgo de contagio directamente a partir de la concentración de CO₂.

La gran cantidad de potenciales aplicaciones y el surgimiento de sensores de bajo costo con características metrológicas aceptables explican el gran interés en el registro de CO₂, particularmente en escuelas y otros edificios de alta ocupación. En consecuencia, se considera relevante su medida en la escuela estudiada en el presente proyecto. Los resultados son valiosos en sí mismos y podrán permitir a futuro la aplicación de otros modelos o análisis con herramientas más sofisticadas. Asimismo, el desarrollo de medidas de CO₂ constituye una experiencia piloto que podrá aportar a futuros trabajos de investigación proyectados por el IMFIA.

Material particulado

El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentra en el aire. Este término abarca partículas de muy diversos tamaños, por lo que su estudio cuantitativo suele referirse a ciertos valores de corte. En general se designa como PMX al subconjunto de partículas que tiene un diámetro medio menor o igual a X μm . Típicamente se estudian los valores de PM10 (partículas inhalables) y PM2.5 (partículas inhalables pequeñas). Dichos valores se expresan generalmente como concentraciones masa-volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ o mg/m^3) (EPA, 2021c).

Las fuentes de emisión de material particulado son diversas, por lo que su composición química es muy variada. Es esperable que la concentración de material particulado sea más elevada en el entorno urbano a causa de fuentes como sitios de construcción, estufas a leña, chimeneas de emisión de gases de combustión y gases de escape de automóviles (EPA, 2021c).

Por otro lado, la exposición a niveles elevados de material particulado ha sido asociada con efectos nocivos sobre la salud humana, tanto pulmonares como cardíacos (agravamiento del asma, arritmias, infartos, entre otros) (EPA, 2021a; WHO, 2013).

⁵A menos que se indique lo contrario, las concentraciones de CO₂ siempre se expresarán en el presente trabajo como relaciones volumen-volumen, en ppm.

2.3 Normativa de referencia

Para la campaña de medidas se tuvo en cuenta la normativa expuesta en las siguientes secciones.

2.3.1 Concentraciones límite de contaminantes aéreos

Dióxido de carbono

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (OSHA, *Occupational Safety and Health Administration*) establece que la concentración límite de CO₂ para exposición diaria durante 8 horas es de 5000 ppm (OSHA, s.f.). Concentraciones superiores producen efectos fisiológicos adversos, desde aumento de la frecuencia cardíaca y dolores de cabeza (entre 3% y 8%) a náuseas, vómitos, pérdida de la consciencia (más de 10%) y muerte (más de 20%) (Küçüküseyin, 2021).

Persily (2015) destaca que los niveles de peligrosidad por respuesta fisiológica al CO₂ rara vez son alcanzados en ambientes no industriales. En este sentido, cuestiona el uso de valores de concentración de CO₂ como un indicador de calidad de aire *per se*. Esto último es una práctica que se ha popularizado, particularmente en el contexto de la pandemia de COVID-19, bajo el fundamento de que la acumulación de CO₂ en un ambiente se debe a una baja tasa de ventilación, lo que evidenciaría un alto riesgo de contagio. Por ejemplo, diversos autores han propuesto como objetivo mantener concentraciones de entre 600 ppm y 800 ppm. El análisis de la pertinencia de estas recomendaciones trasciende a los objetivos del presente trabajo, especialmente dado que las medidas de CO₂ registradas fueron utilizadas como insumo de otros modelos y no como un indicador en sí mismo.

No existe normativa muy difundida para el uso de CO₂ como indicador de calidad de aire interior. Sin embargo, se destacan las normas ASTM D6245 - 18 (2018) y ASTM E741 - 11 (2011), que regulan el uso de CO₂ como trazador pasivo para la estimación de la tasa de ventilación. Además, la norma ASTM D6245 - 18 (2018) vincula la concentración de CO₂ con la emisión de bioefluentes y el porcentaje de insatisfacción de los ocupantes de un ambiente.

Material particulado

Existen diversas normativas que estipulan límites medios anuales y diarios de exposición al material particulado. Se detallan a continuación algunas de ellas.

- **Uruguay:** el 4 de mayo de 2021 se aprobó en Uruguay el decreto 135/021, que constituye la primera normativa legal del país en materia de calidad de aire. La misma establece los siguientes objetivos⁶ para material particulado en el aire exterior⁷ (Ministerio de Ambiente, 2021).
 - **PM2.5:** 25 µg/m³ (objetivo anual) y 35 µg/m³ (objetivo diario).
 - **PM10:** 30 µg/m³ (objetivo anual) y 75 µg/m³ (objetivo diario).

Asimismo, a partir del año 2024 estos objetivos serán reducidos a los siguientes valores.

- **PM2.5:** 15 µg/m³ (objetivo anual) y 25 µg/m³ (objetivo diario).
- **PM10:** 20 µg/m³ (objetivo anual) y 50 µg/m³ (objetivo diario).

⁶El decreto 135/021 estipula tolerancias mayores que pueden ser superadas una cierta cantidad de días al año.

⁷El decreto 135/021 no aplica al aire en ambientes interiores, pero se considerarán sus objetivos como referencia al no existir otra normativa nacional para dichos ambientes.

- **Europa:** la Comunidad Europea rige su calidad de aire por la Directiva 2008/50/EC (EUR-Lex, 2008). La misma estipula los siguientes límites generales.
 - **PM2.5:** 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite anual) y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite diario).
 - **PM10:** 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite anual) y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite diario).

Asimismo, la Unión Europea ha establecido reglamentación específica para la exposición a PM2.5 en el entorno urbano. Se establece que la media móvil por trienio en el entorno urbano no debe superar 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

- **Estados Unidos:** la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, *Environmental Protection Agency*) estipula los siguientes límites⁸ (EPA, 2021b).
 - **PM2.5:** 12,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite anual) y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite diario).
 - **PM10:** 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (límite diario)⁹.

Las regulaciones anteriores pueden ser contrastadas con los valores guía¹⁰ estipulados por la OMS para la protección de la salud humana (OMS, 2006). Dichos valores son acompañados de objetivos intermedios de mejora paulatina. La tabla 2.3.1 resume estos valores.

⁸Se detallan los límites primarios, que refieren a la salud pública, incluyendo poblaciones de riesgo.

⁹No se estipula un límite anual.

¹⁰Estos valores son fijados como metas razonables, pero no garantizan una protección absoluta en la medida en que la evidencia disponible señala que no parece haber un umbral mínimo de concentración de material particulado por debajo del cual desaparezcan todos los efectos adversos sobre la salud humana (OMS, 2006).

GUÍAS DE CALIDAD DE AIRE Y OBJETIVOS INTERMEDIOS DE LA OMS			
Concentraciones medias anuales			
	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Fundamento
OI-1	35	70	Niveles asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo 15% mayor que con las GCA.
OI-2	25	50	Entre otros beneficios de salud, se reduce el riesgo de mortalidad prematura entre un 2% y un 11% respecto al OI-1.
OI-3	15	30	Entre otros beneficios de salud, se reduce el riesgo de mortalidad entre un 2% y un 11% respecto al OI-2.
GCA	10	20	Niveles más bajos para los cuales la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón aumenta por exposición prolongada.
Concentraciones medias diarias			
	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Fundamento
OI-1	75	150	Incremento de alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA.
OI-2	50	100	Incremento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA.
OI-3	37,5	75	Incremento de alrededor del 1,2% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA.
GCA	25	50	Basado en la relación entre los niveles de material particulado de 24 horas y anuales.

Tabla 2.3.1 – Valores Guía de Calidad de Aire (GCA) y Objetivos Intermedios (OI) de la OMS para el material particulado. Adaptado de OMS (2006).

2.3.2 Guías de ventilación en escuelas

La campaña de medidas fue llevada a cabo teniendo presente lo estipulado por diversas guías de ventilación en escuelas, que han sido desarrolladas en el contexto de la pandemia de COVID-19. Las mismas atienden varios aspectos sanitarios, en particular las buenas prácticas de ventilación. La gran mayoría sugiere el uso de CO_2 para cuantificar la tasa de ventilación o como indicador general de la misma, de forma de poder tomar acciones correctivas en tiempo real. En particular, algunas de las guías mencionan aspectos metrológicos relevantes (posicionamiento de sensores, frecuencia de muestreo deseable, entre otros).

A modo de resumen y de forma no exhaustiva, se destacan los trabajos de E. Jones *et al.* (2020), Minguillón *et al.* (2020) y Muelas *et al.* (2020).

2.4 Base de datos y programas

Para acceder a la base de datos experimentales generada, así como a los programas de procesamiento y análisis de datos, contactar a los autores y tutores del presente proyecto.

Capítulo 3

Relevamiento

You can't use an old map to explore a new world.

— Albert Einstein

I wisely started with a map (...).

— J. R. R. Tolkien

3.1 Contextualización del edificio

El edificio en estudio se ubica en la ciudad de Montevideo, en el padrón 28804, con ingreso y fachada sobre la calle Simón Bolívar (número de puerta 1361), entre Av. General Rivera y Silvestre Blanco, en el barrio Pocitos.

En el anexo B.1 puede encontrarse una copia del plano catastral de la manzana del emplazamiento.

3.2 Relevamiento del edificio

3.2.1 Descripción general

Descripción exterior

El edificio en estudio es una construcción de dos pisos, de planta rectangular, con un pequeño patio delantero (delimitado por un acceso enrejado) y con un amplio patio trasero, más allá del cual se encuentran otros edificios auxiliares de la escuela (gimnasio y salón de educación inicial). Los límites laterales del edificio principal son una pared medianera (hacia la Av. General Rivera) y un corredor exterior techado (limitado por el edificio principal y la pared de la edificación lindera) hacia la calle Silvestre Blanco. La figura 3.2.1 muestra fotografías del exterior del edificio.



(a) Fachada este (desde la calle Simón Bolívar)



(b) Fachada oeste (desde el patio)

Figura 3.2.1 – Fotografías del exterior de la escuela.

Por otra parte, la figura 3.2.2 muestra una imagen satelital de la manzana del emplazamiento.

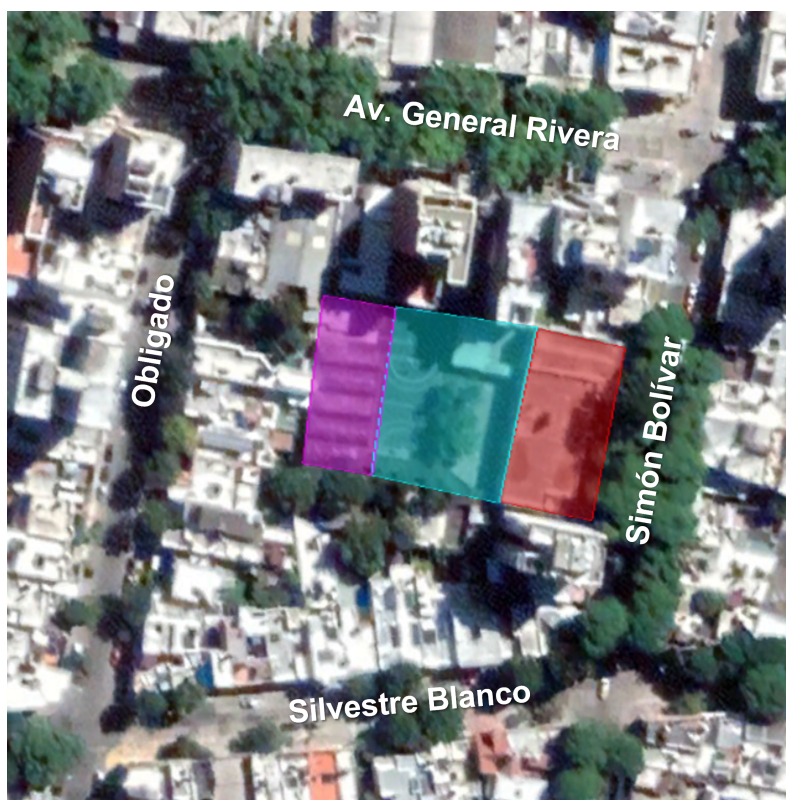


Figura 3.2.2 – Imagen satelital de la manzana de la escuela, adaptada de Google Earth (Google, s.f.). Se distinguen el edificio principal (rojo), el patio (celeste) y el gimnasio (violeta). El norte se encuentra hacia la parte superior de la imagen.

Al sur del edificio principal existe un edificio de apartamentos relativamente alto. A su vez, al norte existe un grupo de apartamentos de similar altura, aunque con un retiro un poco mayor. Las demás construcciones aledañas son bajas y presentan un mayor retiro (separación dada por la calle Simón Bolívar hacia el este y por el patio de la escuela hacia el oeste). Es así que el edificio principal se encuentra “encajonado” entre edificios al norte y al sur. Sobre la fachada este (hacia Simón Bolívar) hay árboles con una altura superior a la de la escuela y sobre la fachada oeste (hacia el patio) hay árboles de altura similar a la de la escuela. Las fotografías de la figura 3.2.3 muestran los alrededores desde la azotea del edificio e ilustran la descripción anterior.



(a) Vista hacia el sur



(b) Vista hacia el norte



(c) Vista hacia el este



(d) Vista hacia el oeste

Figura 3.2.3 – Fotografías tomadas desde la azotea de la escuela.

Descripción interior

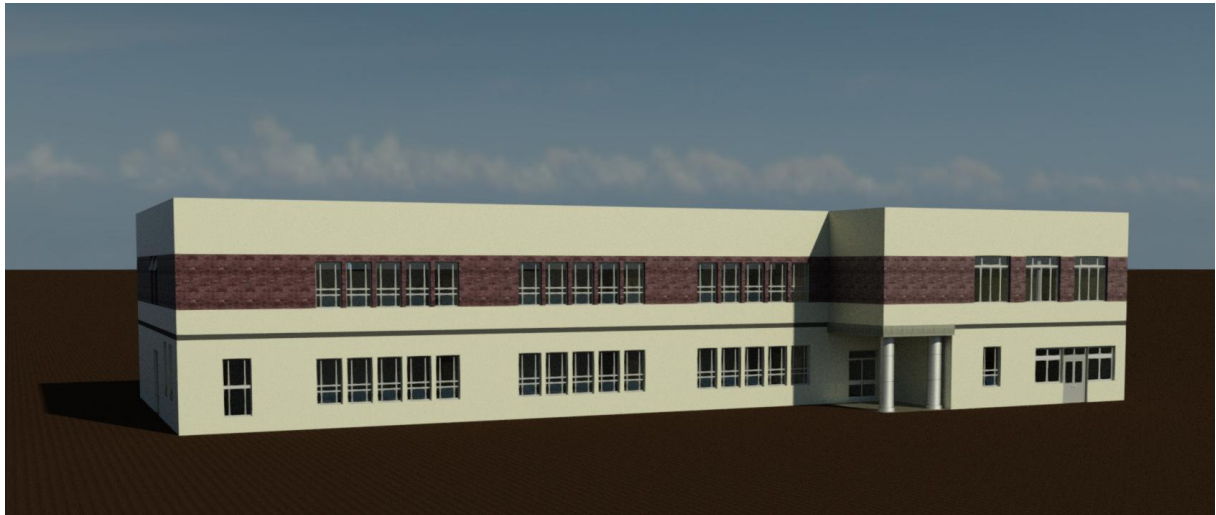
El edificio cuenta con dos plantas de proyección rectangular, estructuradas en torno a sendos corredores de distribución que discurren de norte a sur, paralelos a la calle Simón Bolívar. En cada planta, sobre el correspondiente corredor, existen salones de características similares. Sobre la cabecera norte de dichos corredores se encuentran la escalera que comunica ambas plantas, salones y oficinas (en el primer piso). Asimismo, desde el segundo piso se puede acceder a una azotea transitable.

3.2.2 Elaboración de modelo CAD y documentación edilicia

Al inicio del presente proyecto la escuela no contaba con planos actualizados. Si bien se obtuvieron proyecciones de planta dibujadas durante el primer año de la pandemia por algunos padres, dichos dibujos no contaban con información sobre la mayor parte de las aberturas (particularmente ventanas) ni mostraban ciertas divisiones interiores. Por lo tanto, se decidió relevar en detalle el interior de la escuela. Se rectificaron todas las medidas disponibles, se relevaron las faltantes y se registraron en detalle todos los tipos de aberturas.

Con la información obtenida se generó un modelo CAD (*Computer-Aided Design*) tridimensional con el software Autodesk Revit. En particular se dibujaron en detalle todas las aberturas (puertas y ventanas). Se destaca que este modelo permite obtener cualquier corte o proyección de interés del edificio, por lo que puede ser un insumo valioso en sí mismo para la escuela y para futuros proyectos. Asimismo, el software utilizado permite integrar información de servicios de acondicionamiento térmico, sanitarios y eléctricos.

En el apéndice A.2 se incluyen los planos generados a partir del modelo creado. Asimismo, las figuras 3.2.4 y 3.2.5 muestran algunas imágenes renderizadas del exterior y del interior de la escuela.



(a) Fachada frontal, sobre la calle Simón Bolívar

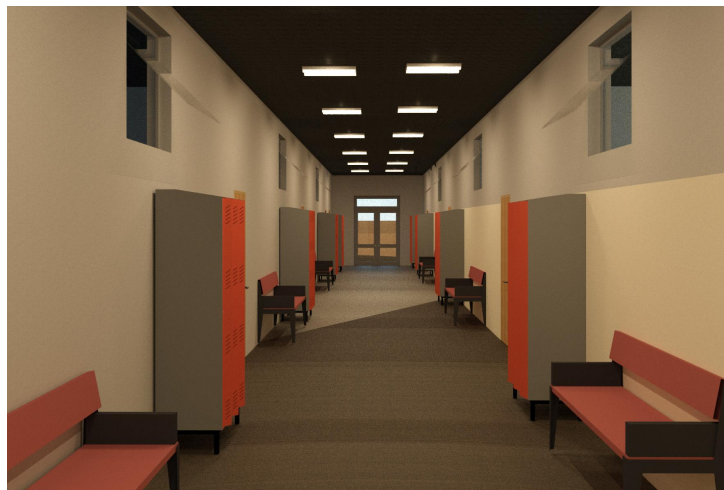


(b) Fachada trasera, sobre el patio

Figura 3.2.4 – Renderizaciones del exterior del modelo de la escuela, realizadas con Autodesk Revit. Se muestran vistas desde el frente y desde el patio.



(a) Entrada



(b) Pasillo principal del primer piso



(c) Salón 2

Figura 3.2.5 – Renderizaciones del interior del modelo de la escuela, realizadas con Autodesk Revit. Se muestran vistas desde la entrada, la cabecera norte del pasillo principal y la puerta del salón 2. El mobiliario incluido es ilustrativo.

3.3 Operativa diaria y ocupación nominal

El edificio opera en dos turnos. Los alumnos del turno matutino concurren a la escuela entre las 8:00 y las 12:00, mientras que los del turno vespertino lo hacen entre las 13:00 y las 17:00. Los estudiantes de cada turno tienen un recreo de 30 minutos. A causa de la emergencia sanitaria, los recreos han sido escalonados para minimizar la ocupación del patio, por lo que su horario depende del grupo.

Durante el desarrollo del proyecto se contó con la ocupación nominal de cada salón para el turno vespertino, informada por la dirección de la escuela N° 83 y disponible en el apéndice A.3. Se presume una ocupación similar para el turno matutino.

3.4 Selección de un salón para medición continua

Considerando la cantidad de sensores y sus restricciones de disponibilidad, que serán expuestas en la sección 4.5 del capítulo 4, se decidió acotar la campaña de medidas del aire interior a un único salón de clases. Se descartó conducir la campaña de medidas en salones de educación inicial, oficinas (dirección y secretaría) y salones de uso especial, temporalmente irregular o con una población cambiante (salón de música, laboratorio y salón de robótica).

A la luz del relevamiento realizado, es evidente que ambas plantas de la escuela se estructuran en dos zonas bien diferenciadas, a saber:

- **Zona 1:** integrada por los ambientes ubicados sobre el corredor de distribución principal.
- **Zona 2:** integrada por los ambientes de la cabecera norte del corredor principal.

En primer lugar, se eligió en cuál de estas dos áreas enfocar el estudio. Por un lado, los salones de la zona 1 parecen ser más representativos de la totalidad de la escuela. Todos ellos tienen la misma superficie ($6\text{ m} \times 8\text{ m}$), aberturas similares¹ y, al menos para el turno vespertino, una cantidad similar de alumnos (entre 25 y 30 niños). Por el contrario, los salones de la cabecera norte presentan características más heterogéneas. Sin embargo, estos salones posiblemente presenten un peor nivel de ventilación, dado que cuentan con ventanas más pequeñas y caminos de ventilación cruzada más tortuosos. En este sentido, puede que representen una mayor preocupación en el contexto de la pandemia.

En aras de maximizar la representatividad del estudio realizado, se eligió trabajar dentro de la zona 1. En particular, se eligió medir en el salón 2, que se encuentra en la planta baja, sobre el patio y en una posición central, como se puede apreciar en el plano E1 del apéndice A.2. Este salón presenta la población nominal máxima (30 personas) y su ubicación simplificó la instalación y la operación de algunos sensores.

3.4.1 Características del salón elegido

El salón 2 se ubica en la planta baja, sobre la fachada oeste. Tiene 6 m de ancho, 8 m de largo y 3,5 m de altura. Asimismo, para el turno vespertino alberga una población nominal de 30 niños de primer año de escuela.

El salón cuenta con cuatro ventanas batientes de dos hojas con apertura hacia el exterior, hacia el patio. Cada hoja tiene un área de 0,27 m de ancho y 1,4 m de altura. Asimismo, el salón cuenta con una banderola pivotante de eje horizontal, de 1,10 m de ancho y 0,92 m de altura, que comunica con el pasillo principal del primer piso. Por último, el salón tiene una puerta batiente de una hoja de 0,73 m de ancho y 2,06 m de altura.

En cuanto a su mobiliario, existen 15 escritorios para alumnos dispuestos en 5 filas (dirección este-oeste) y 3 columnas (dirección norte-sur). Cada escritorio es ocupado por dos alumnos.

¹Iguales para todos los salones que se encuentran sobre una misma fachada.

Además, hay un escritorio en la esquina noroeste para la maestra y un armario y una estantería sobre la esquina sureste.

La figura 3.4.1 muestra una fotografía del interior del salón 2.



Figura 3.4.1 – Interior del salón 2 hacia el fondo (sur). Se puede apreciar el armario, la estantería y parte de las ventanas hacia el patio.

Capítulo 4

Instrumental

It doesn't matter how beautiful your theory is ... If it doesn't agree with experiment, it's wrong.

— Richard Feynman

4.1 Introducción

El presente capítulo detalla aspectos instrumentales de la campaña de medidas. Se presentan los instrumentos utilizados, sus principales características y detalles prácticos sobre su colocación.

4.2 Variables de interés

En consonancia con lo expuesto en el capítulo 2, se seleccionaron las siguientes magnitudes como variables de interés para el presente trabajo.

- **Concentración de CO₂:** el CO₂ es un gas que puede ser utilizado como trazador para estimar la tasa de ventilación (capítulo 6) y el riesgo de contagio de SARS-CoV-2 por vía aérea (capítulo 7).
- **Concentración de material particulado (PM):** interesa como un indicador de calidad de aire.
- **Variables meteorológicas exteriores:** velocidad y dirección de viento, temperatura y radiación solar son variables de interés para el modelado térmico del edificio.
- **Velocidad de viento en las aberturas:** obtener medidas de velocidad de viento en las aberturas podría permitir estimar la tasa de ventilación.

4.3 Instrumentos y sensores disponibles

A continuación se presentan los instrumentos y sensores disponibles en el marco de la campaña de medidas.

4.3.1 Monitores Aeroqual 500

Los monitores Aeroqual 500 son analizadores de gas portátiles (195 mm × 122 mm × 54 mm, menos de 460 g (Taylor, s.f.)). Consisten en un equipo central al cual se le conectan diferentes cabezales (uno a la vez) en función del gas cuya concentración se desea medir.

En el marco del presente proyecto se contó con tres equipos Aeroqual 500, dos equipados con cabezales para medir concentración de CO₂ y uno equipado con un cabezal para medir la concentración de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀ de forma simultánea). Uno de los monitores y los dos cabezales de CO₂ son nuevos, habiendo sido adquiridos para el proyecto de extensión asociado al presente trabajo. El segundo monitor y el cabezal de material particulado contaban, al inicio del proyecto, con aproximadamente seis meses de uso. Los cabezales de CO₂ son sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR, *Non Dispersive Infrared Detector*) y el cabezal de material particulado es un contador láser de partículas (nefelómetro).

De aquí en adelante, se identificarán estos monitores de acuerdo a la siguiente referencia:

- **AQ1:** monitor de CO₂ nuevo (tanto cabezal como equipo central).
- **AQ2:** monitor de CO₂ con cabezal nuevo y equipo central con uso previo.
- **AQ3:** monitor de PM (tanto cabezal como equipo central con uso previo).

La tabla 4.3.1 resume las principales características metrológicas de los cabezales empleados, declaradas por el fabricante (Aeroqual, s.f.-b).

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE LOS CABEZALES AEROQUAL 500		
	Cabezales de CO ₂	Cabezal de PM
Rango de medida	0 ppm - 5000 ppm	1 µg/m ³ - 1000 µg/m ³
Límite de detección	20 ppm	1 µg/m ³
Exactitud	±20 ppm + 5% rdg	±5 µg/m ³ + 15% rdg
Apreciación	1 ppm	1 µg/m ³
Tiempo de respuesta	120 s	5 s

Tabla 4.3.1 – Características metrológicas de los monitores Aeroqual 500 con cabezales de CO₂ y PM. La exactitud declarada se corresponde con la lograda a partir de la calibración de fábrica y los porcentajes indicados están referidos a la lectura del instrumento (rdg, *reading*). El tiempo de respuesta declarado es el T₉₀ (tiempo en el que la lectura alcanza un 90% del valor final ante un escalón en la concentración).

Además, se destaca que los monitores Aeroqual 500 permiten una frecuencia de muestreo de una medida por minuto (registros instantáneos, sin promediación).

Por otra parte, en el anexo B.2 se encuentran disponibles los certificados de calibración de fábrica de los cabezales utilizados.

La figura 4.3.1 muestra los monitores en cuestión.



(a) Equipo con cabezal de CO₂



(b) Equipo con cabezal de PM

Figura 4.3.1 – Fotografías de los monitores Aeroqual 500. Tomadas de Aeroqual (s.f.-c) y Aeroqual (s.f.-a).

4.3.2 Monitores AirCO₂ntrol 5000

Se dispuso de dos monitores AirCO₂ntrol 5000. Estos monitores portátiles (120 mm × 66 mm × 33 mm, 103 g (Dostmann Electronic, s.f.)) miden concentración de CO₂, temperatura y humedad relativa, con una frecuencia de muestreo de una medida cada cinco segundos. Ambos monitores son nuevos y serán identificados como los monitores AC1 y AC2 de aquí en adelante.

La tabla 4.3.2 resume las características metrológicas declaradas por el fabricante Dostmann Electronic (s.f.).

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE LOS MONITORES AIRCO ₂ NTROL 5000			
	CO ₂	Temperatura	Humedad
Rango de medida	0 ppm - 5000 ppm	0 °C - 50 °C	5% - 95%
Resolución	1 ppm (0 ppm - 1000 ppm)	0,1 °C	1%
	5 ppm (1000 ppm - 2000 ppm)		
	10 ppm (2000 ppm - 5000 ppm)		
Tiempo de respuesta	30 s	20 min	-

Tabla 4.3.2 – Características metrológicas de los monitores AirCO₂ntrol 5000. Los tiempos de respuesta declarados son el T₆₃ (tiempo en el que la lectura alcanza un 63% del valor final ante un escalón en la concentración). Los porcentajes de humedad se refieren a la humedad relativa.

La hoja de datos de los equipos no declara su exactitud. Asimismo, no se detalla información sobre su calibración (salvo su ajuste de cero).

La figura 4.3.2 muestra una fotografía del monitor en cuestión.



Figura 4.3.2 – Fotografía de los monitores AirCO₂ntrol 5000. Tomada de Syar (s.f.).

4.3.3 Estación Met One E-Sampler 9800

La estación Met One E-Sampler 9800 es un equipo para uso continuo a la intemperie que registra material particulado¹ mediante un nefelómetro y mediante medidas gravimétricas (pesada diferencial de un filtro). Asimismo, este equipo dispone de un termómetro, un barómetro, y un anemómetro de copela con veleta. Sin considerar ni el anemómetro ni el soporte del instrumento, sus dimensiones son 762 mm × 267 mm × 165 mm y pesa 6,4 kg (Met One Instruments, s.f.-c).

La tabla 4.3.3 resume las características metrológicas de los diferentes sensores de este equipo (Met One Instruments, s.f.-a, s.f.-c).

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE LOS SENSORES DEL MONITOR MET ONE E-SAMPLER 9800			
	Rango de medida	Exactitud	Apreciación
Nefelómetro	0 mg/m ³ - 65 mg/m ³	±10% rdg	1 µg/m ³
Anemómetro	0 m/s - 75 m/s	±0,2 m/s	0,1 m/s
Veleta	0° - 360°	±3°	0,5°
Termómetro	-30 °C - 50 °C	-	0,1 °C
Barómetro	60000 Pa - 104000 Pa	-	1 Pa

Tabla 4.3.3 – Características metrológicas de la estación Met One E-Sampler 9800. La exactitud del nefelómetro se encuentra referida a la lectura (rdg). El anemómetro de copela tiene una lectura no nula mínima de 0,4 m/s. Su exactitud declarada es válida para velocidades menores a 17 m/s (para velocidades superiores se estima ±1% del valor). El fabricante no declara exactitud del termómetro ni del barómetro.

El equipo en cuestión permite una frecuencia de muestreo máxima (elegida) de una medida por minuto, con promediación en el intervalo temporal. Se decidió utilizar de forma permanente el ciclón de PM10.

La figura 4.3.3 muestra una fotografía del equipo en cuestión.

¹Se puede medir PM total (TSP, *Total Suspended Particles*), PM10, PM2,5 o PM1 dependiendo del ciclón instalado en el equipo.



Figura 4.3.3 – Fotografía de la estación Met One E-Sampler 9800. No incluye el anemómetro utilizado. Tomada de Met One Instruments (s.f.-b).

4.3.4 Estación meteorológica Davis Instruments Vantage Pro2

Se contó con una estación meteorológica Davis Instruments, modelo Vantage Pro2. La misma tiene un anemómetro de copela, veleta, termómetro, sensores de radiación total y de radiación ultravioleta, pluviómetro, barómetro e higrómetro. La estación permite una frecuencia de muestreo máxima (seleccionada para la campaña de medidas) de una medida por minuto.

La tabla 4.3.4 resume las características metrológicas declaradas por el fabricante. Más detalles se encuentran disponibles en la hoja de datos de la estación (Davis Instruments, s.f.-b).

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE LOS SENSORES DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS INSTRUMENTS VANTAGE PRO2			
	Rango de medida	Exactitud	Apreciación
Anemómetro	0 m/s - 89 m/s	$\pm \max \{0,9 \text{ m/s}; 5\% \text{ rdg}\}$	0,4 m/s
Veleta	1° - 360°	$\pm 3^\circ$	22,5°
Termómetro	-40 °C - 65 °C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	0,1 °C
Barómetro	540 hPa - 1100 hPa	$\pm 1 \text{ hPa}$	0,1 hPa
Higrómetro	1% - 100%	$\pm 2\%$	1%
Radiación total	0 W/m ² - 1800 W/m ²	$\pm 5\% \text{ FS}$	1 W/m ²

Tabla 4.3.4 – Características metrológicas de la estación meteorológica. El porcentaje de exactitud dado para el anemómetro se encuentra referido a la lectura (rdg). La apreciación informada para la veleta se corresponde con registros sobre una rosa de los vientos de 16 rumbos. La exactitud del barómetro toma en cuenta las correcciones por altura. Los porcentajes informados para el higrómetro se refieren a la humedad relativa. La exactitud para la radiación total se encuentra referida al fondo de escala (FS, *Full Scale*).

No se contó con certificados de calibración de los diferentes sensores de esta estación. La figura 4.3.4 muestra el equipo descrito.



Figura 4.3.4 – Fotografía de la estación Davis Instruments Vantage Pro2. Tomada de Davis Instruments (s.f.-a).

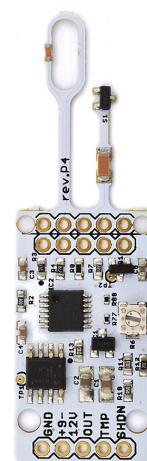
4.3.5 Sensores Modern Device Wind Rev C y Wind Rev P

Se dispuso de diez anemómetros de hilo caliente Modern Device, cinco del modelo Rev C y cinco del modelo Rev P. Se trata de sensores de bajo costo que no incluyen ningún circuito de adquisición de datos. El fabricante no detalla características metrológicas de estos instrumentos, más allá de alcances de hasta 27 m/s para el modelo Rev C y 67 m/s para el modelo Rev P (Modern Device, s.f.-a, s.f.-b).

La figura 4.3.5 muestra fotografías de estos sensores.



(a) Modelo Rev C



(b) Modelo Rev P

Figura 4.3.5 – Fotografías de los sensores anemómetros de hilo caliente Modern Device. Tomadas de Modern Device (s.f.-a) y Modern Device (s.f.-b)

4.3.6 Sensores Winsen MH-Z19B

Se dispuso de dos sensores de CO₂ Winsen MH-Z19B. Se trata de sensores NDIR de bajo costo. Estos dispositivos no incluyen ningún circuito de adquisición de datos.

La tabla 4.3.5 resume las características metrológicas declaradas por el fabricante (Winsen, 2020).

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE LOS SENSORES WINSEN MH-Z19B	
Rango de medida	0 ppm - 5000 ppm
Exactitud	± 50 ppm + 5% rdg
Tiempo de respuesta	120 s

Tabla 4.3.5 – El rango de medida declarado es el utilizado en el presente proyecto. También se pueden configurar rangos de hasta 2000 ppm o 10000 ppm. El porcentaje de exactitud se encuentra referido a la lectura (rdg). El tiempo de respuesta declarado es el T₉₀ (tiempo en el que la lectura alcanza un 90% del valor final ante un escalón en la concentración).

La figura 4.3.6 muestra una fotografía de los sensores en cuestión.

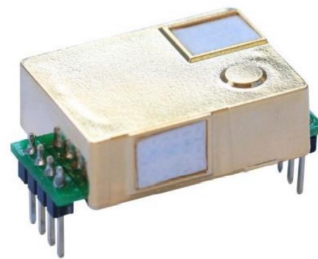


Figura 4.3.6 – Fotografía del sensor Winsen MH-Z19B. Tomada de Winsen (2020).

4.4 Armado de instrumentos en base a placas Arduino

Como se mencionó, los anemómetros Modern Device y los sensores Winsen de CO₂ son dispositivos que no incluyen sistemas de adquisición de datos. Fue necesario implementar el hardware adecuado para su uso. A continuación se describe dicha implementación.

4.4.1 Aspectos generales

Los sistemas para la adquisición de datos requieren esencialmente los mismos componentes, independientemente del tipo de sensor (anemómetro o sensor de CO₂). A continuación se enumeran dichos componentes.

1. **Unidad procesadora:** se requiere un microcontrolador que ejecute el programa de adquisición y almacenamiento de datos y que comunique los diferentes componentes de hardware. Se utilizó una placa Arduino Uno R3 DIP. Se trata de un pequeño dispositivo (68.6 mm × 53.4 mm, 25 g) que opera con un voltaje de 5 V y cuenta con 6 pines de comunicación digital (entrada o salida de datos) y 6 pines de comunicación analógica (entrada de datos) (Arduino, s.f.).
2. **Reloj:** como se desea almacenar la fecha y la hora en la que el dispositivo adquiere cada medida, se necesita un RTC (*Real Time Clock*), un reloj con alimentación autónoma, de manera tal que si el dispositivo se apaga o si su alimentación falla no sea necesario reconfigurar la fecha y la hora del dispositivo. Se utilizó el módulo RTC3231C (Fablet & Bertoni, s.f.-b).
3. **Módulo de almacenamiento de datos:** se requiere un dispositivo para escritura de los datos adquiridos. Se utilizó un módulo para tarjetas SD y microSD.
4. **Fuente de alimentación:** en aras de obtener sensores portátiles, se utilizaron baterías portátiles (*power bank*) de 20000 mAh, que permiten una alimentación de 5 V y 1 A. Se estimó una autonomía de 48 horas con esta capacidad.

Para interconectar los diferentes componentes se decidió utilizar una estrategia de prototipado. Esto es, se utilizaron conexiones desmontables (no soldadas) con cables puente² y una protoboard de 400 puntos³. Esto permitió un armado rápido de los dispositivos y da la posibilidad de reutilizar sus componentes en caso de que a futuro se desee desarrollar nuevas versiones. Sin embargo, sería deseable que futuras versiones de estos dispositivos fueran soldadas, con el fin de hacerlas más robustas.

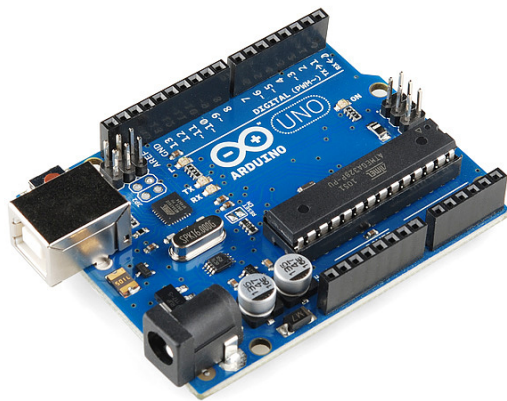
Por otra parte, también se utilizó un cable de conexión macho-macho con terminales USB-A y USB-B para conectar la placa Arduino a la batería. Este mismo cable permite la conexión de la placa con una computadora, pero esto fue necesario sólo para cargar el programa de adquisición de datos.

Por último, se utilizaron tarjetas microSD de 32 GB para almacenamiento de datos.

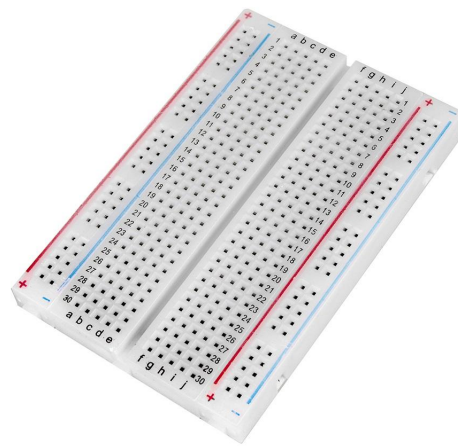
La figura 4.4.1 muestra los principales componentes descritos.

²Cables jumper o DuPont.

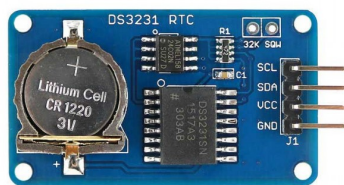
³Las protoboard (también llamadas breadboard) son elementos de prototipado electrónico que permiten interconectar las patas (pines) de diversos componentes electrónicos sin necesidad de soldadura. Cada protoboard tiene dos sectores independientes con conexión para la alimentación de tensión, la tierra y los distintos componentes. Cada fila de cada sector tiene continuidad eléctrica.



(a) Placa Arduino Uno (Eneka, s.f.)



(b) Protoboard de 400 puntos (Vystronic, s.f.)



(c) Módulo RTC (Fablet & Bertoni, s.f.-b)



(d) Módulo SD y microSD (Fablet & Bertoni, s.f.-a)

Figura 4.4.1 – Fotografías de los principales componentes electrónicos utilizados para todos los montajes en base a placas Arduino.

4.4.2 Armado y características particulares

Anemómetros

Los distintos elementos electrónicos fueron colocados en cajas plásticas transparentes y fijados a las mismas. Se perforaron ranuras para poder colocar y retirar las tarjetas SD sin necesidad de abrir las cajas (problemático dada la posición en que fueron colocados, ver sección 4.6.4). Asimismo, se perforó un agujero para poder presionar el botón de reinicio de la placa Arduino⁴. También se perforó un agujero para instalar el cable hacia la batería de manera externa. Las baterías fueron fijadas al exterior de las cajas con velcro, a fin de poder retirarlas para cargarlas sin necesidad de desinstalar las cajas. Por último, se realizaron perforaciones y se instalaron precintos plásticos para poder colgar las cajas.

Para minimizar gastos se asociaron dos anemómetros a cada placa Arduino. Esto es, cada caja adquiere datos de dos sensores independientes. Esto también permite detectar posibles errores de conexión o problemas con algún sensor. Se armaron cinco cajas, dos con dos sensores modelo Rev C, dos con dos sensores modelo Rev P y una con un sensor Rev P y un sensor Rev C. Los sensores fueron fijados fuera de la caja sobre palitos de madera.

El modelo Rev P significó un problema, ya que requiere un voltaje de operación de entre 10 V

⁴Esto reinicia el sistema y borra todos los datos en la tarjeta de memoria. En general no es necesario.

y 12 V, mientras que el modelo Rev C opera en un rango de 4 V a 5 V, este último compatible con el voltaje de operación de las placas Arduino Uno (5 V). Por lo tanto, los módulos con sensores Rev P requirieron de un convertor DC *step-up* para elevar el voltaje de alimentación de los sensores. Se utilizó el modelo LM2596 de Arduino. La figura 4.4.2 muestra una fotografía de este componente.

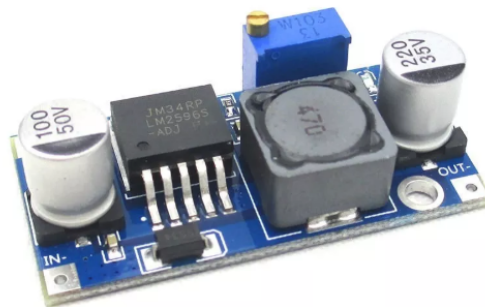


Figura 4.4.2 – Convertor Arduino DC *step-up* para módulos de anemómetros con sensores Rev P. Tomado de Circuitarte (s.f.).

Por otra parte, las figuras 4.4.3, 4.4.4 y 4.4.5 detallan el conexionado de cada módulo armado.

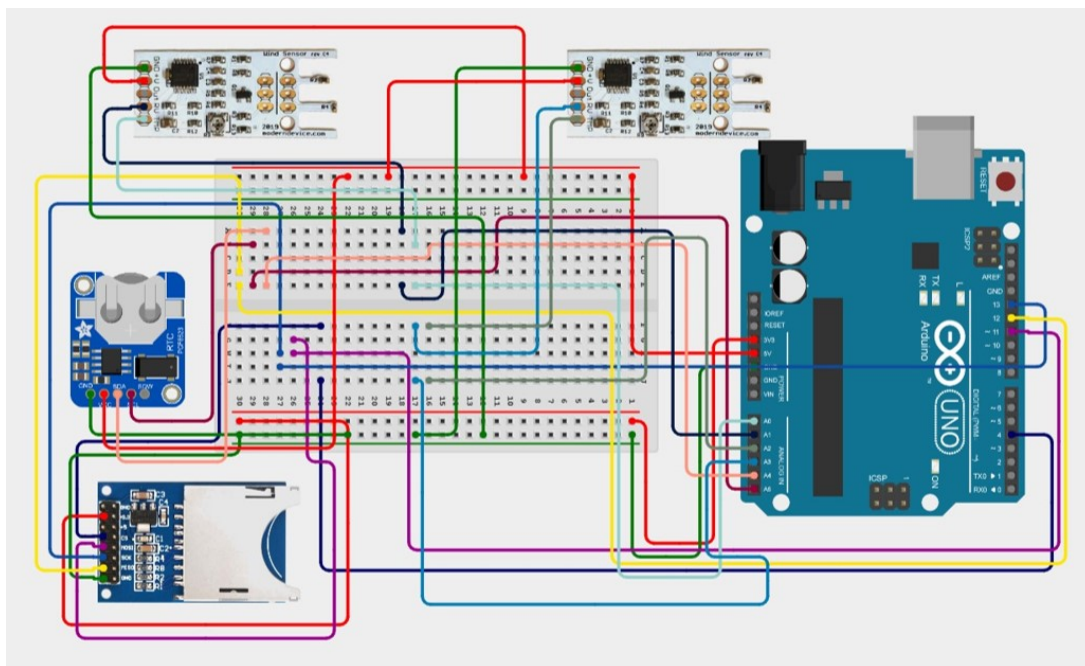


Figura 4.4.3 – Diagrama de conexión eléctrica de los componentes de los anemómetros en base a dos sensores Modern Device Rev C. Realizado con Cirkuit Designer.

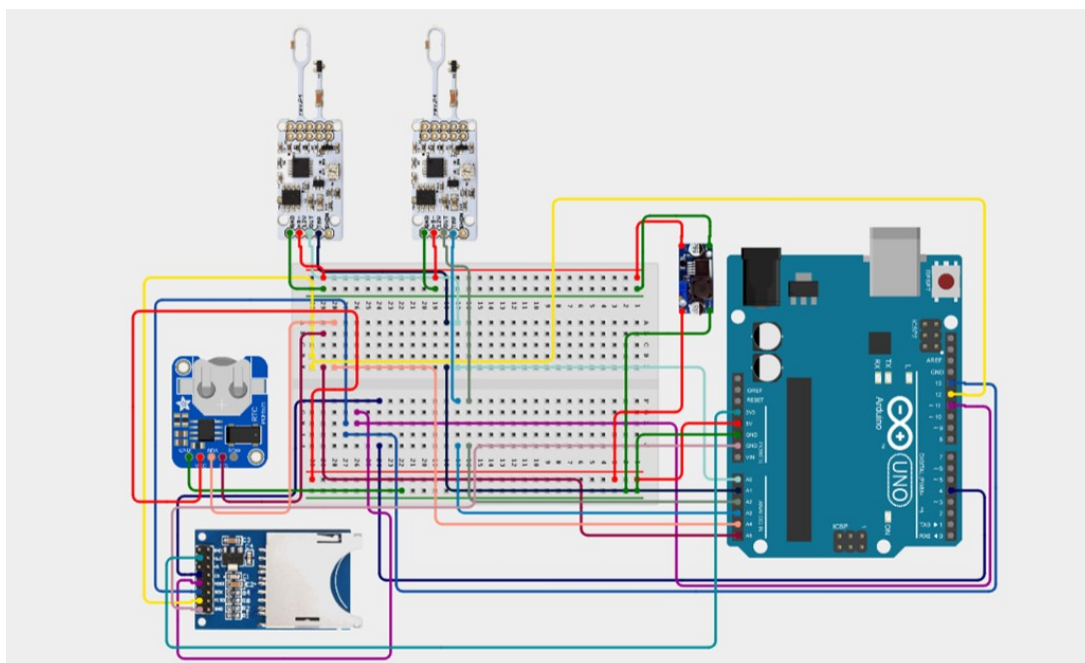


Figura 4.4.4 – Diagrama de conexión eléctrica de los componentes de los anemómetros en base a dos sensores Modern Device Rev P. Realizado con Cirkuit Designer.

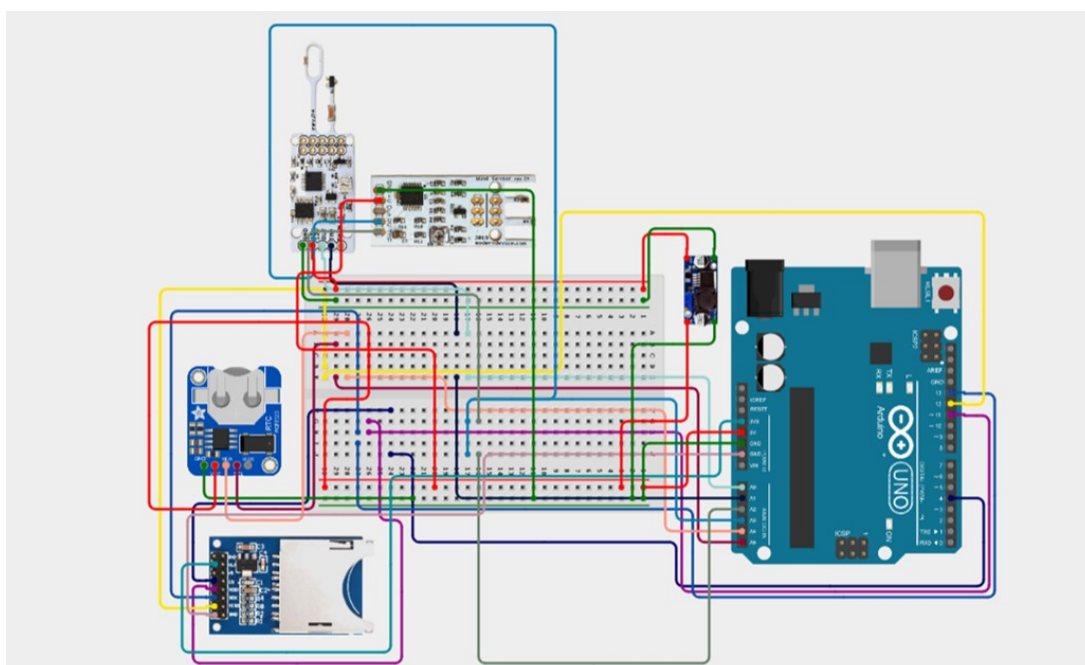
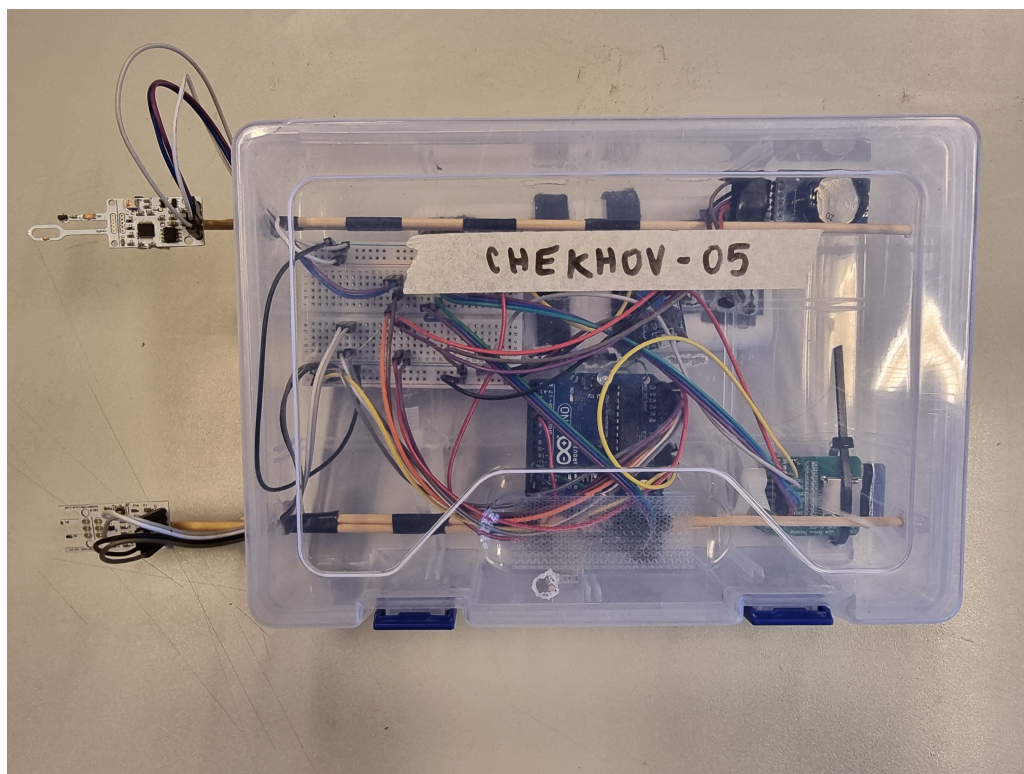
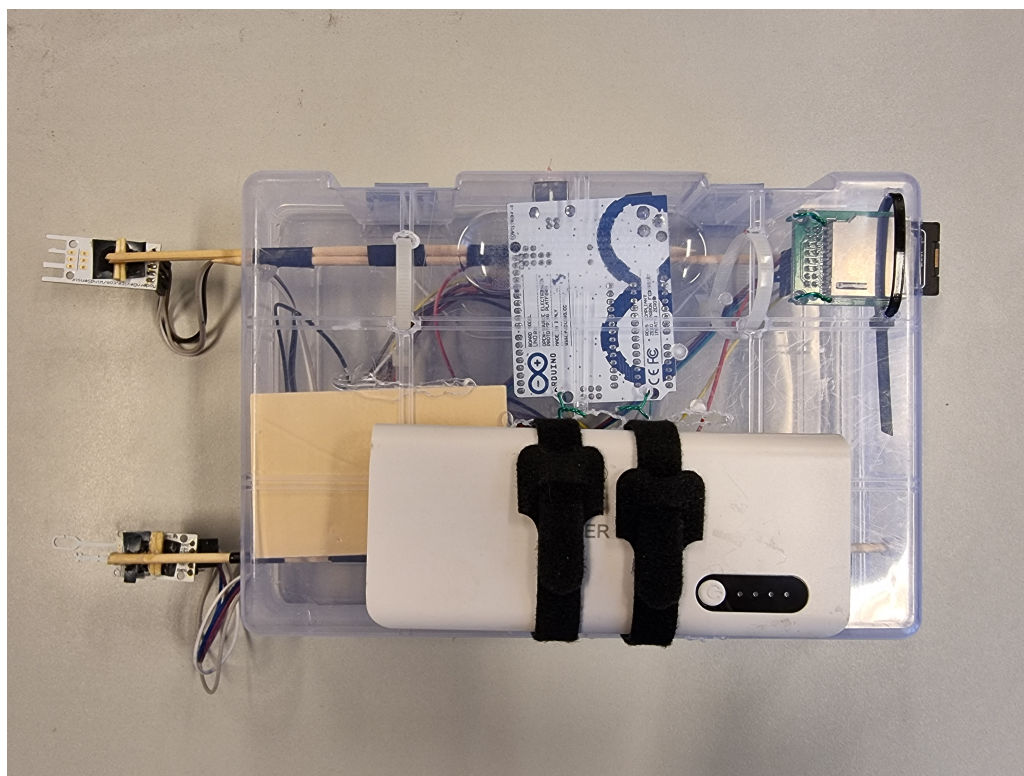


Figura 4.4.5 – Diagrama de conexión eléctrica de los componentes de los anemómetros en base a un sensor Modern Device Rev C y otro Rev P. Realizado con Cirkuit Designer.

Por último, la figura 4.4.6 muestra fotografías del módulo con un sensor Rev C y otro Rev P.



(a) Vista delantera



(b) Vista trasera

Figura 4.4.6 – Fotografía del dispositivo en base a anemómetros Modern Device Rev C y Rev P.

Sensores de CO₂

Los sensores Winsen MH-Z19B fueron colocados en el interior de sendas cajas plásticas. Para permitir la circulación de aire y una medida adecuada se realizaron múltiples perforaciones laterales en la caja.

La figura 4.4.7 muestra el diagrama de conexión de estos módulos.

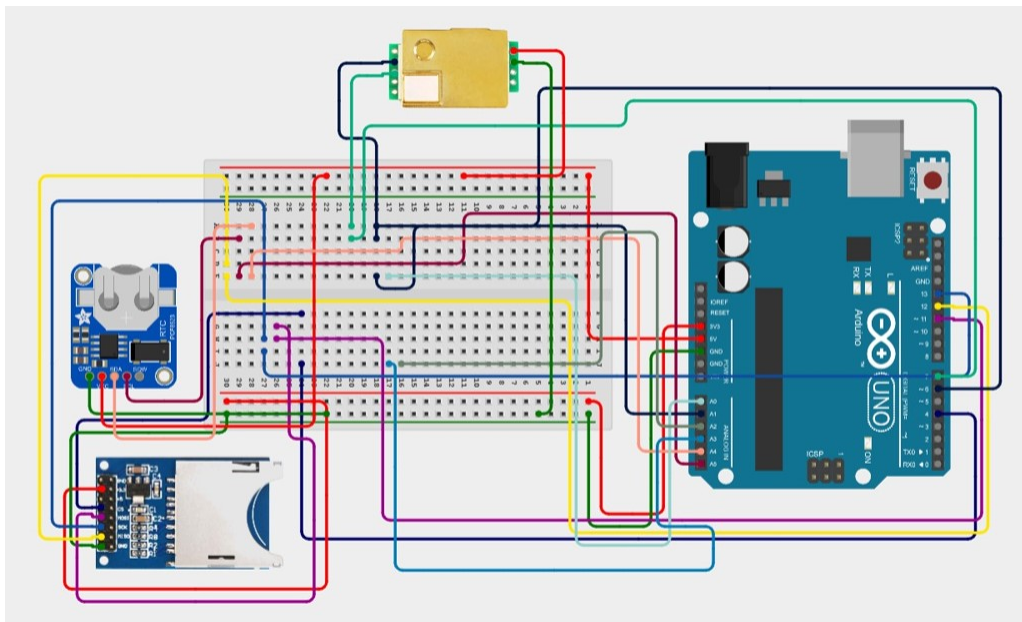


Figura 4.4.7 – Diagrama de conexión eléctrica de los componentes de los equipos para medida de CO₂ en base a los sensores Winsen MH-Z19B. Realizado con Circuit Designer.

Por otra parte, la figura 4.4.8 muestra una fotografía de los dispositivos armados.

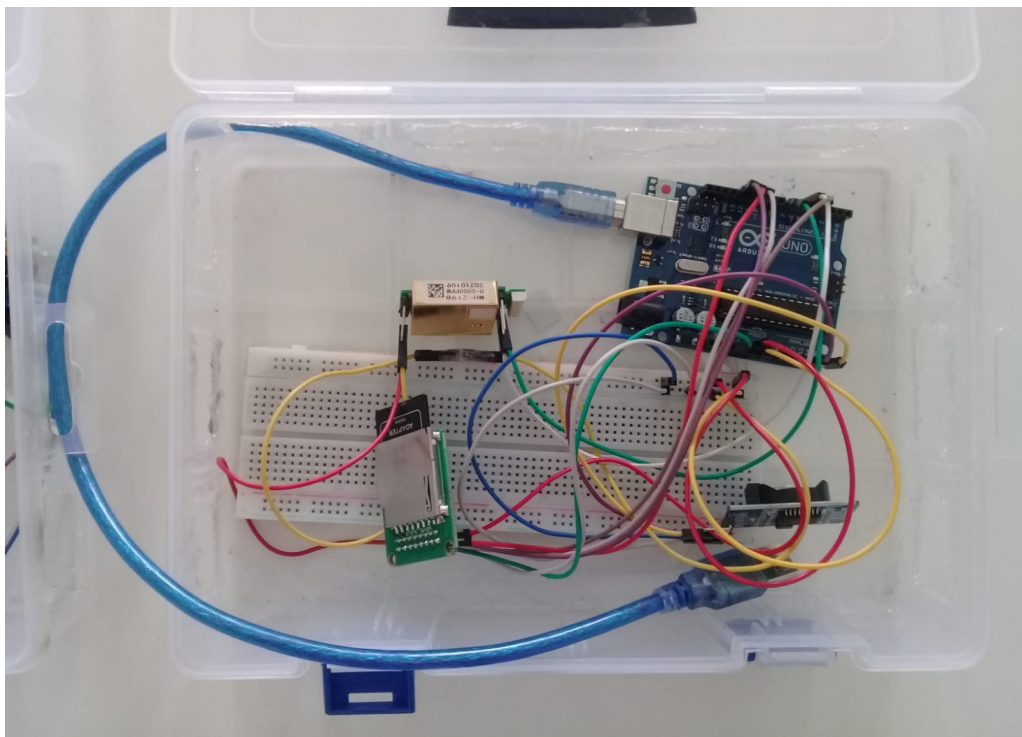


Figura 4.4.8 – Fotografía del dispositivo para medida de CO₂ armado en base a los sensores Winsen MH-Z19B y una placa Arduino.

De aquí en adelante se identificará a los dos dispositivos de medida de concentración de CO_2 como los monitores AR1 y AR2.

4.4.3 Resumen de partes y costo estimado

La tabla 4.4.1 resume los componentes principales y su costo.

PARTES Y PRECIO UNITARIO	
Sensor Rev C	U\$S 17
Sensor Rev P	U\$S 24
Sensor MH-Z19B	U\$S 35
Placa Arduino Uno	\$ 1440
RTC	\$ 269
Lector SD y microSD	\$ 144
Batería	\$ 890
Protoboard	\$ 112
Regulador de voltaje	\$ 122

Tabla 4.4.1 – Costo de las partes de los equipos (cajas) armados. Los costos de los sensores no incluyen envío (fueron adquiridos en el exterior) y son al por menor.

En virtud de los costos presentados, se estimó que cada módulo con dos anemómetros tuvo un costo aproximado de \$5000 y cada caja con un sensor MH-Z19B costó \$4500. Estos precios son muy atractivos al ser contrastados con instrumentos comerciales, lo que justifica el interés en los sensores de bajo costo.

4.4.4 Software de adquisición de datos

El software de adquisición de datos (sketchs de Arduino) ya se encuentra implementado por los fabricantes de los sensores. Esto incluye una calibración genérica. Se implementaron modificaciones mínimas para los arreglos y para el hardware utilizados:

- Para los anemómetros, se modificaron los programas de forma tal que se adquirieran datos de dos sensores y se combinaron los programas del fabricante de acuerdo a los modelos asociados a una misma placa Arduino (dos Rev C, dos Rev P o un Rev C y un Rev P).
- Para los sensores de CO_2 se combinaron distintos módulos ya implementados en un único sketch de Arduino debido a limitaciones de memoria de las placas Arduino Uno.

Los datos (fecha y hora e indicación) se almacenan en un archivo de texto plano (`txt`) en la tarjeta de memoria.

4.4.5 Ajuste

Todos los sensores utilizados requieren un ajuste. En el caso de los anemómetros, se realiza un ajuste de cero configurando un parámetro en la ecuación que el programa de adquisición utiliza para transformar el voltaje de salida de los sensores en una velocidad. Para ello se colocaron los sensores en un ambiente estanco (adentro de un vaso sobre una mesa).

En el caso de los sensores de CO_2 , es necesario ajustar un punto de concentración. Para ello el fabricante indica que se deben colocar los sensores en un ambiente con 400 ppm de concentración (típicamente al aire libre) e iniciar el proceso de calibración, que demora 20 minutos, aproximadamente.

Por otra parte, se desactivó la función de autocalibración de los sensores de CO₂. Este proceso, denominado ABC (*Automatic Baseline Correction*, Corrección Automática de Referencia), consiste en que el monitor asocia la indicación de 400 ppm con la medida más baja obtenida cada cierto tiempo. Esto es una práctica usual en sensores de servicio continuo, típicamente asociados a sistemas de HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*, Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado) con demanda variable. No obstante, como se planeó utilizar los sensores durante pruebas controladas en las que podrían no alcanzarse las 400 ppm, se prefirió desactivar esta funcionalidad.

4.5 Disponibilidad de instrumentos

El monitor AQ1 se encontró disponible de forma permanente durante toda la campaña de medidas. Los demás monitores Aeroqual se encontraron parcialmente disponibles, en general tres días a la semana, debido a su uso en otro proyecto.

Los monitores AC1 y AC2 se encontraron ocasionalmente disponibles, por lo que no fueron instalados de forma permanente en la escuela.

Por otra parte, la estación meteorológica y el sensor Met One se encontraron disponibles de forma permanente.

Por último, los anemómetros de hilo caliente se encontraron disponibles de forma permanente, pero los equipos AR1 y AR2 se encontraron ocasionalmente disponibles debido a que fueron prestados para otro proyecto.

4.6 Instalación de los instrumentos

Se detallan a continuación diversos aspectos relacionados a la instalación en campo de los instrumentos.

4.6.1 Monitores Aeroqual

Los monitores Aeroqual fueron instalados de forma permanente en el interior del salón 2 de la escuela. La selección de su posición estuvo condicionada por diversos aspectos, tanto técnicos como prácticos.

En primer lugar, se observó que la autonomía de los monitores Aeroqual no permitía cubrir la totalidad de ambos turnos de clase. Por lo tanto, se decidió que operaran conectados a la red eléctrica de forma permanente. Esto significó una limitante importante, dado que el salón dispone únicamente de dos tomacorrientes, uno hacia la mitad del salón, sobre la pared oeste (hacia el patio) y otro adyacente a la puerta.

Por otra parte, se intentó respetar lo más posible las diversas recomendaciones existentes para la ubicación de sensores de CO₂. En particular:

- Ubicar los sensores próximos a la altura de la boca de los ocupantes del salón. De acuerdo con la Education & Skills Funding Agency (2018), dicha altura se estima en 1,1 m para niños escolares sentados. Schibuola y Tambani (2021) utilizan una altura un poco menor, de 80 cm, mientras que Muelas *et al.* (2020) recomiendan alturas un poco mayores, de entre 1,2 m y 2 m.
- Evitar puntos extremadamente altos, dado que el CO₂ tiende a estratificarse contra el piso (es uno de los componentes más pesados del aire)⁵.

⁵Sin embargo, algunos investigadores (Macarulla *et al.*, 2017; Macarulla *et al.*, 2018) han colocado sensores contra el techo.

- Evitar puntos muy cercanos a los ocupantes, dado que se podrían obtener lecturas excesivas por falta de mezcla. Muelas *et al.* (2020) recomienda mantener una distancia de al menos 1 m entre el sensor y los ocupantes.
- Buscar puntos representativos de todo el ambiente. Diversos autores sugieren o asumen que los más adecuados son puntos centrales (Macarulla *et al.*, 2017; Macarulla *et al.*, 2018; Minguillón *et al.*, 2020; Schibuola y Tambani, 2021), aunque es esperable que esto dependa del patrón de ocupación. Asimismo, se deberían evitar regiones de estancamiento (particularmente rincones) o zonas muy próximas al ingreso de aire fresco (ventanas)⁶.

Compatibilizar las recomendaciones técnicas con la poca disponibilidad de conexión eléctrica no fue sencillo. En particular, se descartó la posibilidad de instalar los sensores en una posición central, debido a la alta densidad de ocupación y la falta de conectividad eléctrica.

En primer lugar, se decidió instalar el monitor AQ1 en el costado del escritorio de la maestra, del lado más alejado de las ventanas. La altura de esta posición (aproximadamente 70 cm) es próxima a la altura de la boca de los niños y se encuentra relativamente lejos de los ocupantes del salón. Asimismo, esta posición se encuentra “protegida” de las ventanas. Para disponer de energía eléctrica en este punto se instaló un alargue hasta el tomacorriente de la pared oeste. También se decidió instalar el monitor AQ3 en este punto.

Para colocar los monitores se diseñó y se fabricó un soporte metálico. El mismo consiste en una plancha de acero de 2 mm doblada, que fue fijada a un orificio preexistente⁷ en la parte superior del escritorio. La fijación fue realizada mediante una planchuela (instalada por la parte inferior del escritorio) y un par de bulones roscados con tuercas.

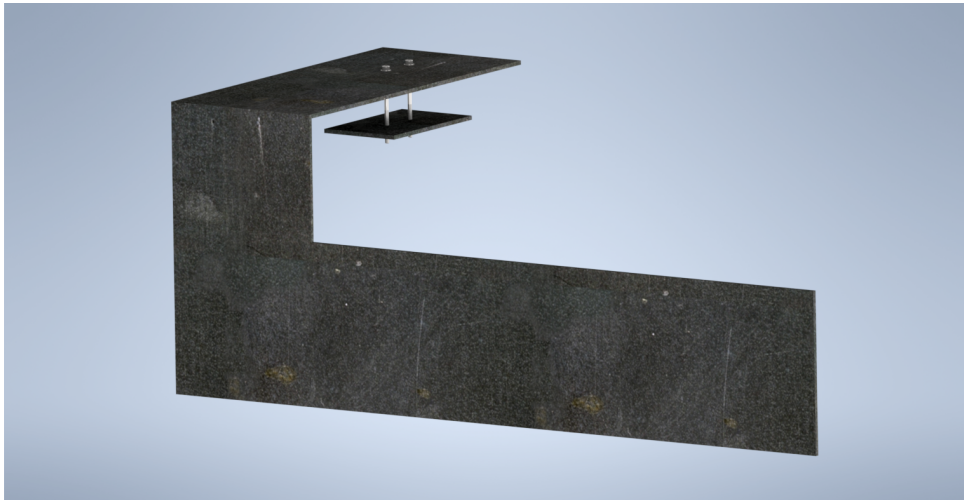
Para fijar los monitores al soporte, se construyeron sendas cajas de protección. Para ello se cortó una caja de plástico (registro estanco de luz) y se le instaló una tapa de acrílico transparente. El fondo de las cajas fue perforado y se instalaron precintos plásticos que fueron sujetados al soporte. Las caras laterales de la caja fueron retiradas para evitar pérdidas de carga significativas en la toma de aire de los monitores. Se destaca que la diferencia en altura de los cabezales de CO₂ y PM evita que las tomas de aire de ambos monitores queden enfrentadas⁸. También se abrió un orificio rectangular en la parte inferior para la conexión de la alimentación eléctrica y del cable de datos.

La figura 4.6.1 muestra el diseño del soporte y su ubicación con los monitores sobre el escritorio. Asimismo, en el apéndice A.4 se encuentra disponible el plano del soporte.

⁶La norma ASTM D6245 - 18 (2018) reconoce la posibilidad de instalar los sensores en la extracción de aire. Sin embargo, para el sistema de estudio, no existe un sentido de circulación claro.

⁷Perforación para cables de datos típica de mobiliario de oficina.

⁸De todas formas esto no debería ser un problema importante, en la medida en que, dado su principio de funcionamiento, los monitores no alteran el aire medido.



(a) Soporte y planchuela de fijación



(b) Soporte con sensores fijados al costado del escritorio



(c) Vista inferior del arreglo, con detalle de la fijación y de los puertos de conexión de los sensores Aeroqual

Figura 4.6.1 – Renderización del diseño del soporte para los sensores Aeroqual 500 del escritorio, realizado con Autodesk Inventor. Los monitores Aeroqual mostrados son representaciones esquemáticas de los monitores. El cabezal cilíndrico de color blanco mide CO_2 (monitor AQ1, a la izquierda) y el gris mide PM (monitor AQ3, a la derecha).

Además, se instaló un alargue desde el tomacorriente de la pared oeste del salón hasta el escritorio para enchufar los monitores. Asimismo, se aprovechó la superficie del escritorio para instalar una laptop de forma permanente. Esto permitió controlar el sensor a distancia dejando instalados los cables de datos de los monitores.

La figura 4.6.2 muestra fotografías del arreglo descrito.



Figura 4.6.2 – Fotografías de la instalación de los monitores AQ1 y AQ3 sobre el escritorio de la maestra, al frente del salón.

Por otra parte, se decidió colocar el monitor AQ2 sobre la esquina sureste del salón (al fondo, contra la pared del pasillo). Se planteó la hipótesis de que esta fuera una zona de estancamiento, pues se encuentra alejada de todas las aberturas. Además, se trata de la zona más alejada del monitor AQ1. Por lo tanto, medir la concentración de CO_2 en el rincón del fondo y compararla con la concentración al frente permitió evaluar el nivel de mezcla del sistema⁹.

Para instalar el monitor se utilizó una caja protectora, como la de los monitores AQ1 y AQ3, que fue apoyada sobre la parte superior de un armario. También se instaló una laptop para controlar el equipo de forma remota. Para alimentar eléctricamente el conjunto se tendió un alargue desde el enchufe contiguo a la puerta hasta la parte superior del armario.

Durante dos semanas se instaló de forma transitoria el monitor AQ2 en el pasillo principal de la primera planta. Para ello se trasladó la computadora al alfeizar de la banderola del salón y se colocó el sensor sobre uno de los armarios del pasillo.

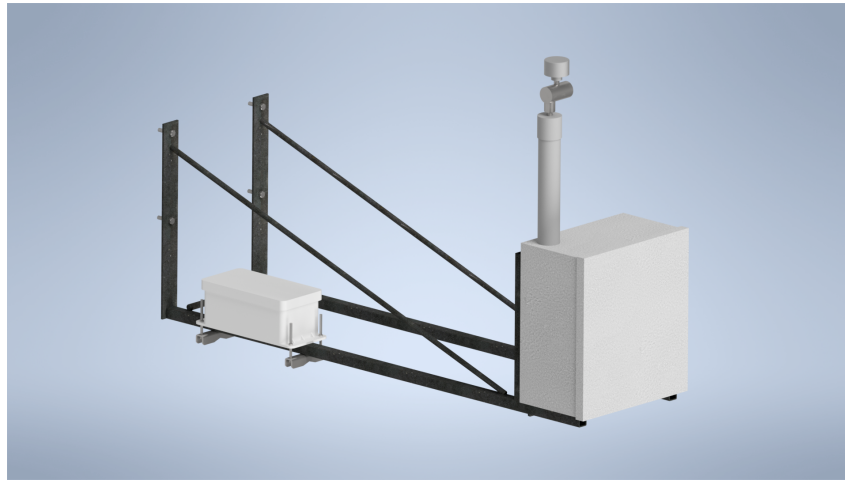
⁹Analizar el nivel de mezcla permite evaluar que tan representativas son las medidas obtenidas de todo el sistema estudiado. Esto es particularmente importante para los desarrollos presentados en los capítulos 6 y 7, que se basan en la hipótesis de mezcla perfecta.

4.6.2 Estación Met One

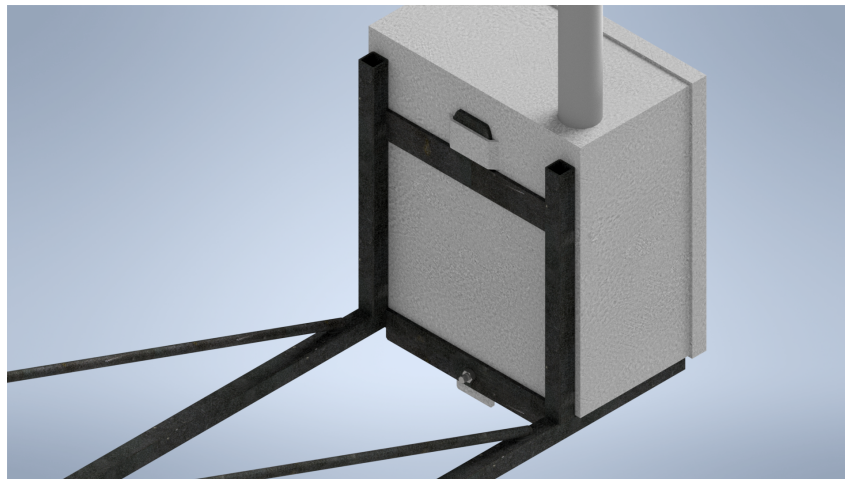
La estación Met One fue instalada en la fachada oeste del edificio, sobre la pared que da al patio. Se eligió este punto por su facilidad de acceso para la descarga de datos, que requiere la conexión cableada de la estación a una computadora. El equipo fue colocado al costado sur de las ventanas del salón 2.

Para fijar el equipo, se diseñó y se construyó una ménsula metálica de 1 m de longitud. Si bien las medidas de velocidad en esta zona estarán muy perturbadas por la presencia de la pared, se pretendió caracterizar, al menos cualitativamente, el flujo sobre las ventanas.

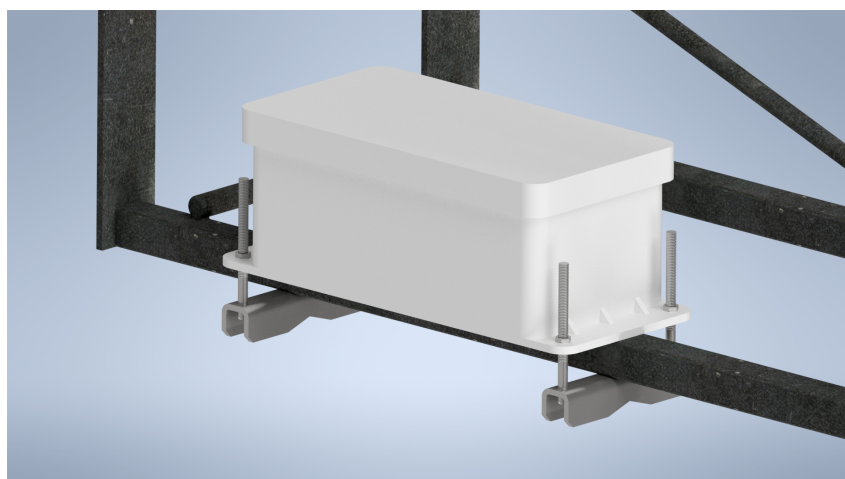
La figura 4.6.3 muestra el diseño de la ménsula y esquematiza la posición de la estación Met One. En el apéndice A.5 se encuentra disponible el plano del diseño.



(a) Vista general



(b) Detalle del enganche posterior



(c) Detalle del transformador

Figura 4.6.3 – Renderización de la ménsula diseñada para colocar la estación Met One E-Sampler 9800, realizada con Autodesk Inventor. Se incluyen detalles de la fijación de la estación a la ménsula y de la posición del transformador de alimentación.

La ménsula fue fijada a la pared con cuatro tacos fischer y bulones roscados de 7 mm de diámetro. Asimismo, el anemómetro fue instalado sobre un tubo de aluminio horizontal, que fue fijado a los tensores de la ménsula con precintos plásticos.

Por otra parte, se tendió un alargue hasta el equipo a lo largo de la fachada del edificio desde el laboratorio del segundo piso. Éste tiene una ventana de guillotina, lo que permitió pasar el cable con una apertura mínima. Además, para maximizar el tiempo entre las descargas de datos (que deben realizarse *in situ*), se instaló un temporizador en la conexión eléctrica, de forma que el equipo operara sólo entre las 7:00 y las 18:00.

La figura 4.6.4 muestra una fotografía de la instalación.



Figura 4.6.4 – Fotografía de la estación Met One E-Sampler 9800 una vez instalada sobre la fachada oeste de la escuela, al sur de las ventanas del salón 2. Se puede apreciar la ménsula, el equipo central y el anemómetro y su veleta.

4.6.3 Estación meteorológica

La estación meteorológica fue colocada en la azotea de la escuela. Para ello se construyó un pequeño dado, llenando un recipiente de plástico con hormigón, al cual se fijó un mástil de 2 m construido con un tubo de polipropileno. La estación fue fijada al mástil, sobre el que además se colocaron tres lingas metálicas con tensores, fijadas a tres muertos contruidos con bloques y dispuestos cada 120°, aproximadamente. La figura 4.6.5 muestra fotografías del arreglo descrito.



(a) Estación y soporte



(b) Detalle de la estación



(c) Tensores



(d) Muerto

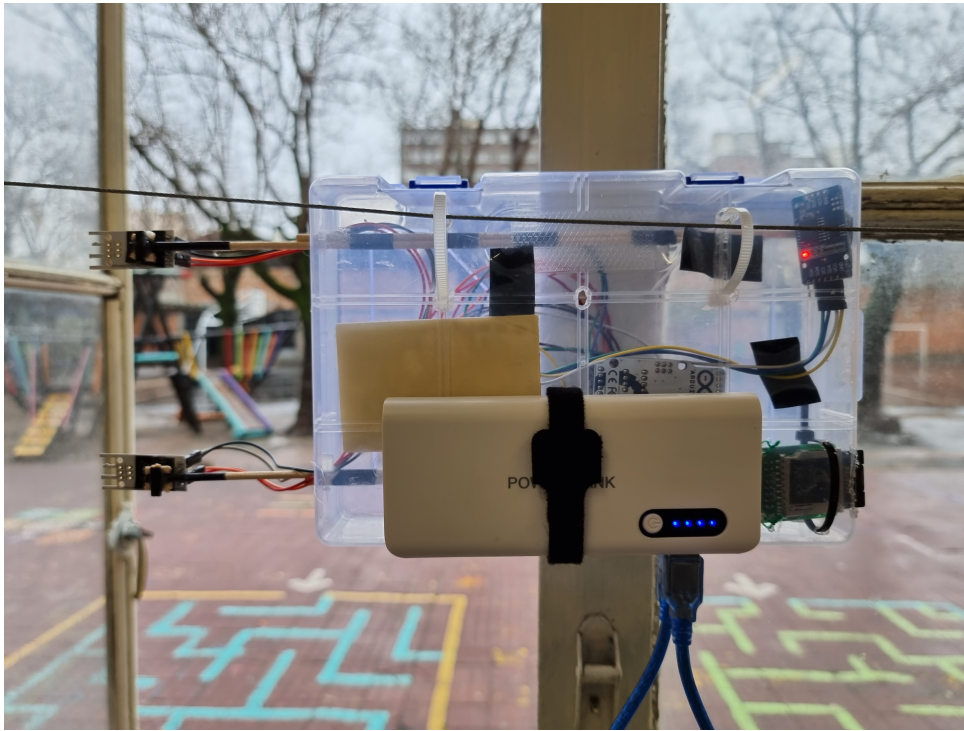
Figura 4.6.5 – Fotografías de la instalación de la estación meteorológica en la azotea de la escuela.

Por otra parte, se nivelaron los sensores de radiación y se ajustó el norte de la veleta.

La estación meteorológica consta de una unidad con los sensores que opera de forma autónoma (utiliza una batería recargable y dispone de un panel solar), por lo que no requiere ningún cableado de datos o de energía. Por otra parte, el equipo dispone de una consola independiente que recibe los registros de forma inalámbrica. Dicha consola requiere alimentación eléctrica y permite un almacenamiento de datos limitado. Se la instaló de forma permanente en el laboratorio del segundo piso, conectada a la red eléctrica y a una tercera laptop para la descarga remota de datos.

4.6.4 Anemómetros

Se instaló un módulo de anemómetros (caja) por ventana, con el objetivo de estimar el caudal correspondiente a cada abertura y contrastar los resultados con las estimaciones de la tasa de ventilación obtenidas a partir de las medidas de CO_2 . Para ello se instalaron pitones cerrados y lingas de acero con tensores sobre las ventanas hacia el patio, a las que se engancharon las cajas. Estas fueron fijadas entre la linga y la división central del marco de cada ventana, de forma tal que los anemómetros quedaran sobre uno de los paños de cada ventana. Dado que las ventanas abren hacia el exterior, los anemómetros no impiden la operación normal de dichas aberturas. En el caso de la banderola, se adaptó la posición de los anemómetros de forma tal que la caja pudiera ser apoyada sobre el alfeizar. La figura 4.6.6 muestra fotografías de los arreglos descritos.



(a) Anemómetro sobre ventana hacia el exterior



(b) Anemómetro sobre la banderola

Figura 4.6.6 – Fotografías de la instalación de los anemómetros contruidos en base a placas Arduino.

4.7 Limitaciones y problemas

Se observaron diversos problemas asociados al uso de los diferentes instrumentos disponibles, detallados en los siguientes apartados.

4.7.1 Monitores Aeroqual 500

Monitores con cabezales de CO₂

Se observó una diferencia sistemática entre las lecturas de los monitores AQ1 y AQ2, pese a que ambos fueron calibrados recientemente en fábrica. Comparaciones con los dos monitores midiendo en el mismo punto mostraron diferencias del orden del 10% de la lectura entre ambos. Las lecturas del monitor AQ2 fueron sistemáticamente superiores a las del AQ1. Al aire libre, los monitores AQ1 y AQ2 arrojaron valores de aproximadamente 380 ppm y 420 ppm, respectivamente. Dado los valores atmosféricos normales de CO₂ (entre 380 ppm y 400 ppm), se planteó la hipótesis de un error sistemático por exceso en el monitor AQ2. Se destaca que esta diferencia es significativa dada la exactitud declarada por el fabricante (ver tabla 4.3.1).

La corrección de la diferencia observada debería implicar la calibración de ambos equipos o, al menos, la comparación con algún monitor de mayor exactitud. Como esto no fue posible, se decidió corregir las lecturas del monitor AQ2 por las del monitor AQ1. Como se mencionó, las lecturas al aire libre parecen indicar que el error sistemático corresponde al monitor AQ2. Además, para los análisis que involucran al sensor AQ2 (en particular el de la hipótesis de mezcla perfecta en el capítulo 6) es más importante la consistencia de las lecturas de los monitores que el valor absoluto registrado.

Se colocaron ambos monitores en un ambiente controlado y se registraron datos durante aproximadamente 30 horas entre los días 18 y 19 de agosto. Se llevó a cabo una regresión lineal simple y se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.7.1.

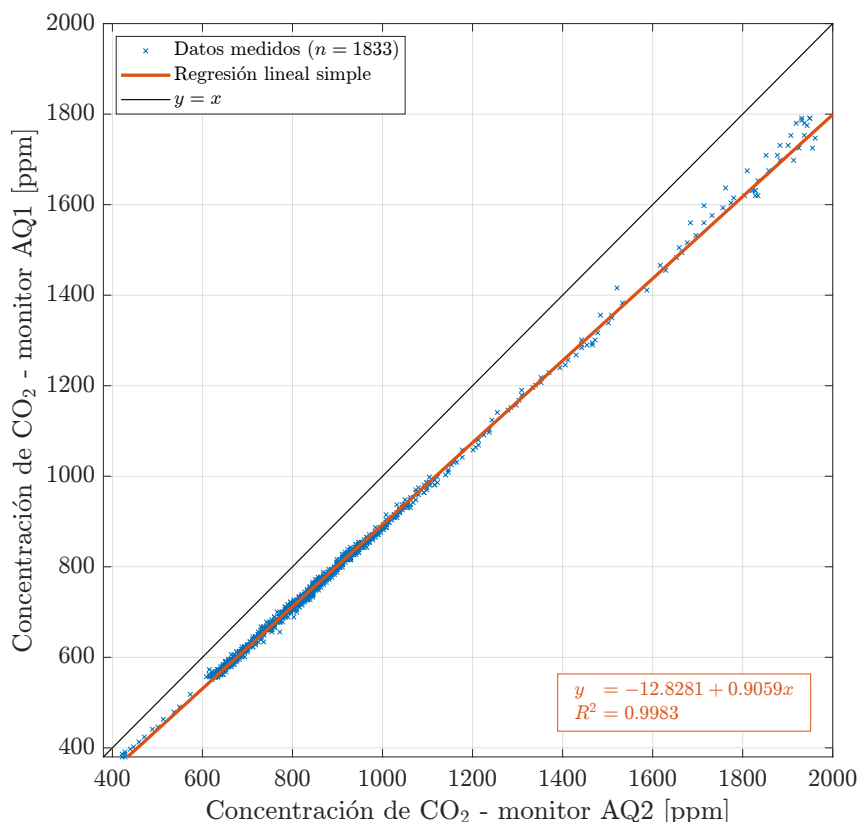


Figura 4.7.1 – Resultados de la regresión lineal entre las medidas comparadas de los monitores AQ1 y AQ2.

Como se puede observar en la figura 4.7.1, se obtuvo una muy buena correlación lineal entre ambos monitores, con un coeficiente de determinación alto. La mayoría de los registros se encuentra en el rango entre 600 ppm y 1000 ppm (que contiene a la mayoría de las medidas de la campaña), pero el ajuste es bueno sobre todo el intervalo de medidas.

Como comentario final, se destaca que el monitor AQ2 también presentó lecturas con errores sistemáticos por exceso al operar con un cabezal diferente (para otro gas) en el contexto de otro proyecto. Las diferencias observadas podrían deberse al monitor base y no al cabezal utilizado. Esto es razonable desde el punto de vista de la calibración de fábrica, que se realiza únicamente para el cabezal.

Monitor con cabezal de material particulado

En lo que respecta al monitor AQ3, el cabezal con el que opera para medir PM2.5 y PM10 cuenta con un certificado de calibración reciente (ver anexo B.2). Sin embargo, en el contexto de otro proyecto conducido por el Departamento de Ingeniería Ambiental (DIA) del IMFIA, se observaron discrepancias significativas entre las medidas de dicho monitor (con el mismo cabezal) y una estación de calidad de aire de referencia recientemente calibrada. En consecuencia, según las indicaciones del personal del DIA, se corrigieron las lecturas del monitor AQ3 según las siguientes ecuaciones

$$PM10 = 0,576\,70\, PM10_c + 19,592\, \mu g/m^3 \quad (4.7.1)$$

$$PM2.5 = 0,614\,88\, PM2.5_c + 6,1066\, \mu g/m^3 \quad (4.7.2)$$

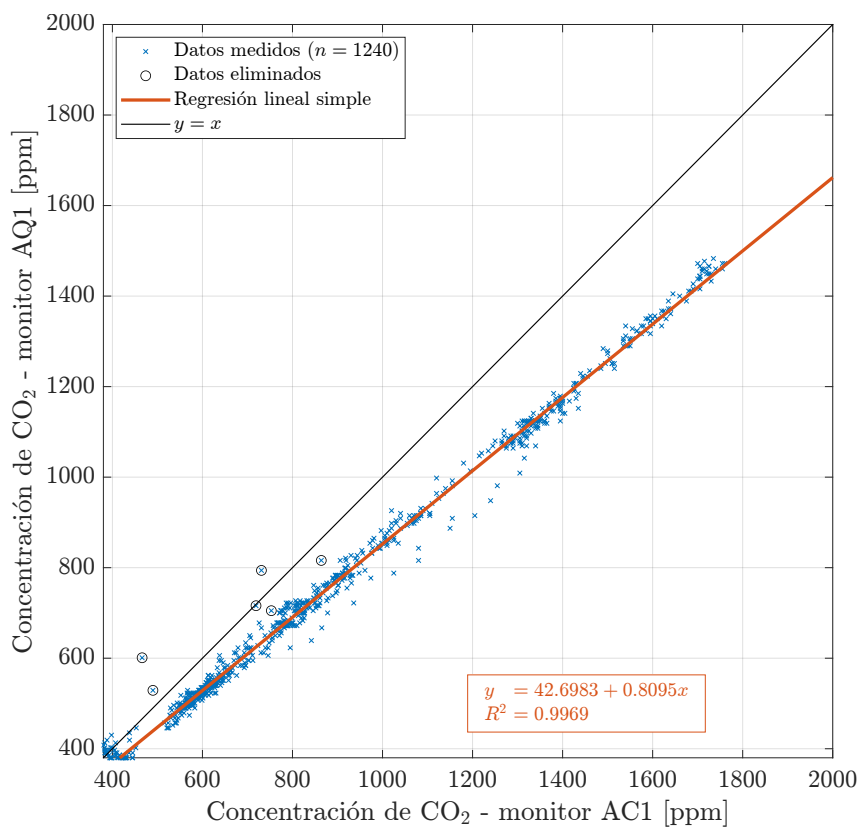
donde PM10 y PM2.5 designan las concentraciones corregidas y $PM10_c$ y $PM2.5_c$ las indicaciones instrumentales, todas expresadas en $\mu g/m^3$.

4.7.2 Monitores AirCO₂ntrol

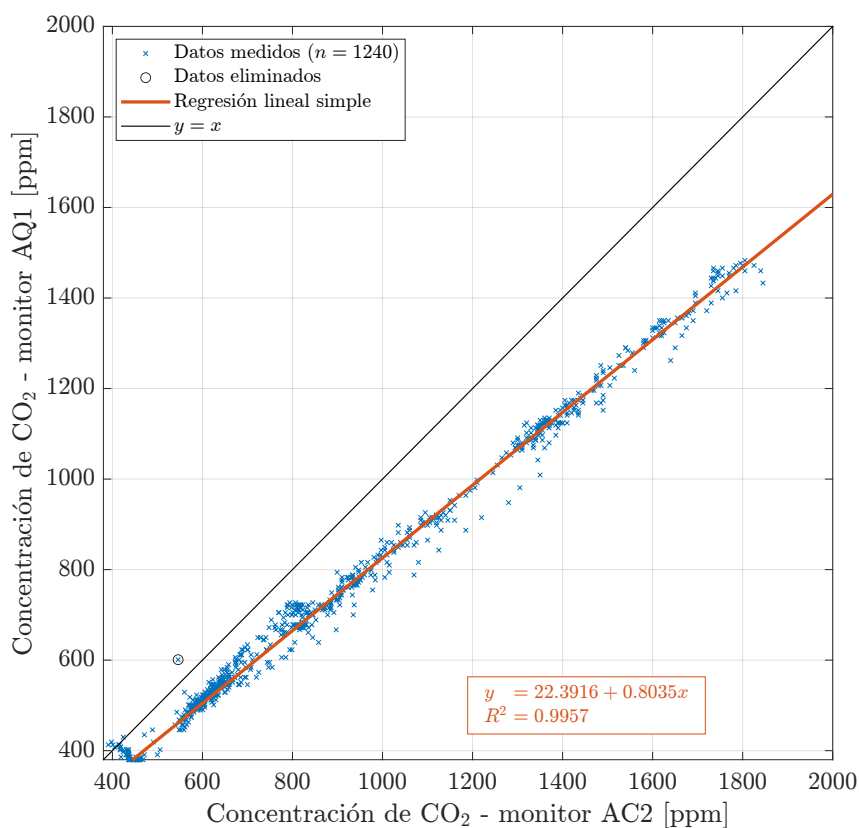
Para los monitores AC1 y AC2 se observaron lecturas con diferencias significativas respecto a los monitores AQ1 y AQ2 y entre sí. Dado que estos monitores no cuentan con detalles del fabricante sobre su calibración ni sobre su exactitud, se decidió corregirlos por las lecturas del monitor AQ1 de forma similar a lo detallado en la sección 4.7.1. De esta forma, el monitor AQ1 oficiará de referencia para todas las medidas de CO₂ del presente proyecto.

Antes de llevar a cabo la mencionada corrección, se ajustó el cero de los monitores de forma simultánea con aire exterior. Esto establece el punto de 400 ppm. Durante esta operación se constataron lecturas atmosféricas de aproximadamente 380 ppm. Asimismo, se observó que luego de establecido el cero, los monitores aún mantenían cierta diferencia en sus lecturas.

La figura 4.7.2 muestra los resultados de regresión lineal entre el monitor AQ1 y los monitores AC1 y AC2 para medidas tomadas entre el mediodía del martes 12 y el mediodía del miércoles 13 de octubre, en un ambiente controlado. Como las frecuencias de muestreo del monitor AQ1 (una medida por minuto) y de los monitores AC1 y AC2 (una medida cada cinco segundos) son diferentes, se interpolaron linealmente las medidas de los monitores AC1 y AC2 a una frecuencia minutal. Algunas medidas con mayor apartamiento en el diagrama de dispersión (7 para el monitor AC1 y 2 para el monitor AC2) fueron eliminadas por inspección gráfica. Se identifican dichos puntos en la figura 4.7.2, pero no fueron tomados en cuenta para la regresión lineal presentada. Asimismo, ciertos períodos breves con lecturas que presentaban notorias perturbaciones fueron eliminados.



(a) Resultados para el monitor AC1



(b) Resultados para el monitor AC2

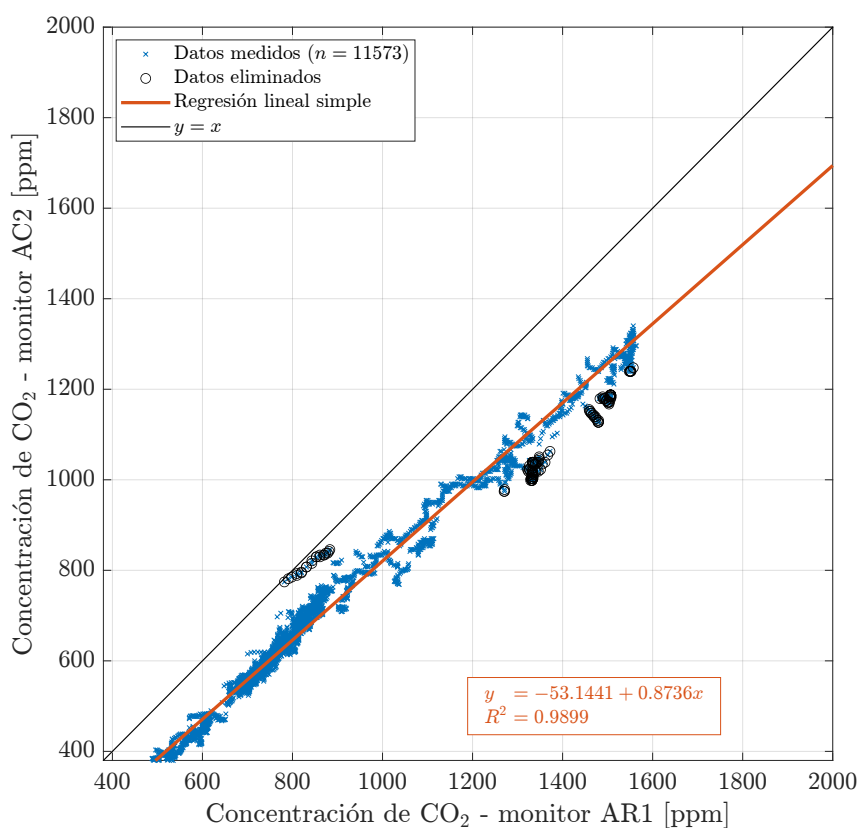
Figura 4.7.2 – Resultados de la regresión lineal entre las medidas comparadas de los monitores AC1 y AC2 con el monitor AQ1.

4.7.3 Monitores basados en sensores Winsen MH-Z19B

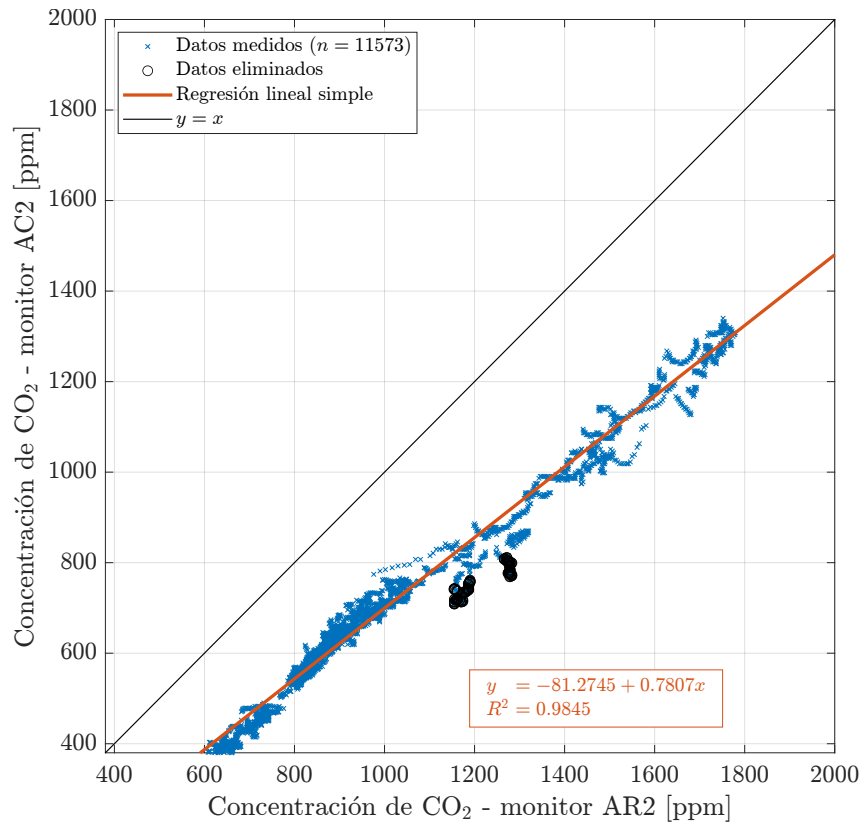
Al igual que en el caso de los monitores AirCO₂ntrol, los equipos Arduino presentaron un error sistemático notorio respecto a los demás monitores.

En primera instancia, y en el marco de otro proyecto, docentes del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) realizaron comparaciones entre las lecturas corregidas del monitor AQ2 y las indicaciones de los monitores AR1 y AR2. En base a sus resultados, propusieron corregir las indicaciones instrumentales mediante un factor multiplicativo de 1,05.

Posteriormente, los monitores debieron ser temporalmente desmontados y fueron rearmados con otros sensores del mismo modelo, por lo que fue necesario recalcular la corrección. En este caso, se propuso una corrección similar a las expuestas en las secciones anteriores, por regresión lineal simple. Sin embargo, debido a restricciones prácticas, no se pudo comparar los monitores AR1 y AR2 con el monitor AQ1 de referencia, por lo que se utilizó el monitor AC2 (corregido por el AQ1) en su lugar. La figura 4.7.3 muestra los resultados obtenidos.



(a) Resultados para el monitor AR1



(b) Resultados para el monitor AR2

Figura 4.7.3 – Resultados de la regresión lineal entre las medidas comparadas de los monitores AR1 y AR2 con el monitor AC2 (a su vez corregido por el AQ1). Se detalla la cantidad de medidas registradas para el monitor AC2, los puntos eliminados, la recta de regresión obtenida y el coeficiente de determinación.

En el caso de los monitores Arduino, se observó gráficamente un ligero quiebre de la nube de puntos en el entorno de las 1000 ppm. Además, a partir de dicha concentración aumenta la dispersión de las medidas. Se intentó un ajuste en dos tramos, pero no se observaron cambios significativos, por lo que, para simplificar, se prefirió mantener una única recta de corrección para todo el rango de medida.

4.7.4 Estación Met One E-Sampler 9800

La estación Met One presentó problemas de funcionamiento en la bomba de muestreo. Se constató que la misma no logró alcanzar el caudal de diseño estipulado por el fabricante. Esto afecta de manera significativa las medidas de material particulado, dado que modifica la operación del ciclón instalado en la toma de la estación.

En el marco del proyecto de extensión en el cual se insertó el presente proyecto de grado, participantes del DIA (IMFIA) realizaron una intercalibración entre este equipo y el monitor AQ3. Se obtuvo así la siguiente corrección para las lecturas de PM10.

$$PM10 = 0,65288 PM10_c + 26,407 \mu g/m^3 \quad (4.7.3)$$

donde PM10 designa la concentración corregida y PM10_c la indicación instrumental, ambas en $\mu g/m^3$.

Asimismo, se concluyó que en el entorno analizado existe una correlación significativa entre las concentraciones de PM10 y PM2.5, por lo que esta última se puede estimar como

$$\text{PM2.5} = 0,169\,65 \text{ PM10}_c + 8,064 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad (4.7.4)$$

donde PM2.5 designa la concentración estimada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La discusión en profundidad de las correlaciones presentadas trasciende los objetivos del presente proyecto. La incertidumbre asociada a las mismas afectará únicamente los resultados de material particulado exterior, cuyo interés es secundario frente a las concentraciones interiores. Asimismo, las medidas de material particulado tienen un fin descriptivo y no participan ni de la estimación de la tasa de ventilación ni del riesgo de contagio presentadas en el presente trabajo.

4.7.5 Anemómetros basados en sensores Modern Device Rev C y Rev P

En primer lugar, se tuvieron problemas prácticos con los anemómetros instalados. Se constató que en muchas ocasiones las ventanas y las cortinas fueron cerradas y los anemómetros quedaron en el medio. Esto, además de imposibilitar una medida adecuada de la velocidad, provocó que algunos sensores se rompieran.

En segundo lugar, se observó que las indicaciones de los anemómetros eran demasiado elevadas. Esto hizo sospechar que las curvas de calibración del fabricante pueden no ser adecuadas.

En tercer lugar, se observó que los anemómetros operan de forma omnidireccional, algo no detallado por el fabricante. Esto implica que permiten registrar el módulo de la velocidad de viento, pero no su dirección o una componente específica. Esto dificulta significativamente su uso para estimar el caudal de aire que atraviesa cierta abertura.

Debido a los problemas mencionados, se decidió no incluir resultados de medidas de velocidad de viento en el presente trabajo. No obstante, se intentó calibrar alguno de los anemómetros con la asistencia de personal del IMFIA. Debido a restricciones de tiempo, esto sólo fue posible para uno de los cinco módulos con anemómetros y los resultados pudieron ser procesados luego de terminada la campaña de medidas en la escuela.

Detalles de la calibración

Se eligió calibrar el módulo con un sensor Rev C y otro Rev P, a fin de poder comparar el desempeño de ambos.

La calibración fue realizada el 14 de setiembre de 2021 en las instalaciones del Canal de Pruebas Navales y Pesqueras del IMFIA. El mismo cuenta con un carro dinamométrico, sobre el cual se pueden realizar calibraciones para bajas velocidades¹⁰. Se instaló la caja con los anemómetros sobre un brazo metálico al frente del carro. La figura 4.7.4 muestra fotografías del canal y del anemómetro.

¹⁰Limitado por el motor que mueve el carro y por la longitud del canal (70 m) (IMFIA, s.f.)



(a) Vista hacia el frente



(b) Vista hacia el fondo



(c) Brazo metálico



(d) Fijación del anemómetro

Figura 4.7.4 – Fotografías tomadas en el Canal de Pruebas Navales y Pesqueras del IMFIA durante la calibración de los anemómetros. Se muestran vistas hacia el frente y el fondo del canal, el brazo metálico del carro y la instalación del anemómetro sobre éste.

Se sellaron todas las aberturas hacia el exterior con polifón y se cerraron las puertas de acceso, de forma de mantener un ambiente estanco. Así, la velocidad de referencia queda dada por la velocidad del carro. La calibración fue realizada para cinco velocidades diferentes, entre 0,085 m/s y 2,5 m/s.

En el anexo B.3 se incluye el informe de calibración realizado por personal del DIA en el contexto del proyecto de extensión. El mismo muestra que si bien las indicaciones de los sensores Rev C y Rev P presentan apartamientos muy significativos respecto de las velocidades de referencia, la relación entre la indicación instrumental y la velocidad de referencia es lineal, con coeficientes de determinación altos¹¹. Esto es compatible con la observación de indicaciones

¹¹ $R^2 = 0,99$ para el sensor Rev C y $R^2 = 0,999$ para el Rev P.

demasiado altas. Asimismo, el informe muestra que los módulos construidos son potencialmente útiles y permiten medidas con incertidumbres razonables.

La calibración realizada comparó la indicación instrumental de los sensores con una velocidad de referencia. No obstante, en realidad el programa de adquisición de datos de los sensores procesa dicha indicación instrumental a partir del voltaje y de la temperatura registradas en el sensor. A futuro podría ser interesante intentar una calibración utilizando directamente estos parámetros. No obstante, para ello sería necesario investigar su relación funcional. Como alternativa, podría repetirse la calibración realizada bajo condiciones ambientales diferentes, con el fin de analizar qué tan robustos son los resultados que se obtuvieron.

4.8 Otras instancias de medición

Además de la medición continua a largo plazo en el interior del salón 2 y en el exterior de la escuela, se llevaron a cabo instancias de medida de corta duración en condiciones más controladas. Por un lado, se realizaron dos instancias de medida de CO_2 con generación artificial en el salón 2, y por otro lado se midió la concentración de CO_2 durante el turno vespertino con registro de la operación de las aberturas en el salón 11. Estas pruebas, que serán presentadas en detalle en los capítulos 6 y 5, respectivamente, contaron con una mayor cantidad de puntos de medida.

4.9 Otros comentarios

Se destaca que, en general, los instrumentos utilizados presentan buenas características metrológicas. En particular la exactitud declarada por los fabricantes de todos los sensores de CO_2 se encuentra dentro de las recomendaciones de Minguillón *et al.* (2020). Por otra parte, si bien algunos instrumentos no pudieron ser calibrados, sus lecturas se consideran suficientes para un análisis descriptivo.

Por otro lado, se desea señalar que incursionar en el armado y uso de sensores de bajo costo es una experiencia valiosa en sí misma. Es particularmente relevante para otros proyectos de investigación sobre calidad de aire alineados con los intereses del IMFIA, tanto presentes como futuros. Este tipo de sensores podría permitir un despliegue mayor, cubriendo de forma simultánea más ambientes con una mayor densidad de puntos de medida. Asimismo, se podrían relevar otros contaminantes. Sería deseable profundizar en la calibración de este tipo de sensores. Empero, esto escapa a los objetivos del presente proyecto.

Capítulo 5

Análisis descriptivo de los resultados

The joy of engineering is to find a straight line on a double logarithmic diagram.

— Thomas Koenig

5.1 Introducción

El presente capítulo presenta un análisis descriptivo de las medidas de campo obtenidas. En el apéndice A.6 se encuentra disponible un calendario que detalla los días para los cuales se cuenta con medidas para cada uno de los instrumentos utilizados.

5.2 Medidas de CO₂

Se describen a continuación todas las medidas de CO₂ realizadas.

5.2.1 Medidas en el salón 2

En el interior del salón 2 se registraron medidas diarias, durante su operativa normal entre julio y diciembre, y en instancias particulares, durante pruebas controladas.

Medidas diarias

La concentración de CO₂ fue registrada diariamente al frente y al fondo del salón, con los monitores AQ1 y AQ2, respectivamente.

Las medidas al fondo del salón fueron registradas con menor frecuencia que al frente del salón, dada la menor disponibilidad de uso del monitor AQ2. Asimismo, dicha posición fue elegida para evaluar el grado de uniformidad de la concentración de CO₂ en el salón por comparación con las medidas al frente. Sin embargo, la posición del monitor AQ2 no cumple con algunas de las recomendaciones expuestas en la sección 4.6.1 del capítulo 4. Por lo tanto, a continuación se presenta únicamente un resumen descriptivo de los datos obtenidos al frente del salón. Los resultados del monitor AQ2 serán presentados más adelante, en la sección 6.4.3 del capítulo 6, cuando se discuta la hipótesis de mezcla perfecta.

En primer lugar, se construyeron diagramas de caja¹ para la media diaria de la concentración de CO₂ durante las horas de ocupación, separando los turnos matutino y vespertino. Se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 5.2.1.

¹Todos los diagramas de caja del presente trabajo representan el rango intercuartílico y la mediana en la caja. Los bigotes representan los valores no atípicos máximo y mínimo. Un valor es considerado atípico si se encuentra a más de 1,5 veces el rango intercuartílico de los cuartiles inferior o superior.

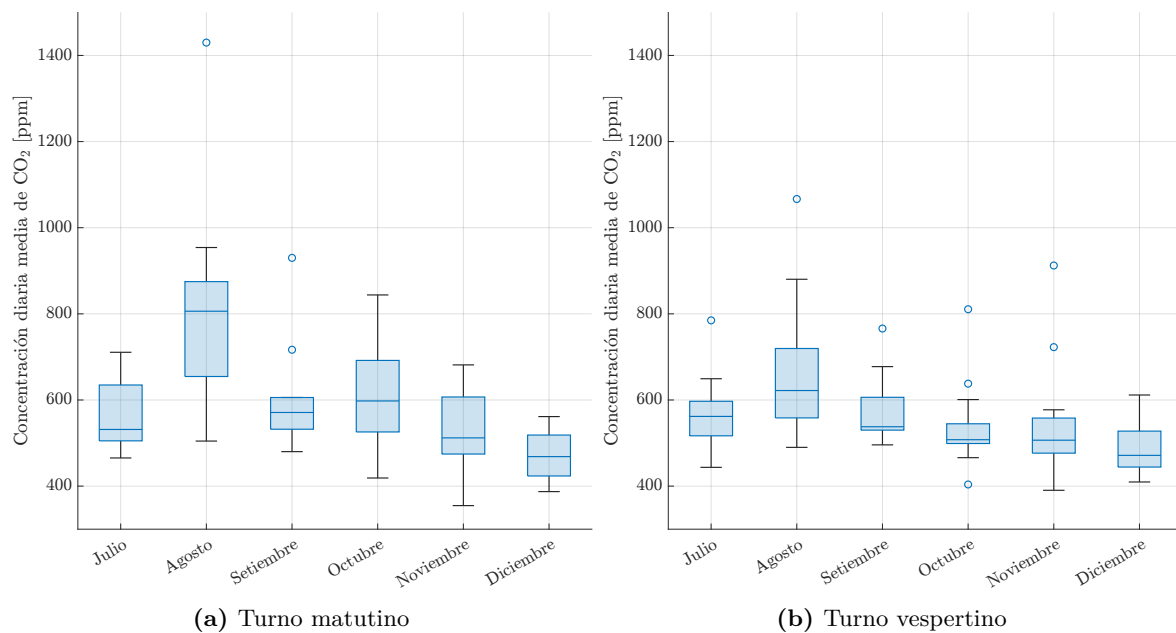


Figura 5.2.1 – Diagrama de caja mensual de la concentración media diaria de CO₂ registrada por el monitor AQ1 en cada turno.

Como puede observarse, los resultados son similares para ambos turnos. La evolución temporal es similar, con un leve pero sostenido decrecimiento de la concentración media diaria a partir de agosto, a excepción del crecimiento entre setiembre y octubre para el turno matutino. En términos cuantitativos, las concentraciones observadas para un mismo mes fueron un poco mayores en el turno matutino. Asimismo, éste también presentó una mayor dispersión en sus resultados.

Por otra parte, se computó una curva media diaria de concentración de CO₂. Para ello, se calculó el valor medio registrado en intervalos de 5 minutos durante toda la campaña de medidas. Esto es, para un cierto intervalo temporal diario de 5 minutos, se promediaron todas las medidas realizadas en diferentes días. Se redujo la resolución temporal desde la frecuencia de muestreo de una medida por minuto para tomar en cuenta posibles errores introducidos por el reloj del monitor AQ1. Se obtuvo así la figura 5.2.2.

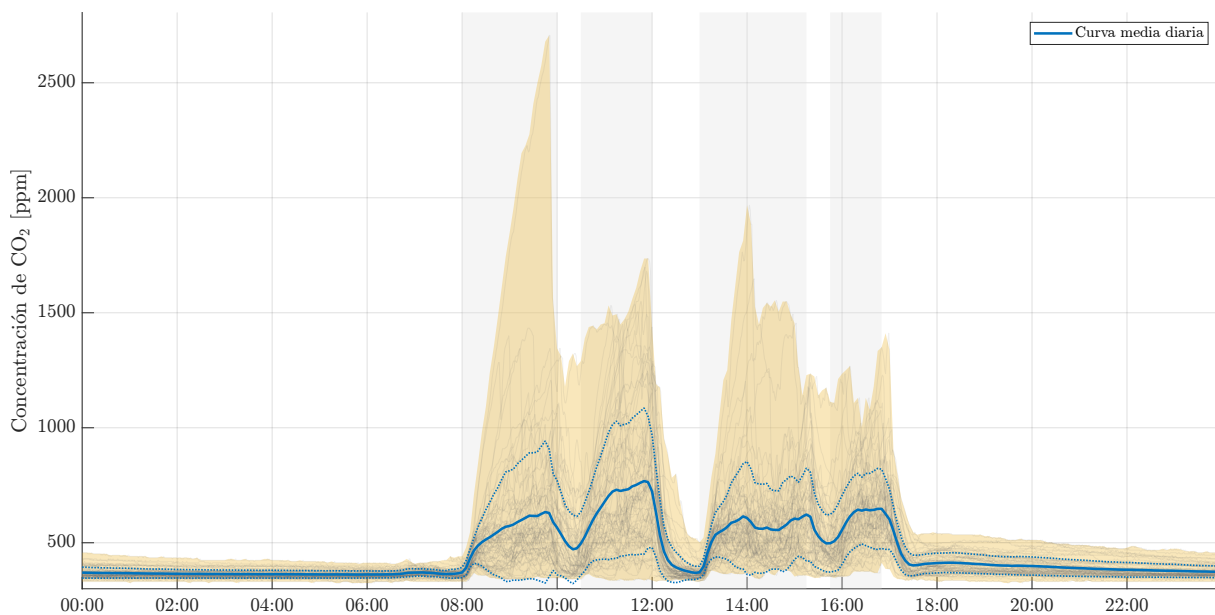


Figura 5.2.2 – Curva media diaria de CO₂ al frente del salón. El área amarilla denota las concentraciones mínima y máxima registradas para cada instante y el área gris denota los períodos de ocupación. La curva azul continua denota el valor medio, las curvas discontinuas denotan una distancia de un desvío estándar (dentro de cada intervalo de 5 minutos) al valor medio y las curvas grises muestran las medidas crudas promediadas.

En la figura 5.2.2 se observa un andamiento razonable. Al iniciar y finalizar los períodos de ocupación la concentración aumenta y disminuye rápidamente, respectivamente. Se confirma la observación realizada a partir de la figura 5.2.1 de que la concentración de CO₂ alcanza valores ligeramente superiores durante el turno matutino. Asimismo, el andamiento matutino es levemente diferente al vespertino. La curva media del primero no muestra que se alcance un equilibrio bien establecido, mientras que en la tarde la concentración de CO₂ parece más estabilizada.

Por otra parte, se observa que la concentración media de CO₂ alcanza el valor atmosférico al mediodía, durante el cambio de turno². Sin embargo, durante los recreos el descenso de la concentración no es tan marcado y no alcanza valores tan bajos. Esto parecería indicar que los niveles de ventilación son mayores durante el cambio de turno.

Por último, se exploró la relación entre la concentración de CO₂ y la temperatura en término de medias diarias durante las horas de ocupación para cada turno. Se obtuvo así el diagrama de dispersión mostrado en la figura 5.2.3, donde se utilizaron los registros de temperatura de la estación meteorológica del techo, que serán descritos en la sección 5.4.2.

²Esto será particularmente relevante para el modelo de riesgo basado en la concentración de CO₂ a ser presentado en el capítulo 7, puesto que determina la independencia de las poblaciones matutina y vespertina.

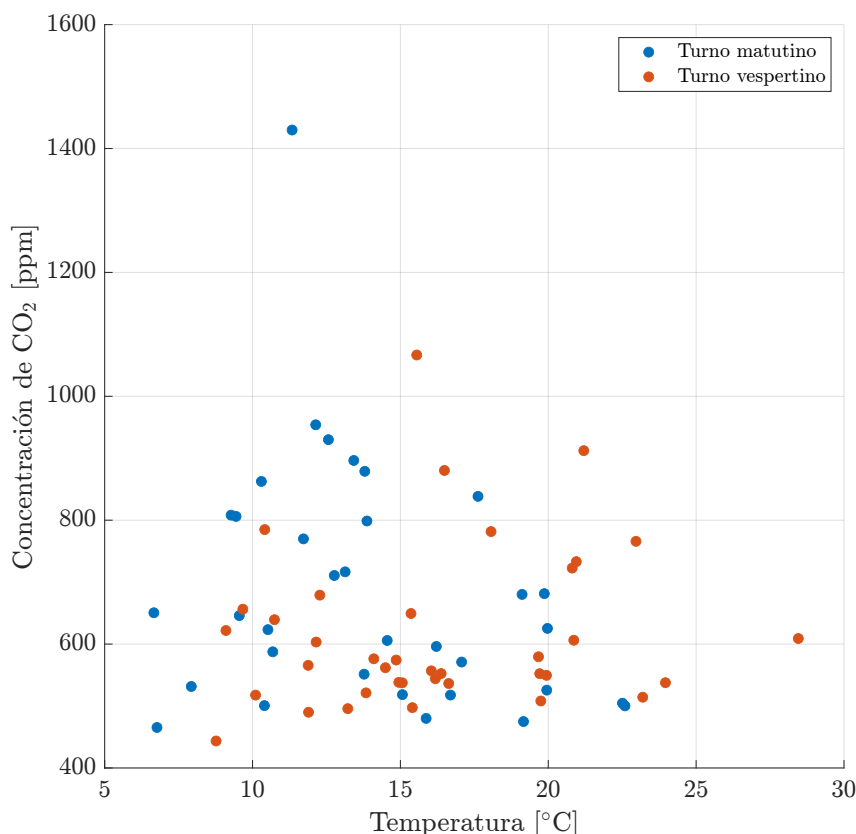


Figura 5.2.3 – Diagrama de dispersión de la concentración de CO₂ (monitor AQ1) en función de la temperatura (estación meteorológica). Se muestran valores medios diarios para cada turno.

Se observa que no hay una relación clara entre la temperatura y la concentración de CO₂. La concentración parece crecer levemente al bajar la temperatura hasta los 10 °C, pero luego baja un poco. Además, la concentración de CO₂ es reducida para temperaturas extremas. Por lo tanto, los resultados no parecen concluyentes respecto al efecto de la temperatura. Sería deseable tener una muestra mayor.

Medidas en pruebas controladas

Se realizaron varias pruebas controladas en el salón 2. Su descripción y el análisis de los resultados obtenidos serán presentados más adelante, en el capítulo 6.

5.2.2 Medidas en el pasillo

Entre el 21 de julio y el 5 de agosto se realizaron medidas en el pasillo principal del primer piso, en una posición cercana a la banderola del salón 2. Estas medidas fueron de carácter exploratorio al principio de la campaña, con el fin de evaluar si el pasillo presentaba concentraciones elevadas de CO₂. Esto fue importante para planificar la estimación de la tasa de ventilación³ presentada en el capítulo 6.

A modo de ejemplo, se incluyen a continuación la comparación entre la concentración de CO₂ al frente del salón y en el pasillo para los días 26, 29 y 30 de julio.

³Como se verá más adelante, se decidió mantener la concentración de entrada del aire como un parámetro implícito, debido a la alta variabilidad de la concentración en el pasillo.

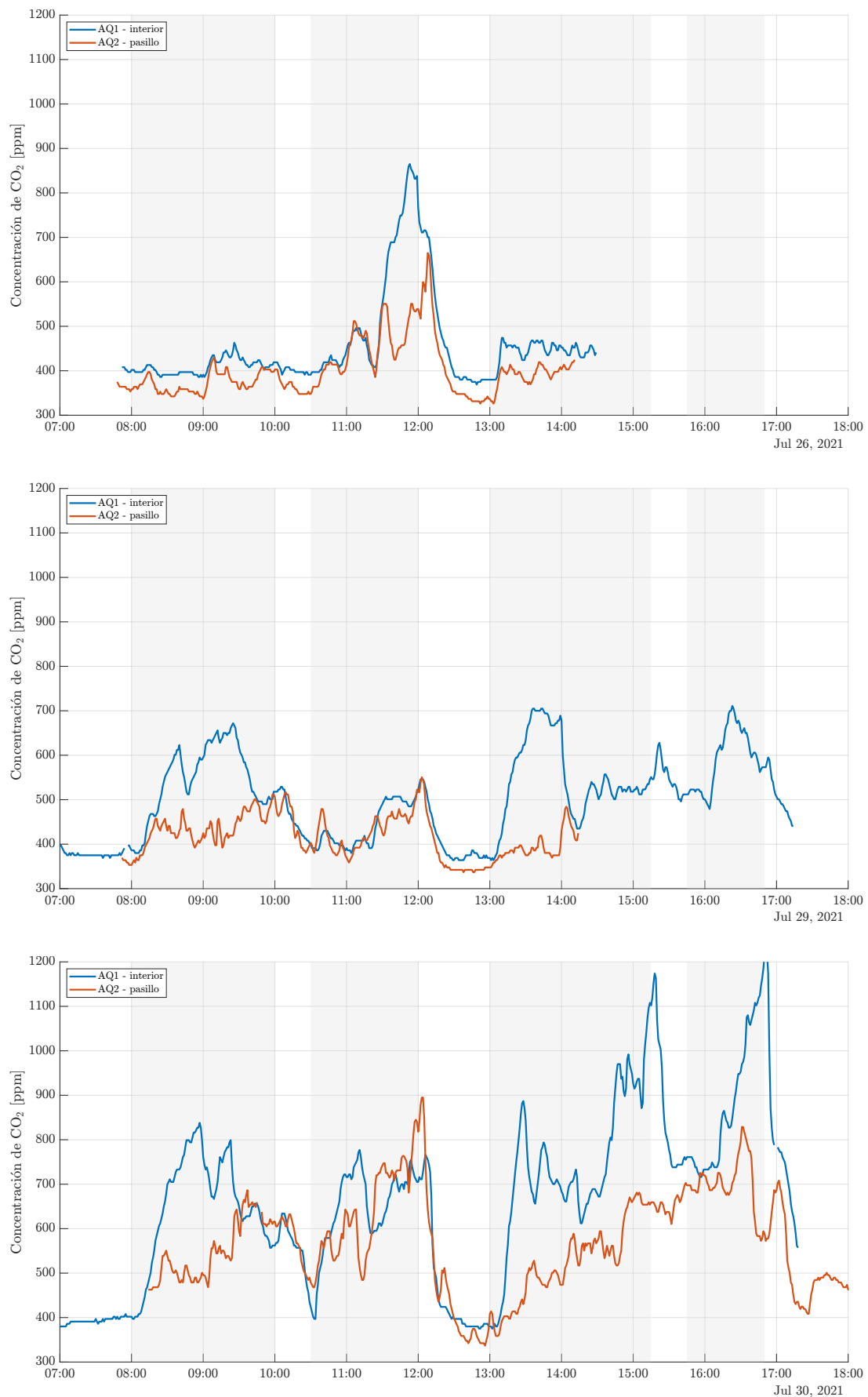


Figura 5.2.4 – Concentración de CO₂ en el interior del salón y en el pasillo para los días 26, 29 y 30 de julio.

Se observa que en general la concentración de CO₂ en el pasillo es más baja que en el interior del salón, aunque en algunos casos es similar o incluso superior. Asimismo, la concentración del pasillo es en varias ocasiones superior a la concentración atmosférica.

5.2.3 Medidas en el salón 11

De forma particular, se realizó una prueba el día 3 de diciembre en el salón 11 de la escuela. Éste se encuentra en el segundo piso, sobre la fachada del patio, como se puede apreciar en el plano E2 del apéndice A.2.

El salón tiene una puerta en la esquina noreste, cuatro ventanas hacia el patio (tipo banderola de eje horizontal) y una banderola hacia el pasillo⁴. Asimismo, tiene 6 m de ancho, 8 m de largo y 3,5 m de altura, y es ocupado durante el turno vespertino por 30 alumnos de quinto año de escuela. Se tiene entonces que la geometría y la ocupación de los salones 2 y 11 son muy similares.

La prueba realizada consistió en medir la concentración de CO₂ de forma simultánea en cuatro puntos del salón 11 durante el turno vespertino, utilizando los monitores AC1, AC2, AR1 y AR2 descritos en el capítulo 4. Se le pidió a los ocupantes que registraran el cierre y la apertura de todas las aberturas durante el turno y que generaran un registro escrito.

El principal objetivo fue asociar el andamio de los registros de CO₂ a configuraciones de ventilación conocidas. Además, las medidas obtenidas permitieron evaluar el desempeño de los monitores de CO₂ contruidos con sensores de bajo costo.

Se presentan a continuación algunos detalles de las pruebas y un análisis somero de los resultados obtenidos.

⁴Por más detalles sobre la ubicación y las dimensiones de las aberturas consultar el apéndice A.2.

Posición de los monitores

Se colocaron los monitores en las siguientes posiciones, mostradas en la figura 5.2.5:

- **Monitor AC1:** ubicado en el centro del salón.
- **Monitor AC2:** ubicado al frente del salón, a la izquierda del pizarrón (hacia el oeste).
- **Monitor AR1:** ubicado en la esquina sureste del salón (al fondo, hacia el pasillo).
- **Monitor AR2:** ubicado en la esquina suroeste del salón (al fondo, hacia el patio).

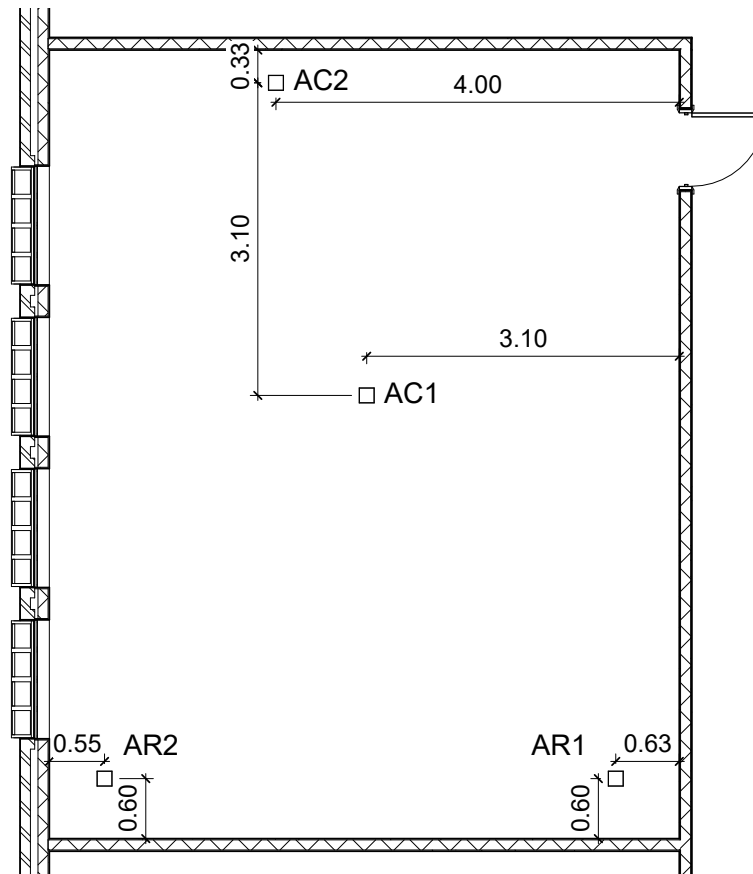


Figura 5.2.5 – Definición de las posiciones de los sensores de CO₂ durante la prueba en el salón 11. Las cotas señaladas se encuentran en metros.

La figura 5.2.6 muestra fotografías del frente y del fondo del salón durante la prueba descrita.



(a) Frente del salón



(b) Fondo del salón

Figura 5.2.6 – Fotografías del salón 11 durante la prueba realizada, con los sensores instalados.

Resultados

La tabla 5.2.1 resume la cronología de eventos registrada por los ocupantes del salón.

CRONOLOGÍA DE EVENTOS	
Hora	Evento
13:15	Apertura de puerta y ventanas.
14:45	Salida al recreo. Cierre de puerta y ventanas.
15:40	Reingreso de alumnos. Puerta abierta y ventanas cerradas.
16:00	Salida de alumnos. Apertura de puerta y ventanas.

Tabla 5.2.1 – Cronología de eventos durante las medidas en el salón 11.

Por otra parte, la figura 5.2.7 muestra la concentración de CO₂ registrada por cada instrumento en función del tiempo.

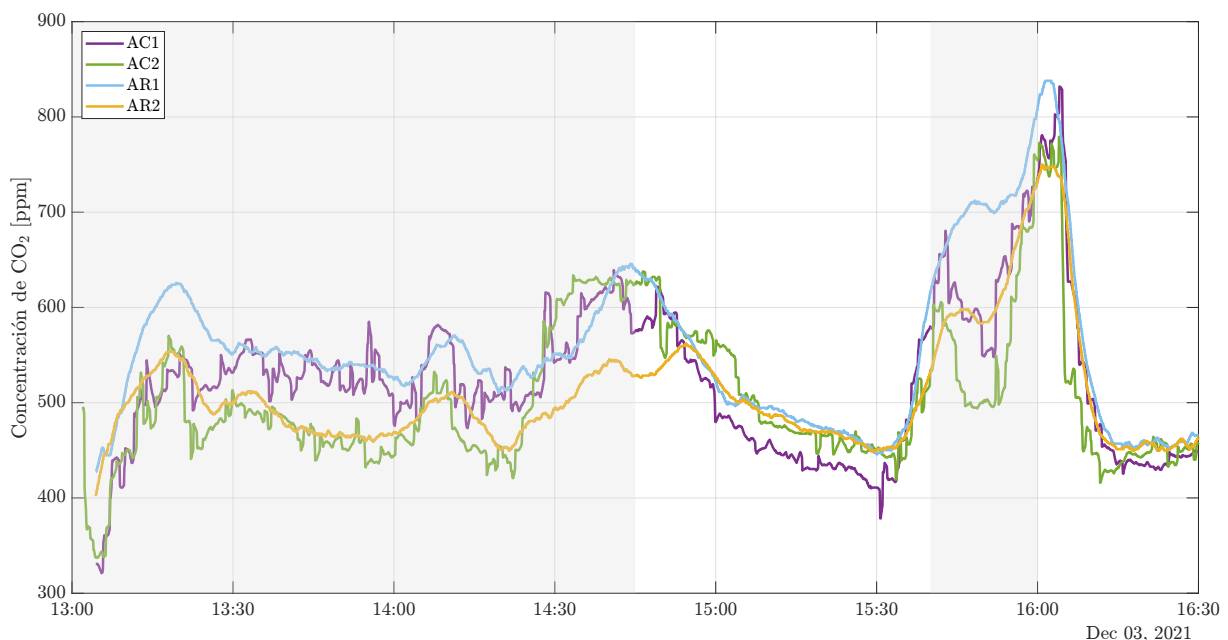


Figura 5.2.7 – Resultados de concentración de CO₂ en función del tiempo en las cuatro posiciones de medida del salón 11. El fondo sombreado indica los períodos en lo que el salón estuvo ocupado.

Al comienzo del turno se observa un rápido aumento de la concentración de CO₂, que se estabiliza luego de aproximadamente 15 minutos. A continuación, durante el recreo, la concentración baja, alcanzando entre 400 ppm y 450 ppm. Con el reingreso de los alumnos la concentración vuelve a subir y alcanza valores aún más altos, lo cual es compatible con que las ventanas se encontraran cerradas. Por último, se observa que el decrecimiento de la concentración al final del turno, con la puerta y las ventanas abiertas, es mucho más rápido que en el recreo, con todas las aberturas cerradas.

Durante el primer período, en el cual las ventanas estuvieron abiertas, los monitores AC2 y AR2 presentaron concentraciones similares y más bajas que las de los monitores AC1 y AR1, que también fueron similares entre sí. Esto es razonable, dado que los monitores AC2 y AR2 se encuentran más cerca de las ventanas. De todas formas, las diferencias de concentración en general no superan las 100 ppm. Las medidas en todos los puntos son relativamente bajas, en el entorno de las 500 ppm.

Por otra parte, durante el recreo la concentración de CO₂ se uniformiza, con diferencias de aproximadamente 50 ppm. Dichas diferencias son menores que la incertidumbre de los sensores

AR1 y AR2, por lo que no son significativas.

Por último, durante el período en el que las ventanas estuvieron cerradas y la puerta abierta se observaron diferencias mayores. El monitor AR1 presenta lecturas significativamente mayores que el resto. Esto parece indicar que la esquina sureste del salón, que se encuentra alejada de todas las aberturas, presenta un estancamiento significativo en ausencia de ventilación cruzada.

La prueba realizada permite concluir que el andamio de la concentración de CO_2 responde de forma apreciable a la operación de las aberturas y al régimen de ventilación (cruzado o unilateral). Además, se concluyó que el desempeño de los equipos AR1 y AR2 es muy bueno, con resultados similares a los obtenidos con los equipos comerciales AC1 y AC2. Estos resultados son alentadores para profundizar más en el uso de sensores de bajo costo en futuros proyectos.

5.3 Medidas de material particulado

Se computaron diagramas de caja mensuales para las horas de ocupación nominal para las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} medidas⁵ en el interior del salón 2 y en el exterior, sobre el patio. Se obtuvieron así las figuras 5.3.1 y 5.3.2.

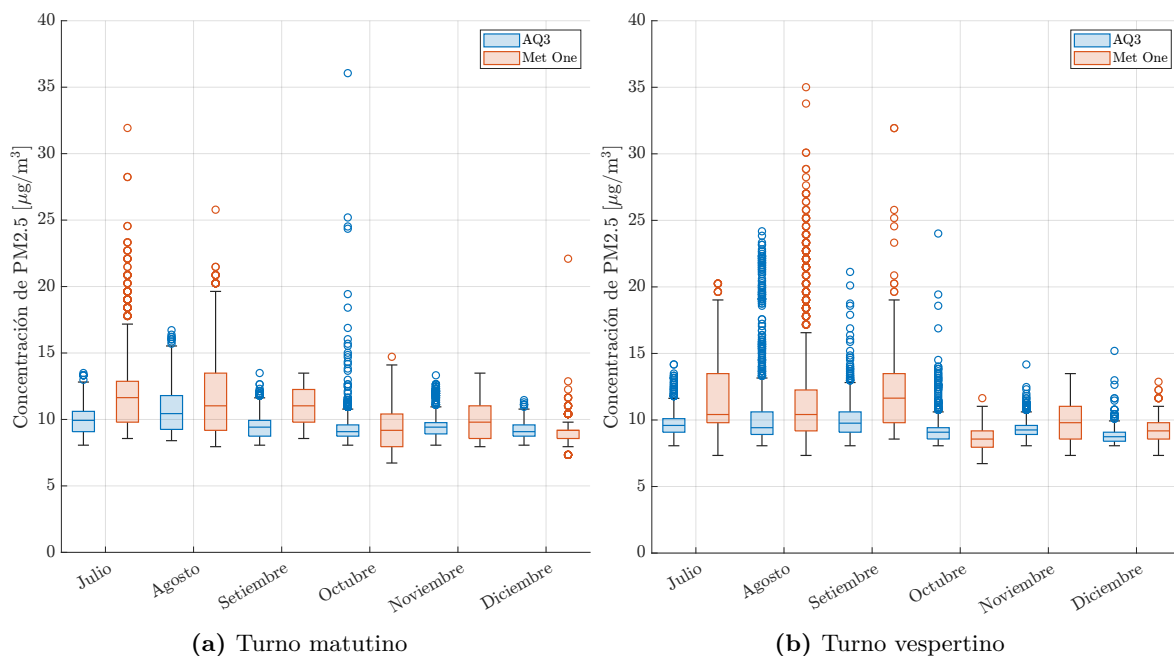


Figura 5.3.1 – Diagrama de caja mensual de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ interior (registrada por el monitor AQ3) y exterior (estimada a partir de las medidas de PM_{10} de la estación Met One) durante las horas de ocupación nominal.

⁵Las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ exteriores son en realidad estimaciones obtenidas a partir de las concentraciones de PM_{10} medidas, de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.7.1 del capítulo 4.

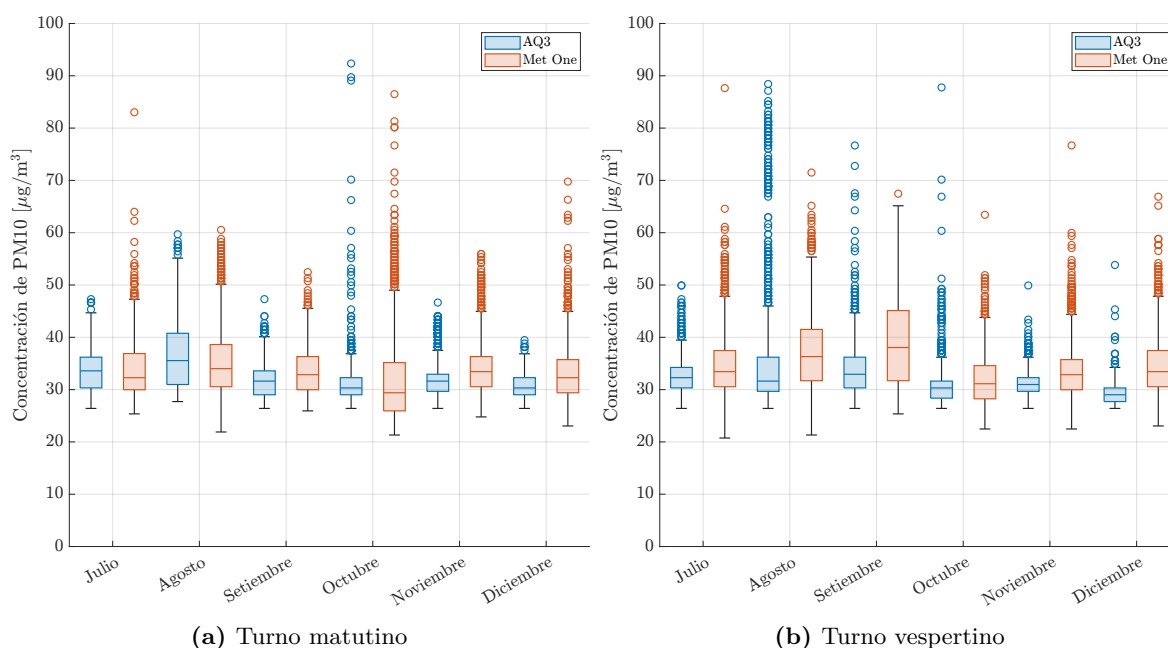


Figura 5.3.2 – Diagrama de caja mensual de la concentración de PM10 interior (registrada por el monitor AQ3) y exterior (registrada por la estación Met One) durante las horas de ocupación nominal.

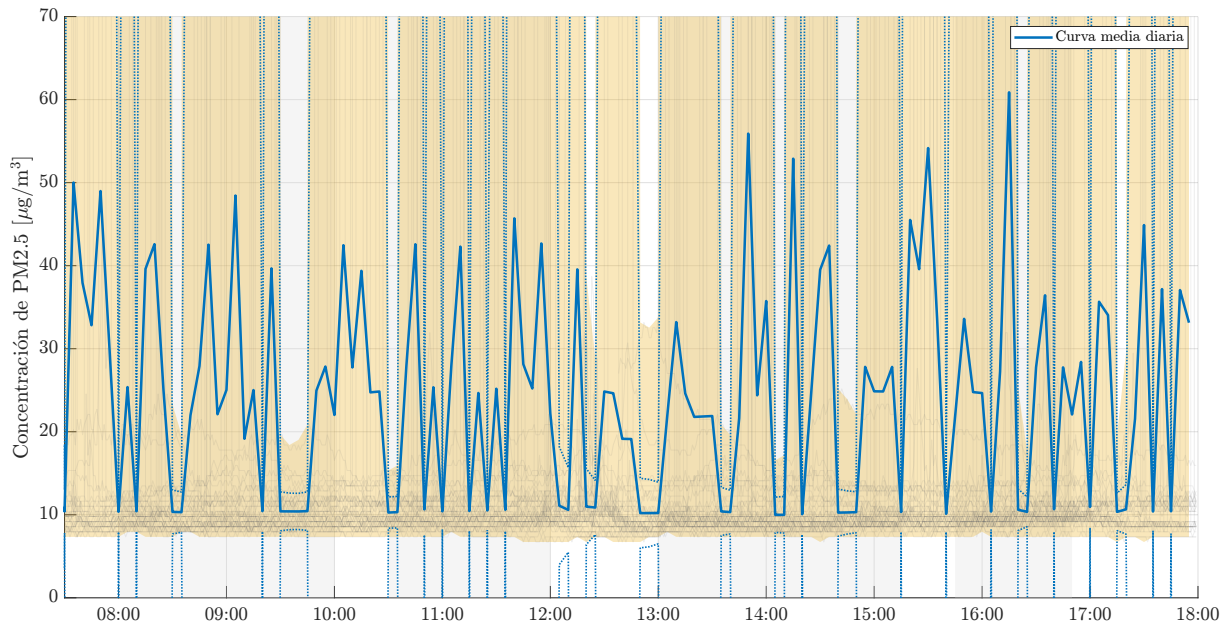
Se observa que en general los resultados obtenidos son muy similares para el interior y para el exterior. Los resultados de la estación Met One muestran concentraciones un poco mayores y mayor dispersión que los del monitor AQ3. Para PM2.5 esto parece darse con mayor frecuencia en los meses invernales, mientras que los resultados de PM10 son más uniformes en el tiempo.

Se observa que durante las horas de ocupación el material particulado alcanza concentraciones razonables. Se cumple con la normativa uruguaya para PM2.5, tanto con el objetivo diario ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como el anual ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Además, se cumple con los objetivos que regirán a partir del año 2024. Para PM10 se cumple únicamente con el objetivo diario de dicha normativa ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), no con el anual ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). También se cumple con el objetivo diario que regirá a partir del año 2024.

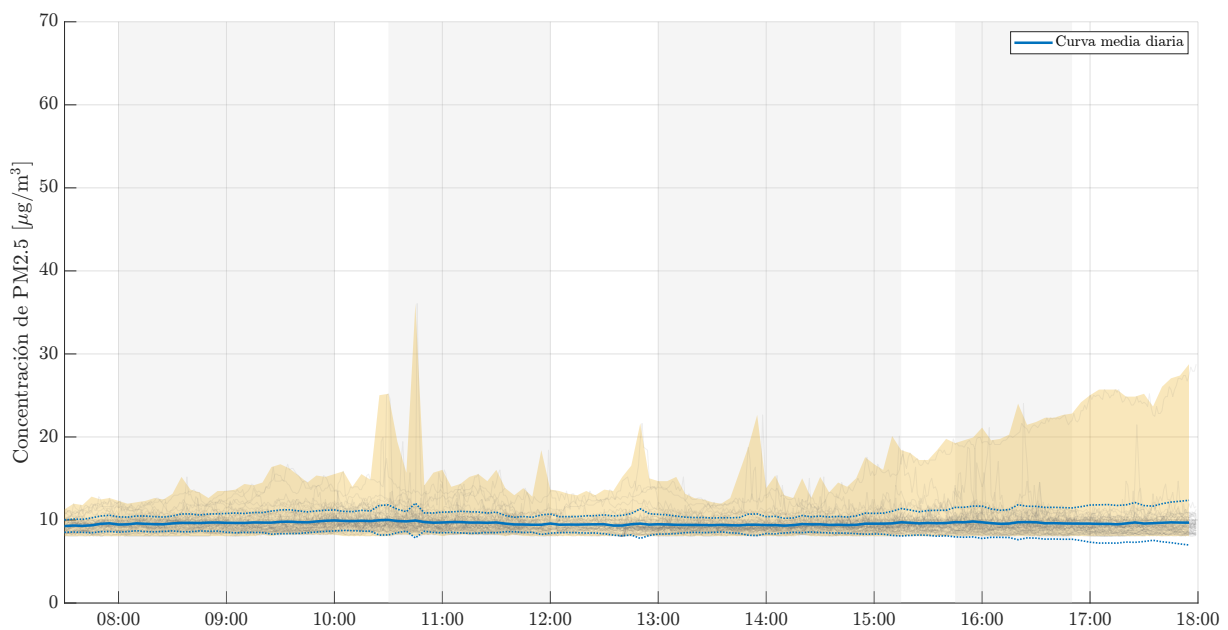
La concentración de material particulado también cumple con los límites exigidos por la Unión Europea. En cuanto a la normativa estadounidense, el aire interior cumple con todos los límites estipulados, mientras que el exterior supera el límite anual para PM2.5.

Es curioso que en general la concentración media de material particulado exterior sea mayor que la interior durante las horas de ocupación. Esto puede denotar una baja tasa de ventilación, con sedimentación del material particulado en el interior y poca entrada de material particulado exterior.

Por otra parte, se computaron curvas medias diarias para la concentración interior y exterior de PM2.5 y PM10, a fin de poder evaluar el andamio temporal y analizar los datos fuera de las horas de ocupación nominal (entradas y salidas, recreo y hora entre turnos). Se obtuvieron las figuras 5.3.3 y 5.3.4, que fueron construidas en la misma forma que la descrita para la concentración de CO_2 en la sección 5.2.1 del presente capítulo.

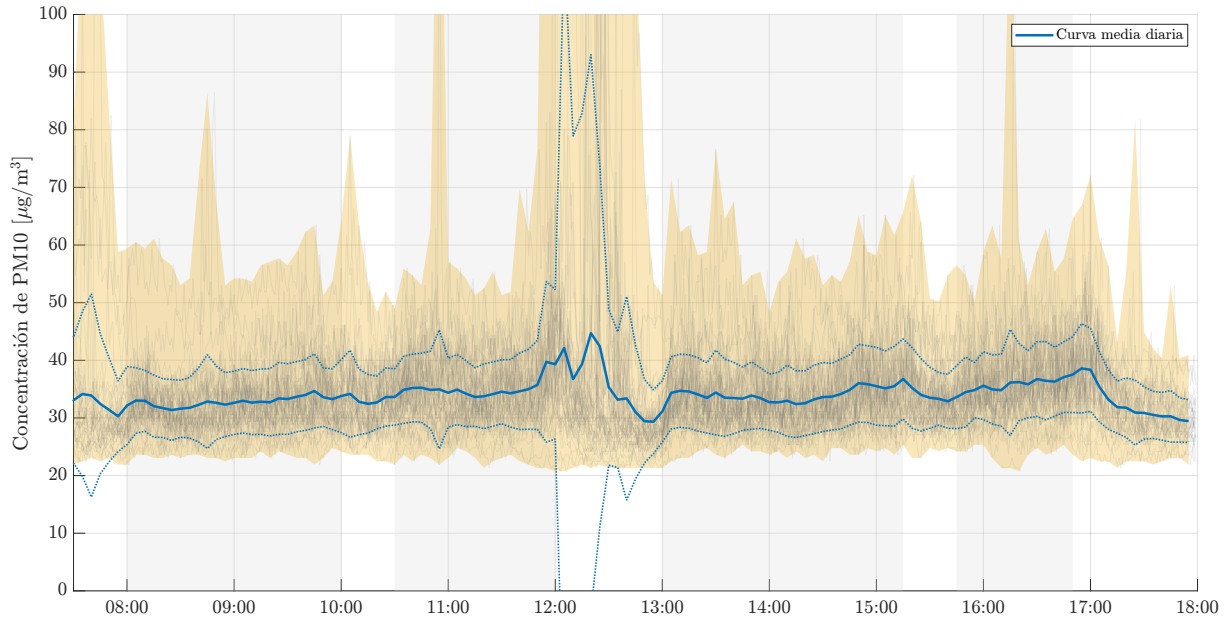


(a) Monitor AQ3 (interior)

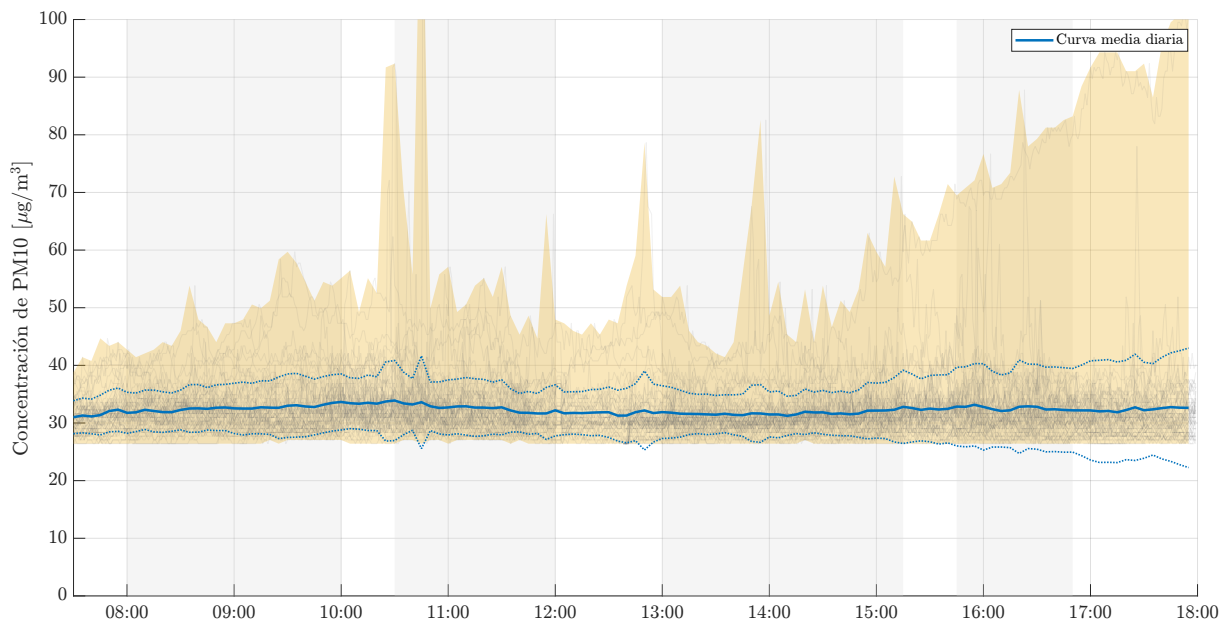


(b) Estación Met One (exterior)

Figura 5.3.3 – Curva media diaria de la concentración de PM2.5 interior (registrada por el monitor AQ3) y exterior (estimada a partir de las medidas de PM10 de la estación Met One). Se muestran la curva media y la distancia de un desvío estándar a la misma, así como los datos diarios, los períodos de ocupación y la franja de valores máximos y mínimos.



(a) Monitor AQ3 (interior)



(b) Estación Met One (exterior)

Figura 5.3.4 – Curva media diaria de la concentración de PM10 interior (registrada por el monitor AQ3) y exterior (registrada por la estación Met One). Se muestran la curva media y la distancia de un desvío estándar a la misma, así como los datos diarios, los períodos de ocupación y la franja de valores máximos y mínimos.

Se observa que la curva media de concentración interior de PM_{2.5} presenta oscilaciones temporales importantes, lo que hace que el desvío estándar sea elevado. En cambio, la concentración exterior estimada presenta una baja variación temporal. Esto último podría deberse en parte a la correlación utilizada para su estimación.

En cuanto a la concentración de PM₁₀, se observan resultados medios similares para el interior y para el exterior. Los resultados del interior presentan una dispersión un poco mayor que los del exterior.

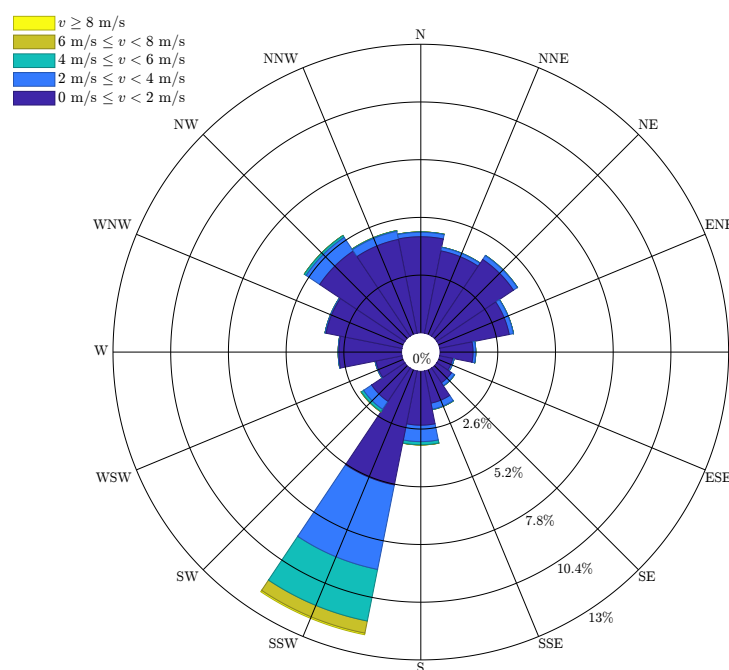
Por otra parte, es curioso que para varios días de medida la concentración de PM₁₀ interior presenta importantes picos durante la primera mitad del cambio de turno, alcanzando valores muy altos, de hasta $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (fuera de escala). Este fenómeno también se observa antes del comienzo del turno matutino, entre las 7:00 y las 8:00. Este comportamiento podría deberse a la limpieza del salón, que ocurre justamente en dichos momentos. Podría haber una gran resuspensión de material particulado, a la vez que ciertos productos de limpieza podrían generar más material particulado. En particular, la hipótesis de resuspensión parece razonable dado que el fenómeno se observa principalmente para PM₁₀, que tiene una mayor velocidad de sedimentación que el PM_{2.5} (Gensdarmes, 2015).

5.4 Otras medidas

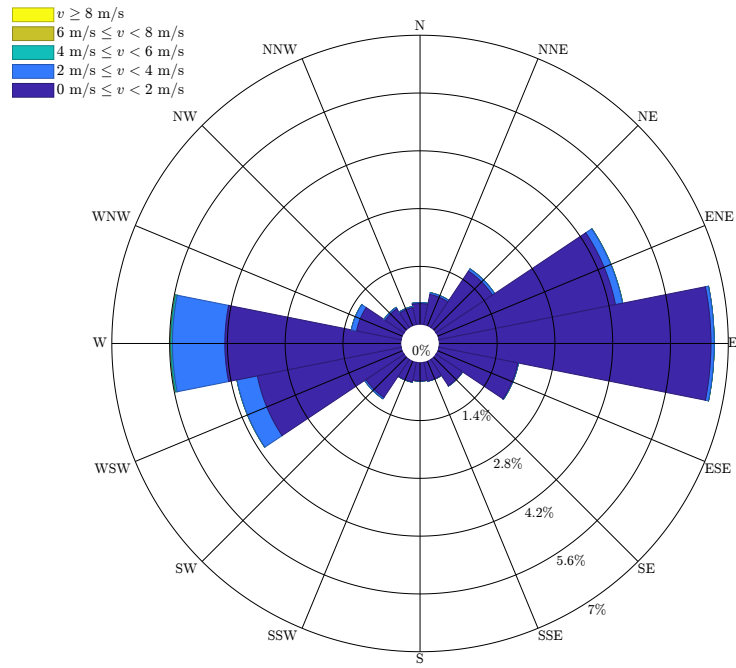
Se presentan a continuación otras medidas realizadas en el exterior de la escuela. Los resultados presentados en esta sección no se encuentran filtrados por hora de ocupación (abarcan la totalidad de los datos).

5.4.1 Dirección y velocidad de viento

Se generaron rosas de viento a partir de las medidas registradas por la estación meteorológica del techo y de la estación Met One sobre el patio. Los resultados fueron agrupados sobre una rosa de dieciséis rumbos, de forma de poder comparar las medidas de ambos instrumentos. Se obtuvo así la figura 5.4.1.



(a) Estación meteorológica



(b) Estación Met One

Figura 5.4.1 – Rosas de viento para la estación meteorológica del techo y para la estación Met One. Generado en base al código de Pereira (2022).

La diferencia entre las rosas de viento parece reflejar la perturbación que el edificio genera sobre la velocidad del viento. Esto puede ser indicativo de la importancia de tener una medida local para caracterizar el flujo en las aberturas.

5.4.2 Temperatura

Se construyó un diagrama de caja estratificado por mes para los registros de temperatura de la estación meteorológica del techo y de la estación Met One sobre el patio. La figura 5.4.2 muestra los resultados obtenidos.

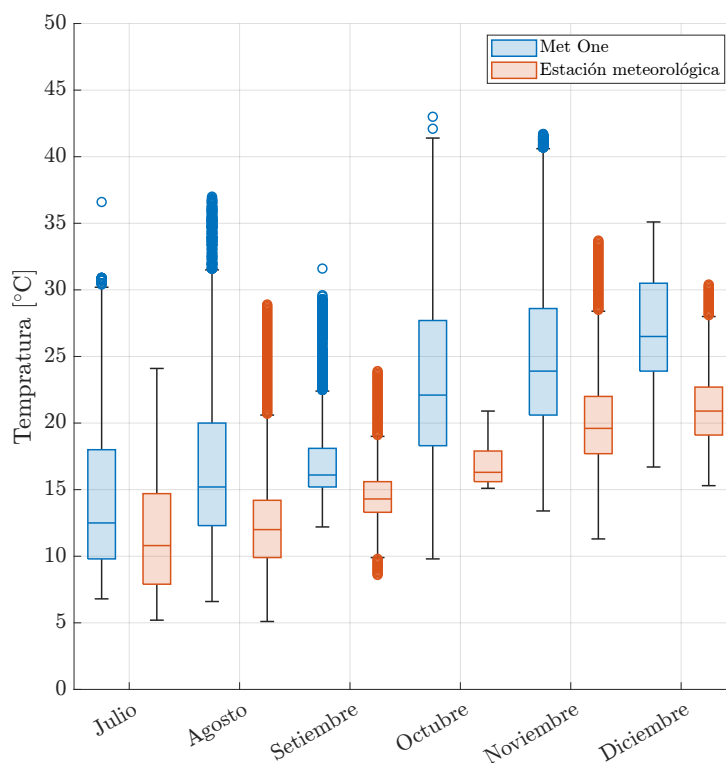


Figura 5.4.2 – Temperatura mensual registrada por la estación meteorológica del techo y por la estación Met One.

Como se puede observar en la figura 5.4.2, existe una diferencia significativa entre las medidas de ambas estaciones. En particular, las medidas de la estación Met One alcanzan frecuentemente valores sorprendentemente altos. Para evaluar estas diferencias se consultó el registro histórico de temperaturas para el año 2021 de la estación del Aeropuerto Internacional de Carrasco. La figura 5.4.3 muestra un gráfico de dicho registro, tomado de Weather Spark (s.f.).

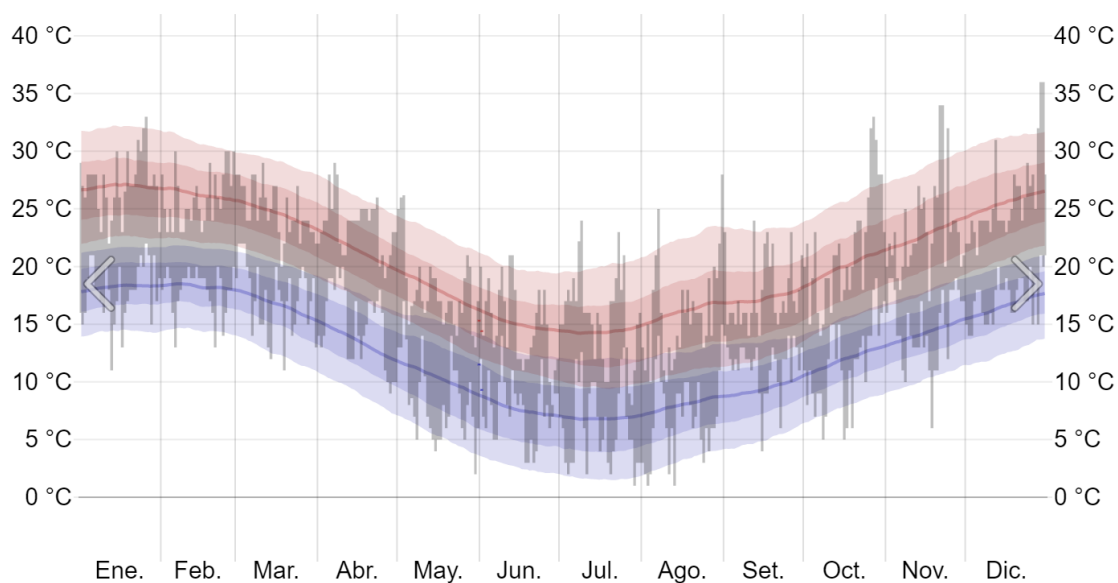


Figura 5.4.3 – Registro histórico de temperatura para Montevideo en el año 2021. Las medidas corresponden a la estación del Aeropuerto Internacional de Carrasco y la figura fue tomada de Weather Spark (s.f.). Las barras grises muestran el intervalo diario de temperaturas reportadas. Las curvas roja y azul denotan las temperaturas diarias máximas y mínimas, respectivamente. Las zonas sombreadas señalan el rango intercuartílico y la faja entre los percentiles 10 y 90.

Se observa que las temperaturas de la estación meteorológica del techo son consistentes con los registros históricos mostrados en la figura 5.4.3, mientras que la estación Met One presenta un error significativo por exceso. Esto probablemente se deva a la cercanía de la estación Met One con la pared, que posiblemente se encuentre a mayor temperatura que el aire durante el día. Se decidió utilizar únicamente las medidas de temperatura de la estación meteorológica del techo para el desarrollo del presente trabajo.

5.4.3 Humedad

Se construyó un diagrama de caja estratificado por mes para los registros de humedad relativa de la estación meteorológica del techo. Se obtuvieron los siguientes resultados.

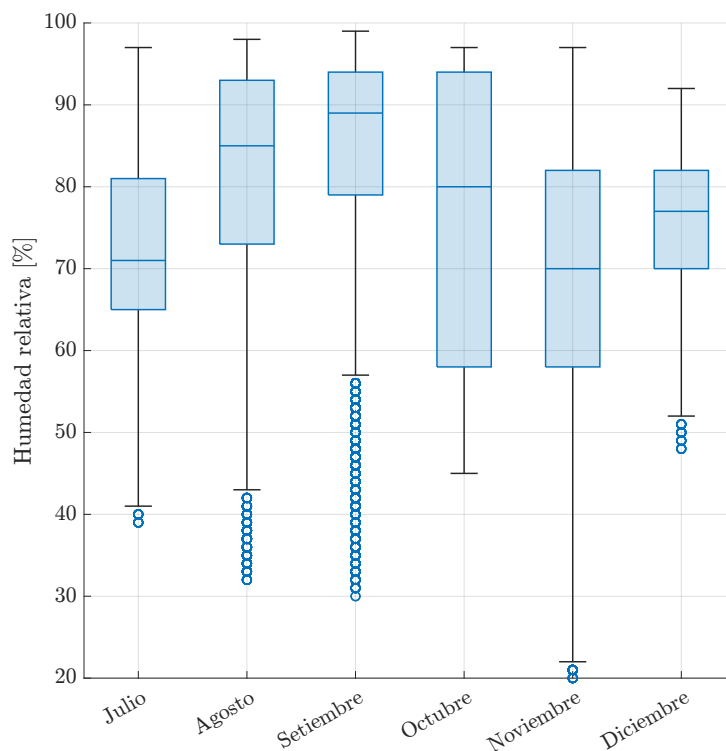


Figura 5.4.4 – Humedad relativa mensual registrada por la estación meteorológica del techo.

5.4.4 Otras magnitudes

Se registraron también otras variables meteorológicas como presión, radiación solar y precipitación. No se incluye el análisis descriptivo de estas variables por brevedad. No obstante, las mismas se encuentran disponibles en la base de datos generada.

Capítulo 6

Estimación de la tasa de ventilación

The tragedy of science is the slaying of a beautiful hypothesis by an ugly fact.

— T. H. Huxley

6.1 Introducción

En el presente capítulo se estima la tasa de ventilación en el salón 2 de la escuela a partir de un modelo de caja con mezcla perfecta, que utiliza las medidas de concentración de CO₂. Se comparan los resultados para la temporada invernal (*a priori* más preocupante) con los de la primavera. Se presentan resultados tanto para el turno matutino como para el vespertino.

6.1.1 Motivación

El interés por determinar la tasa de ventilación de un ambiente responde a dos aspectos complementarios. En primer lugar, la tasa de ventilación es un indicador de la calidad del aire en ambientes interiores, pues es el principal parámetro que regula la concentración de contaminantes aéreos (gases o partículas en suspensión). En la medida en que el aire de reposición se encuentre limpio, la ventilación removerá y diluirá los contaminantes aéreos. En consecuencia, la mayor parte de los códigos y normativas sobre calidad de aire interior estipulan requisitos para la tasa de ventilación, ya sea en términos de un caudal mínimo de renovación de aire por persona o en términos de las renovaciones por hora totales para un recinto dado (ACH, *Air Changes per Hour*). Por ejemplo, el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2019 (*Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*) estipula el caudal de renovación mínimo para un ambiente en función de un caudal mínimo por persona y de un caudal mínimo por unidad de área según la función del ambiente considerado (ASHRAE, 2018). Para un salón de clase de primaria, el estándar establece¹ componentes de 5 L/s por persona y de 0,6 L/s por metro cuadrado. Considerando una ocupación nominal de 30 personas y la superficie del salón 2 (48 m²), esto se traduce en 178,8 L/s, que para el volumen del salón en cuestión son 3,8 ACH. En cambio, en el contexto de la pandemia de COVID-19, la OMS ha sugerido una ventilación de 10 L/s por persona (WHO, 2021a). Para 30 ocupantes, se traduce en 300 L/s o 6,4 ACH.

En segundo lugar, la tasa de ventilación es un parámetro que participa en diversos modelos para la estimación del riesgo de contagio por vía aérea de enfermedades infecciosas. Este aspecto es abordado en el capítulo 7.

En los espacios con ventilación forzada, la tasa de ventilación es un parámetro de diseño que queda garantizado por el correcto funcionamiento del sistema de ventilación. Empero, en

¹En el contexto de la pandemia la ASHRAE sugiere evaluar elevar la tasa de ventilación, pero mantiene los mínimos del estándar 62.1 (ASHRAE, s.f.-c).

ambientes con ventilación natural, la tasa de ventilación depende de las condiciones climáticas y de cómo los ocupantes del espacio operan las aberturas. Esto último puede ser un impedimento importante para el correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación natural desde el punto de vista de la calidad de aire. Si la apertura de ventanas no permite mantener el confort térmico de los ocupantes para ciertas condiciones climáticas (por ejemplo, en invierno), es probable estos que no las abran y que la calidad de aire se deteriore.

En virtud de lo anterior, se desea determinar la tasa de ventilación para evaluar la calidad de aire en la escuela. En particular, es de interés estimar la tasa de ventilación en invierno, con el fin de evaluar si el esquema de ventilación natural existente es o no apropiado.

6.2 Modelos

Existen diversos métodos para estimar la tasa de ventilación en un recinto determinado que, en principio, puede ser una única habitación o un conjunto de habitaciones. En general estos métodos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1. Modelos CFD.
2. Modelos de caja.

6.2.1 Modelos CFD

Los modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) se basan en resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento del aire, para determinar el campo de velocidades en el recinto estudiado y, a partir de éste, inferir los caudales entrantes y salientes por las diversas aberturas. Si bien esta opción resulta muy atractiva por su alto nivel de detalle (que permite además estudiar la distribución espacial de diversos contaminantes), presenta algunos problemas importantes. En primer lugar, se destacan las limitaciones inherentes a cualquier análisis CFD:

- Requieren un alto nivel de especialización por parte de quien conduce el análisis.
- Requieren un tiempo relativamente largo para su correcta configuración (validación del modelo, generación de mallas, análisis de convergencia de la solución, ajuste de diversos parámetros, procesamiento de resultados, entre otros). Esto dificulta el desarrollo de análisis en tiempo real.
- Requieren disponer de recursos de cómputo adecuados.

Por otra parte, existen limitaciones específicas para determinar la tasa de ventilación. En particular, es difícil definir condiciones de borde adecuadas para el dominio de estudio. No se pueden prescribir condiciones de borde de entrada para la ecuación de balance de momento, pues esto implica fijar la tasa de ventilación que se quiere calcular. Diversos investigadores han intentado solucionar este problema mediante la simulación de una edificación completa. Esto permite imponer una condición de borde de entrada al dominio de cómputo (por ejemplo, un perfil de viento tipo capa límite) y estudiar la tasa de ventilación para diversas condiciones climáticas (dirección y velocidad de viento) y patrones de apertura de las diferentes aberturas del edificio, tanto internas como externas. El problema con este enfoque es que es computacionalmente muy demandante, lo que limita fuertemente su aplicación. En consecuencia, algunos investigadores como Meroney (2009) han propuesto métodos desacoplados, en los que el exterior y el interior del edificio se simulan por separado. Si bien esto es práctico, X. Zhang *et al.* (2020) señalan que existe evidencia de que puede no ser acertado.

6.2.2 Modelos de caja

Los modelos de caja constituyen un abordaje diametralmente opuesto a los modelos CFD. Los mismos se basan en suponer que el ambiente estudiado se encuentra perfectamente mezclado. Esto es, el recinto se supone homogéneo y queda caracterizado por valores únicos de diversas propiedades, como la temperatura y concentración de diversos contaminantes.

Existen múltiples aproximaciones para el abordaje de los modelos de caja. En su versión más simple, presentada a continuación, se estudia un único recinto perfectamente mezclado mediante la formulación de balances de masa y energía. Empero, algunos autores han propuesto enfoques más complejos, como por ejemplo:

- Modelos no deterministas, llamados “de caja gris”, en los cuales se utiliza una ecuación diferencial estocástica. Ésta se formula complementando la ecuación de balance de masa con términos estocásticos que representan, por ejemplo, incertidumbre experimental (Macarulla *et al.*, 2017; 2018; 2021).
- Modelos multinodales, en los cuales se considera un conjunto interconectado de ambientes perfectamente mezclados (red nodal) y se resuelve la tasa de ventilación para todos ellos simultáneamente (Megri, 2014).

Dado que el trabajo de campo se concentró en un único salón, se modelará un único ambiente (el salón estudiado). Se utilizará un modelo determinista.

Planteo general y sus problemas

Los modelos de caja permiten determinar la tasa de ventilación a partir de un balance de masa para alguna especie química (trazador) dispersa en el aire. Diversos autores han optado por utilizar CO₂ como trazador. Batterman (2017) señala que este gas presenta las siguientes ventajas:

- Es inerte.
- Su generación está garantizada para cualquier recinto ocupado (producido al respirar). Asimismo, en un recinto con ocupación uniforme y de alta densidad (como escuelas), la generación de CO₂ es bastante uniforme.
- El instrumental de medida es relativamente barato y tiene una exactitud razonable.

No obstante lo anterior, el uso de CO₂ como trazador presenta algunas dificultades:

- El aire de reposición incluye CO₂, por lo que su concentración debe ser determinada.
- La concentración de CO₂ en el aire exterior (nivel de base) presenta fluctuaciones durante el día, que pueden incrementarse debido a la presencia de tránsito pesado, entre otros factores.
- La tasa de generación de CO₂ depende de la ocupación del recinto estudiado, por lo que ésta debe ser conocida.

Asumiendo que el aire se comporta como un fluido incompresible y que el sistema cuenta con una única entrada y una única salida de masa, se tiene que

$$V \frac{dC(t)}{dt} = Q(C_{\text{ext}} - C(t)) + nG \quad (6.2.1)$$

donde V es el volumen del recinto, Q es el caudal volumétrico de aire, G es la tasa de generación de CO_2 por persona², n es la cantidad de personas presentes y C es la concentración volumétrica de CO_2 . Asimismo, C_{ext} denota la concentración volumétrica de CO_2 en el caudal de entrada.

Asumiendo que los diversos parámetros del modelo son constantes, se obtiene que

$$C(t) = C_{\text{ext}} + \frac{nG}{Q} - \left(C_{\text{ext}} - C_o + \frac{nG}{Q} \right) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (6.2.2)$$

donde C_o denota la concentración inicial de CO_2 en el recinto considerado. El parámetro que interesa obtener es la tasa de ventilación, que puede ser expresada mediante el caudal de reposición Q o en términos de renovaciones por hora (ACH):

$$\text{ACH} = \frac{Q}{V} \quad (6.2.3)$$

donde las ACH se expresan convencionalmente en h^{-1} .

En principio, es posible ajustar directamente la ecuación (6.2.2) para una serie de medidas de concentración. De hecho, con una serie de medidas lo suficientemente grande, en teoría es posible ajustar todos los parámetros (C_{ext} , nG , Q e incluso V y C_o) del modelo mediante algún algoritmo de ajuste no lineal. Empero, en general esto es muy difícil debido a la combinación de los efectos del ruido experimental (en la serie de concentraciones) y de la variación de los parámetros del modelo.

En cuanto a los parámetros del modelo, se observa que los mismos pueden cambiar principalmente por dos motivos. En primer lugar, puede cambiar la tasa de ventilación. Esto es particularmente relevante en habitaciones con ventilación natural, que presenta variaciones de alta frecuencia³ propias de la capa límite atmosférica. Asimismo, puede haber cambios en la tasa de ventilación debido a la apertura o cierre de puertas y ventanas. En segundo lugar, puede variar la tasa de generación de CO_2 . Esto puede suceder debido a cambios de ocupación, que alteren la tasa de generación de CO_2 , o a cambios en la tasa de generación por persona, asociadas por ejemplo a cambios en el nivel de actividad física. Las variaciones más importantes ocurren cuando se llena y se vacía el recinto, por lo que es preciso conocer con exactitud cuándo sucede esto.

Idealmente, los cambios en los parámetros del modelo producirían modificaciones fácilmente reconocibles en la forma de la curva de concentración en función del tiempo. En ese caso, bastaría dividir la curva en intervalos temporales de ajuste dentro de los cuales los parámetros fueran aproximadamente constantes. De esta manera, se obtendría una serie temporal de tasa de ventilación. Empero, esto no suele ser una tarea sencilla. Duarte *et al.* (2018) señalan que las medidas de concentración de CO_2 suelen presentar ruido de alta frecuencia, lo que sugiere el uso de algún tipo de filtro pasabajos. El problema es que es difícil distinguir entre el ruido experimental y las propias variaciones de los parámetros, principalmente de la tasa de ventilación, que en el caso de la ventilación natural también presenta oscilaciones de alta frecuencia.

En función de lo anterior, la división en ventanas temporales no es obvia. Además, Duarte *et al.* (2018) señalan que ésta puede condicionar significativamente los resultados.

Por otra parte, el ajuste de la tasa de generación de CO_2 por persona puede ser problemático. Si bien en teoría este parámetro puede ser ajustado por regresión, resulta difícil acotarlo⁴.

²Asumida uniforme para toda la población del recinto.

³En sistemas con ventilación forzada la tasa de ventilación queda esencialmente impuesta por el sistema de HVAC.

⁴En general los métodos de optimización requieren la prescripción de cotas para los parámetros de ajuste.

Batterman (2017) y la norma ASTM D6245 - 18 (2018) sugieren el uso de valores de referencia tabulados para computar este término. Dichos valores dependen del sexo, la edad y del nivel de actividad metabólica. El uso de estos valores, si bien resulta práctico (en la medida en que se puedan estimar los datos demográficos de la población estudiada), puede introducir un nivel de incertidumbre considerable, asociada en particular (pero no sólo) a estimar correctamente el nivel de actividad metabólica de los individuos. En el anexo B.4 se muestra la variabilidad de la tasa de generación según la masa corporal en función del sexo, edad y actividad metabólica, de acuerdo con la norma ASTM D6245 - 18 (2018).

En aras de simplificar este problema es que diversos autores han propuesto ajustar la ecuación (6.2.2) para casos particulares simplificados. En particular, Batterman (2017) distingue cuatro estrategias que han sido aplicadas con cierto éxito: el método de decaimiento, el método de acumulación, el método de equilibrio y el método transitorio. Se presentan a continuación de forma somera estas propuestas.

Método de decaimiento

El método de decaimiento consiste en ajustar la serie de medidas de CO_2 a partir del instante en que se vacía el salón⁵. En este caso, la tasa de generación de CO_2 es nula y la ecuación (6.2.2) se reduce a

$$C(t) = C_{\text{ext}} \left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) + C_o e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (6.2.4)$$

La gran ventaja de este planteo radica en eliminar la tasa de generación de CO_2 y el nivel de ocupación, lo que reduce la incertidumbre y simplifica sustancialmente el ajuste.

La principal limitación de esta propuesta es que únicamente permite estimar la tasa de ventilación cuando el recinto se vacía. El resultado obtenido puede no ser representativo de la tasa de ventilación diaria. Esto es esperable si, por ejemplo, se abren todas las aberturas al finalizar el turno de ocupación. En ese caso se sobrestimaría la tasa de ventilación real durante la ocupación.

Es interesante señalar que este método se encuentra estandarizado por las normas ASTM D6245 - 18 (2018) y ASTM E741 - 11 (2011).

Método de acumulación

El método de acumulación o crecimiento consiste en ajustar la ecuación (6.2.2) cuando se ocupa el ambiente en estudio⁶. Es esperable observar un aumento rápido en la concentración de CO_2 , lo que puede minimizar la probabilidad de que otros parámetros del modelo cambien.

Otra ventaja es que con este abordaje se estima la tasa de ventilación durante el período de ocupación y no luego del mismo, como sucede para el método de decaimiento.

Puede no ser viable aplicar este método si el proceso de ocupación del ambiente se extiende demasiado en el tiempo.

⁵De forma más general, podría considerarse el método a partir del instante en que ocurre un cambio significativo en la ocupación del salón. Empero, en este caso es necesario estimar la ocupación y la tasa de generación luego de dicho cambio.

⁶Más en general, cuando hay un aumento importante en la ocupación.

Método de equilibrio

Este método consiste en restringir el análisis a los periodos en los que el ambiente alcanza una concentración de CO_2 estacionaria. Tomando límite con $t \rightarrow \infty$ en la ecuación (6.2.2) (o anulando la derivada en la ecuación (6.2.1)) se obtiene que

$$C_{\text{eq}} = C_{\text{ext}} + \frac{nG}{Q} \quad (6.2.5)$$

donde C_{eq} es la concentración de equilibrio. En este caso se puede obtener C_{eq} promediando la serie de medidas y, conociendo el nivel de ocupación y estimando la tasa de generación de CO_2 , se puede despejar el caudal de reposición Q .

Si bien el método de equilibrio es muy sencillo, su aplicabilidad queda limitada a que efectivamente el sistema alcance el equilibrio. Esto puede ser difícil en sistemas con ventilación natural. Asimismo, persisten los problemas de conocer la ocupación y de estimar la tasa de generación.

Se destaca que el método de equilibrio se encuentra regulado por la norma ASTM D6245 - 18 (2018).

Método transitorio

El método transitorio consiste en ajustar la ecuación (6.2.2) entre dos medidas de concentración registradas en instantes t_1 y t_2 consecutivos ($t_1 < t_2$). Se tiene entonces que

$$C(t_2) = C_{\text{ext}} + \frac{nG}{Q} - \left(C_{\text{ext}} - C(t_1) + \frac{nG}{Q} \right) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (6.2.6)$$

Si se conocen C_{ext} (se la mide o se sabe que se repone con aire exterior) y n , se puede resolver instantáneamente (entre dos medidas) la tasa de ventilación.

Se destaca que el método transitorio permite incorporar la variabilidad de ocupación con gran exactitud si se cuenta con un registro detallado y la frecuencia de muestreo es lo suficientemente alta. Asimismo, este método elimina el problema de determinar una ventana de ajuste apropiada y genera una serie temporal detallada de la tasa de ventilación, algo particularmente deseable en sistemas con ventilación natural.

No obstante lo anterior, el método transitorio presenta algunos inconvenientes importantes. Es necesario conocer C_{ext} , cuya medición o estimación puede no ser sencilla. Asimismo, el ruido experimental puede generar resultados dudosos. Un posible paliativo para estos problemas podría ser ajustar el modelo sobre un mayor conjunto de puntos, lo que permitiría ajustar más parámetros, como C_{ext} , o minimizar el impacto del ruido experimental. Esto sería una solución de compromiso entre el método transitorio entre dos puntos consecutivos y el ajuste general. Sin embargo, en la medida en que se agregan más puntos para el ajuste del modelo, se pierde la capacidad de reflejar oscilaciones de alta frecuencia en los parámetros. También se podría implementar un filtro pasabajos, pero persistiría el problema de filtrar sólo el ruido experimental y no las propias oscilaciones de los parámetros.

Otros problemas

Todos los métodos presentados se encuentran limitados por la hipótesis de que exista una única entrada. Si bien el balance de masa podría generalizarse para una cantidad arbitraria de flujos de entrada con sus respectivas concentraciones, puede ser muy difícil ajustar cada caudal y medir o ajustar cada concentración de reposición. En particular, en recintos con ventilación cruzada como la escuela en estudio, podría suceder que el aire ingresara desde el pasillo y no desde el exterior, lo que llevaría a una concentración de reposición que puede ser mucho más elevada que la atmosférica y que además puede ser variable en el tiempo⁷. Parece más razonable mantener un

⁷Durante la campaña de medidas se observaron en el pasillo concentraciones variables que alcanzaban el entorno de las 1000 ppm en algunas ocasiones. Ver la sección 5.2.2 del capítulo 5.

planteo analítico con una única entrada y entender la concentración de reposición como un valor promedio ponderado en los flujos de entrada. Si bien esto simplifica significativamente el planteo, obliga a que C_{ext} deba ser considerado como un parámetro de regresión y no pueda ser medido. Además, resulta difícil acotar el valor de C_{ext} en el programa de ajuste del modelo. Asimismo, se destaca que el caudal ajustado en este caso incluye las infiltraciones de la envolvente del edificio.

Por otra parte, salvo los métodos de equilibrio y transitorio, no es posible ajustar datos durante el correr del día. Parece oportuno buscar alternativas que permitan estimar la tasa de ventilación durante horarios de ocupación.

Por último, se destaca que la aplicación de cualquier modelo de caja se basa en la hipótesis de mezcla perfecta. De acuerdo con los estándares ASTM E741 - 11 (2011) y ASTM D6245 - 18 (2018), esta hipótesis debe ser comprobada midiendo en varios puntos del recinto y verificando que la diferencia de concentración entre dichos puntos no supere el 10% del valor medio de la diferencia de concentraciones entre el interior y el aire de reposición. Empero, la mayor parte de los trabajos publicados no verifican esta hipótesis y asumen que el punto de medida seleccionado (en general, pero no siempre, un punto central) es representativo de todo el sistema (Batterman, 2017; Macarulla *et al.*, 2021; Schibuola y Tambani, 2021).

6.3 Metodología

Se presenta a continuación la metodología utilizada para la estimación de la tasa de ventilación en el salón estudiado a partir de los datos de campo recolectados.

6.3.1 Adaptación del modelo de caja general

Se optó por utilizar un modelo de caja simple, adaptando la ecuación general de balance de masa (ecuación (6.2.2)) con los siguientes objetivos:

- Maximizar el aprovechamiento de las medidas a fin de determinar la tasa de ventilación durante todo el período de ocupación (no sólo al principio o al final del mismo).
- Simplificar la selección de ventanas de ajuste adecuadas.
- Solucionar los problemas asociados al parámetro C_{ext} .
- Evitar la incertidumbre asociada a la estimación de G .
- Prescindir de la necesidad de conocer la serie temporal de ocupación y los niveles de ocupación diaria para cada turno.

Adaptación de la ecuación de balance de masa

Para aprovechar las medidas durante toda la ocupación es necesario trabajar sobre el balance de masa en su versión completa. Esto implica solucionar las dificultades asociadas a determinar o ajustar G , n y C_{ext} . Para ello se propone reescribir la ecuación (6.2.2) en función de la concentración de equilibrio, dada por la ecuación (6.2.5). Resulta entonces que para cada ventana de ajuste

$$C(t) = C_{\text{eq}} + (C_o - C_{\text{eq}}) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (6.3.1)$$

Este cambio de variable permite intercambiar los parámetros G , n y C_{ext} por C_{eq} . Las ventajas de este planteo son varias. En primer lugar C_{eq} es un parámetro fácilmente interpretable, ya que es la asíntota horizontal de la curva $C(t)$. Asimismo, es más sencillo estimar su valor, que está inferiormente acotado por la concentración atmosférica de CO_2 . Por otra parte, al reducir la cantidad de parámetros de ajuste (esto es, los grados de libertad del problema) el algoritmo de resolución resulta ser más robusto y requiere una menor cantidad de medidas.

Otra ventaja del método propuesto es que es sencillo prescribir condiciones iniciales para el algoritmo de ajuste de los parámetros (que es iterativo). C_o puede ser estimada a partir de la primera medida de la ventana de ajuste y C_{eq} a partir de la última medida⁸.

Se ajustaron por regresión los valores de Q , C_{eq} y C_o . C_o fue incluido como parámetro de regresión (y no estimado a partir de la primera medida de cada ventana) con el fin de minimizar el impacto del ruido experimental que pudiera existir en la primera medida de la serie ajustada. Sin embargo, se restringió considerablemente su rango de variación. Como valor de V se utilizó el volumen bruto del salón ($6 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} = 168 \text{ m}^3$).

Se destaca que el método de ajuste propuesto es válido independientemente de que la concentración de CO_2 se encuentre creciendo o decreciendo.

Selección de ventanas

Se decidió seleccionar las ventanas de ajuste manualmente, por inspección visual de las curvas de concentración en función del tiempo. Si bien esto es muy laborioso dada la gran cantidad de medidas, fue mucho más sencillo identificar ventanas “razonables” de forma gráfica. De esta forma se distinguieron las oscilaciones de alta frecuencia (debido a cambios en los parámetros o al ruido experimental) de la tendencia “global” de la serie de concentración.

Este método, si bien es sencillo, no permite cubrir toda la serie de medidas con ventanas de estimación. Se observaron intervalos con tendencias poco claras, que no fueron ajustados. Asimismo, se evitó ajustar ventanas con menos de ocho puntos o con cambios de concentración inferiores a 100 ppm. En casos particulares extremos se flexibilizó un poco este criterio; para saltos de varios cientos de ppm se llegaron a ajustar ventanas de cinco puntos⁹ y para ventanas de más de 15 puntos se permitieron saltos de aproximadamente 70 ppm.

Se construyó una base de datos que detalla, para cada día, los límites de las ventanas de crecimiento y decrecimiento.

Restricciones y valores iniciales

Se impusieron las siguientes restricciones de ajuste

$$\begin{cases} 0 \text{ h}^{-1} \leq \text{ACH} \leq 30 \text{ h}^{-1} \\ 350 \text{ ppm} \leq C_{eq} \leq 3000 \text{ ppm} \\ C_1 - 20 \text{ ppm} \leq C_o \leq C_1 + 20 \text{ ppm} \end{cases} \quad (6.3.2)$$

donde C_1 es el primer valor de la serie de concentración ajustada.

La primera restricción pide que el caudal sea no negativo y que las ACH no superen las 30 renovaciones por hora. Esta cota superior es relativamente alta y en la práctica se observó que no condicionó el ajuste (en general el ajuste convergió en valores inferiores).

La segunda restricción pide que la concentración de equilibrio no sea inferior a la atmosférica¹⁰ y que no supere un umbral, relativamente arbitrario, de 3000 ppm. La cota superior elegida es mayor que todas las concentraciones medidas. No obstante lo anterior, se observa que con caudales de renovación muy pequeños, la concentración de equilibrio ajustada diverge ($C_{eq} \xrightarrow{Q \rightarrow 0} +\infty$). Esto sucede porque la solución de la ecuación (6.2.1) degenera en una recta. Se observó que en dichos casos el valor de C_{eq} (impuesto por la restricción superior) tenía un impacto intrascendente sobre el caudal de reposición (a niveles tan bajos el número exacto ajustado para las ACH no es particularmente importante).

Por último, la tercera restricción pide que la condición inicial del modelo sea ajustada en un rango de tolerancia de ± 20 ppm alrededor del primer valor de la ventana de ajuste. Esto

⁸La bondad de esta estimación de C_{eq} depende de qué tan cerca esté el proceso de alcanzar el equilibrio.

⁹No sería prudente ajustar ventanas aún más chicas, pues podrían corresponderse con eventos anormales como personas respirando cerca de los sensores.

¹⁰El valor mínimo fue elegido en función de los datos relevados por el monitor AQ1.

permite cierta variabilidad en el valor de C_o , con el propósito de disminuir el impacto del ruido experimental.

Por otra parte, se utilizaron los siguientes valores iniciales de iteración para el algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados

$$\begin{cases} \text{ACH}_i = 5 \text{ h}^{-1} \\ C_{\text{eq}_i} = C_{\text{end}} \\ C_{o_i} = C_1 \end{cases} \quad (6.3.3)$$

donde el subíndice i denota la condición inicial de cada variable y C_{end} es la última concentración registrada dentro de la ventana ajustada.

La condición inicial para la tasa de ventilación fue impuesta en función de estimaciones preliminares. Se observó que los resultados obtenidos son relativamente insensibles al valor elegido.

Por otra parte, la condición elegida para la concentración de equilibrio es una buena estimación en la medida en que la concentración alcance su valor de equilibrio dentro de la ventana de ajuste.

Por último, la justificación de la condición elegida para la concentración inicial es trivial a la luz de la restricción impuesta para este parámetro.

Evaluación de la bondad de ajuste

Los ajustes obtenidos fueron evaluados cualitativamente por inspección gráfica y cuantitativamente mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*), definido como

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{C}_i - C_i)^2}{n}} \quad (6.3.4)$$

donde n es el total de puntos ajustados para la ventana en cuestión, C_i representa cada una de las concentraciones medidas y $\hat{C}_i$ denota la respectiva concentración estimada por el modelo ajustado. El error cuadrático medio permite una evaluación comparativa (entre ventanas) de la bondad de ajuste.

Otras consideraciones

El ajuste de datos fue realizado sin implementar ningún tipo de filtrado. Algunos investigadores han optado por colapsar medidas mediante promedios cada diez o quince minutos (Batterman, 2017; Schibuola y Tambani, 2021). Otros investigadores han propuesto el uso de filtros más complejos como el filtro Kalman (Duarte *et al.*, 2018; Remion *et al.*, 2021).

Se probó replicar el análisis de datos con un filtro en media móvil, pero se observó que con este método es difícil lograr un compromiso adecuado entre la eliminación del ruido y la deformación del andamio de la curva. En particular, se observó que este tipo de filtrado deforma sustancialmente los picos asociados a crecimientos por ocupación o desocupación del salón. Esto sucede debido a que la escala temporal del fenómeno de crecimiento o de decrecimiento es comparable a la escala del ruido que se desea filtrar.

En la medida en que las ventanas fueron ajustadas manualmente mediante inspección gráfica, no parece determinante aplicar un filtro pasabajos, pero futuros trabajos podrían abordar este aspecto en mayor profundidad. Esto es particularmente importante en el caso de querer automatizar el procesamiento de datos.

6.3.2 Datos analizados

Medidas diarias durante operación normal

En primer lugar, se ajustaron los datos diarios registrados con el monitor Aeroqual 500 al frente del salón, al costado del escritorio de la maestra. A partir de estos ajustes se computaron estadísticas generales y mensuales de ventilación.

Pruebas controladas

Por otra parte, también se ajustaron datos obtenidos durante pruebas artificiales de decaimiento. Dichas pruebas fueron realizadas sin alumnos y en condiciones controladas. Se cerraron todas las aberturas del salón y se generó CO_2 artificialmente. Una vez terminada la generación, se encendieron los ventiladores de techo con el fin de homogeneizar la concentración de CO_2 . A continuación se los apagó, se abrieron diferentes combinaciones de aberturas y se registró la disminución de la concentración de CO_2 , con el fin de estimar la tasa de ventilación asociada a cada configuración.

Para generar CO_2 se hizo reaccionar ácido acético (CH_3COOH) con bicarbonato de sodio (NaHCO_3) en solución acuosa. Dichos reactivos producen CO_2 gaseoso de acuerdo con la siguiente ecuación:



La reacción descrita es espontánea a temperatura ambiente. Considerando un rendimiento unitario, se puede estimar la cantidad estequiométrica de reactivos para un aumento de concentración de 1000 ppm como sigue. El volumen de CO_2 necesario, V_{CO_2} , se puede expresar como¹¹

$$V_{\text{CO}_2} = \Delta C V \quad (6.3.6)$$

donde V es el volumen del salón (168 m^3) y ΔC el cambio de concentración volumétrica (1000 ppm). Asimismo, asumiendo un comportamiento de gas ideal, la cantidad de sustancia CO_2 (n_{CO_2}) puede ser expresada en función de su volumen como

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{PV_{\text{CO}_2}}{RT} \quad (6.3.7)$$

donde P es la presión absoluta, T es la temperatura absoluta y $R = 8,314 \text{ kJ/kmolK}$ es la constante de los gases ideales. Considerando una presión de 101,325 kPa y una temperatura de 298 K, se obtiene, a partir de las ecuaciones (6.3.6) y (6.3.7), que

$$n_{\text{CO}_2} = 6,87 \text{ mol} \quad (6.3.8)$$

En virtud de la estequiometría dictada por la ecuación (6.3.5) se tiene que

$$\begin{aligned} n_{\text{CH}_3\text{COOH}} &= n_{\text{CO}_2} \\ n_{\text{NaHCO}_3} &= n_{\text{CO}_2} \end{aligned} \quad (6.3.9)$$

donde n siempre designa la cantidad de sustancia y el subíndice identifica la especie química. Observando que las masas molares del ácido acético y del bicarbonato de sodio son 60,05 g/mol y 84,01 g/mol, y que la densidad del ácido acético es 1,05 g/mol, se obtiene que se necesitan 577 g de bicarbonato de sodio y 393 mL de ácido acético.

Durante dos de las pruebas¹² también se contó con un pequeño cilindro de CO_2 presurizado, que complementó la generación.

¹¹Se asume que durante el aumento de concentración todas las aberturas están cerradas y en consecuencia la cantidad de CO_2 perdida por exfiltraciones es despreciable.

¹²Pruebas 1A (se utilizó exclusivamente el cilindro) y 1B (se utilizaron tanto el cilindro como la reacción química), ver nomenclatura en la sección 6.4.2.

6.3.3 Verificación de la hipótesis de mezcla perfecta

Se analizó en qué medida se cumple la hipótesis de mezcla perfecta. Para ello se compararon:

- Las medidas diarias registradas en el fondo y en el frente del salón.
- Las medidas obtenidas durante las pruebas de ventilación controladas.

Si bien sería deseable realizar análisis sistemáticos más detallados de la hipótesis de mezcla perfecta (por ejemplo, con una grilla regular de puntos de medida), esto fue imposible por restricciones de índole práctico (dificultad de instalar sensores, entre otros). De todas formas, las medidas diarias comparan dos puntos alejados y con regímenes de flujo bastante diferentes, dado que el sensor del escritorio está cerca de la ventana y enfrentado a las aberturas de ambos lados, mientras que el sensor del fondo está en un punto que probablemente presente estancamiento. En consecuencia, es esperable (y queda demostrado en función de los resultados) que la concentración de CO_2 en el fondo sea mayor que en el frente del salón.

Por otro lado, las medidas obtenidas durante las pruebas controladas permiten evaluar la hipótesis de mezcla perfecta para configuraciones muy distintas.

Se destaca que, dada la práctica generalizada de no analizar la hipótesis de mezcla perfecta observada en la gran mayoría de los estudios que estiman la tasa de ventilación, el análisis presentado contribuye a la rigurosidad del trabajo.

6.4 Resultados

6.4.1 Ajuste de los datos diarios del salón 2

Ejemplos de ajustes diarios

En primer lugar, se verificó que el ajuste de las ventanas seleccionadas fuera adecuado. Para ello se graficó, para cada día, la curva de datos crudos de CO_2 y se superpusieron las curvas teóricas ajustadas para cada ventana. Los ajustes notoriamente malos o con un error cuadrático medio muy elevado respecto al resto de las ventanas fueron corregidos (en algunos casos dividiendo ventanas demasiado grandes) o descartados. La figura 6.4.1 muestra, a modo de ejemplo, algunos de los ajustes diarios obtenidos. Por claridad se ha elegido un día con ventanas de ajuste relativamente amplias, a fin de poder indicar los resultados. Se incluyen más ejemplos en el apéndice A.7, donde se puede apreciar una muestra más variada.

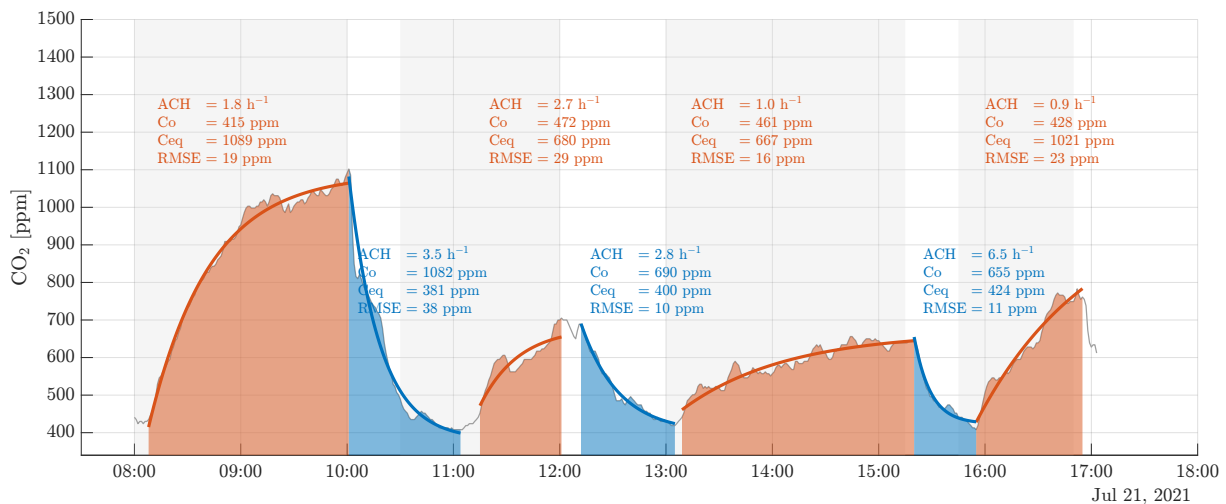


Figura 6.4.1 – Ejemplo de resultados de ajuste para el miércoles 21 de julio. La curva gris se corresponde con los datos medidos. Las curvas de colores son los ajustes del modelo. En naranja se indican ventanas de crecimiento y en azul ventanas de decrecimiento de la concentración de CO_2 . Asimismo, estos colores delimitan los intervalos temporales ajustados. El fondo sombreado delimita los períodos de ocupación. Se indican en la figura los parámetros ajustados para cada ventana y la raíz del error cuadrático medio.

Como puede observarse en la figura 6.4.1 (y en las figuras del apéndice A.7), el modelo de caja logra ajustar los datos experimentales satisfactoriamente. Se reconocen patrones temporales esperados: crecimiento al inicio de los períodos de ocupación y decrecimiento cuando estos finalizan. De todas formas se observa que en algunos casos los datos experimentales oscilan alrededor del modelo ajustado, lo que puede reflejar tanto ruido experimental como pequeñas oscilaciones en los parámetros del modelo.

Análisis estadístico de los resultados de ajuste

Se presentan a continuación los resultados de ajuste obtenidos sobre todo el conjunto de datos de CO_2 al frente del salón 2. Se trataron por separado los datos correspondientes a los turnos matutino y vespertino.

En primer lugar, se construyeron histogramas para las distribuciones de la tasa de ventilación, expresada como ACH, y de la raíz del error cuadrático medio durante las horas de ocupación nominal. Asimismo, se estratificaron dichos resultados en ventanas de crecimiento y de decrecimiento de la concentración de CO_2 . La figura 6.4.2 muestra estos resultados.

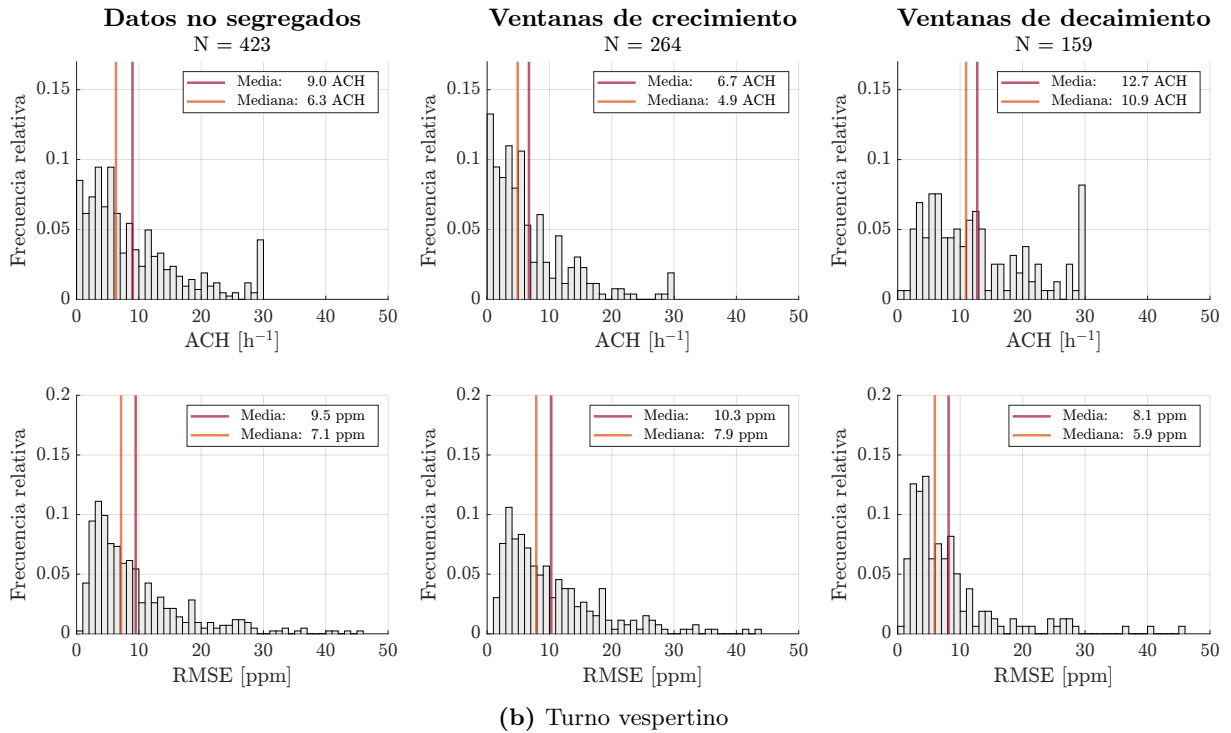
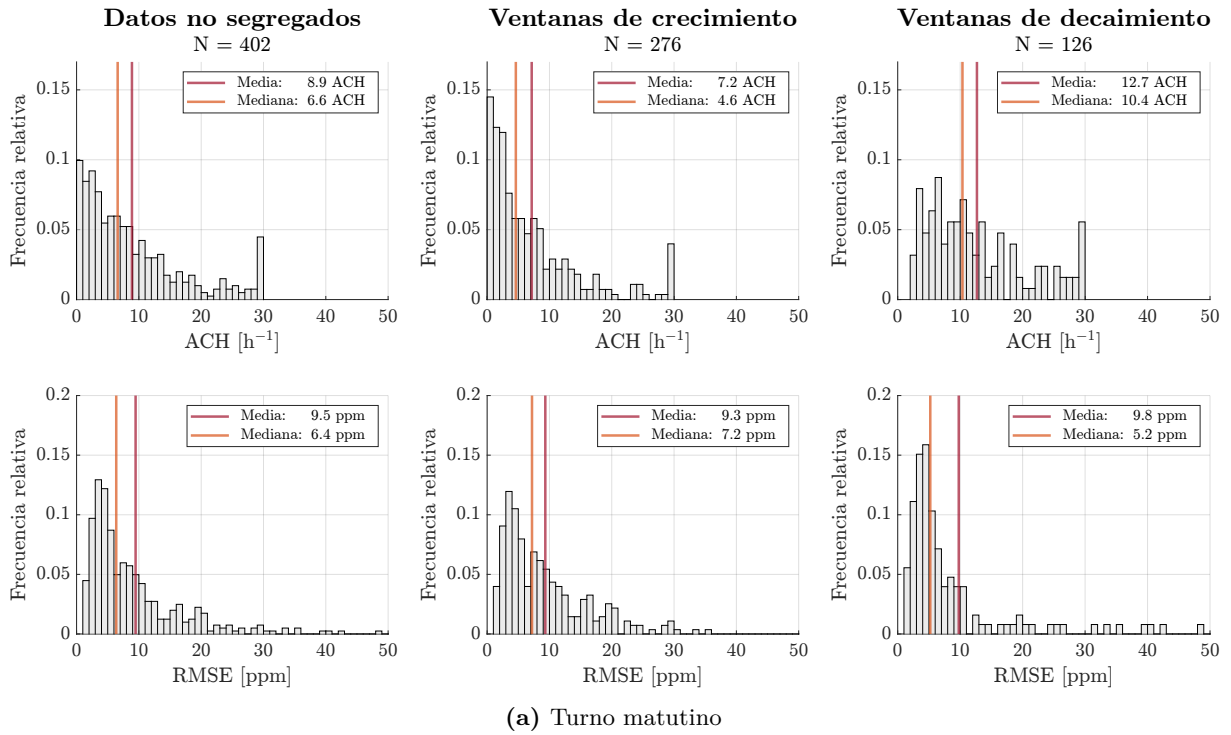


Figura 6.4.2 – Resultados de ajuste para los turnos matutino y vespertino durante las horas de ocupación nominal. Se detallan la frecuencia relativa de valores ajustados de ACH y el RMSE asociado para el total de datos. Asimismo, se estratifican estos resultados en ventanas de crecimiento y decrecimiento. El valor N corresponde al total de datos en cada categoría.

En primer lugar, se observa en la figura 6.4.2 que, para ambos turnos de ocupación, la distribución de ACH y de RMSE de los datos no estratificados es cualitativamente similar a la del grupo de ventanas de crecimiento. Se trata de distribuciones relativamente asimétricas, con mayores frecuencias relativas para valores bajos. En cambio, los estratos de ventanas de decrecimiento presentan distribuciones con valores de ACH más uniformes y elevados. Esto es razonable, dado que los decrecimientos ocurren generalmente cuando aumenta la tasa de ventilación¹³. La mayor dispersión del estrato de decrecimiento puede estar asociada a la variabilidad de la ventilación natural.

Asimismo, los valores más frecuentes para los ajustes durante el crecimiento de la concentración de CO₂ son relativamente bajos. Esto es consistente con el cierre de aberturas.

Además, se destaca que en términos medios las estimaciones son bastante elevadas. En general los valores medios superan el requisito mínimo del estándar ANSI/ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2018) y cumplen con la recomendación de la OMS (WHO, 2021a). Para el ambiente estudiado es posible obtener tasas de ventilación significativamente altas.

Por otra parte, se analizaron los decaimientos durante los recreos y durante el final de los turnos, fuera de las horas de ocupación. Los siguientes histogramas describen los ajustes correspondientes.

¹³Podría deberse a una reducción de la ocupación, pero es poco probable en la medida en que se han filtrado únicamente las horas de ocupación nominal.

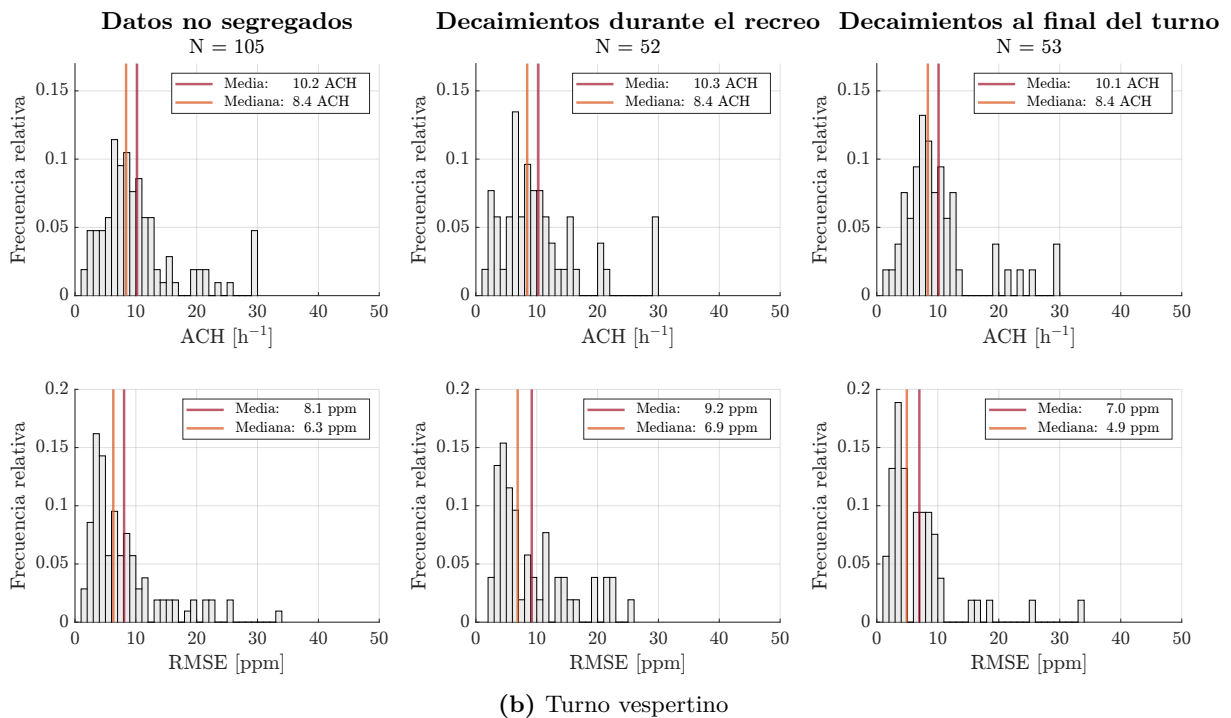
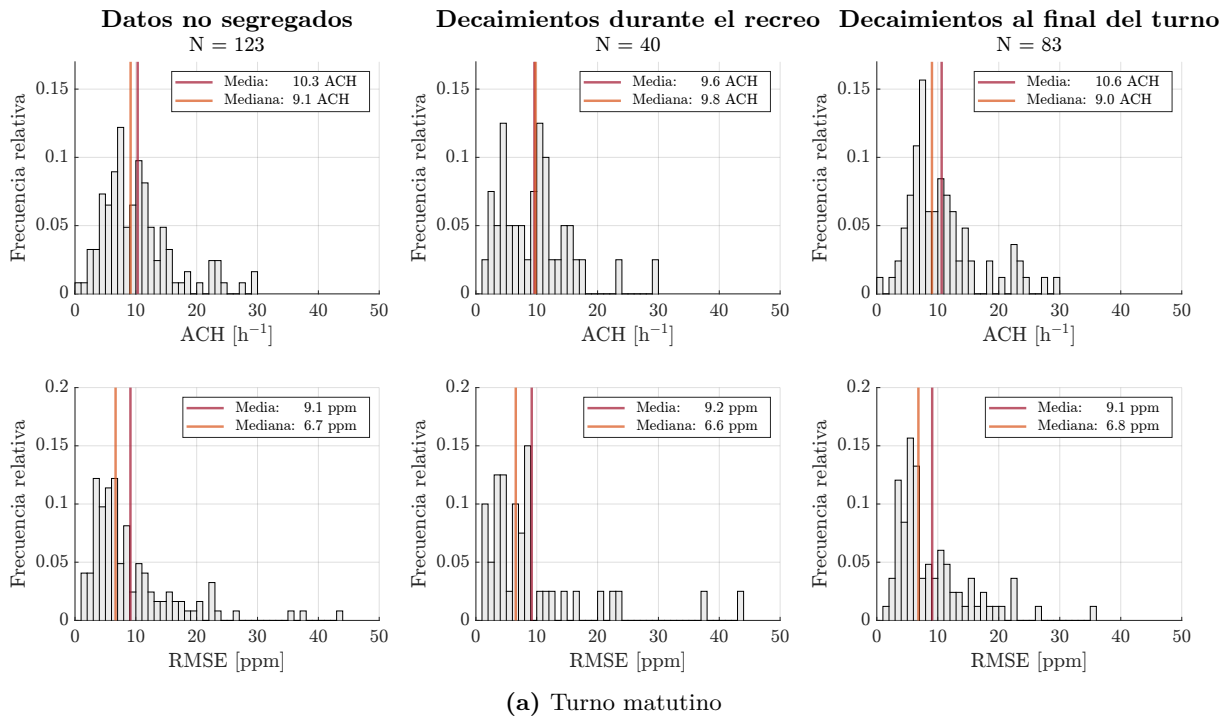


Figura 6.4.3 – Resultados de ajuste para los turnos matutino y vespertino durante las horas de desocupación (recreos y final de cada turno). Se detallan la frecuencia relativa de valores ajustados de ACH y el RMSE asociado. Asimismo, se estratifican estos resultados en ventanas de ajuste durante el recreo y al final del turno. El valor N corresponde al total de datos en cada categoría.

Para los decaimientos en horas de desocupación se observan comportamientos similares en ambos turnos. Las distribuciones resultantes son un poco más simétricas que durante las horas de ocupación y tienen picos más definidos.

Además, los resultados estratificados son similares para ambas categorías, por lo que no parece haber diferencias significativas de ventilación entre el recreo y el final de turno. Asimismo, los valores medios obtenidos son similares a los del estrato de decaimiento durante las horas de ocupación (figura 6.4.2). Esto es compatible con la hipótesis de que se abran las aberturas en una configuración similar para ambos casos.

En suma, los resultados hasta aquí presentados parecen indicar que el régimen de ventilación para ambos turnos consiste en ventilar (abrir en cierto grado las ventanas) durante las horas de desocupación y en ciertas (pocas) instancias puntuales durante las horas de ocupación. Asimismo, se destaca que el salón estudiado presenta la potencialidad de alcanzar altos caudales de renovación. Empero, esto no es lo más frecuente, lo cual puede deberse a limitaciones asociadas al confort térmico de los ocupantes. Con tasas de ventilación muy elevadas, si la temperatura exterior fuera baja (particularmente en invierno), la temperatura interior de equilibrio sería inaceptablemente baja (cercana a la exterior). Por otra parte, la contaminación sonora también podría ser un factor de discomfort significativo que estimulara a mantener las ventanas cerradas durante las horas de clase.

En cuanto a los residuos de ajuste, no se observan diferencias entre los diferentes estratos, lo que indica una bondad de ajuste similar para las diferentes situaciones analizadas.

Por otra parte, se calculó qué porcentaje del tiempo de ocupación fue cubierto mediante ventanas de ajuste, con el fin de evaluar la representatividad de las estimaciones respecto del total de datos. La tabla 6.4.1 resume la cobertura temporal de los ajustes para los turnos matutino y vespertino.

COBERTURA TEMPORAL DE LOS AJUSTES DEL MODELO DE CAJA				
	Tiempo de crecimiento	Tiempo de decrecimiento	Tiempo no ajustado	Total
Turno matutino	40,2% (8078 min)	10,3% (2048 min)	49,5% (9886 min)	100% (20012 min)
Turno vespertino	36,9% (7036 min)	13,8% (2641 min)	49,3% (9415 min)	100% (19092 min)
Total	38,6% (15114 min)	12,0% (4689 min)	49,4% (19301 min)	100% (39104 min)

Tabla 6.4.1 – Distribución de la cobertura temporal de los ajustes realizados. Los porcentajes se encuentran referidos al total de minutos registrados para la fila correspondiente.

Se observa que se logró una cobertura apenas mayor al 50%. Esto es, de todas las medidas registradas dentro de los intervalos de ocupación nominal, la mitad se encuentra comprendida en alguna estimación de la tasa de renovación de aire. Este porcentaje se considera satisfactorio, considerando que se han evitado intervalos temporales con medidas de CO₂ particularmente ruidosas o con andamios poco claros.

Impacto de la duración variable de los intervalos de ajuste sobre los resultados

Si bien los resultados presentados permiten evaluar la frecuencia relativa de ocurrencia de diferentes tasas de ventilación dentro del conjunto de ventanas ajustadas, los mismos no reflejan la frecuencia temporal real de dichos eventos. Esto se debe a que las ventanas temporales ajustadas son de duración variable. Ventanas de alta tasa de ventilación y de corta duración (por

ejemplo, asociadas a apertura de ventanas durante un corto período de tiempo para ventilar) tienen el mismo peso en la distribución estimada que ventanas de muy larga duración. Por lo tanto, los histogramas presentados podrían ser estimadores sesgados (por exceso), en términos temporales, de la probabilidad de ocurrencia de ciertos niveles de ventilación.

Para evaluar el problema descrito, en primer lugar se estratificaron los resultados de ajuste en rangos de tasa de ventilación y se analizó la distribución de la duración de las ventanas de ajuste para cada estrato. Se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6.4.4.

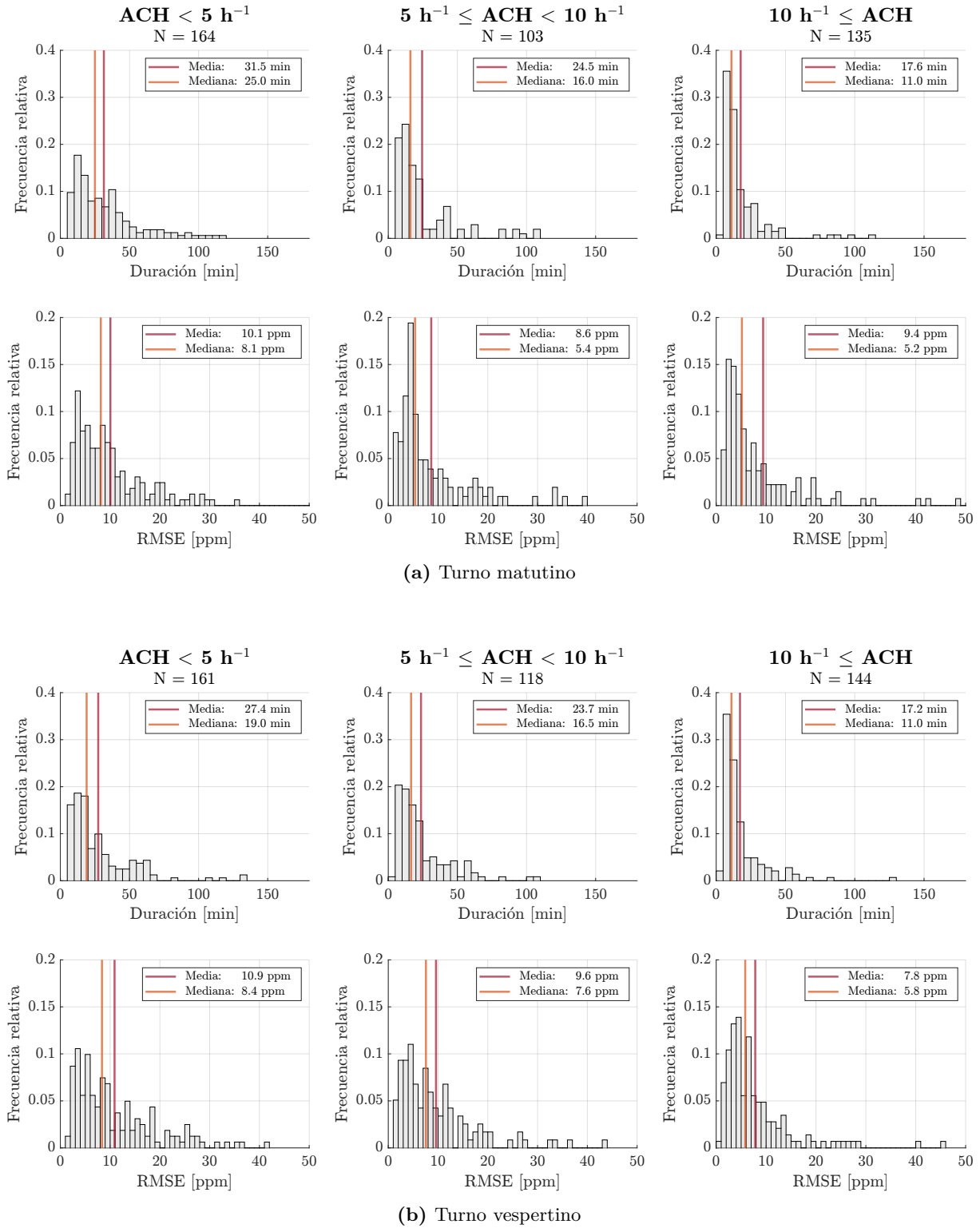


Figura 6.4.4 – Distribución de duración de las ventanas de ajuste y RMSE asociado, estratificando por rangos de tasa de ventilación. El valor N corresponde al total de datos en cada categoría.

Se observa que los valores medios bajan al subir la tasa de renovación de aire. En particular para valores mayores a 10 h^{-1} , se observa que la gran mayoría de las observaciones presentan duraciones muy cortas. El comportamiento es similar para ambos turnos. Esto muestra que la problemática descrita es plausible y que las tasas de ventilación altas pueden encontrarse sobrerrepresentadas en un sentido temporal.

Por otra parte, se construyó un estimador que tuviera en cuenta la duración de cada ventana de ajuste. Para ello se computó la media diaria de la tasa de ventilación ponderada en la duración de las ventanas de ajuste. Esto es, se computó diariamente para el turno matutino y vespertino, durante las horas de ocupación nominal

$$\overline{ACH}_p = \frac{\sum_{i=1}^v ACH_i \Delta t_i}{T} \quad (6.4.1)$$

donde $\overline{ACH}_p$ es la media ponderada diaria, v es el número de ventanas de ajuste para el turno considerado dentro de las horas de ocupación, Δt_i es la duración de cada ventana y T es el tiempo total cubierto por ventanas de ajuste para el día considerado (esto es, $T = \sum_{i=1}^v \Delta t_i$). Se obtuvieron así los siguientes histogramas de distribución para cada turno.

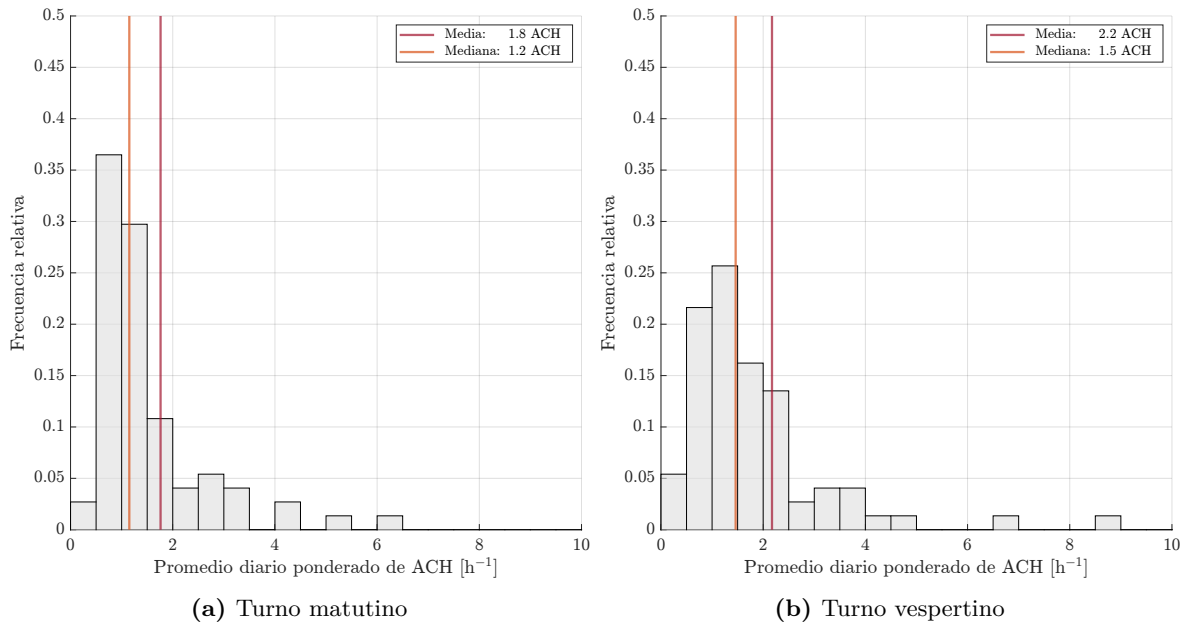


Figura 6.4.5 – Distribución de la media diaria de ACH, ponderada en el tiempo.

Se observa que la estimación diaria de ACH ponderada por el tiempo de ajuste es mucho menor que la estimación dada por los histogramas de la figura 6.4.2 y se encuentra por debajo de lo estipulado por la ASHRAE y por la recomendación de la OMS. Esto refleja que durante la mayor parte del tiempo en que el salón se encuentra ocupado la tasa de ventilación es baja, pero hay eventos de corta duración con alta tasa de ventilación.

Los resultados ponderados en el tiempo muestran que el análisis presentado sobre el conjunto de ventanas ajustadas, sin discriminar por su duración temporal, sobrestima el valor esperado de tasa de ventilación para un instante dado. No obstante, se destaca que ambos análisis son complementarios y aportan información desde puntos de vista diversos. Si bien el valor ponderado representa mejor la tasa de ventilación media diaria, es importante reconocer la existencia de ventanas con tasas de ventilación elevadas, aunque sean de corta duración. Este tipo de eventos puede lograr disminuir sustancialmente el riesgo de contagio por vía aérea, como se mostrará en la sección 7.4.3 del capítulo 7.

Estratificación temporal del análisis estadístico

Los resultados de tasa de ventilación fueron estratificados mensualmente, con el fin de analizar posibles variaciones con el cambio de estación y el aumento de la temperatura exterior.

En primer lugar, se analizó la distribución mensual de tasas de ventilación considerando el total de ventanas ajustadas, independientemente de su duración temporal. Se obtuvieron así los siguientes diagramas de caja.

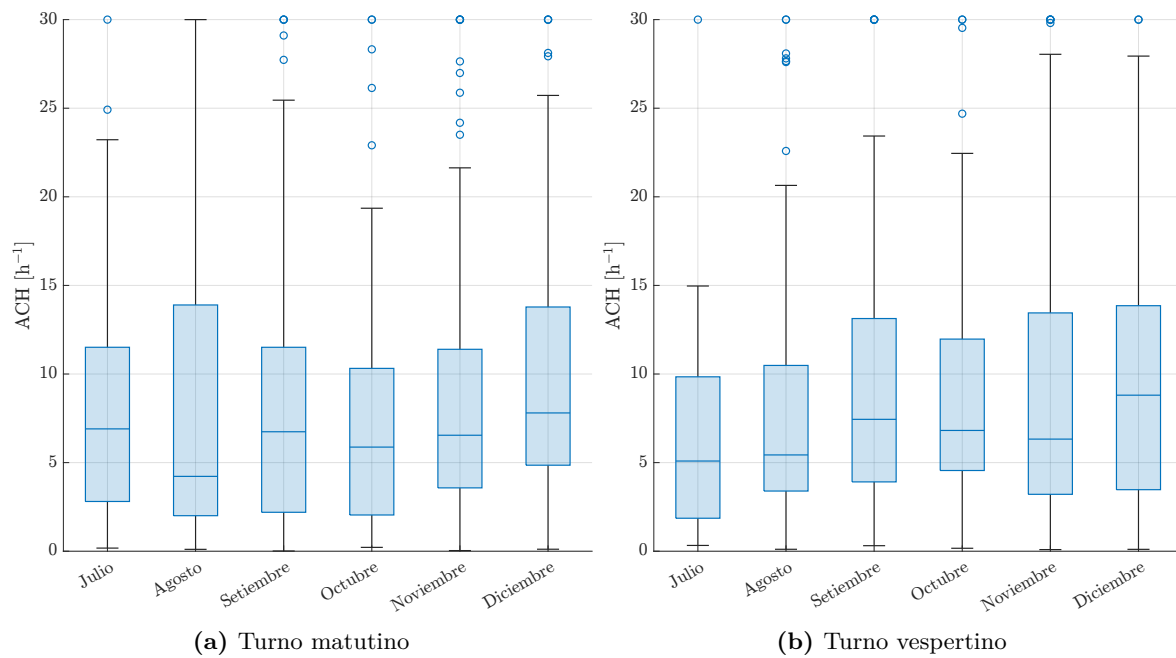


Figura 6.4.6 – Diagramas de caja para la distribución mensual de las tasas de ventilación ajustadas.

Se observa una leve tendencia general de crecimiento, aunque con oscilaciones mensuales, de la media de la tasa de ventilación. Asimismo, se destaca una gran dispersión en los ajustes obtenidos, con rangos intercuartílicos de ACH de entre 5 h^{-1} y 10 h^{-1} .

Por otra parte, los valores medios mensuales son elevados. Estos podrían encontrarse amplificados por eventos de corta duración, como se detalló anteriormente. Por lo tanto, se computaron los mismos diagramas de caja pero considerando las medias diarias de ACH ponderadas en el tiempo. Se obtuvieron así los siguientes diagramas.

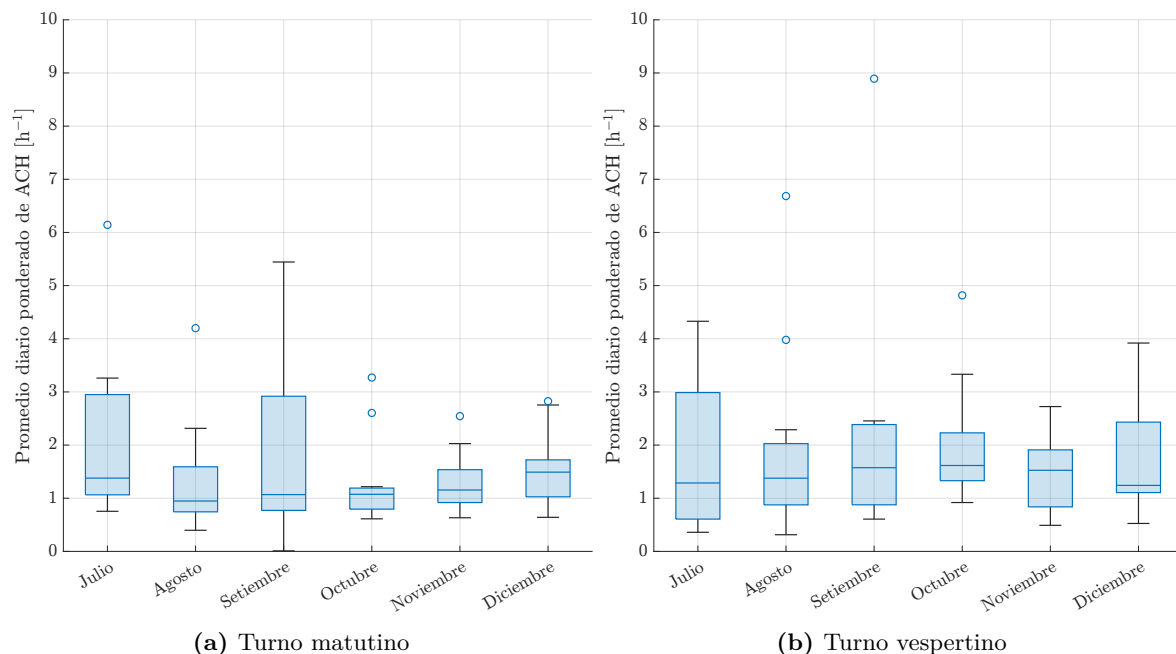


Figura 6.4.7 – Diagramas de caja para la distribución mensual de las tasas de $\overline{ACH}_p$.

Nuevamente, se observan valores mucho más bajos de ACH que para la distribución de la totalidad de ventanas ajustadas. El comportamiento temporal es bastante estable y el cuartil superior nunca supera valores de 3 h^{-1} , lo cual es considerado insuficiente.

6.4.2 Experimentos controlados

Se realizaron tres pruebas de decaimiento la noche del viernes 10 de setiembre (pruebas 1A, 1B y 1C) y otras tres la noche del viernes 15 de octubre en el salón 2 de la escuela (pruebas 2A, 2B y 2C).

Sensores disponibles

Se dispuso de todos los monitores de CO_2 descritos en la sección 4.3 del capítulo 4 (aunque no todos estuvieron disponibles para todas las pruebas). Estos es:

- **AQ1 y AQ2:** los dos monitores Aeroqual 500 con cabezal de CO_2 .
- **AC1 y AC2:** los dos monitores Air CO_2 ntrol 5000.
- **AR1 y AR2:** los dos monitores contruidos en base a placas Arduino y los sensores MH-Z19B.

Posicionamiento de los sensores

Para todas las pruebas los sensores se mantuvieron en las mismas posiciones. Todos fueron colocados a 0,7 m del piso (sobre escritorios) a lo largo de la diagonal del salón entre el escritorio de la maestra y el armario del fondo (diagonal NW-SE). La figura 6.4.8 muestra y numera las posiciones utilizadas sobre el plano de planta del salón.

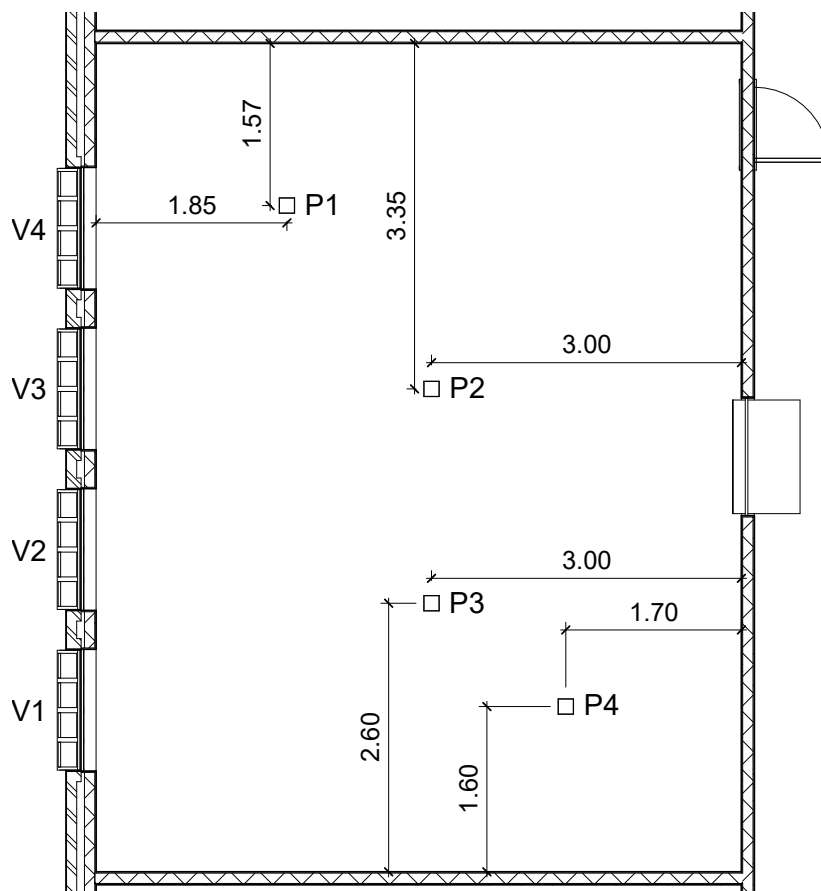


Figura 6.4.8 – Definición de las posiciones utilizadas para colocar los sensores de CO_2 durante las pruebas controladas en el salón 2. Las cotas señaladas se encuentran en metros. Todas las posiciones señaladas se encuentran a 0,7 m del piso.

Por otra parte, la tabla 6.4.2 detalla qué sensores estuvieron disponibles y en qué posición fueron colocados para cada una de las pruebas. Se destaca que los sensores Aeroqual intercambiaron su posición durante el período de generación de la prueba 1C. Las posiciones declaradas en dicha prueba para estos monitores se corresponden con el período de decaimiento que fue efectivamente ajustado.

POSICIONES DE LOS SENSORES DE CO ₂ DURANTE LAS PRUEBAS CONTROLADAS							
Fecha	Prueba	AQ1	AQ2	AC1	AC2	AR1	AR2
10/09/21	1A	P4	P1	P3	P2	-	P2
	1B	P4	P1	P3	P2	-	P2
	1C	P1	P4	-	-	P4	P2
15/10/21	2A	P1	P4	P3	P2	-	-
	2B	P1	P4	P3	P2	-	-
	2C	P1	P4	P3	P2	-	-

Tabla 6.4.2 – Posiciones de los sensores de CO₂ durante las pruebas controladas, según la nomenclatura definida en la figura 6.4.8.

Resumen de pruebas y cronología de eventos

Las pruebas de decaimiento se realizaron con las siguientes configuraciones de las aberturas del salón. Se utiliza la numeración de ventanas indicada en la figura 6.4.8. En todos los casos la apertura fue completa.

- **Prueba 1A:** se abrió únicamente la hoja izquierda de la ventana 2.
- **Prueba 1B:** se abrieron la hoja izquierda de la ventana 2 y la banderola.
- **Prueba 1C:** se abrió únicamente la banderola.
- **Prueba 2A:** se abrieron las hojas izquierda y derecha de las ventanas 1 y 4, respectivamente y se abrió la banderola.
- **Prueba 2B:** se abrieron la hoja izquierda de la ventana 1, la banderola y la puerta.
- **Prueba 2C:** se abrieron la hoja izquierda de la ventana 2 y la banderola.

La motivación para la elección de las configuraciones detalladas fue diversa. Las configuraciones de las pruebas 1A, 1B y 1C fueron elegidas con el objetivo de comparar regímenes de ventilación unilateral (1A y 1C) con una configuración de ventilación cruzada (1B). La configuración 1C representa el peor caso observado durante el funcionamiento normal de la escuela y la configuración 1B representa un régimen de ventilación cruzada de apertura mínima hacia el exterior (interesante en aras de compatibilizar la ventilación con el confort térmico en los días más fríos). Por otra parte, la configuración 2A estudia el efecto de separar el área de apertura hacia el patio y la prueba 2B evalúa un “camino” de ventilación diagonal, que podría minimizar las zonas de estancamiento y maximizar la renovación de aire en el sector de mayor ocupación. Por último, la configuración 2C repite la prueba 1B en un día diferente, lo que permite evaluar en cierta medida el posible impacto de las condiciones externas.

Todas las pruebas controladas fueron realizadas con el resto de las aperturas del edificio cerradas. Por lo tanto, es posible que durante la operación normal de la escuela las configuraciones estudiadas permitieran tasas de ventilación mayores (por ejemplo, si se abrieran las ventanas del salón de enfrente).

Se destaca que durante la operación normal del salón la banderola siempre permanece abierta, mientras que las puertas y ventanas al patio pueden ser cerradas. Esto queda garantizado por la dificultad de acceso y de operación de la banderola.

Por otra parte, la tabla 6.4.3 resume la cronología de eventos de las diferentes pruebas realizadas.

CRONOLOGÍA DE EVENTOS					
10 de setiembre de 2021					
1A		1B		1C	
Hora	Evento	Hora	Evento	Hora	Evento
18:48	Inicia generación de CO ₂	19:47	Inicia generación de CO ₂	20:13	Inicia generación de CO ₂
19:06	Finaliza generación de CO ₂	19:58	Finaliza generación de CO ₂	20:40	Finaliza generación de CO ₂
19:13	Encendido de ventiladores	19:58	Encendido de ventiladores		(ventiladores encendidos durante la generación)
19:30	Apagado de ventiladores y apertura de aberturas	20:03	Apagado de ventiladores y apertura de aberturas	20:40	Apagado de ventiladores y apertura de aberturas
19:47	Cierre de aberturas	20:13	Cierre de aberturas		
15 de octubre de 2021					
2A		2B		2C	
Hora	Evento	Hora	Evento	Hora	Evento
18:10	Inicia generación de CO ₂	18:50	Inicia generación de CO ₂	19:35	Inicia generación de CO ₂
18:25	Apagado de ventiladores y apertura de aberturas	19:13	Apagado de ventiladores y apertura de aberturas	20:23	Apagado de ventiladores y apertura de aberturas
18:36	Cierre de aberturas	19:23	Cierre de aberturas	20:47	Cierre de aberturas

Tabla 6.4.3 – Cronología de eventos de las pruebas controladas en el salón 2.

Resultados

Las figuras 6.4.9 y 6.4.10 muestran la evolución temporal de la concentración de CO₂ para cada una de las pruebas. La alternancia en el sombreado del fondo señala los eventos detallados en la cronología de la tabla 6.4.3.

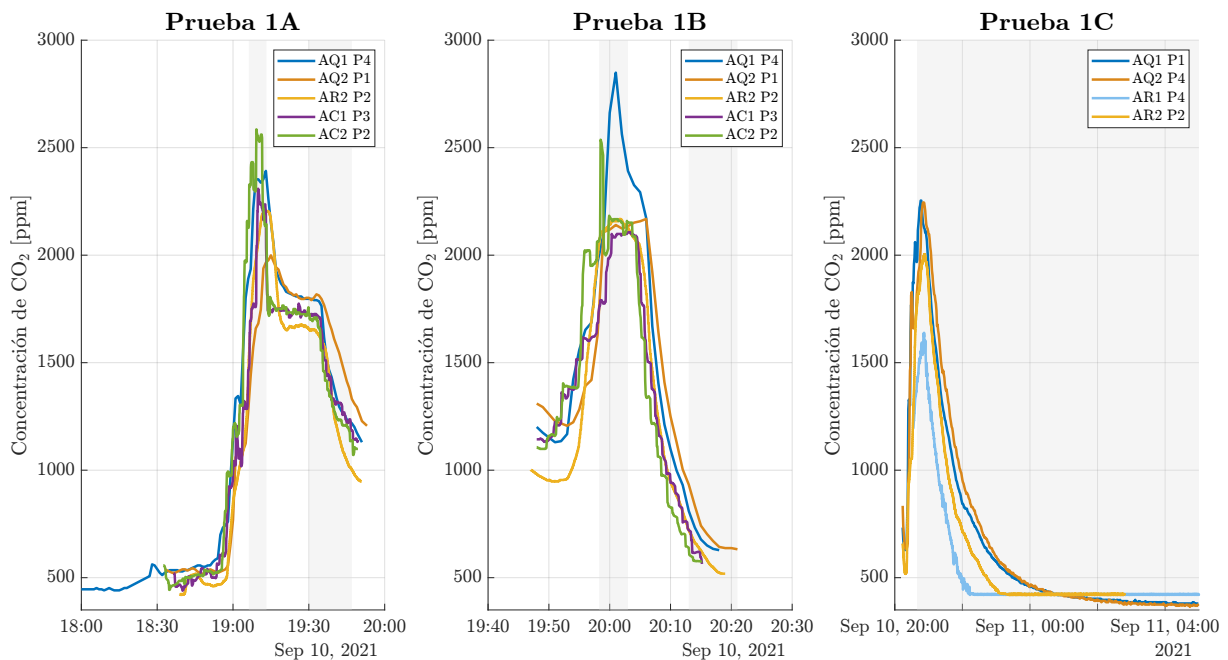


Figura 6.4.9 – Resultados obtenidos durante las pruebas controladas del viernes 10 de setiembre de 2021.

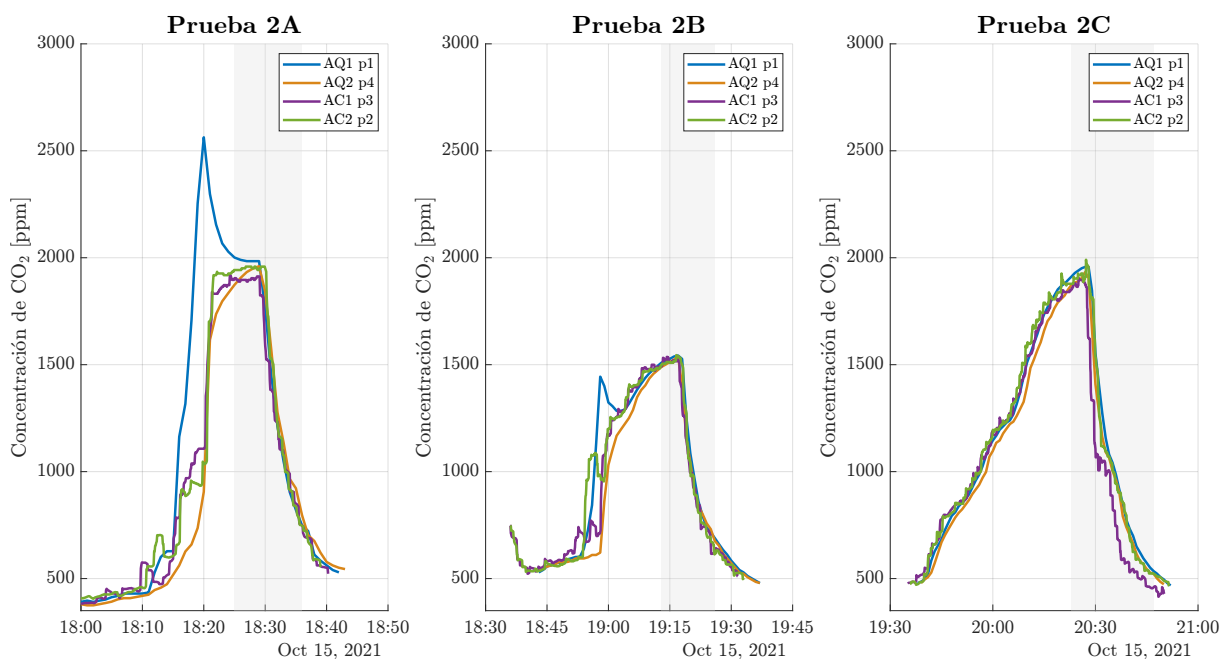


Figura 6.4.10 – Resultados obtenidos durante las pruebas controladas del viernes 15 de octubre de 2021.

En términos generales, se observa una concordancia satisfactoria entre las lecturas de los diferentes instrumentos, con apartamientos máximos correspondientes a los sensores Arduino. Esto parece ser particularmente cierto para los decaimientos de las pruebas 2A y 2B. La concordancia entre las lecturas y la validez de la hipótesis de mezcla perfecta es abordada en la sección 6.4.3.

Por otra parte, se observa que encender los ventiladores de techo reduce y homogeneiza la concentración de CO_2 . Esto queda evidenciado por el abatimiento de los picos de concentración producido al encender los ventiladores en las pruebas 1A, 1B y 1C (figura 6.4.9). Asimismo,

se observa que para las pruebas 2A, 2B y 2C las concentraciones son más uniformes, dado que la generación fue llevada a cabo con los ventiladores encendidos. Una notoria excepción es el monitor Aeroqual 1, colocado en el escritorio. La alta concentración observada durante el crecimiento de la prueba 2A puede deberse a la presencia de personas cerca del sensor. Se cuidó que al momento del decaimiento no hubiera personas cerca de ninguno de los sensores.

Por último, se observa que para el decaimiento de la prueba 1C, desarrollado durante toda la noche, los sensores Arduino presentaron desvíos notorios respecto de los monitores Aeroqual. Asimismo, al alcanzar una concentración de aproximadamente 420 ppm, las lecturas de estos monitores se estabilizaron en un valor constante de forma abrupta, lo cual no parece correcto. Esto se debe a que los sensores no son capaces de registrar concentraciones inferiores al valor de 400 ppm indicado durante su ajuste. En las gráficas se observa un valor de corte de 420 ppm debido a que los resultados presentados se encuentran corregidos mediante un factor multiplicativo de 1,05, como se indica en la sección 4.7.3 del capítulo 4; los datos crudos del instrumento se estabilizan en 400 ppm. Para los ajustes presentados a continuación no se consideró esta parte de la curva artificialmente estabilizada.

Ajuste de los datos según el modelo de caja

Se ajustó el modelo de caja dado por la ecuación (6.3.1) para las series de decaimiento de la concentración de CO_2 obtenidas durante las pruebas controladas. La selección de datos fue manual, tomando en cuenta la cronología de eventos de la tabla 6.4.3 pero eligiendo según el andamiaje de la curva¹⁴.

En el caso de las pruebas controladas se cambió la restricción superior para el valor de C_{eq} . Se utilizó una cota superior de 500 ppm. Esto se debe a que la ocupación fue muy reducida y el aire de reposición tuvo una concentración atmosférica de CO_2 ¹⁵, por lo que el valor de equilibrio debe ser sustancialmente bajo (despreciando la generación por ocupación, en el entorno de 400 ppm).

La tabla 6.4.4 detalla los parámetros ajustados en cada prueba para cada sensor y el RMSE asociado.

¹⁴En todas las pruebas se observó un tiempo muerto entre la operación de las aberturas y la reacción de los sensores.

¹⁵Asegurado al encontrarse desocupado el resto de la escuela.

RESULTADOS DE AJUSTE DEL MODELO DE CAJA PARA LAS PRUEBAS CONTROLADAS					
Prueba	Instrumento	ACH [h^{-1}]	C_o [ppm]	C_{eq} [ppm]	RMSE [ppm]
1A	AQ1	3,44	1744	500	56,87
	AQ2	1,88	1816	350	12,16
	AC1	3,32	1690	500	53,12
	AC2	3,49	1625	500	51,73
	AR2	3,88	1639	350	33,31
1B	AQ1	12,12	2313	433	74,82
	AQ2	11,90	2189	497	18,71
	AC1	13,52	2063	500	28,64
	AC2	15,11	1898	488	36,34
	AR2	16,14	1583	500	18,43
1C	AQ1	1,16	2091	397	18,81
	AQ2	1,06	2077	383	11,88
	AR1	1,61	1918	378	16,03
	AR2	2,00	1582	350	30,70
2A	AQ1	16,70	1758	500	7,83
	AQ2	15,08	1842	500	23,96
	AC1	15,32	1795	500	39,87
	AC2	19,42	1915	500	41,78
2B	AQ1	14,70	1507	500	25,83
	AQ2	13,38	1383	500	31,17
	AC1	14,39	1496	500	25,67
	AC2	17,33	1465	500	43,49
2C	AQ1	9,32	1826	477	35,86
	AQ2	8,06	1645	415	40,67
	AC1	11,85	1836	449	77,67
	AC2	11,13	1786	500	73,92

Tabla 6.4.4 – Parámetros del modelo de caja ajustados en cada prueba a partir de las medidas de cada sensor.

En primer lugar, se observó que para los sensores AQ1, AC1 y AC2 en la prueba 1A y para el sensor AR2 en la prueba 1B, el parámetro C_{eq} quedó acotado por su restricción superior de 500 ppm. Para verificar el impacto de esta restricción sobre los resultados, se probó aumentar la cota y se obtuvieron valores C_{eq} mucho mayores. En particular, para los sensores señalados para el experimento 1A se observaron valores de más de 1000 ppm y tasas de ventilación asociadas mucho mayores. Este problema de ajuste puede tener varias causas. Por un lado, puede deberse en parte a fenómenos de mezcla incompleta, propiciados por una ventilación muy pobre (unilateral y con una única abertura en el caso 1A). Esto parece particularmente probable para el sensor AQ1, ubicado en la posición 4, que *a priori* parece razonable que sea una zona de estancamiento. Por otro lado, el problema también puede deberse a que la evolución de la concentración haya sido muy lenta (consistente con una ventilación pobre) y que los valores medidos no hayan logrado capturar correctamente el andamio de la curva (en particular su asíntota). De cualquier manera, se aplicó la restricción mencionada y se obtuvieron resultados consistentes con los sensores que no se vieron afectados por la restricción de C_{eq} .

Para varios de los sensores de las pruebas 2A, 2B y 2C también se observó el comportamiento descrito en el párrafo anterior. Sin embargo, en estos casos se vio que aumentar la restricción sobre C_{eq} no produce grandes cambios sobre la tasa de ventilación, debido a que el valor ajustado nunca supera 650 ppm.

Por otra parte, la figura 6.4.11 muestra gráficamente los ajustes obtenidos.

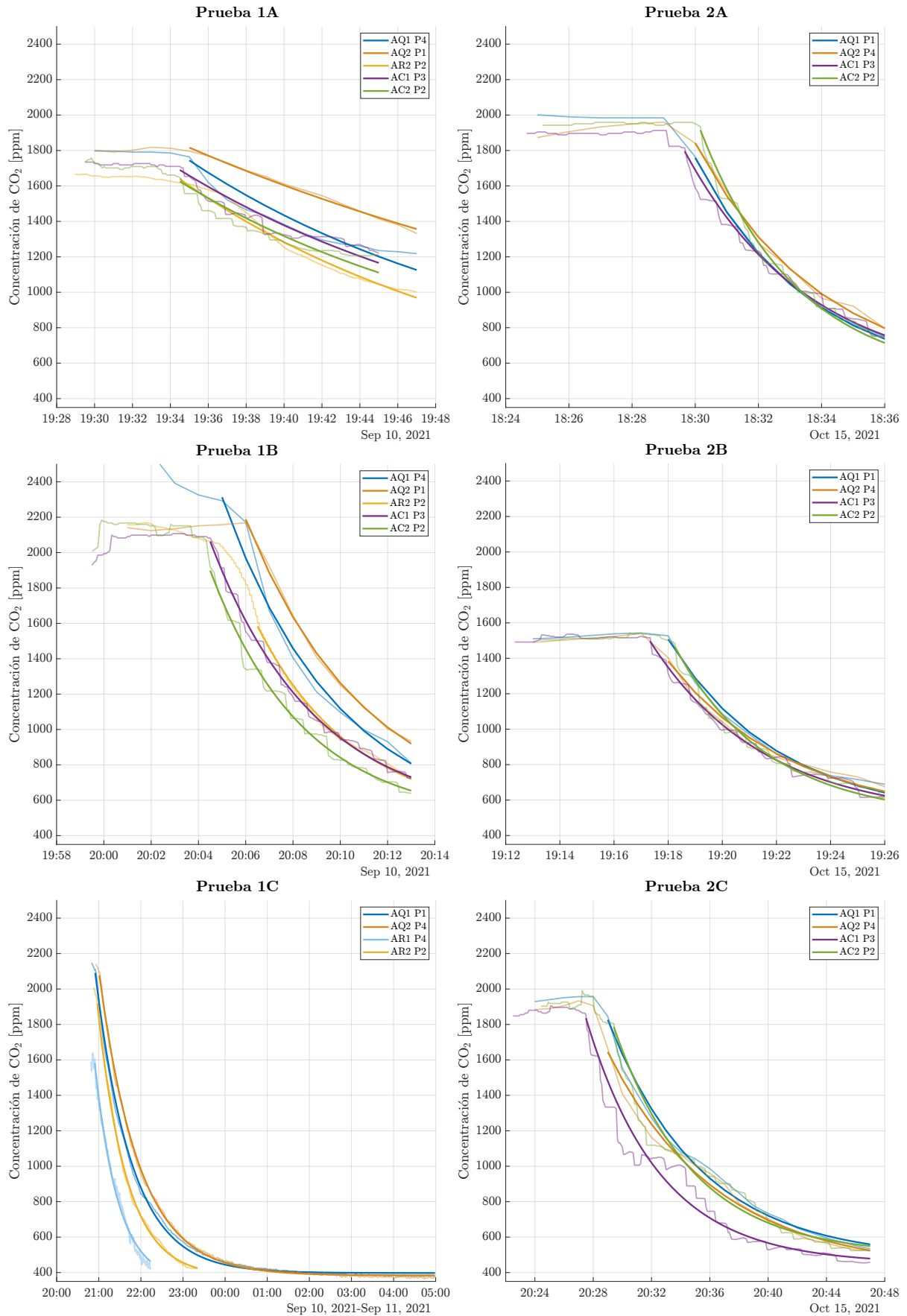


Figura 6.4.11 – Ajustes del modelo de caja para las pruebas controladas de decaimiento.

A fin de simplificar la comparación entre los resultados de las diferentes pruebas, la tabla 6.4.5 resume los valores medios y el desvío estándar muestral de la tasa de ventilación ($\overline{ACH}$ y s_{ACH} , respectivamente), computados a partir de las estimaciones de cada instrumento para cada prueba.

MEDIA Y DESVÍO DE LA TASA DE VENTILACIÓN PARA CADA PRUEBA CONTROLADA						
Prueba	1A	1B	1C	2A	2B	2C
$\overline{ACH}$ [h^{-1}]	3,20	13,76	1,46	16,63	14,95	10,09
s_{ACH} [h^{-1}]	0.77	1,85	0,43	1,99	1,68	1,72

Tabla 6.4.5 – Media y desvío estándar muestral de la tasa de ventilación ajustada en cada experimento. Resultados computados a partir de los ajustes de los diversos instrumentos.

En primer lugar, se destaca la notoria diferencia entre las configuraciones de ventilación unilateral (1A y 1C) y cruzada (1B, 2A, 2B y 2C). Las segundas logran una tasa de ventilación un orden de magnitud mayor que las primeras. En particular, la tasa de ventilación más baja se obtuvo abriendo únicamente la banderola al pasillo (prueba 1C). La configuración unilateral con apertura al patio (prueba 1A) produjo una tasa de ventilación de aproximadamente el doble. Esto es razonable, pensando en que la apertura al patio produce interacción directa con el viento exterior, mientras que la banderola comunica con aire estancado (resto del edificio)¹⁶. Empero, también la configuración 1A produjo resultados significativamente menores que las configuraciones de ventilación cruzada.

Las pruebas 1B y 2C arrojaron resultados similares. Ambas implicaron la misma configuración de aperturas, pero fueron realizadas en días diferentes. Esto es alentador, en el sentido de que las altas tasas de ventilación obtenidas no sean producto de condiciones meteorológicas atípicas. Para obtener resultados concluyentes sería necesario repetir más veces la prueba de esta configuración, en diferentes días.

La mayor tasa de ventilación se obtuvo durante la prueba 2A. Se alcanzó un valor mayor que para la prueba 2B, que implicó la misma área de apertura al patio. Las pruebas 1B y 2C implicaron la mitad de área de apertura al patio. Claramente la relación con el área es no lineal, puesto que las pruebas 2A y 2B no duplicaron a las 1B y 2C en tasa de ventilación.

Por último, se destaca que, observando la figura 6.4.11, parece que las pruebas 2A y 2B son las que lograron una mayor consistencia entre los ajustes (curvas más similares). Esto podría deberse a patrones de ventilación más uniformes y con menores zonas de estancamiento, lo cual es razonable dada la configuración de las aperturas (ventilación a lo largo de la diagonal principal o simétrica alrededor del plano este-oeste). No obstante lo anterior, las pruebas 2A y 2B no son las que presentan una menor dispersión (en términos de s_{ACH}) en los valores de ACH estimados.

Los valores de ACH obtenidos verifican que el salón estudiado presenta la potencialidad de una muy alta tasa de ventilación natural. A modo de referencia, en el contexto de la pandemia de COVID-19, la OMS ha recomendado tasas de ventilación de 10 L/s persona, que dado el volumen del salón y considerando una ocupación de 30 personas (peor caso posible) equivale a 6,83 ACH. En este sentido, la ventilación natural del salón sería más que suficiente. Sin embargo, estos resultados deben ser matizados a la luz de los presentados en la sección 6.4.1 durante la operación cotidiana. Se observó que las tasas de ventilación altas, del orden de las obtenidas durante las pruebas controladas, son eventos más bien puntuales, no sostenidos en el tiempo. Los resultados muestran entonces que durante las clases en general no se mantienen abiertas las ventanas al patio. Probablemente esto se deba a la incompatibilidad de tasas de ventilación

¹⁶En casos de operación normal sería esperable que esta diferencia fuera menor, en la medida en que otras ventanas del edificio estuvieran abiertas).

tan altas con el confort térmico de los ocupantes del salón. Con tasas de ventilación tan altas, la temperatura del salón será similar a la temperatura exterior, lo que en invierno puede ser demasiado frío. Esto será discutido de forma cuantitativa en el capítulo 9.

En definitiva, probablemente el diseño de aberturas se encuentre sobredimensionado, puesto que genera tasas de ventilación demasiado altas. Esto lleva a que los ocupantes cierren las ventanas y la ventilación efectiva sea baja. Más allá de esto, hace falta evaluar cuantitativamente si los niveles reales de ventilación son insuficientes o no desde el punto de vista del riesgo de contagio y qué estrategias de ventilación se pueden utilizar para minimizar dicho riesgo. Esto será abordado en el capítulo 7.

6.4.3 Evaluación de la hipótesis de mezcla perfecta

Datos diarios

Con el fin de evaluar la hipótesis de mezcla perfecta, se compararon las series de medidas de los monitores AQ1 y AQ2. Las figuras 6.4.12, 6.4.13 y 6.4.14 muestran los resultados obtenidos para algunos días con comportamiento cualitativamente diverso.

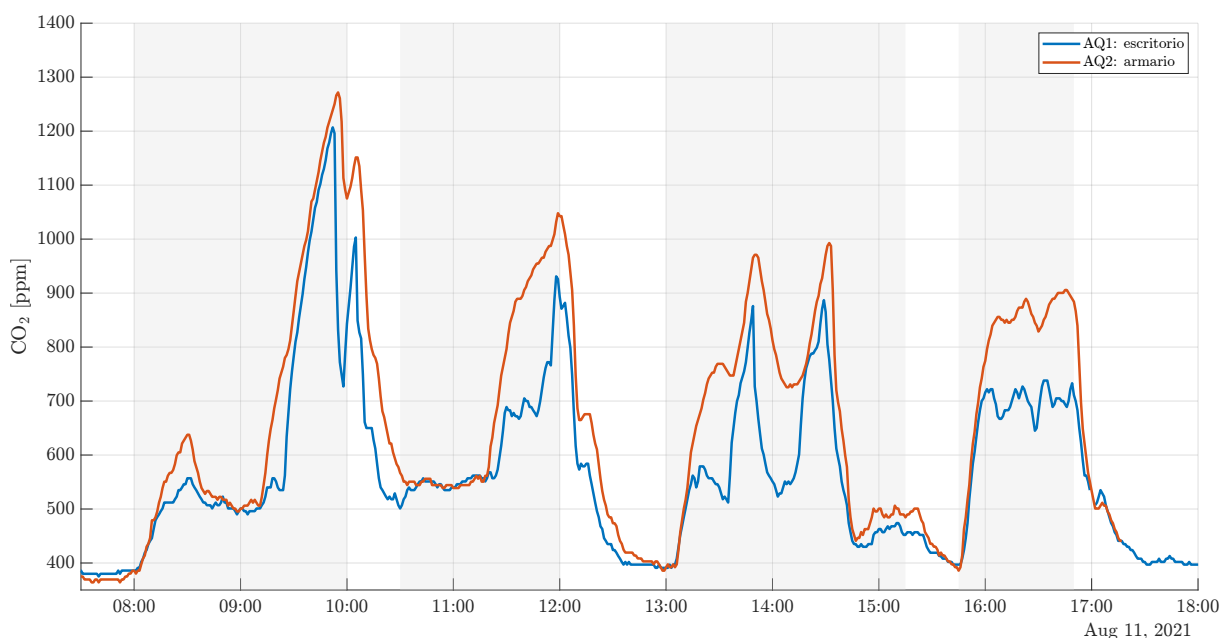


Figura 6.4.12 – Concentración diaria de CO₂. Resultados al frente y al fondo del salón para el miércoles 11 de agosto.

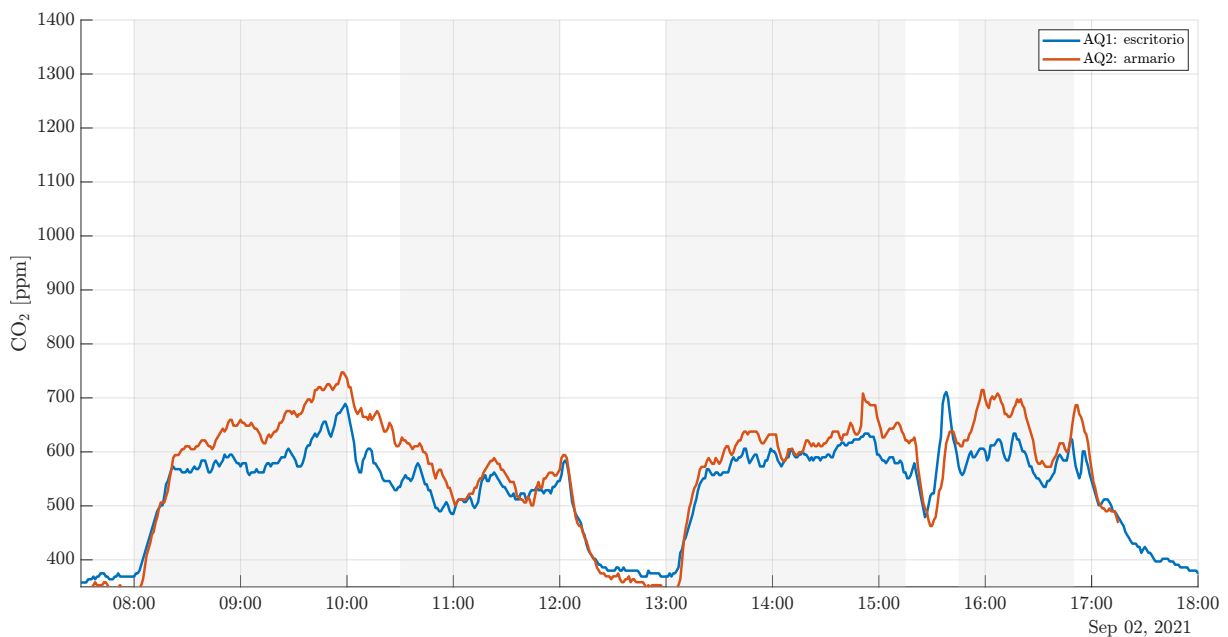


Figura 6.4.13 – Concentración diaria de CO₂. Resultados al frente y al fondo del salón para el jueves 2 de setiembre.

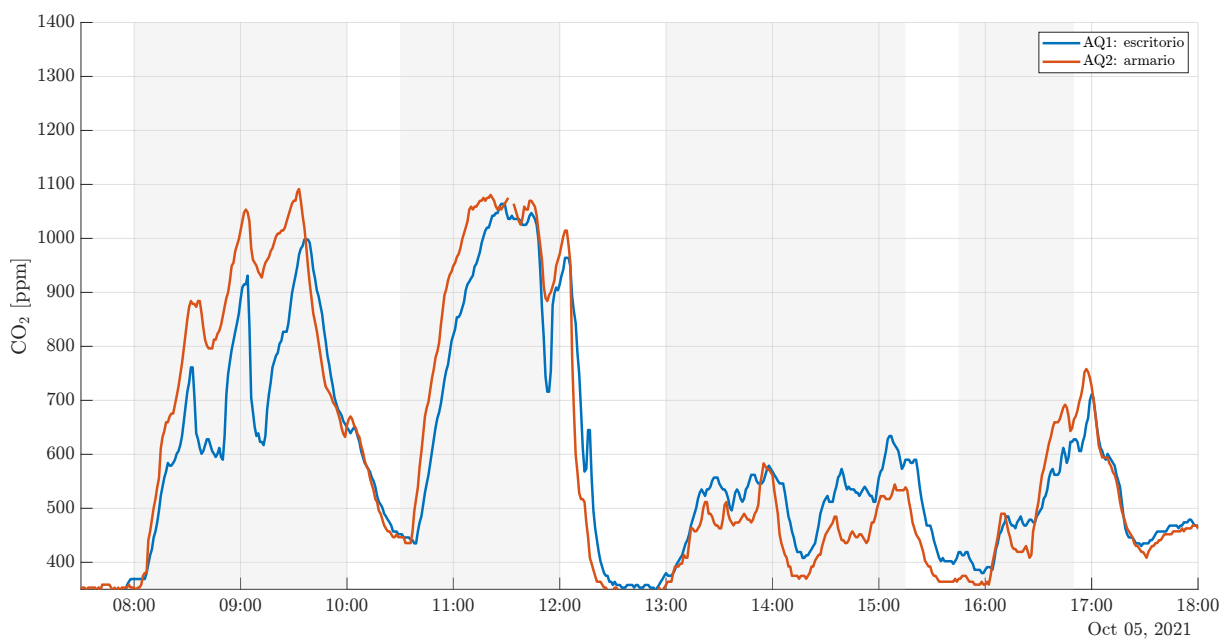


Figura 6.4.14 – Concentración diaria de CO₂. Resultados al frente y al fondo del salón para el martes 5 de octubre.

En las figuras anteriores se observa que la concentración al fondo del salón suele ser superior a la concentración al frente del salón. Esto es *a priori* razonable, dado que es probable que la posición sobre el armario del fondo sea una región de estancamiento, puesto que es un ángulo y no se encuentra alineada con ninguna abertura. Una curiosa excepción puede observarse durante el primer intervalo de ocupación del turno vespertino el día 5 de octubre (figura 6.4.14), que mantuvo concentraciones superiores al frente. Sin embargo, las diferencias son pequeñas.

Asimismo, la hipótesis de que el sensor AQ2 se encuentra en una región de estancamiento es consistente con la amplitud de las variaciones observadas. Los días 11 de agosto (figura 6.4.12) y 5 de octubre (figura 6.4.14) se observan oscilaciones de entre 300 ppm y 400 ppm de amplitud en

los registros del sensor AQ1. El sensor AQ2 presenta oscilaciones de forma similar, que parecen responder a los mismos estímulos, pero que son de amplitud significativamente menor, de entre 100 ppm y 200 ppm. Es esperable que una región estancada tenga variaciones mucho más suaves de su concentración, por presentar un transporte advectivo de CO_2 menor.

Por otra parte, se condujo un análisis cuantitativo. Se computó la diferencia de concentración de CO_2 entre el fondo y el frente del salón para todos los instantes dentro de los horarios de ocupación nominal en los que se contó con medidas simultáneas de los dos monitores Aeroqual¹⁷. Se obtuvo así la distribución de diferencias de concentración mostrada en la figura 6.4.15, que también muestra los resultados estratificados por turno de ocupación.

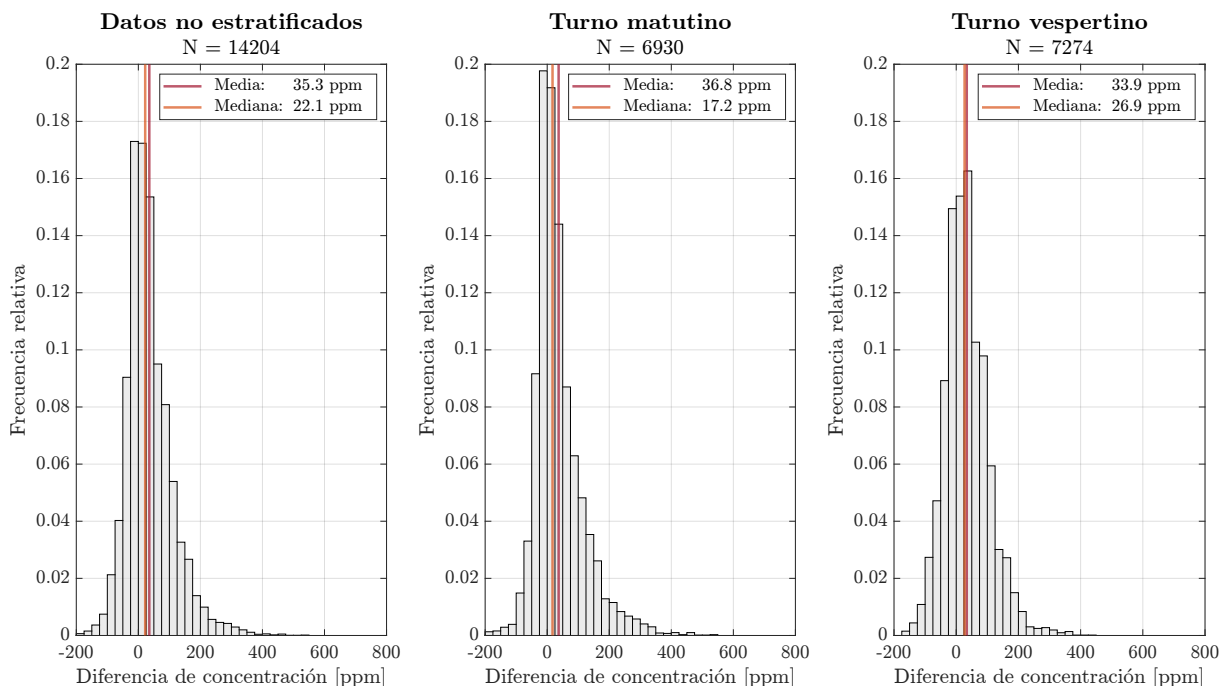


Figura 6.4.15 – Histograma de diferencia de concentraciones de CO_2 entre el fondo y el frente del salón en horas de ocupación nominal.

En primer lugar, se observa que el comportamiento es esencialmente independiente del turno de ocupación (matutino o vespertino). Por otra parte, se destaca que se obtuvieron distribuciones ligeramente asimétricas hacia la derecha. En términos medios, la diferencia entre ambos puntos de medida es bastante pequeña y resulta comparable con la incertidumbre de los monitores AQ1 y AQ2. Empero, eso no quita que para una parte relativamente grande de las medidas las diferencias sean significativas.

También se construyeron gráficos de frecuencia acumulada para estimar la función de distribución de los datos relevados. En este caso, se analizó el valor absoluto de las diferencias entre ambos sensores para el conjunto total de datos relevados durante horas de ocupación nominal y también se estratificaron los resultados por turno de ocupación. La figura 6.4.16 muestra los resultados obtenidos.

¹⁷En la presente sección, siempre que se refiere a la diferencia de concentración entre ambos monitores se considera la concentración del fondo menos la concentración del frente.

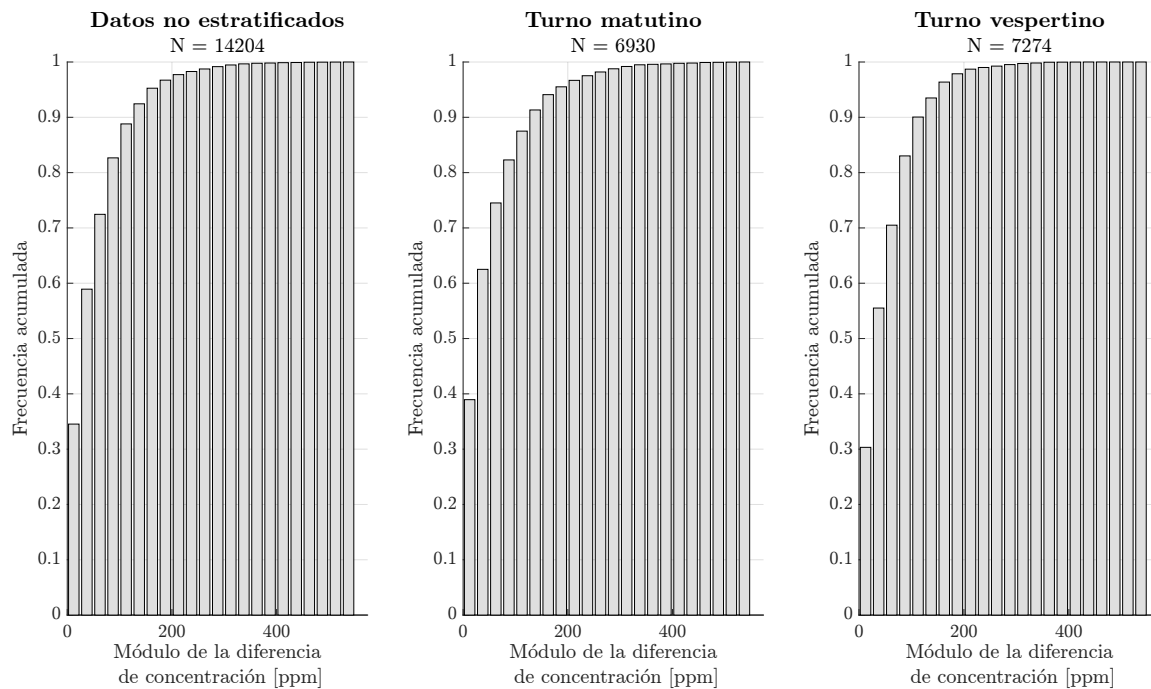


Figura 6.4.16 – Frecuencia acumulada del valor absoluto de la diferencia de concentraciones de CO_2 entre el fondo y el frente del salón. El valor N corresponde al total de datos en cada categoría.

Se observa que el tercer cuartil ronda las 100 ppm, algo relativamente razonable para considerar mezcla perfecta dados los niveles de incertidumbre instrumental.

Los resultados presentados fueron estratificados por mes y se construyeron gráficos de caja para analizar posibles cambios temporales en la diferencia de concentración de CO_2 entre los puntos relevados. Este análisis también fue estratificado por turno de ocupación. Se obtuvo así la figura 6.4.17.

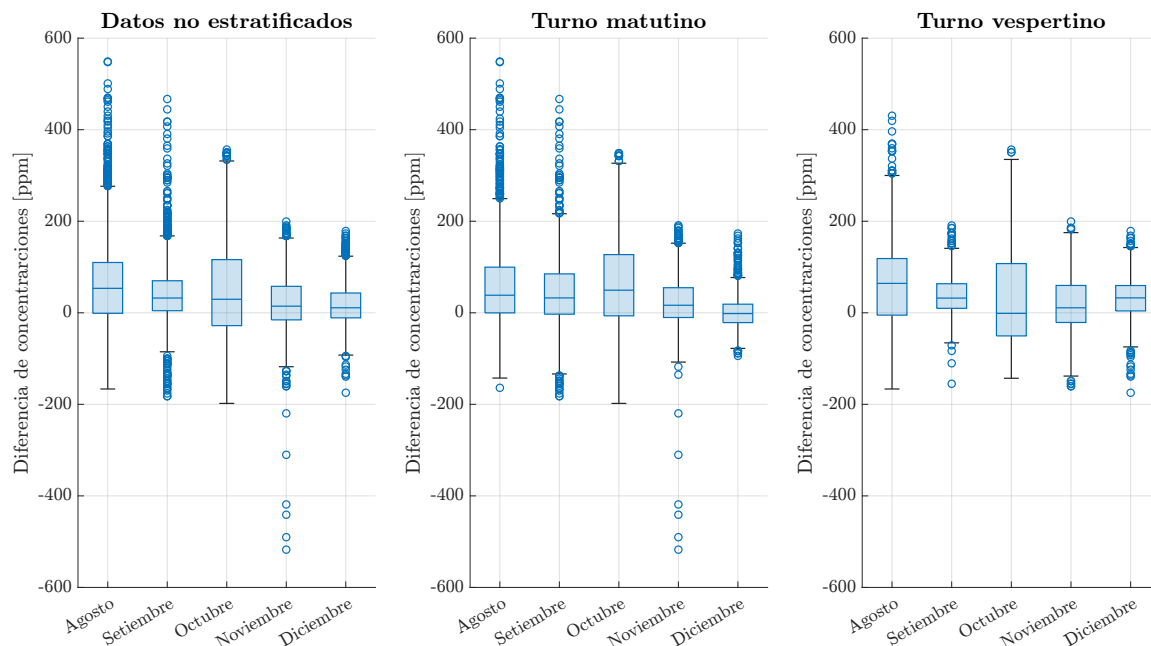


Figura 6.4.17 – Gráficos de caja para la evolución temporal de la diferencia de concentraciones de CO_2 entre el fondo y el frente del salón.

En la figura anterior se observa que las diferencias de concentración se mantuvieron relativamente estables durante toda la campaña de medidas, con un rango intercuartílico máximo en el mes de octubre. En los últimos tres meses del año la mediana de la diferencia decreció en el turno matutino y creció en el vespertino, pero ambos cambios fueron marginales. Asimismo, en dicho período se observa una reducción sostenida del rango intercuartílico de la diferencia de concentraciones, lo que indica que los eventos de altas diferencias de concentración redujeron su frecuencia.

También es interesante señalar que en el mes de noviembre el turno matutino registró una gran cantidad de eventos atípicos, en los cuales la concentración en el frente del salón fue mayor que en el fondo.

Por último, la figura 6.4.17 permite apreciar que existe cierta asimetría en la distribución de diferencia de concentración. En este sentido, en general la concentración al frente del salón es menor que en el fondo (como se aventuró en el capítulo 4). Sin embargo, en aproximadamente un 25% de los registros la lectura al fondo fue menor que al frente del salón.

Con el fin de evaluar cuantitativamente el grado de mezcla observado, se consideró lo estipulado por las normas ASTM D6245 - 18 (2018) y ASTM E741 - 11 (2011). Estas señalan que se puede considerar que la mezcla es perfecta si la diferencia entre las concentraciones de CO_2 medidas en diferentes puntos es menor al 10% de la diferencia entre la concentración media (computada entre los puntos de medida) y la concentración exterior (del aire de reposición). Tomando como referencia una concentración exterior de 380 ppm¹⁸, se computó el porcentaje de apartamiento durante las horas de ocupación nominal. La figura 6.4.18 presenta diagramas de caja mensuales para dicho porcentaje, tanto para el total de datos como estratificando por turno de ocupación.

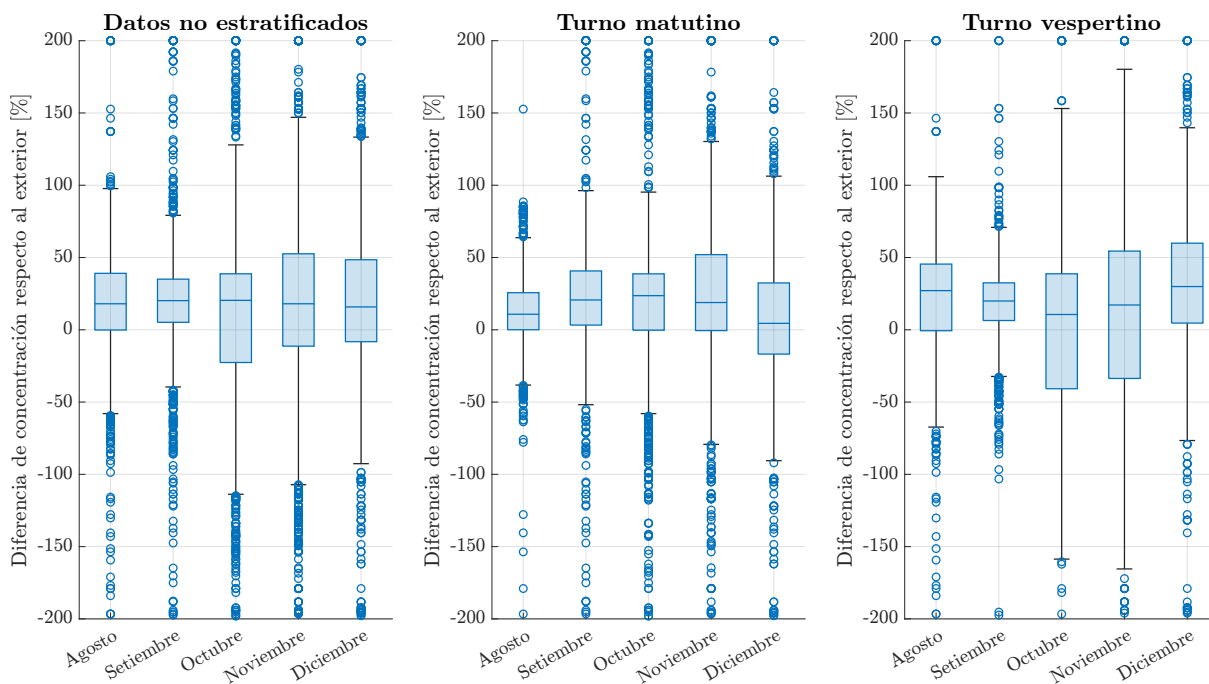


Figura 6.4.18 – Gráficos de caja para la evolución temporal de la diferencia de concentraciones de CO_2 entre el fondo y el frente del salón como porcentaje de la diferencia entre la concentración media y la concentración exterior.

Se observa que en muchos casos las diferencias registradas superan el límite del 10%. En este sentido, la mezcla no podría ser considerada perfecta, al menos desde el punto de vista de la normativa ASTM. Sin embargo, las diferencias absolutas mostradas por la figura 6.4.17 no son

¹⁸En casos con ingreso de aire desde el pasillo y alta concentración de CO_2 en dicho ambiente, este número podría ser mayor.

mucho mayores que la incertidumbre instrumental declarada por el fabricante de los monitores Aeroqual 500. Esto podría señalar que el criterio establecido por la normativa fuera demasiado exigente. En este sentido, dado el instrumental utilizado, los resultados podrían ser considerados aceptables.

Pruebas controladas

Durante las pruebas controladas se encendieron los ventiladores de techo del salón para homogeneizar el sistema. Para evaluar este proceso, se consideraron las medidas obtenidas durante el proceso de crecimiento de la concentración de la prueba 1A. La figura 6.4.19 muestra las series registradas por cada instrumento, la concentración media y las diferencias de cada sensor con la media, expresadas como porcentaje de la diferencia entre la concentración media y la concentración de reposición (380 ppm).

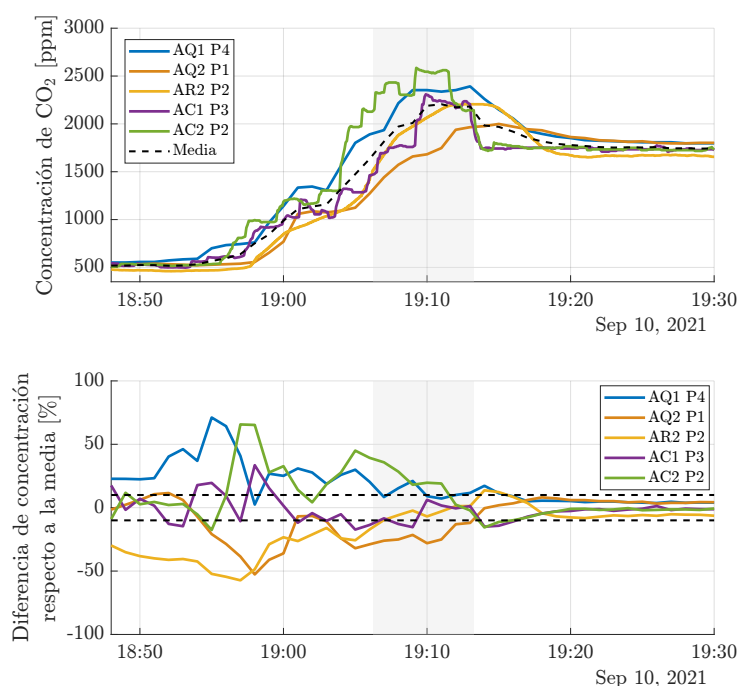


Figura 6.4.19 – Proceso de generación de CO₂ durante la prueba 1A. El fondo sombreado detalla el período con ventiladores encendidos. En el segundo gráfico, las líneas punteadas señalan el desvío límite de $\pm 10\%$ establecido por la norma ASTM D6245 - 18 (2018) para considerar válida la hipótesis de mezcla perfecta.

Se observa que durante el proceso de generación de CO₂ de la prueba 1A se registraron desvíos significativos respecto de la hipótesis de mezcla perfecta, con apartamientos máximos de aproximadamente 50%. En general, la concentración es mayor cuanto más cercana es la posición del sensor a la fuente de CO₂, con la notoria excepción del monitor AC2, que presenta concentraciones sistemáticamente mayores a la media. Además, el monitor AC1, en la posición P3, es el que presenta un menor desvío respecto a la media, siendo el punto de medida más representativo del sistema.

Al encender los ventiladores se observa una marcada homogeneización del sistema. Esto permite que, al iniciar la prueba de decrecimiento, se cumpla con la hipótesis de mezcla perfecta desde el punto de vista de la norma ASTM D6245 - 18 (2018). Dado que para los demás experimentos se desarrollaron procesos de aumento de la concentración con los ventiladores encendidos, es razonable suponer que todas las pruebas comenzaron cumpliendo la condición de mezcla perfecta.

Por otra parte, se analizaron los apartamientos de cada sensor respecto a la media durante

los decaimientos ajustados en la sección 6.4.2. Para ello, se recortaron los intervalos ajustados de forma tal de tener registros de todos los sensores y se interpolaron las medidas a una frecuencia común de una medida por minuto. Las figuras 6.4.20 y 6.4.21 expresan los resultados como diagramas de caja. La figura 6.4.20 muestra la diferencia absoluta de concentración respecto a la media. La figura 6.4.21 expresa dichos resultados como porcentajes de la diferencia de concentración entre la media de los instrumentos y la concentración exterior (380 ppm), de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D6245 - 18 (2018).

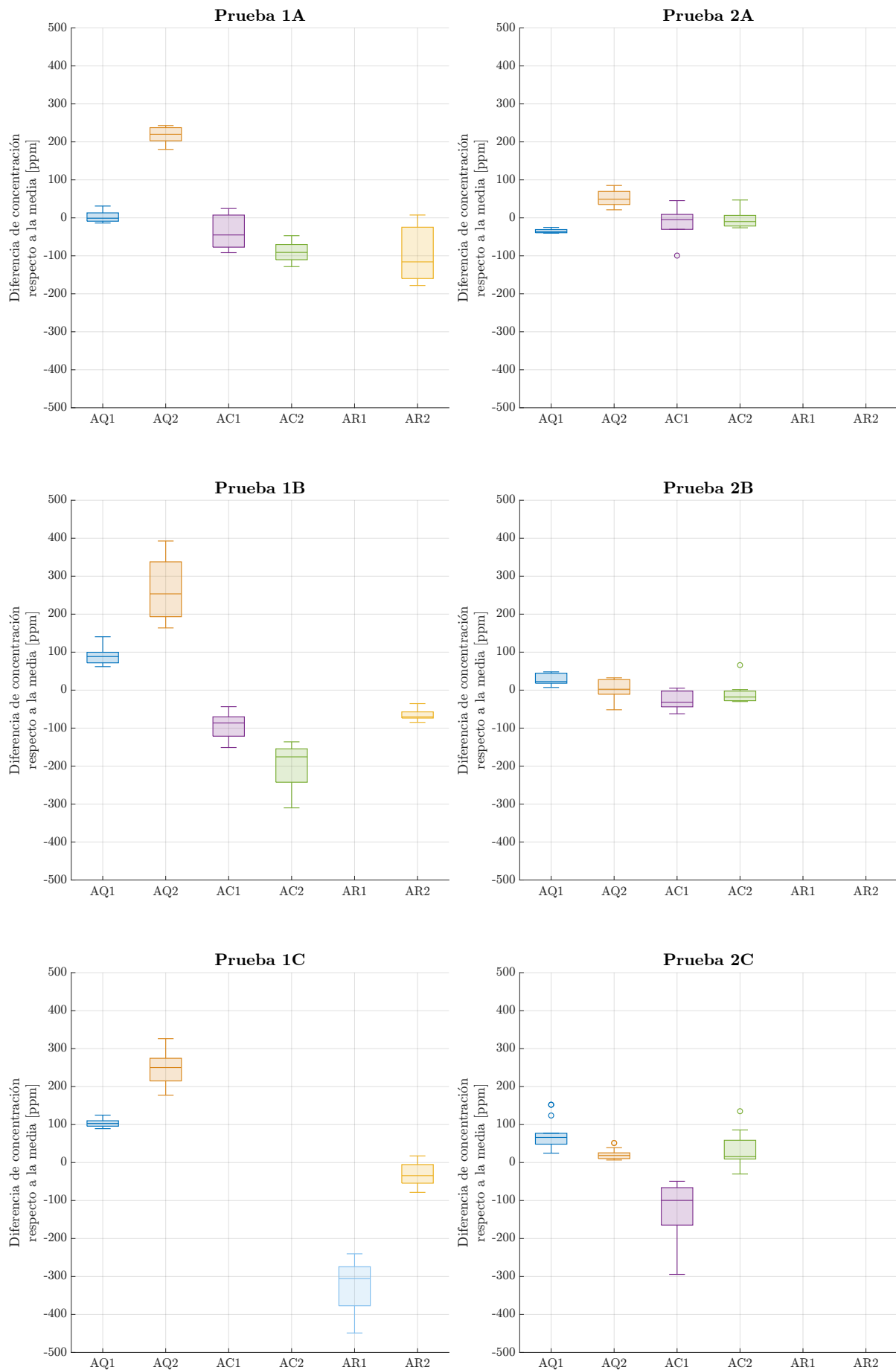


Figura 6.4.20 – Diferencias absolutas de concentración de cada sensor respecto a la media.

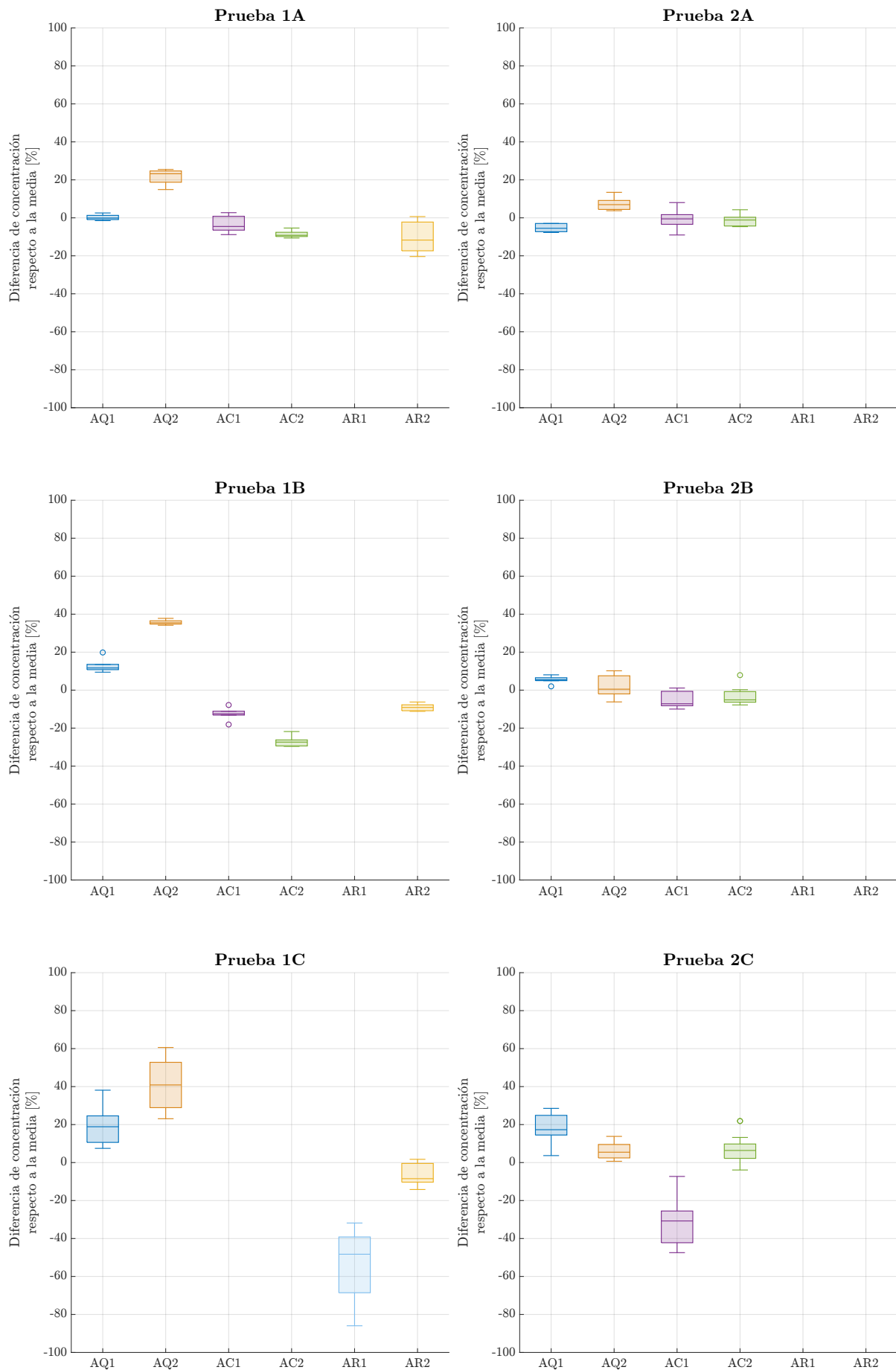


Figura 6.4.21 – Diferencias de concentración de cada sensor respecto a la media, expresadas como porcentaje de la diferencia entre la concentración media y la concentración exterior.

En primer lugar, se observa que las pruebas del día 10 de setiembre presentan, en general, diferencias entre sensores que son significativamente mayores que las de las pruebas del día 15 de octubre. Salvo para el sensor AC1 durante la prueba 2C, las pruebas del 10 de setiembre presentan apartamientos absolutos en el orden de la incertidumbre declarada por los fabricantes. Es posible que las diferencias elevadas de las pruebas 1A, 1B y 1C se deban, al menos en parte, a una mala sincronización entre los relojes. Originalmente, las pruebas controladas fueron planeadas únicamente para estimar la tasa de ventilación, lo que no requiere sincronizar los relojes con demasiado cuidado. Para la segunda prueba se agregó el objetivo de evaluar la hipótesis de mezcla perfecta y se sincronizaron todos los relojes. Dado que los decaimientos de concentración pueden ser muy rápidos, diferencias de un minuto pueden alterar significativamente los resultados. Si se dispusiera de más datos, se podrían reducir las medidas, colapsándolas en promedios cada dos o tres minutos. Empero, esto no es posible para todos los decaimientos (algunos cuentan con menos de 10 registros), por lo que se ha decidido computar las diferencias minuto a minuto. Por lo tanto, las diferencias de las pruebas 1A, 1B y 1C podrían estar sobrestimadas.

Los mayores apartamientos respecto a la media se observaron durante la prueba 1C (ventilación unilateral hacia el pasillo), mientras que los menores apartamientos se observaron durante las pruebas 2A y 2B (ventilación cruzada). Es así que las configuraciones de ventilación cruzada con un “camino” más amplio (con dos ventanas hacia el patio en extremos opuestos en la prueba 2A y a lo largo de una diagonal en la prueba 2B) resultaron en concentraciones más uniformes y en una mayor mezcla del aire durante el decaimiento.

Como se señaló anteriormente, las pruebas controladas probablemente consistan en un peor caso desde el punto de vista de la hipótesis de mezcla perfecta, puesto que durante la operación normal del salón de clases existe un forzante térmico producido por los alumnos que contribuye a la mezcla del aire. Esto es consistente con las diferencias de concentración observadas entre el frente y el fondo del salón de clase durante horas de ocupación, que en general no superaron las 100 ppm (figura 6.4.17). En cambio, para algunas pruebas controladas se observaron diferencias mayores respecto a la media.

Como comentario final, se observa que para el análisis de datos de las pruebas controladas se comparó cada sensor respecto a la concentración media, mientras que en el caso de los datos diarios se consideró la diferencia entre los puntos de medida. La elección de comparar con respecto a la media fue hecha para simplificar los datos presentados y la comparación entre sensores. Sin embargo, la norma ASTM D6245 - 18 (2018) requiere considerar las diferencias entre puntos de medida, lo que justifica el tratamiento de los datos diarios. Si se consideraran las diferencias entre todos los sensores de las pruebas controladas, se obtendrían diferencias aún mayores. Esto es consistente con lo observado en el párrafo anterior.

6.5 Conclusiones

En función de la tasa de ventilación estimada a partir de las medidas diarias de CO_2 , se concluyó que el salón presenta la potencialidad de alcanzar muy altas tasas de ventilación, por encima del requisito de diseño de la ASHRAE y de la recomendación sanitaria de la OMS para la pandemia de COVID-19. Esto es evidenciado por repetidas estimaciones ajustadas a partir de un modelo de mezcla perfecta. No obstante, en términos medios diarios, tanto el turno matutino como el vespertino mostraron resultados mucho menores, por debajo de los umbrales mencionados. Esto parece indicar que el salón se ventila de forma intensa pero por períodos de tiempo cortos. Esta situación amerita una evaluación detallada del riesgo de contagio, que será presentada en el siguiente capítulo. Asimismo, se destaca que no alcanzar tasas de ventilación altas de forma sostenida probablemente se debe a la operación de las aberturas que realizan los ocupantes.

Los resultados quedan supeditados a dos fuentes de incertidumbre principales. En primer lugar, las estimaciones presentadas no utilizan todos los datos registrados, sino que se logró una

cobertura temporal del orden del 50%. En segundo lugar, las ventanas temporales de estimación son de duración variable, lo que dificulta obtener un valor representativo para la tasa de ventilación. Se constató que la tasa de ventilación estimada se correlaciona con la duración de la ventana de ajuste: a mayor duración, menor tasa de ventilación.

Por otra parte, no se observaron patrones estacionales claros para la tasa de ventilación. Las variaciones mensuales de la tasa de ventilación diaria media fueron escasas. Esto puede deberse a que la campaña de medidas logró abarcar pocos días con temperaturas altas. Sería deseable extender la medición a los primeros meses de clase del año y analizar el comportamiento de los ocupantes ante temperaturas altas sostenidas.

Se sugiere para futuros trabajos investigar la posibilidad de automatizar el proceso de selección de ventanas de ajuste. Esto simplificaría significativamente el trabajo manual y permitiría estimaciones en vivo para muchos más puntos de medida. Una posibilidad a evaluar es el uso de técnicas basadas en el filtro Kalman. Asimismo, sería deseable que dicho proceso utilizara todos los datos registrados y realizara estimaciones en intervalos temporales de duración constante. Evaluar cuál es la duración adecuada y si los ajustes son buenos no es trivial. Lo segundo podría ser realizado a partir de un indicador como el RMSE, con un umbral de aceptación calibrado manualmente a partir de análisis como el presentado.

En cuanto a las pruebas controladas, las mismas reafirmaron la conclusión de que el salón presenta la potencialidad de alcanzar muy altas tasas de ventilación de forma sostenida, incluso con la apertura de pocas ventanas. Asimismo, permitieron concluir que los regímenes de ventilación cruzada son mucho más efectivos, con tasas de ventilación un orden de magnitud mayores que las obtenidas con ventilación unilateral.

En cuanto al análisis de la validez de la hipótesis de mezcla perfecta, los resultados de las medidas diarias son auspiciosos. El comportamiento cualitativo de las medidas al frente y al fondo del salón analizado es similar, con concentraciones normalmente superiores en el fondo, que, como se supuso *a priori*, parece ser una zona de estancamiento. En términos cuantitativos, la mediana de las diferencias de concentración de CO₂ se encuentra por debajo de la incertidumbre de los sensores utilizados, y el tercer cuartil es del orden de 100 ppm, lo que parece una diferencia aceptable.

No obstante lo anterior, se observaron diferencias máximas relativamente grandes, de entre 300 ppm y 400 ppm. Además, en una proporción significativa de las medidas no se cumplió con la condición de mezcla perfecta estipulada por las normas ASTM D6245 - 18 (2018) y ASTM E741 - 11 (2011). Esto se debió principalmente a la baja concentración interior de CO₂, por lo que es cuestionable si dicho límite es apropiado en el contexto estudiado, pudiendo ser demasiado estricto.

Por otra parte, los resultados del segundo día de pruebas controladas lograron cumplir con la hipótesis de mezcla perfecta de acuerdo a los estándares ASTM, excepto en el caso en que un monitor se encontró directamente enfrente a sólo dos aperturas opuestas abiertas y arrojó lecturas francamente menores de concentración de CO₂. Ignorando los resultados del primer día de medida, cuyas altas diferencias pueden deberse a la inadecuada sincronización de los monitores, se concluyó que altas tasas de ventilación son compatibles con la hipótesis de mezcla perfecta.

Si bien sería deseable profundizar el estudio de la validez de la hipótesis de mezcla perfecta, los resultados obtenidos se consideran satisfactorios dadas las diversas restricciones prácticas encontradas (acceso a la escuela, disponibilidad de sensores, etc.). Además, se destaca el valor de los resultados presentados en vista de que ninguna de las publicaciones consultadas evalúa la hipótesis de mezcla perfecta, que es fundamental para el uso de modelos de caja.

A futuro sería deseable repetir los estudios de mezcla perfecta en más salones, con datos detallados de ocupación y de configuración de las aberturas, con una mayor densidad de puntos y con variaciones de altura. Además, sería deseable comparar esquemas de ventilación con y sin ocupación.

Capítulo 7

Estimación del riesgo de contagio

Iba parecido a la noche. Sentose lejos de las naves, tiró una flecha y el arco de plata dio un terrible chasquido. Al principio el dios disparaba contra los mulos y los ágiles perros; mas luego dirigió sus amargas saetas a los hombres (...)

— Homero, *La Ilíada*, canto I

7.1 Introducción

El presente capítulo propone una estimación del riesgo de contagio por vía aérea en el salón 2 del edificio principal de la escuela. En particular, se analiza la probabilidad de contagio de SARS-CoV-2 por vía aérea de largo alcance (aerosoles) en función de los datos experimentales recabados y se comparan los resultados para la temporada invernal (*a priori* más preocupante) con los de la primavera. Se presentan resultados tanto para el turno matutino como para el vespertino.

7.2 Antecedentes y modelos de contagio

La sospecha de que diversas enfermedades, tanto de origen bacteriano como viral, pueden ser contagiadas por vía aérea mediante la formación de aerosoles fue postulada y experimentalmente estudiada en la primera mitad del siglo XX. En 1934 Wells, un investigador de la *Harvard School of Public Health*¹ publicó dos trabajos al respecto. En el primero de ellos (Wells, 1934), analizó la aerodinámica de las gotas expulsadas por los seres humanos durante diversos eventos respiratorios y concluyó que, en virtud del diámetro de éstas y de los efectos evaporativos, es probable que se formen aerosoles (gotículas muy pequeñas) que puedan ser transportados a grandes distancias por corrientes de aire. Asimismo, expresó claramente una preocupación sanitaria al respecto, planteando la posibilidad de que dichos aerosoles transportaran agentes patógenos como virus y bacterias. En su segundo trabajo (Wells y Stone, 1934), Wells presentó resultados de un experimento de laboratorio que verificó la capacidad infecciosa de bacterias aerosolizadas. Posteriormente, en 1936, Wells presentó resultados similares para el virus de la influenza y demostró que la luz UV podía imposibilitar su capacidad de contagio (Wells y Brown, 1936).

Los revolucionarios trabajos de Wells y sus colaboradores, cuya hipótesis de contagio aéreo mediante aerosoles ha sido verificada para diversas enfermedades como, por ejemplo, el ébola, la tuberculosis y la influenza (R. M. Jones y Brosseau, 2015; Killingley y Nguyen-Van-Tam, 2013), generaron la necesidad de poder evaluar cuantitativamente el riesgo epidemiológico de

¹Escuela de Salud Pública de la Universidad de Harvard.

contagio por vía aérea. En particular, el modelado cuantitativo permite la evaluación comparada de medidas de mitigación de contagio. Diversos investigadores han propuesto distintos modelos con este fin. Los mismos pueden, en general, ser agrupados en dos grandes categorías (Sze To y Chao, 2010):

1. Los modelos de tipo Wells-Riley.
2. Los modelos de tipo respuesta a la dosis.

7.2.1 Los modelos de Wells-Riley

Los modelos de Wells-Riley son una categoría relativamente amplia de modelos que estiman la probabilidad de infección por vía aérea de largo alcance (exclusivamente) de agentes patógenos. Todos ellos derivan del trabajo de Riley *et al.* (1978), que, basándose en la cuantificación de la dosis infecciosa propuesta por Wells (1955)², propuso un modelo relativamente sencillo para evaluar la probabilidad de contagio por vía aérea con el fin de estudiar un brote de sarampión en una escuela de Nueva York. Las hipótesis de este modelo han sido posteriormente relajadas por diversos investigadores, que también han agregado parámetros o han integrado nuevas variables con el fin de incorporar de forma explícita ciertos aspectos. Este proceso ha dado lugar al surgimiento de la mencionada familia de modelos.

Los modelos de Wells-Riley están basados en la ecuación de Reed Frost (Gammaitoni y Nucci, 1997a). En particular, esto implica que la probabilidad de contagio es la misma para todos los individuos de la población y que ésta se encuentra segregada (se asume que sólo hay contagio dentro de la población considerada) (Abbey, 1952). Estos modelos permiten llevar a cabo análisis epidemiológicos generacionales, pero en el presente trabajo se abordará únicamente el primer paso de contagio (esto es, no se analizarán casos donde individuos susceptibles se infecten y contagien a otros individuos).

Por otra parte, todos los modelos de Wells-Riley pueden ser clasificados como modelos de caja³, puesto que asumen⁴ que el sistema se encuentra perfectamente mezclado y que todo agente patógeno que ingresa al sistema se dispersa homogénea e instantáneamente en todo su volumen.

A continuación se presenta de forma somera esta familia de modelos.

Modelo de Wells-Riley original

Como se mencionó previamente, el modelo de Wells-Riley original se basa en la cuantificación ideada por Wells (1955) de la carga infecciosa, llamada “quanta”. Riley *et al.* (1978) definen un quantum como «(...) el número de partículas infecciosas transportadas por vía aérea requeridas para producir una infección, que puede consistir de una o más partículas»⁵.

Si se consideran los quanta como una especie químicamente inerte y se asume que el sistema (recinto considerado) se encuentra perfectamente mezclado, la concentración de quanta en cualquier instante queda definida como solución al siguiente balance de masa⁶

$$V \frac{dC_q}{dt} = qI - QC_q \quad (7.2.1)$$

²Wells fue mentor de Riley y es descrito por Nardell (2016) como «quizás el investigador más lúcido sobre las infecciones por vía aérea hasta la fecha (...)» (traducción personal desde el inglés).

³Ver sección 6.2.2 del capítulo 6.

⁴Salvo, hasta cierto punto, el modelo de Rudnick y Milton (2003), como se señala más adelante.

⁵Traducción personal del original en inglés: “A quantum is defined as the number of infectious airborne particles required to infect and may be one or more airborne particles.”.

⁶Se asume que el aire que ingresa al recinto está limpio, esto es, que su concentración de quanta es nula, y que el aire se comporta como un fluido incompresible.

donde V es el volumen del recinto, C_q es la concentración volumétrica de quanta, q es la tasa de generación de quanta por infectado⁷, I es el número de infectados primarios, Q es el caudal de ventilación total del recinto y t es el tiempo.

Considerando que el sistema ha alcanzado el equilibrio, resulta que la concentración de quanta en el ambiente es (Riley *et al.*, 1978)

$$C_{q_{eq}} = \frac{qI}{Q} \quad (7.2.2)$$

Recordando que se ha supuesto como hipótesis la mezcla perfecta del sistema, Riley *et al.* (1978) señalan que el número total de quanta inhalado durante un intervalo de tiempo t por un cierto ocupante se puede expresar como el volumen inhalado multiplicado por la concentración de quanta, esto es

$$\lambda = \frac{Iqpt}{Q} \quad (7.2.3)$$

donde λ es el número total de quanta inhalado y p es el caudal inhalado por una persona (ventilación pulmonar).

Asimismo, Riley *et al.* (1978) señalan que, dado que los quanta son entidades discretas, aleatoriamente distribuidas y que su concentración es muy baja, la probabilidad de infección se puede expresar como

$$P = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}} \quad (7.2.4)$$

La ecuación anterior describe el modelo de Wells-Riley original⁸ (Riley *et al.*, 1978). En el último paso de la deducción se utiliza como hipótesis⁹ que la probabilidad de infección queda descrita por una variable aleatoria X con distribución de Poisson de parámetro λ . Se tiene entonces que su función de probabilidad es

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (7.2.5)$$

La probabilidad de tener algún infectado se puede expresar como el complemento de la probabilidad de no tener ningún infectado:

$$P(X \geq 1) = 1 - P(X = 0) \quad (7.2.6)$$

Considerando $k = 0$ en la ecuación (7.2.5), resulta

$$P(X \geq 1) = 1 - e^{-\lambda} \quad (7.2.7)$$

de donde se obtiene la ecuación (7.2.4).

Rudnick y Milton (2003) señalan que la comprensión del modelo de Riley *et al.* (1978) queda supeditada a entender cabalmente el parámetro q . Tanto Rudnick y Milton (2003) como Nardell (2016) destacan que la idea de Wells era definir un parámetro capaz de describir el comportamiento estocástico de las infecciones por vía aérea de largo alcance. Dichos autores señalan que para una dosis total de un quantum ($\lambda = 1$) la probabilidad de infección es de un 63%, con lo que q puede ser entendido como la tasa de emisión de dosis infecciosas del 63% y como una medida de la “fuerza” infecciosa de los individuos infectados.

⁷Asumida idéntica para todos los infectados.

⁸En realidad, el trabajo de Riley *et al.* (1978) plantea también una mínima generalización de la ecuación anterior, donde el exponente se reescribe como $\sum_i \lambda_i$, donde el índice i recorre diferentes eventos de exposición consecutivos.

⁹La hipótesis de que la probabilidad de infección mantiene una relación de Poisson con los quanta totales fue postulada por Wells (1955) al formular el concepto de quanta (Gammaitoni y Nucci, 1997a; Nardell, 2016).

De todos los parámetros del modelo original de Wells-Riley, el más difícil de estimar es q , que depende del patógeno considerado y de la actividad de los ocupantes del recinto, que influye sobre la cantidad de gotículas emitidas (Buonanno, Stabile *et al.*, 2020). Sze To y Chao (2010) señalan que en general debe ser ajustado *a posteriori* a partir de datos epidemiológicos de uno o más brotes de una enfermedad. Para ello se puede expresar la probabilidad de contagio como

$$P = \frac{D}{S} \quad (7.2.8)$$

donde D es el número de infecciones secundarias registradas y S la población susceptible (observar que $S = n - I$, siendo n el tamaño total de la población). Luego, conociendo los demás parámetros, se puede despejar q a partir de la ecuación (7.2.4). La posibilidad de aplicar el modelo queda supeditada entonces a la disponibilidad de datos de brotes reales.

Por otra parte, también suele ser problemático conocer el caudal de renovación de aire, Q . En particular es difícil conocerlo en ambientes con ventilación natural, lo que dificulta tanto ajustar q como aplicar el modelo.

Modificaciones menores del modelo original

Diversos autores han introducido modificaciones relativamente menores (puesto que no alteran sus hipótesis fundamentales) en el modelo original de Wells-Riley con el fin de incorporar procesos o características particulares. Sze To y Chao (2010) destacan varios ejemplos, que pueden agruparse en las siguientes categorías.

1. **Modelos con filtrado:** consisten en agregar un factor en el exponente del modelo, R , que representa el efecto del uso de respiradores o tapabocas. Dicho factor es el complemento de la eficiencia de filtrado, esto es, la fracción de quanta que logra penetrar las barreras implementadas. El modelo supone que todos los individuos susceptibles utilizan elementos de protección idénticos (igual R para todos los ocupantes).
2. **Modelos con descomposición explícita del caudal:** se trata de modelos que incluyen diversos tipos de sumideros de patógeno, expresados en forma de flujos de salida que son incorporados (restando) en el miembro derecho de la ecuación (7.2.1). Por ejemplo:

- (a) incorporan procesos de eliminación de quanta por desinfección con luz ultravioleta y por filtrado con purificadores de aire, resultando

$$P = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q + \lambda_{UV}V + \eta_f Q_f}} \quad (7.2.9)$$

donde λ_{UV} es la tasa de inactivación por irradiación ultravioleta, Q_f es el caudal hacia el purificador y η_f es la eficiencia de su filtro.

- (b) incorporan procesos de pérdida de viabilidad del patógeno suspendido y de deposición del patógeno sobre superficies, resultando

$$P = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q + \lambda_v V + \lambda_d V}} \quad (7.2.10)$$

donde λ_v y λ_d son las tasas de pérdida de viabilidad y de deposición del patógeno.

Si bien los modelos expuestos ejemplifican la potencial flexibilidad del planteo original, la determinación completa del modelo puede volverse compleja, pues es necesario estimar los parámetros incorporados. Asimismo, Sze To y Chao (2010) aconsejan cautela en el uso estos modelos, dado que algunos de los mecanismos que se incorporan explícitamente pueden ya estar considerados de forma implícita en el valor de q . Por ejemplo, si se utilizara un valor de q estimado

a partir de la ecuación (7.2.4) en el modelo dado por la ecuación (7.2.10), se estarían duplicando los efectos de deposición y de pérdida de viabilidad, dado que estos se encontrarían ya implícitos en q por ser mecanismos no considerados de forma explícita en el modelo de cálculo. Esto conduciría a subestimar el riesgo de contagio. Observaciones similares aplican en los demás casos.

Modelo de Gammaioni y Nucci

El modelo propuesto por Gammaioni y Nucci (1997a, 1997b) es una relajación del planteo original de Riley *et al.* (1978), pues levanta la hipótesis de sistema estacionario (Sze To y Chao, 2010). Empero, se mantiene la hipótesis de mezcla perfecta.

El modelo se basa en el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias¹⁰:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{p}{V} S(t) N(t) \\ \frac{dN(t)}{dt} = -\frac{Q}{V} N(t) + qI \end{cases} \quad (7.2.11)$$

donde $N(t)$ es el número de quanta dispersos en el ambiente en un determinado instante. Se observa que en este modelo S y N son funciones del tiempo, dada la relajación de la hipótesis de estacionaridad. Se asume que dichas funciones son derivables.

La primera de las ecuaciones planteadas en (7.2.11) es postulada por Gammaioni y Nucci (1997a, 1997b) estableciendo que la tasa de infección (que es opuesta a la derivada temporal de la población susceptible) es proporcional al número de quanta inhalado por la población por unidad de tiempo. Esto es una forma alternativa de escribir la hipótesis de Wells (1955) de que la probabilidad de infección presenta una distribución Poisson con parámetro igual al número de quanta inhalado. En efecto, separando variables e integrando se obtiene que

$$S(t) = S_0 e^{-\frac{p}{V} \int_0^T N(t) dt} \quad (7.2.12)$$

donde S_0 es el número inicial de susceptibles. Observando que el número de infectados secundarios es $D = S_0 - S(t)$ se obtiene, en virtud de la ecuación (7.2.8)

$$P = 1 - e^{-\frac{p}{V} \int_0^T N(t) dt} \quad (7.2.13)$$

El exponente de la ecuación anterior es el número total de quanta inhalados por un individuo.

La segunda ecuación de (7.2.11) resulta de un balance de masa al agente patógeno (ecuación (7.2.1) expresada en términos de la cantidad absoluta de quanta). Considerando como condición inicial un número N_0 de quanta en el ambiente, se obtiene de dicha ecuación que

$$N(t) = \frac{qIV + (N_0 Q - qIV) e^{-\frac{Qt}{V}}}{Q} \quad (7.2.14)$$

Resulta entonces, a partir de (7.2.13) que

$$P = 1 - e^{-\frac{pIq}{Q} \left[t + \left(\frac{N_0}{Iq} - \frac{V}{Q} \right) \left(1 - e^{-\frac{Qt}{V}} \right) \right]} \quad (7.2.15)$$

La ecuación (7.2.15) es un modelo de tipo Wells-Riley que levanta la hipótesis de estacionaridad del sistema, una de las principales restricciones del modelo original junto con la hipótesis de mezcla perfecta (que se mantiene). Las dificultades asociadas a determinar Q y q se mantienen, así como los cuidados señalados por Sze To y Chao (2010) sobre el uso de valores de q determinados con otros modelos.

¹⁰En realidad, Gammaioni y Nucci (1997a, 1997b) definieron un parámetro C que utilizaron en lugar de Q para incluir desinfección por luz ultravioleta. Esto es similar a la modificación introducida en (7.2.9). Por simplicidad, se omite este aspecto en el planteo.

Por otra parte, es interesante notar que, si $N_o = 0$, la ecuación (7.2.15) tiende a la ecuación (7.2.4) a medida que avanza el tiempo y los términos exponenciales tienden a cero. La extinción de dichos términos corresponde a que el sistema alcance un régimen estacionario. Se puede decir entonces que el modelo de Gammaitoni y Nucci contiene al modelo de Wells-Riley original como caso particular.

Por último, se destaca que se puede sustituir el caudal Q por la tasa total de eliminación de quanta, de forma similar a lo expuesto en la ecuación (7.2.10). Esto permite considerar efectos como deposición de aerosoles sobre superficies y pérdida de viabilidad de patógenos.

Modelo de Rudnick y Milton

El abordaje propuesto por Rudnick y Milton (2003) significa un punto de inflexión para los modelos de Wells-Riley, puesto que permite desconocer la tasa de ventilación en el ambiente estudiado. La idea de estos investigadores fue utilizar el dióxido de carbono presente en el ambiente como un trazador natural para estimar qué fracción del aire presente en el ambiente fue respirada por alguna persona. El aire que ya fue respirado es el que puede transportar patógenos y provocar infecciones.

Asumiendo que los ocupantes del recinto en estudio son la única fuente de CO_2 presente¹¹ y suponiendo que el sistema se encuentra perfectamente mezclado, se puede escribir el siguiente balance de masa para el CO_2 generado por los ocupantes

$$C_a V_e = (C - C_{\text{ext}}) V \quad (7.2.16)$$

donde C_a es la concentración de CO_2 del aire espirado por cada ocupante, V_e es el volumen total espirado por los ocupantes, C es la concentración de CO_2 en el sistema y C_{ext} es la concentración de CO_2 en el aire de reposición. La expresión anterior es válida incluso si el sistema no se encuentra en régimen estacionario, pues simplemente expresa que la masa de CO_2 espirada por los ocupantes es igual a la masa de CO_2 en el sistema por encima de la que corresponde a la línea de base impuesta por el aire de reposición.

Observando que la fracción f de aire del sistema que ya fue respirado se puede expresar como

$$f = \frac{V_e}{V} \quad (7.2.17)$$

resulta, a partir de la ecuación (7.2.16), que

$$f = \frac{C - C_{\text{ext}}}{C_a} \quad (7.2.18)$$

Por otra parte, suponiendo, como se ha hecho en los apartados anteriores, que q , p , n e I permanecen constantes, la concentración de quanta en el ambiente, C_q , puede ser escrita como el producto de la concentración de quanta en el aire exhalado por los infectados (q/p) y la fracción volumétrica de aire que fue exhalado por los infectados (fI/n):

$$C_q = \frac{fIq}{np} \quad (7.2.19)$$

Asimismo, se define la fracción media de aire que ya fue respirado como

$$\bar{f} = \frac{\int_0^T f dt}{T} \quad (7.2.20)$$

¹¹Esta hipótesis no resulta restrictiva en el caso de estudio, pero no permite la presencia de, por ejemplo, estufas de gas. No obstante, si se conoce la tasa de generación de CO_2 de otras fuentes presentes, puede adaptarse el presente planteo sin mayores dificultades.

donde T denota el período de tiempo analizado. Se deduce entonces que la concentración media de quanta del recinto en el período analizado es

$$\bar{C}_q = \frac{\bar{f}Iq}{np} \quad (7.2.21)$$

Multiplicando C_q por el volumen total inspirado por un individuo del recinto en el período analizado (pt), se obtiene el número medio de quanta inhalado por dicho individuo:

$$\lambda = \frac{\bar{f}Iqt}{n} \quad (7.2.22)$$

Por último, utilizando la hipótesis de Wells (distribución Poisson de parámetro λ para la probabilidad de contagio), se obtiene que

$$P = 1 - e^{-\frac{\bar{f}Iqt}{n}} \quad (7.2.23)$$

La genialidad del enfoque de Rudnick y Milton radica en la eliminación del caudal de ventilación Q como parámetro explícito del modelo, que, como se mencionó previamente, es un parámetro particularmente difícil de estimar de forma continua en recintos con ventilación natural¹². Tampoco es necesario conocer el volumen del recinto estudiado. Asimismo, se mantiene el logro del modelo de Gammaitoni y Nucci de permitir no estacionaridad. El único requisito es disponer de monitoreo continuo de la concentración de CO₂, algo cada vez más común y que no significa un impedimento en el marco del presente proyecto.

Por otra parte, resulta interesante la observación realizada por Vouriot *et al.* (2021) acerca de la pertinencia de la hipótesis de mezcla perfecta. Si bien Rudnick y Milton (2003) explicitan que suponen mezcla perfecta, Vouriot *et al.* (2021) señalan que si se define f de manera local (en el punto de medida) a partir de la ecuación (7.2.18) y se asume que el patógeno se distribuye uniformemente en el aire espirado (esto es, el aire espirado se encuentra bien mezclado, pero no necesariamente todo el aire del salón), la ecuación (7.2.23) sigue siendo válida. Esto levanta, parcialmente, la hipótesis de mezcla perfecta y permite asociar la distribución espacial de CO₂ a una distribución espacial de riesgo de infección. Sin embargo, si se desea calcular el número básico de reproducción¹³ para el ambiente, sí es necesario suponer mezcla perfecta y asumir que la probabilidad P calculada es característica de todo el recinto.

Una limitante que persiste en el planteo original de Rudnick y Milton es la imposibilidad de estimar la probabilidad de contagio para un patrón arbitrario de ocupación, puesto que implícitamente el modelo asume un único período de ocupación continuado. Una posible solución es la presentada por Vouriot *et al.* (2021), que consiste en expresar el número total de quanta inhalado como la integral de la exposición instantánea de quanta. En un infinitésimo temporal, el infinitésimo de quanta inhalado se puede expresar a partir de la ecuación (7.2.22) considerando el valor instantáneo de f como

$$d\lambda = \frac{fIqdt}{n} \quad (7.2.24)$$

Se tiene entonces que

$$\lambda = \int_0^T \frac{fI(t)q}{n(t)} dt \quad (7.2.25)$$

Esta expresión permite entender n e I como funciones del tiempo, esto es, un patrón de ocupación arbitrario. Si se considera la simplificación de que el sistema sólo admite estar ocupado por n

¹²A nivel mundial las escuelas son un tipo de recinto que cuenta típicamente con ventilación natural (Stabile *et al.*, 2021).

¹³Ver sección 7.3.3.

personas o totalmente desocupado (se modelan entradas y salidas como procesos instantáneos y se asume que la asistencia es siempre la misma), se puede expresar λ como

$$\lambda = \frac{I}{n} \int_0^T \sigma(t) f q \, dt \quad (7.2.26)$$

donde $\sigma(t)$ es un operador de Heaviside que vale 1 en los horarios de ocupación y 0 fuera de estos.

Resulta entonces, aplicando la hipótesis de Wells, que el modelo de Rudnick y Milton se puede expresar de forma generalizada para un sistema de dos estados de ocupación (plenamente ocupado y vacío) como

$$P = 1 - e^{-\frac{I}{n} \int_0^T \sigma(t) f q \, dt} \quad (7.2.27)$$

Pese a sus múltiples ventajas, se han planteado algunos reparos al uso de CO₂ como trazador de agentes patógenos aéreos. En particular Stabile *et al.* (2021) señalan que el CO₂, al ser un trazador gaseoso, no es capaz de reflejar algunos aspectos del comportamiento dinámico de los aerosoles, como su deposición o filtrado. Asimismo, el modelo tampoco permite incluir inactivación viral (espontánea o por desinfección ultravioleta). Estos “sumideros” de patógeno, en cambio, pueden ser fácilmente representados en los modelos de Wells-Riley que incluyen el caudal como parámetro explícito, puesto que se basan en un balance de masa al patógeno en sí mismo.

7.2.2 Los modelos de respuesta a la dosis

La segunda familia de modelos de contagio son los modelos de respuesta a la dosis. Este grupo, de desarrollo más reciente y que comprende una gran cantidad de variantes, se basa en la idea de modelar la respuesta de la exposición de un individuo susceptible a una cierta cantidad (dosis) de patógeno¹⁴. Dicho modelo puede ser determinista (para una cierta dosis siempre se infecta un cierto porcentaje fijo de la población susceptible) o estocástico (se modela la probabilidad de infección para una cierta dosis según alguna distribución de probabilidad) (Sze To y Chao, 2010).

Un aspecto favorable de los modelos de respuesta a la dosis es que algunas formulaciones permiten modelar simultáneamente varias vías de contagio (gotículas de corto y largo alcance, fomites). No obstante, presentan el inconveniente de requerir una gran cantidad de datos experimentales para ajustar la curva de respuesta o el modelo de probabilidad. En general estos datos se obtienen de experimentación animal mediante inoculación nasal (no con el patógeno aerosolizado si éste es peligroso). Esto obliga a suponer que la respuesta a la dosis es extrapolable entre especies (en particular a humanos) e ignorar los efectos que la aerolización pudiera tener sobre el contagio (Sze To y Chao, 2010).

Al momento de desarrollo del presente análisis existe un trabajo que ajustó un modelo sencillo de respuesta a la dosis para SARS-CoV-2 (X. Zhang y Wang, 2021).

7.2.3 Selección de un modelo de contagio

Pese a que los modelos de respuesta a la dosis constituyen un abordaje potencialmente más detallado de los fenómenos de contagio, presentan ciertas dificultades. En particular, son significativamente más complejos y los antecedentes de su aplicación para el estudio de la propagación de SARS-CoV-2 son escasos. Por el contrario, existen muchos más antecedentes de aplicación de los modelos de Wells-Riley, tanto de variaciones del planteo de Rudnick y Milton (2003) (Buonanno, Stabile *et al.*, 2020; Burrige *et al.*, 2021; Cammarata y Cammarata, 2021; Pavlonis *et al.*, 2021; Schibuola y Tambani, 2021; Vouriot *et al.*, 2021) como del planteo del tipo

¹⁴Aquí se entiende por cantidad de patógeno a una medida física del agente infeccioso, por ejemplo, copias de ARN. No se introduce el concepto de quanta.

de Gammaitoni y Nucci (1997a, 1997b) (Buonanno, Stabile *et al.*, 2020; Schibuola y Tambani, 2021; Stabile *et al.*, 2021).

Por otra parte, si bien los modelos de respuesta a la dosis permiten incorporar otras vías de contagio al análisis de riesgo además de la vía aérea de larga distancia, esto trasciende a los objetivos del presente proyecto. En la medida que se pretende analizar la suficiencia sanitaria de la ventilación como medida de higiene, restringir el análisis a la vía aérea de larga distancia resulta apropiado. Las demás rutas de contagio ya tienen indicadas medidas de mitigación claras y efectivas (distanciamiento social, desinfección de superficies, etc.) (Stabile *et al.*, 2021).

En virtud de lo expuesto, se decidió utilizar un modelo de Wells-Riley para el desarrollo del presente trabajo. Asimismo, dado que se dispone de una base de datos relativamente grande de medidas de CO₂, se decidió utilizar el modelo de Rudnick y Milton (2003) con las modificaciones de Vouriot *et al.* (2021), expuesto en la sección 7.2.1. Las ventajas de este modelo son varias. En particular, permite prescindir de la determinación de la tasa de ventilación. Si bien una distribución de la misma fue obtenida y descrita en el capítulo 6, prescindir de estos resultados evita supeditar el análisis de riesgo a la incertidumbre del análisis de la tasa de ventilación.

7.3 Metodología

7.3.1 Base metodológica

Análisis de los datos de la campaña de medidas

Para la estimación del riesgo de contagio en el salón estudiado se tomó como referencia la metodología de Vouriot *et al.* (2021), que consiste en la comparación intermensual del riesgo de contagio a partir del modelo dado por la ecuación (7.2.27). Esto es consistente con el objetivo del proyecto de evaluar el riesgo sanitario de forma comparada entre invierno y primavera.

Vouriot *et al.* (2021) analizan un escenario de asistencia semanal regular y computan la probabilidad de tener algún contagio considerando un único infectado primario durante intervalos temporales iguales al período de incubación del SARS-CoV-2 (5 días). La hipótesis de este planteo es que, pasado el período de incubación, el individuo infectado desarrollará síntomas y dejará de asistir a clases. Los autores repiten el cómputo de esta probabilidad para todas las semanas de cada mes y presentan valores mensuales medios.

Se destaca que el enfoque descrito evalúa únicamente la probabilidad de contagio por vía aérea e implica suponer que la exposición ocurre únicamente en el salón de clases durante el horario escolar. Asimismo, se asume que las poblaciones de los turnos matutino y vespertino son independientes. Esto último implica suponer que luego de cada turno el aire se renueva completamente y no hay posibilidad de transmisión de patógeno. En términos del modelo, esto se verifica si la concentración de CO₂ vuelve al nivel basal (asumido en 380 ppm), lo que fue verificado experimentalmente durante la campaña de medidas.

Asociación de los resultados con valores de tasas de ventilación

Con el fin de asociar los resultados de riesgo a valores de tasas de ventilación (de interés por ser un parámetro de diseño para sistemas de ventilación), se procedió de forma similar a parte del planteo de Rudnick y Milton (2003). En primer lugar, se generaron curvas semanales sintéticas de concentración de CO₂, basadas en un modelo de mezcla perfecta (ecuación (6.2.2)). Para ello se consideró una ocupación diaria de 3,5 horas (4 horas con un recreo de media hora). Se generaron diversas curvas, con el fin de desarrollar un estudio paramétrico en la tasa de ventilación, supuesta constante durante todo el período de análisis.

En segundo lugar, para cada una de las curvas de CO₂ obtenidas se estimó el riesgo de contagio de acuerdo con la ecuación (7.2.27). Esto fue realizado en forma paramétrica en q , de forma análoga al análisis de datos experimentales.

Por último, dado que para cada curva se conoce la tasa de ventilación, también se estimó el riesgo de contagio aéreo mediante la aplicación del modelo de Gammaitoni y Nucci (1997a, 1997b). Para poder considerar un régimen de ocupación variable, se implementó una modificación de dicho modelo similar a la de Vouriot *et al.* (2021) para el modelo de Rudnick y Milton (2003). La ecuación de balance de masa de quanta (segunda ecuación de (7.2.11)) se puede reescribir como

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{Q}{V}N(t) + \sigma(t)qI \quad (7.3.1)$$

donde $\sigma(t)$ es el operador de Heaviside asociado a la ocupación. Esta ecuación se puede resolver analíticamente por tramos de ocupación, utilizando como condición inicial el valor final del período anterior. Por simplicidad, se utilizó un enfoque similar al del método transitorio para la estimación de la tasa de ventilación, expresando el número de quanta en un instante a partir del número de quanta en el instante anterior (ecuación (6.2.6)).

Por otra parte, modificando la ecuación (7.2.13) resulta que

$$P = 1 - e^{-\frac{p}{V} \int_0^T \sigma N(t) dt} \quad (7.3.2)$$

Esta ecuación fue resuelta numéricamente mediante una suma de Riemann central.

7.3.2 Parámetros del modelo

Tasa de generación de quanta

Los trabajos que han analizado el contagio de SARS-CoV-2 mediante un enfoque de Wells-Riley (por ejemplo Buonanno, Morawska *et al.*, 2020; Buonanno, Stabile *et al.*, 2020; Burrridge *et al.*, 2021; Cammarata y Cammarata, 2021; Pavilonis *et al.*, 2021; Schibuola y Tambani, 2021; Vouriot *et al.*, 2021) no han calculado q de forma explícita a partir de un brote, presumiblemente por falta de datos, dado que se trata de un virus de surgimiento reciente. En general, estos autores han optado por utilizar las estimaciones de q presentadas por Buonanno, Morawska *et al.* (2020) y Buonanno, Stabile *et al.* (2020). Las mismas se basan en la hipótesis de que la carga viral de los aerosoles es igual a la carga viral bucal de los infectados, obtenida experimentalmente. Mediante la estimación de factores de conversión adecuados, los autores presentan valores de q como función del tipo de actividad de los individuos. Asimismo, en su segundo trabajo (Buonanno, Morawska *et al.*, 2020), los autores determinaron funciones de densidad log-normal para los valores de q a partir de un análisis de Monte Carlo. La tabla 7.3.1 resume los resultados de estos autores.

DISTRIBUCIÓN DE LA TASA DE EMISIÓN DE QUANTA PARA SARS-COV-2					
	Percentil	En reposo, respirando por la boca	Actividad intensa, respirando por la boca	Actividad ligera, hablando	Actividad ligera, cantando
q	5	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^0$
	25	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$8,2 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^0$	$1,0 \cdot 10^1$
	50	$3,7 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^0$	$5,0 \cdot 10^0$	$3,2 \cdot 10^1$
	75	$1,1 \cdot 10^0$	$7,7 \cdot 10^0$	$1,5 \cdot 10^1$	$9,8 \cdot 10^1$
	90	$3,1 \cdot 10^0$	$2,1 \cdot 10^1$	$4,2 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^2$
	95	$5,7 \cdot 10^0$	$3,8 \cdot 10^1$	$7,6 \cdot 10^1$	$4,9 \cdot 10^2$
	99	$1,7 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$
$\log_{10}(q)$	Media	$-4,29 \cdot 10^{-1}$	$3,99 \cdot 10^{-1}$	$6,98 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^0$
	Desvío estándar	$7,20 \cdot 10^{-1}$	$7,20 \cdot 10^{-1}$	$7,20 \cdot 10^{-1}$	$7,20 \cdot 10^{-1}$

Tabla 7.3.1 – Distribución estadística de la tasa de emisión de quanta para SARS-CoV-2. Adaptado de Buonanno, Morawska *et al.* (2020). Las tasas de emisión se encuentran en quanta/h. La función de densidad es log-normal, por lo que $\log_{10} q$ presenta una distribución normal, con la media y el desvío estándar declarados.

El método de cálculo presentado por Buonanno, Morawska *et al.* (2020) y Buonanno, Stabile *et al.* (2020) representa un avance significativo para los modelos de Wells-Riley, pues permite su uso para el estudio de pandemias en curso, cuando la información disponible es insuficiente para ajustar q a partir de reportes de casos. Asimismo, permite estimar valores de q como función de la actividad de los individuos. Empero, en el caso del SARS-CoV-2 estas estimaciones aún presentan una incertidumbre significativa, relacionada a algunos de los factores de conversión empleados y a la carga viral bucal.

Por lo tanto, en la medida en que la estimación de q es una fuente de incertidumbre importante (depende del individuo¹⁵ y de los mecanismos no modelados explícitamente, entre otros), parece razonable desarrollar un análisis paramétrico, comparando los resultados para diversos valores de q . Se utilizarán entonces los siguientes valores, seleccionados por Burrridge *et al.* (2021) y Vouriot *et al.* (2021) en sus trabajos:

- $q = 1$ quanta/h. Corresponde a una clase con niños sentados en relativo silencio.
- $q = 5$ quanta/h, que corresponde a una clase ruidosa, con niños hablando (Burrridge *et al.*, 2021; Vouriot *et al.*, 2021).
- $q = 10$ quanta/h y $q = 20$ quanta/h, valores mayores utilizados como evaluación de hipotéticos casos de mayor infectividad (variantes virales más agresivas, casos de súper emisores, entre otros).

Otros parámetros

Se considerará un único infectado ($I = 1$) y se asumirá que la población total es de 30 personas ($n = 30$). El análisis podría refinarse si se conociera la asistencia diaria, pero no fue posible obtener dicha información. De todos modos, como se expresa en la sección 7.3.4, se realizará un análisis en términos medios, por lo que utilizar la ocupación nominal del salón es suficiente.

¹⁵En particular, se destaca que este valor podría ser diferente en niños y podría variar a lo largo del período de incubación (Vouriot *et al.*, 2021).

Además, se supone que el patrón de ocupación de cada turno es fijo e idéntico para cada día, de acuerdo a la ocupación nominal del salón declarada por las autoridades de las escuelas:

- **Turno matutino:** de 8:00 hs a 10:00 hs y de 10:30 hs a 12:00 hs.
- **Turno vespertino:** de 13:00 hs a 15:15 hs y de 15:45 hs a 16:50 hs.

Lo anterior implica ignorar los patrones de ocupación dentro de cada turno, como salidas por actividades puntuales no declaradas.

Por otra parte, se considerará un período de incubación $T = 5$ días. Se destaca que este valor podría requerir ajustes si se quisiera analizar alguna variante particularmente agresiva del virus. Por ejemplo, se ha reportado que la variante Delta¹⁶ del SARS-CoV-2 es más infecciosa (lo que se podría traducir en un q mayor) y que tiene un período de incubación levemente menor (Wang *et al.*, 2021).

Además, se considerará que la concentración exterior de CO₂ es $C_{\text{ext}} = 380$ ppm y que la concentración de CO₂ en el aire espirado por una persona es $C_a = 37500$ ppm, esto último siguiendo la referencia de cálculo presentada por Rudnick y Milton (2003).

Por último, para el análisis mediante curvas sintéticas de CO₂, se considerará una tasa de generación de $G = 0,00335$ L/s persona (ASTM D6245 - 18, 2018; Batterman, 2017). Asimismo, se evaluarán tasas de ventilación de 0,5, 1, 3 y 6,43 ACH. El último de estos valores corresponde a la recomendación de 10 L/s persona dada por la OMS (WHO, 2021a).

7.3.3 Determinación del número básico de reproducción

Se utilizará como indicador de riesgo el número básico de reproducción, R_o . El mismo se define como el número de infecciones secundarias que surgen en una población cuando se introduce un infectado en la misma. Se considera que la situación es segura si $R_o < 1$. En el caso contrario, habrá (en términos medios) infectados y la enfermedad se propagará.

A partir de las ecuaciones (7.2.8) y (7.2.27), si se considera $I = 1$ y por lo tanto $S = n - 1$, resulta que $D = R_o$ por definición. Por lo tanto, se tiene que

$$R_o = (n - 1) \left(1 - e^{-\frac{1}{n} \int_0^T \sigma(t) f q \, dt} \right) \quad (7.3.3)$$

Si se expresa la integral como el producto del tiempo efectivamente ocupado, T^* , y de la fracción media (en los períodos ocupados) de aire respirado, $\bar{f}$, se tiene

$$R_o = (n - 1) \left(1 - e^{-\frac{\bar{f} q T^*}{n}} \right) \quad (7.3.4)$$

Imponiendo $R_o = 1$ en la ecuación anterior, se puede deducir una expresión analítica para la fracción de aire respirado crítica, f_{cr} .

$$\bar{f}_{\text{cr}} = \frac{1}{qT} \ln \left(\frac{n - 1}{n - 2} \right)^n \quad (7.3.5)$$

Asimismo, esta cantidad se puede expresar en términos de una concentración de CO₂ crítica media mediante la ecuación (7.2.18):

$$\bar{C}_{\text{cr}} = \frac{C_a}{qT} \ln \left(\frac{n - 1}{n - 2} \right)^n + C_{\text{ext}} \quad (7.3.6)$$

donde $\bar{C}_{\text{cr}}$ es la concentración crítica media.

Se observa que evaluar el riesgo de contagio en términos del número básico de reproducción relaja el supuesto de que a todos los individuos infectados corresponde el mismo valor de q , porque hay un único infectado. Alternativamente, algunos autores como Stabile *et al.* (2021) han sugerido generar una distribución de valores de q a partir de simulaciones de Monte Carlo.

¹⁶Al momento del presente análisis la variante Delta es la de principal transmisión en Uruguay (Lussich, 2021).

7.3.4 Adaptación a la disponibilidad de datos

Emular la metodología de Vouriot *et al.* (2021) no es del todo viable con los datos de campo disponibles. Si bien la serie de datos obtenida es extensa, es frecuente la presencia de huecos, días en los que no se dispone de datos (ver apéndice A.6) debido a contingencias diversas (días sin ocupación como feriados y paros, desconexión accidental de equipos, pérdida de energía eléctrica, etc.). Esto imposibilita desarrollar el cálculo de la probabilidad de infección para todas las semanas de la campaña.

Se utilizaron dos enfoques complementarios para abordar la situación descrita. En primer lugar, se minimizó el número de huecos. Para ello se decidió utilizar la unión de los datos registrados con ambos monitores de CO₂, tanto el que se encontraba siempre al frente del salón como el que, cuando estuvo disponible, se ubicó en el fondo del salón. Esto es válido bajo la hipótesis de mezcla perfecta. Asimismo, en el caso en que ambas lecturas se encontraban disponibles, se promediaron los dos registros. Esto, además de ser razonable bajo la hipótesis de mezcla perfecta desde el punto de vista instrumental, es un paliativo para apartamientos de dicha hipótesis¹⁷.

El segundo enfoque consistió en estimar la probabilidad de contagio mensual media a partir de la media de las fracciones de aire previamente respirado. Esto es, se calculó la probabilidad de infección mensual media, $\bar{P}$, como

$$\bar{P} = 1 - e^{-\frac{Iq\bar{f}}{n} \int_0^T \sigma(t) dt} \quad (7.3.7)$$

La expresión anterior no es exacta. Dado que la relación $P(f)$ dada por la ecuación (7.2.27) no es lineal, no es correcto, en términos generales, obtener la media de las probabilidades a partir de la media de f . Lo correcto sería promediar los valores de P , como presentan Vouriot *et al.* (2021). No obstante, el error introducido es despreciable en la medida en que el exponente sea pequeño. Considérese la siguiente función, que representa la no linealidad del problema:

$$g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad / \quad g(x) = 1 - e^{-x} \quad (7.3.8)$$

Si se considera su desarrollo de Taylor de primer orden entorno a $x = 0$, $\tilde{g}$, se tiene que

$$\tilde{g}(x) = x \quad (7.3.9)$$

Por lo tanto, el error relativo de linealización es

$$e(x) = \frac{g(x) - \tilde{g}(x)}{g(x)} = 1 - \frac{x}{1 - e^{-x}} \quad (7.3.10)$$

Resulta evidente a partir de la ecuación anterior que $e(x) \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0$. La figura 7.3.1 muestra algunos valores de $e(x)$

¹⁷Indicado por la norma ASTM D6245 - 18 en el contexto de la estimación de la tasa de ventilación.

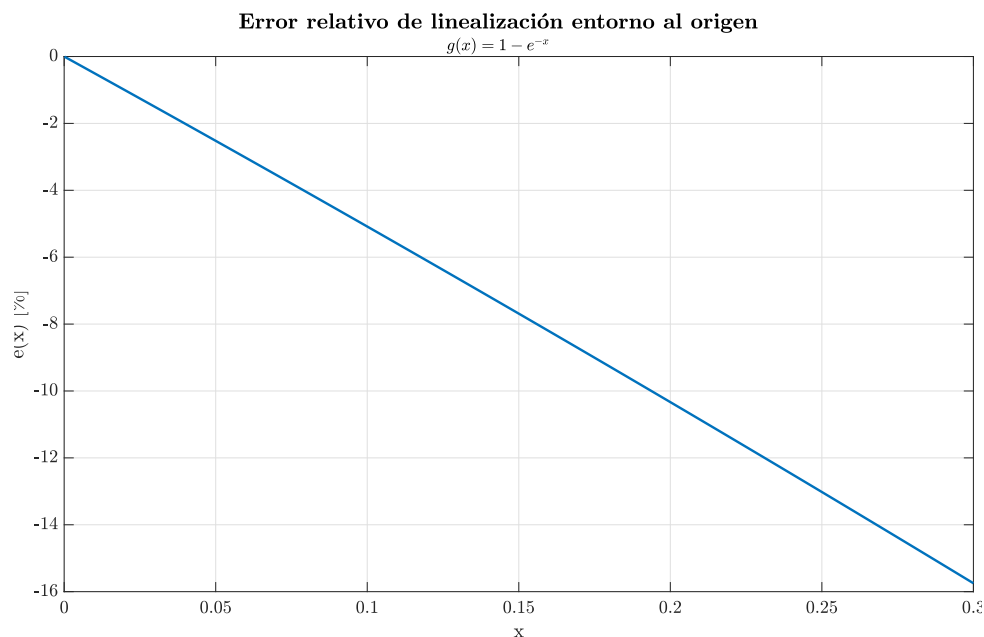


Figura 7.3.1 – Error relativo de linealización del modelo de Rudnick y Milton entorno al origen.

Con el fin de estimar el orden de magnitud del error, se consideran los siguientes parámetros para el modelo de riesgo: $n = 30$, $I = 1$, $\bar{f} = 0,03^{18}$ y $q = 10$ quanta/h¹⁹. Con $T = 5$ días y considerando un tiempo diario de exposición de 3,5 horas, resulta $x \approx 0,175$. Esto implica un error relativo de aproximadamente -9%, lo cual se considera aceptable.

Por lo tanto, se considera que el comportamiento de $P(f)$ es aproximadamente lineal en el rango de análisis y se dirime aceptable la estimación de $\bar{P}$ propuesta.

7.4 Resultados y discusión

7.4.1 Cálculo del riesgo de contagio a partir de los datos de campo

Cálculo explícito del riesgo de contagio

En los casos en que se contó con semanas de datos completos para alguno de los turnos, se calculó la evolución temporal de la probabilidad de contagio y el número reproductivo final de forma explícita, de acuerdo con las ecuaciones (7.2.27) y (7.3.3). Las semanas disponibles fueron:

- **Segunda semana de agosto:** lunes 9 a viernes 13. Disponible para ambos turnos. Para los días 10 y 11 se promediaron las lecturas de los dos monitores.
- **Última semana de agosto / primera semana de setiembre:** lunes 30 a viernes 3. Disponible para el turno matutino. Se promediaron datos para todos los días salvo el viernes.
- **Segunda semana de setiembre:** lunes 6 a viernes 10. Disponible sólo para el turno vespertino. Se promediaron datos el día 7. Para el día 6 se dispuso únicamente de datos en el fondo del salón.

¹⁸Correspondiente a una concentración de CO₂ de 1500 ppm. En función de los datos de campo, esto es una estimación conservadora.

¹⁹Valor extremo en el rango analizado, con lo que se trata de una estimación conservadora.

- **Última semana de setiembre:** lunes 27 a viernes 1. Disponible para ambos turnos. Se promediaron datos en la tarde de los días 27 y 29. Para el 28 y la mañana del 29 sólo se dispuso de datos en el fondo.
- **Primera semana de octubre:** lunes 4 a viernes 8. Disponible sólo para la tarde. Se promediaron datos de ambos monitores para los días 4, 5 y 6.
- **Última semana de octubre:** lunes 25 a viernes 29. Disponible únicamente para el turno matutino. Se promediaron datos los días 25 (para algunos intervalos de ambos turnos), 26 (en la tarde) y 27 (en la mañana).
- **Cuarta semana de noviembre:** lunes 22 a viernes 26. Disponible sólo para el turno matutino. No se promediaron datos (el monitor del fondo del salón estuvo en servicio lunes y martes y el del frente del salón de miércoles a viernes).
- **Última semana de noviembre / primera semana de diciembre:** lunes 29 a viernes 3. Disponible para ambos turnos. Se promediaron datos para los días 29 (en la tarde), 2 y 3 (en la mañana).
- **Segunda semana de diciembre:** lunes 6 a viernes 10. Se promediaron datos los días 7, 8 (en la mañana) y 10. Para la tarde del 8 y para el 9 se dispuso únicamente de datos en el fondo del salón.
- **Tercera semana de diciembre:** lunes 13 a viernes 17. Disponible únicamente para el turno matutino. Se promediaron datos todos los días excepto el 14 (en la mañana) y el 15.

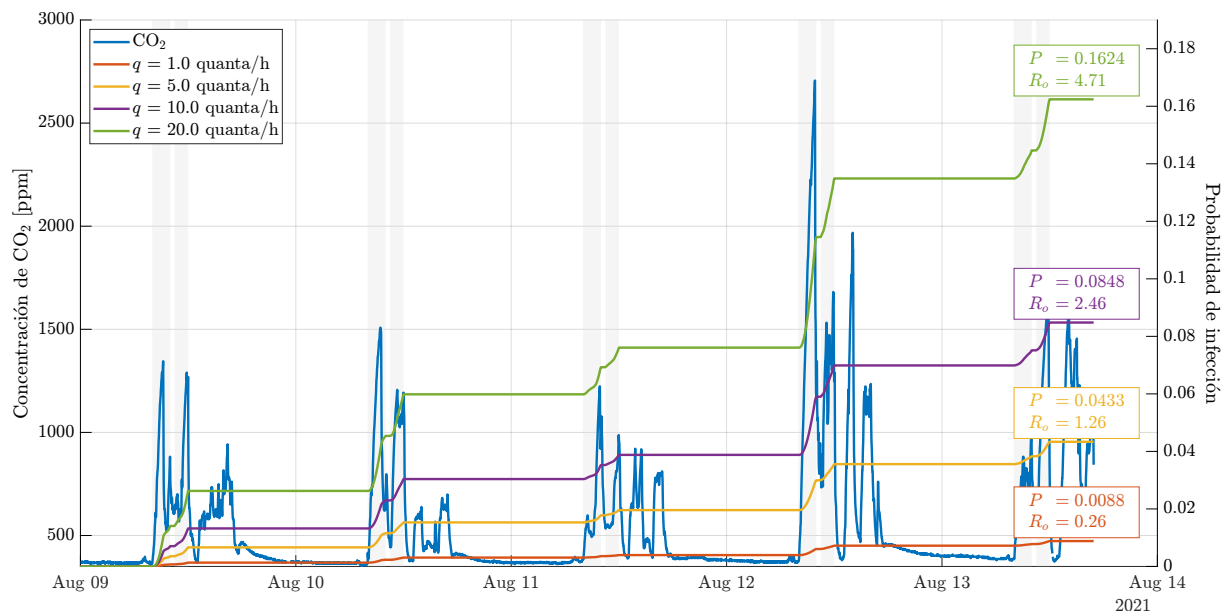
La tabla 7.4.1 resume los resultados obtenidos en términos del número básico de reproducción.

ESTIMACIÓN SEMANAL DEL NÚMERO BÁSICO DE REPRODUCCIÓN				
Turno matutino				
Semana	q [quanta/h]			
	1	5	10	20
09/08 - 13/08	0,26	1,26	2,46	4,71
30/08 - 03/09	0,14	0,68	1,35	2,63
27/09 - 01/10	0,11	0,55	1,08	2,12
25/10 - 29/10	0,06	0,30	0,60	1,14
22/11 - 26/11	0,09	0,43	0,86	1,70
29/11 - 03/12	0,04	0,19	0,37	0,74
06/12 - 10/12	0,05	0,27	0,54	1,07
13/12 - 17/12	0,03	0,16	0,32	0,63
Turno vespertino				
Semana	q [quanta/h]			
	1	5	10	20
09/08 - 13/08	0,16	0,80	1,57	3,06
06/09 - 10/09	0,15	0,74	1,47	2,87
27/09 - 01/10	0,11	0,55	1,08	2,12
04/10 - 08/10	0,09	0,43	0,86	1,69
29/11 - 03/12	0,06	0,29	0,57	1,12
06/12 - 10/12	0,06	0,31	0,62	1,24

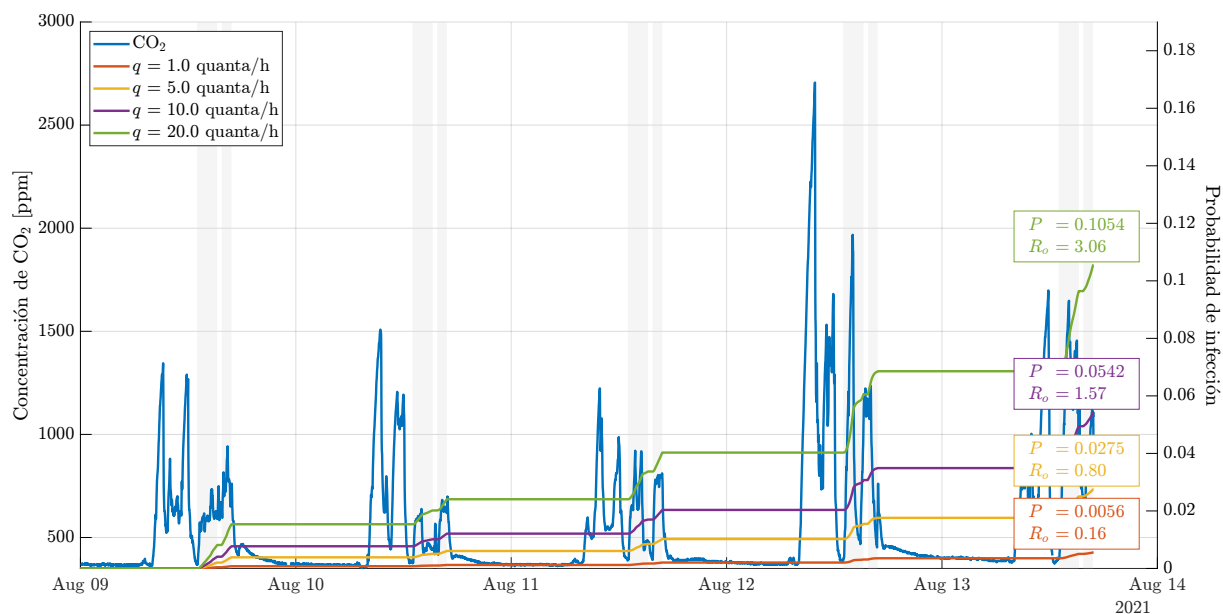
Tabla 7.4.1 – Estimación explícita del número básico de reproducción para las semanas con datos completos.

Se observa una tendencia a la disminución del riesgo de contagio, con algunas oscilaciones. Para valores de q de hasta 5 quanta/h se obtuvieron valores de R_o por debajo de la unidad, con la excepción de la semana entre el 9 y el 13 de agosto para el turno matutino. El caso de 10 quanta/h presentó un riesgo elevado ($R_o > 1$) para los meses de invierno, pero se vio un decrecimiento considerable en la primavera, alcanzándose valores aceptables. Para el caso de 20 quanta/h todas las estimaciones de riesgo arrojaron resultados con $R_o > 1$, salvo para el turno matutino en la tercera semana de diciembre.

Por otra parte, las figuras 7.4.1 y 7.4.2 ejemplifican la evolución temporal de la probabilidad de contagio. Por brevedad se incluyen únicamente las semanas del 09/08 al 13/08 y del 29/11 al 03/12, casos de mayor y menor riesgo de contagio, respectivamente, para los que se cuenta con estimaciones en ambos turnos. La totalidad de los gráficos se encuentran disponible en el apéndice A.8.

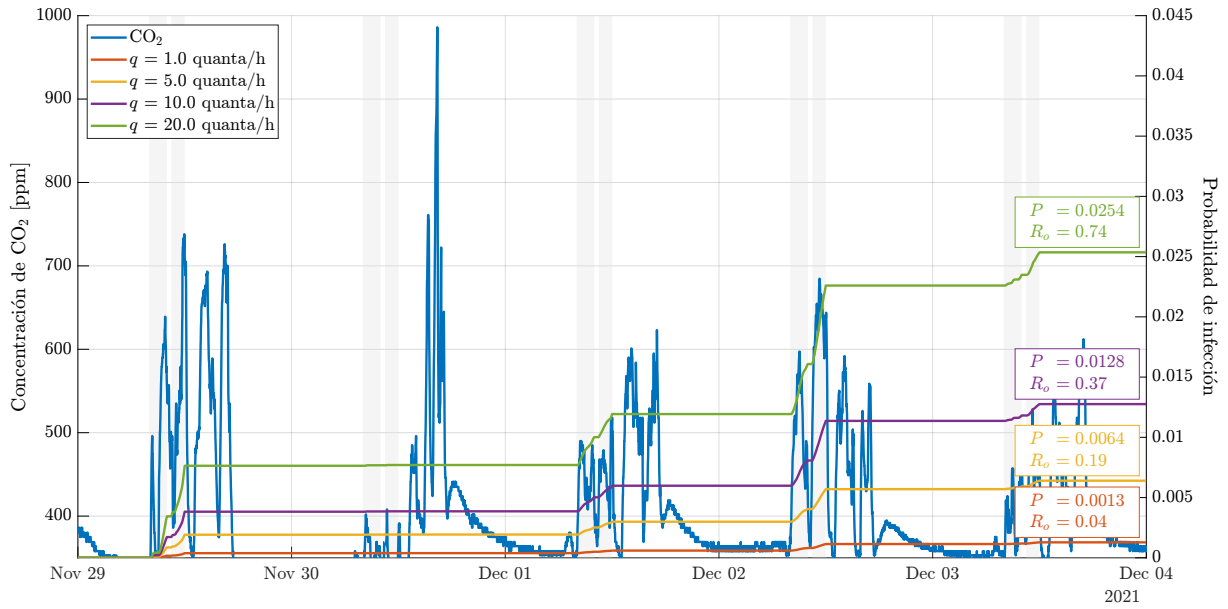


(a) Turno matutino.

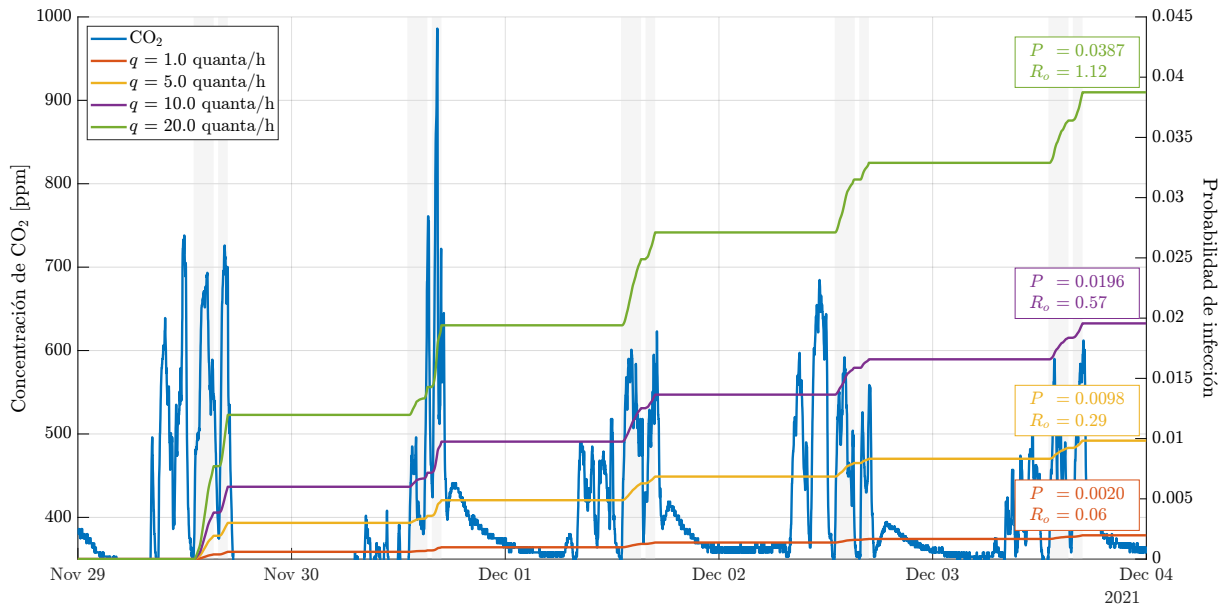


(b) Turno vespertino

Figura 7.4.1 – Evolución temporal de la probabilidad de contagio y del dióxido de carbono para la segunda semana de agosto.



(a) Turno matutino.



(b) Turno vespertino

Figura 7.4.2 – Evolución temporal de la probabilidad de contagio y del dióxido de carbono para la última semana de noviembre / primera semana de diciembre.

Promedios mensuales

La tabla 7.4.2 resume los resultados de riesgo mensual medio, expresados en términos del número básico de reproducción medio.

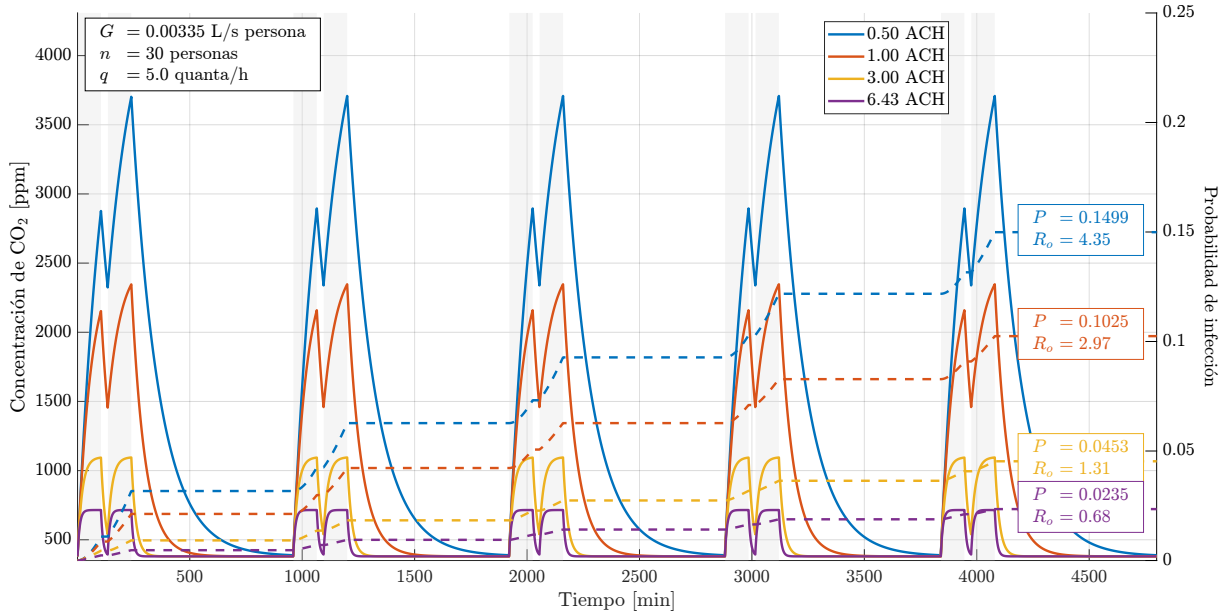
ESTIMACIÓN MENSUAL DEL NÚMERO BÁSICO DE REPRODUCCIÓN MEDIO				
Turno matutino				
Mes	q [quanta/h]			
	1	5	10	20
Agosto	0,18	0,88	1,74	3,38
Setiembre	0,10	0,47	0,94	1,85
Octubre	0,11	0,52	1,03	2,03
Noviembre	0,07	0,37	0,73	1,45
Diciembre	0,04	0,21	0,43	0,85
Turno vespertino				
Mes	q [quanta/h]			
	1	5	10	20
Agosto	0,12	0,57	1,13	2,22
Setiembre	0,10	0,48	0,96	1,88
Octubre	0,07	0,35	0,70	1,37
Noviembre	0,07	0,33	0,65	1,29
Diciembre	0,05	0,27	0,53	1,05

Tabla 7.4.2 – Estimación mensual del número básico de reproducción medio.

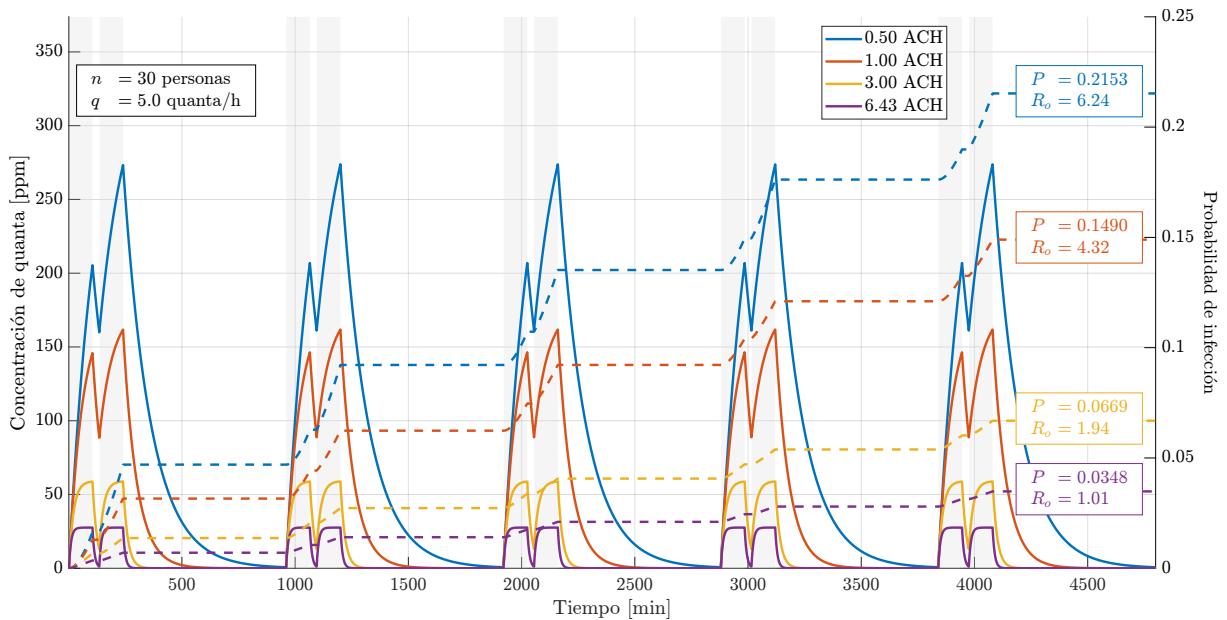
Se observa un comportamiento similar al descrito para los resultados semanales de la tabla 7.4.1. El riesgo muestra una reducción muy significativa. En el turno matutino el número básico de reproducción se reduce en diciembre a un cuarto de su valor en agosto, y en la tarde a la mitad. Asimismo, se vuelven a observar valores de R_0 mayores a la unidad a partir de tasas de emisión de 10 quanta/h.

7.4.2 Análisis paramétrico en la tasa de ventilación

La figura 7.4.3 muestra las curvas sintéticas de CO_2 y de concentración de quanta construidas. Además, se muestra la evolución temporal del riesgo de contagio por vía aérea para $q = 5$ quanta/h, evaluado a partir de los modelos de Rudnick y Milton y de Gammaioni y Nucci, respectivamente.



(a) Modelo de Rudnick y Milton.



(b) Modelo de Gammaioni y Nucci.

Figura 7.4.3 – Estimación del riesgo de contagio para tasas de ventilación constantes y un patrón de ocupación tipo. Las horas de ocupación se corresponden con el fondo sombreado. Las curvas continuas corresponden con la concentración de CO_2 o de quanta y las curvas punteadas corresponden a la probabilidad de que se produzca alguna infección secundaria.

Por otra parte, la tabla 7.4.3 resume los resultados obtenidos para las demás tasas de generación de quanta con ambos modelos. Se indica el número básico de reproducción para cada tasa de ventilación y para cada tasa de generación de quanta.

ESTIMACIÓN DEL RIESGO PARA TASAS DE VENTILACIÓN CONSTANTES				
Modelo de Rudnick y Milton				
ACH	q [quanta/h]			
	1	5	10	20
0,50	0,93	4,35	8,04	13,86
1,00	0,62	2,97	5,64	10,18
3,00	0,27	1,31	2,57	4,91
6,43	0,14	0,68	1,35	2,63
Modelo de Gammaioni y Nucci				
ACH	q [quanta/h]			
	1	5	10	20
0,50	1,37	6,24	11,14	18,00
1,00	0,92	4,32	8,00	13,79
3,00	0,40	1,94	3,75	7,01
6,43	0,20	1,01	1,99	3,84

Tabla 7.4.3 – Estimación del número básico de reproducción para tasas de ventilación constantes.

En primer lugar, se observan diferencias entre las predicciones de los modelos de Rudnick y Milton y de Gammaioni y Nucci. Estas diferencias son, posiblemente, atribuibles al valor de G utilizado para crear las curvas sintéticas de CO_2 para el modelo de Rudnick y Milton. Éste arroja en general números de reproducción menores que el modelo de Gammaioni y Nucci, lo que podría indicar que el valor de G fuera bajo. Se consideraron otros valores de G dentro del rango de variación detallado en el anexo B.4 y se observó que este parámetro tiene un impacto significativo sobre los resultados.

Por otra parte, se observa que las curvas de CO_2 computadas para las tasas de ventilación más bajas no logran alcanzar la concentración de reposición (380 ppm) durante el recreo diario. Esto no se condice con el comportamiento observado en los datos experimentales diarios del salón 2, en el cual el recreo permitía alcanzar la concentración atmosférica de CO_2 . Esto es un indicador de que la tasa de ventilación alcanzada durante los recreos suele ser mayor a 1 ACH, lo cual es consistente con las estimaciones obtenidas en el capítulo 6. Asimismo, las curvas de CO_2 computadas indican que los niveles de CO_2 observados diariamente en el salón 2, en general menores a 1000 ppm, son consistentes con tasas de ventilación mayores a 3 ACH.

En cuanto al riesgo de contagio por vía aérea, los resultados obtenidos muestran que la tasa de ventilación recomendada por la OMS es segura hasta valores de emisión de 5 quanta/h. Tasas de ventilación tan bajas como 1 ACH podrían ser seguras con una tasa de emisión de 1 quanta/h. Ninguna de las tasas de ventilación analizadas resulta apropiada para los escenarios de alta emisividad y/o infectividad viral (10 quanta/h y 20 quanta/h).

A la luz de las tasas de ventilación estimadas en el capítulo 6, los resultados presentados ponen en duda la aptitud de la ventilación natural para mantener niveles de riesgo aceptables, particularmente durante el invierno. Si bien podría ser suficiente, la incertidumbre asociada a q es tal que parece razonable considerar la aplicación de medidas de mitigación de riesgo adicionales (mayor tasa de ventilación, filtrado y desinfección del aire, etc.).

Por último, se destaca que las predicciones de riesgo del modelo de Gammaioni y Nucci serían un poco menores si se incorporaran efectos de inactivación viral y sedimentación de aerosoles. Empero, para la presente sección no se han considerado dichos efectos a fin de mantener una comparación “limpia” entre ambos modelos (el modelo de Rudnick y Milton no considera los efectos mencionados).

7.4.3 Regímenes de ventilación

En función de los resultados obtenidos en la sección 7.4.2, se decidió evaluar el desempeño de la apertura periódica de aberturas para abatir el riesgo de contagio por vía aérea. Para ello se procedió de manera análoga a lo expuesto en la antedicha sección, pero se consideró un aumento periódico de la tasa de ventilación durante un cierto tiempo, para reflejar la apertura de ventanas.

Para el análisis presentado en la presente sección se utilizó exclusivamente el modelo de Gammaioni y Nucci, con el fin de evitar la elección de un valor de G para la construcción de curvas artificiales de CO_2 . En este caso se consideraron los efectos de inactivación viral y de deposición de aerosoles. Se consideraron las siguientes tasas de eliminación viral por concepto de dichos procesos, utilizadas por Buonanno, Morawska *et al.* (2020)

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{inac}} &= 0,63 \text{ h}^{-1} \\ \lambda_{\text{depo}} &= 0,24 \text{ h}^{-1}\end{aligned}\tag{7.4.1}$$

donde λ_{inac} y λ_{depo} son las tasas de eliminación por inactivación y deposición, respectivamente. Dichos valores fueron sumados a la tasa de ventilación considerada para computar el valor de Q utilizado en la ecuación (7.2.15).

Por ejemplo, se consideró un escenario en el que se tiene una tasa de ventilación basal de 1 ACH y en el cual cada 30 minutos se abren las ventanas durante 5 minutos, aumentando la tasa de ventilación a 10 ACH. La figura 7.4.4 muestra la evolución temporal de la concentración de quanta y del riesgo de contagio para este caso. También se muestran los resultados que se obtendrían si no se abrieran las ventanas (tasa de ventilación de 1 ACH permanente).

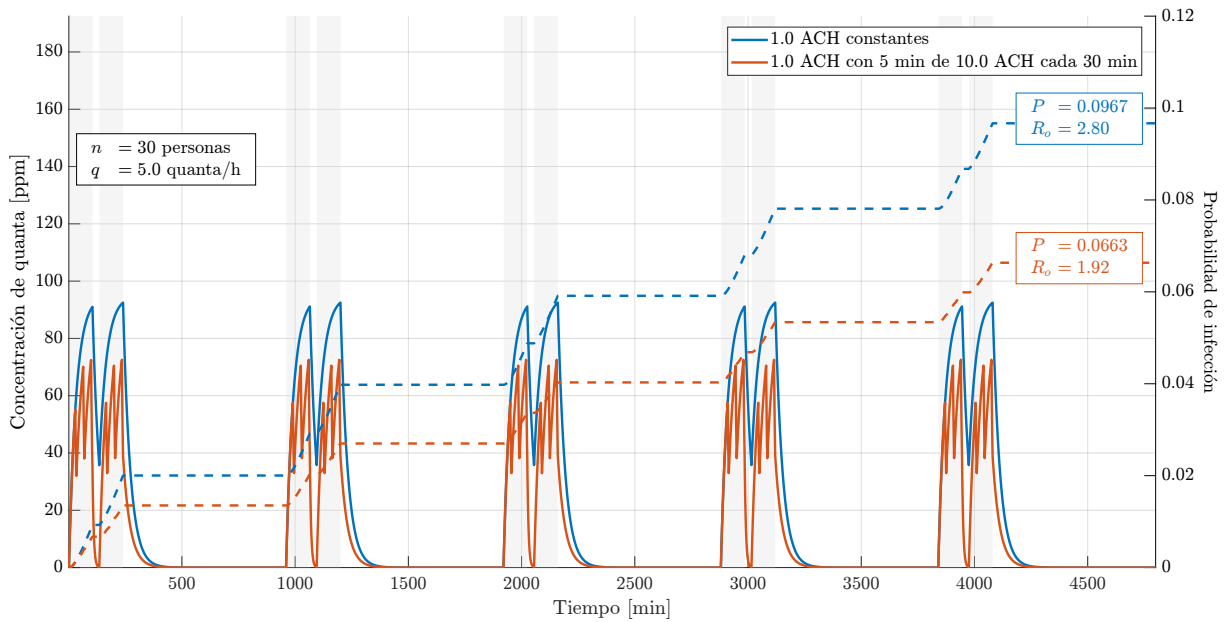


Figura 7.4.4 – Mitigación del riesgo de contagio mediante apertura periódica de ventanas.

Aún ventilando periódicamente el número básico de reproducción es mayor a 1, pero se observa un abatimiento sustancial del riesgo de contagio respecto a la situación base. Para

evaluar en mayor detalle dicha reducción, se realizaron simulaciones con variaciones en las tasas de ventilación basal (ACH_{low}), la tasa de ventilación con apertura de aberturas (ACH_{high}), el tiempo de apertura de las ventanas (t_{high}) y el tiempo con ventanas cerradas (t_{low}). La tabla 7.4.4 presenta los resultados obtenidos. Los porcentajes declarados se corresponden con la reducción del número de reproducción respecto a la situación sin apertura de ventanas. Entre paréntesis se incluye el número básico de reproducción computado para una tasa de emisión de 5 quanta/h.

REDUCCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO BÁSICO DE REPRODUCCIÓN								
ACH_{low} [h^{-1}]	0,3 (7,63)				1 (4,32)			
ACH_{high} [h^{-1}]	6		10		6		10	
t_{high} [min]	5	10	5	10	5	10	5	10
t_{low} [min]								
10	75,4% (1,88)	79,9% (1,53)	81,3% (1,43)	85,5% (1,11)	60,9% (1,69)	67,1% (1,42)	69,7% (1,31)	75,7% (1,05)
15	72,1% (2,13)	77,2% (1,74)	77,9% (1,69)	82,7% (1,32)	56,9% (1,86)	63,4% (1,58)	65,0% (1,51)	71,8% (1,22)
20	69,6% (2,32)	74,7% (1,93)	75,0% (1,91)	80,1% (1,52)	54,2% (1,98)	60,2% (1,72)	61,3% (1,67)	68,1% (1,38)
25	67,8% (2,46)	72,5% (2,10)	72,9% (2,07)	77,6% (1,71)	52,1% (2,07)	57,6% (1,83)	58,6% (1,79)	64,6% (1,53)
30	65,8% (2,61)	70,8% (2,23)	70,2% (2,27)	75,6% (1,86)	49,8% (2,17)	55,6% (1,92)	55,6% (1,92)	62,0% (1,64)

Tabla 7.4.4 – Estimación de la reducción del número básico de reproducción al implementar regímenes de ventilación periódicos. Los valores entre paréntesis corresponden al número de reproducción para una tasa de emisión de 5 quanta/h.

En primer lugar, se destaca que los valores basales de tasa de ventilación elegidos son consistentes con las estimaciones presentadas en el capítulo 6. En particular, 1 ACH se asemeja al valor medio ponderado diario del salón estudiado y 0,3 ACH representa un caso extremo. Por otra parte, los valores de ACH_{high} elegidos son consistentes con las estimaciones obtenidas a partir de las pruebas controladas en la sección 6.4.2 del capítulo 6. Asimismo, los intervalos de apertura de ventanas son relativamente cortos, lo que intenta compatibilizar la ventilación natural con el confort térmico de los ocupantes del salón.

En todos los casos analizados se observa una reducción sustancial del número básico de reproducción, por lo general mayor al 50% del valor sin apertura de ventanas. Si bien no se logran valores de R_0 inferiores a la unidad, la mitigación del riesgo es sustancial.

Se observa que las diferencias entre mantener abiertas las ventanas 5 o 10 minutos suelen ser pequeñas, de entre el 5% y el 10%, aproximadamente. Asimismo, el valor de t_{low} no tiene un impacto demasiado pronunciado para el rango estudiado. La reducción porcentual de R_0 no cambia más de un 10% al triplicar el valor de este parámetro.

En definitiva, establecer un régimen de ventilación periódica puede ser una herramienta valiosa para disminuir el riesgo de contagio. Es muy efectiva para abatir el riesgo y compatibiliza en cierto grado los aspectos sanitarios con el confort térmico. Parece razonable sugerir ventilar los salones durante al menos 5 minutos cada 30 minutos en invierno.

Por último, se destaca que los resultados porcentuales presentados son relativamente independientes del valor de q elegido para el análisis. Si bien el valor del número de reproducción

cambiará al variar q , la reducción porcentual no presentará cambios muy grandes en la medida en que el exponente de la ecuación (7.2.15) sea pequeño. Si esto se cumple, el modelo se comporta de forma aproximadamente lineal en q , con lo que al computar el valor porcentual de la reducción del riesgo la expresión final resulta ser independiente de dicho parámetro²⁰.

7.5 Conclusiones

Se concluyó que existe un patrón estacional en el riesgo de contagio, que presentó una tendencia a la baja hacia los últimos meses del año. Esto fue observado tanto en las estimaciones semanales explícitas como en la aproximación media mensual.

Asimismo, se observó que para tasas de emisión de quanta de 10 quanta/h o más, se obtienen números básicos de reproducción mayores a la unidad, lo que permitiría la propagación de la infección en el salón de clase. Dicha tasa de emisión corresponde, de acuerdo a las estimaciones bibliográficas, a un valor relativamente alto, superior al esperable para un salón de clase ruidoso. Sin embargo, dicho valor fue estimado para la variante original de SARS-CoV-2 a principios de la pandemia de COVID-19. Desde entonces han surgido variantes mucho más agresivas y transmisibles, como las variantes Delta y Ómicron. Es posible que una tasa de emisión de quanta de 10 quanta/h no sea inusual para dichas variantes. Además, la campaña de medidas no cubrió la primera parte del invierno, que podría presentar niveles de riesgo incluso mayores. Por lo tanto, en la situación observada parece viable el contagio de SARS-CoV-2, sobre todo teniendo en cuenta que las estimaciones presentadas sólo consideran la vía de aerosoles de largo alcance.

Por otra parte, el estudio del riesgo de contagio a partir de curvas sintéticas de quanta, generadas con un modelo de mezcla perfecta, mostró que es posible abatir significativamente el riesgo de contagio mediante esquemas de ventilación periódica. Si bien en términos absolutos el riesgo de contagio puede seguir siendo inaceptable, su reducción es muy significativa, en el entorno del 70% del riesgo original. Es evidente que vale la pena implementar regímenes de ventilación periódicos, con configuraciones de ventilación cruzada durante al menos 5 minutos cada media hora.

Además, se observó que el riesgo de contagio para tasas de ventilación constantes similares a las medias diarias obtenidas en el capítulo 6 es bastante mayor que el computado a partir de las medidas de CO₂. Esto es compatible con la hipótesis de ocurrencia de instancias de alta tasa de ventilación de corta duración presentada en el capítulo 6, y se condice con el abatimiento del riesgo comentado en el párrafo anterior.

Por último, se destaca que si bien la ventilación cruzada intermitente puede reducir significativamente el riesgo de contagio, es dudoso que permita alcanzar niveles absolutos de riesgo satisfactorios. El tiempo con apertura de puertas y ventanas que se puede mantener durante un día de invierno se encuentra acotado por mantener el confort térmico interior. Por lo tanto, podría ser deseable implementar un sistema de acondicionamiento térmico centralizado, que garantizara una alta tasa de ventilación a la vez que mantuviera el confort térmico. Esta idea será desarrollada en los siguientes capítulos, que versarán sobre el modelado térmico del edificio y el diseño de un posible sistema.

²⁰Esto se cumple de forma aproximada, debido a la participación de q en el término de la condición inicial de quanta. En el modelo de Rudnick y Milton el modelo linealizado sí es perfectamente lineal en q (Burridge *et al.*, 2021).

Parte II

Sistema de acondicionamiento térmico invernal

Capítulo 8

Introducción al acondicionamiento térmico

Sono stato colpito dall'urgenza di fare. Conoscere non è abbastanza; dobbiamo applicare. Essere disposti non è abbastanza; dobbiamo fare.

— Leonardo da Vinci

A continuación se presenta el diseño de un sistema de HVAC para el edificio de las escuelas N° 32 y N° 83 de Montevideo.

Esta segunda parte no pretende ser un proyecto completo en sí mismo, sino que busca esbozar una solución al problema del acondicionamiento térmico y la ventilación en un contexto sanitario adverso. En consecuencia, el énfasis estará puesto en cómo incorporar los aspectos sanitarios al proceso de diseño y no en diseñar al detalle y de forma óptima todos los componentes del sistema.

8.1 Motivación

Los resultados anteriormente presentados muestran que la ventilación natural puede permitir muy altas tasas de renovación de aire, pero que esto ocurre durante intervalos temporales cortos. Como se mencionó, probablemente esto se deba a que mantener abiertas las ventanas durante intervalos temporales más extensos imposibilite alcanzar temperaturas de confort. En consecuencia, las tasas de ventilación medias son relativamente bajas y no cumplen ni con el estándar 62.1 de la ASHRAE ni con las recomendaciones de la OMS para la pandemia.

Por otra parte, si bien se mostró que ventilar de forma periódica, aunque sea por poco tiempo, reduce sensiblemente el riesgo de contagio de SARS-CoV-2 por vía aérea, esto puede no ser suficiente en términos absolutos.

Por lo tanto, se proyectó una instalación de HVAC centralizada con ventilación forzada, que compatibiliza mantener tasas de ventilación elevadas con el confort térmico de los ocupantes del edificio.

Es relevante mencionar que actualmente la escuela no cuenta con ningún sistema de acondicionamiento térmico centralizado. Los salones cuentan con unidades de aire acondicionado tipo *split*, pero éstas no deberían ser utilizadas en el contexto de la pandemia, según estipula la normativa vigente (ANEP, 2021).

8.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos asociados al proyecto de acondicionamiento térmico fueron los siguientes.

- Modelar el balance térmico del edificio de la escuela y determinar la carga térmica de diseño para el sistema de HVAC.
- Elegir un punto de operación para el sistema de HVAC y presentar un diseño concreto que incluya:
 - El trazado y dimensionamiento de los ductos de distribución de aire.
 - La selección de un equipo comercial compatible con el diseño.
 - Documentación gráfica.
- Evaluar de forma somera los costos de operación de la instalación proyectada.

8.3 Referencias de diseño

El diseño presentado se guía principalmente por lo estipulado por la ASHRAE. En particular, se siguió lo indicado en el *Handbook - Fundamentals* (ASHRAE, 2021) y por los estándares 55 y 62.1 (ASHRAE, 2017, 2018). Asimismo, se consideraron algunas de las formulaciones y recomendaciones presentadas por Stoecker y Jones (1982).

Capítulo 9

Modelado térmico del edificio

We shape our buildings; thereafter they shape us.

— Sir Winston Churchill, discurso a la Cámara de los Lores, 28 de octubre de 1943

9.1 Introducción

El presente capítulo presenta el modelado térmico del edificio. El objetivo es resolver el balance de energía con el fin de determinar la potencia que debería aportar un sistema de HVAC para mantener el confort térmico de los ocupantes.

Pese a que la escuela es un edificio relativamente simple y que los patrones de ocupación son estables, resolver el balance térmico para cada parte de la escuela no es trivial, puesto que requiere modelar intercambios de calor conductivos, convectivos y radiativos entre distintos ambientes y entre el edificio y el exterior. Con el objetivo de simplificar esta tarea se utilizó el programa EnergyPlus, descrito en el siguiente apartado.

9.2 EnergyPlus

EnergyPlus es un programa creado por el Departamento de Energía (DOE, *Department of Energy*) de Estados Unidos para el modelado energético de edificios (BEM, *Building Energy Modeling*). Esto significa que implementa y resuelve un modelo matemático del comportamiento térmico de un edificio. Las aplicaciones de dicho modelo son muy variadas, tanto para el diseño de nuevos edificios como para el estudio y la mejora de edificios existentes. En particular, es posible utilizarlo para dimensionar un sistema de HVAC.

Existen diversos programas similares al EnergyPlus, como TRNSYS o ESP-r (TRNSYS, s.f.; University of Strathclyde Glasgow, s.f.). Sin embargo, se decidió utilizar EnergyPlus por ser un programa de licencia libre bien establecido¹. Además, hay investigadores en FING con experiencia previa en su uso (Curto-Risso *et al.*, 2021; Gervaz Canessa, 2021).

EnergyPlus basa su funcionamiento en el concepto de zona térmica. Una zona térmica es un volumen de control que incluye una masa de aire y todas las superficies de almacenamiento de energía o intercambio de calor que se encuentran en su interior o que limitan sus fronteras. El programa asume que la temperatura del aire de cada zona es uniforme, por lo que el modelo puede ser representado por una red nodal. Cada nodo es un volumen de control de mezcla perfecta y existen intercambios de energía entre algunos de ellos. Es importante subrayar que las zonas térmicas no están definidas por la geometría interna del edificio estudiado y pueden incluir una o más habitaciones. El usuario debe definir la división del edificio en zonas térmicas

¹En 2021 EnergyPlus cumplió su vigésimo aniversario.

al montar la simulación considerando la resolución espacial deseada y el tiempo de cómputo admitido. Típicamente es deseable para la proyección de sistemas de HVAC que cada zona térmica se corresponda con el volumen servido por cada una de las manejadoras de aire de la instalación.

Para cada zona térmica se resuelve el balance de energía, que considera transferencia de calor por radiación de onda corta (luz solar o lámparas), radiación de onda larga (radiación del cielo, del piso, superficies y equipos eléctricos), convección entre el aire y las diferentes superficies y conducción por las paredes, el techo y el piso. Estos mecanismos de transferencia admiten varios modelos matemáticos, de diverso grado de complejidad. Asimismo, dichos modelos pueden ser dependientes del elemento considerado (por ejemplo, se modelan de forma diferente la conducción en las paredes y en el suelo). El balance considerado también incluye un término transitorio, por lo que se trata de un modelo dinámico.

Salvo en lo que será señalado más adelante, se utilizó la configuración por defecto. Esto implica:

- Discretización del término temporal del balance de energía con una aproximación por diferencias finitas de tercer orden hacia atrás.
- Modelo de conducción unidimensional para paredes y techo. Se asume que estos tienen una temperatura superficial uniforme, que son opacos, emisores difusos y superficies grises, con una transferencia de calor uniforme.
- Se supone que las ventanas son superficies isotermas de capacidad térmica despreciable, opacas a la radiación infrarroja.

Detallar de forma exhaustiva los modelos físicos y el funcionamiento del EnergyPlus trasciende a los objetivos del presente trabajo. El programa cuenta con documentación abundante (EnergyPlus, s.f.) y existen trabajos (Gervaz Canessa, 2021) que resumen adecuadamente sus principales modelos.

9.3 Montaje del modelo en EnergyPlus

El montaje del modelo en EnergyPlus implica generar el archivo de entradas, un documento en texto ASCII de extensión *idf* (*Input Data File*). El mismo describe el caso de simulación e incluye, entre otros:

- La geometría del edificio, incluyendo superficies principales (paredes), subsuperficies (puertas y ventanas) y superficies que proyectan sombras (como el corredor techado al norte del edificio).
- Los materiales del edificio (paredes, techos, ventanas, etc.).
- El día de diseño.
- El paso temporal y la duración de la simulación.
- Los cronogramas de ocupación y uso de diferentes partes del edificio.
- Las diferentes cargas térmicas del edificio (personas, equipos eléctricos, estufas, etc.).
- Los modelos de transferencia de calor a ser utilizados.
- La especificación de zonas térmicas.

Por otra parte, también se debe disponer de una base de datos climáticos (dirección y velocidad de viento, temperatura, humedad, radiación solar, etc.) a ser utilizada como forzante exterior del modelo. Dicha base de datos es tomada por el EnergyPlus de un archivo de texto ASCII de extensión *epw* (*EnergyPlus Weather file*). La misma puede incluir varios días del año, el programa leerá el que se indique en el archivo *idf*.

9.3.1 Armado del archivo *idf*

Se describe a continuación la metodología de montaje de las diversas partes del archivo *idf*. Asimismo, se detallan algunas configuraciones especiales.

Modelado geométrico

La descripción de la geometría del edificio fue quizás el proceso más complicado, en la medida en que EnergyPlus no cuenta en sí mismo con una interfaz gráfica avanzada. Cada superficie del edificio debe ser especificada listando sus vértices uno a uno en el archivo *idf*. Esto, además de implicar una gran cantidad de trabajo, facilita cometer errores y tener problemas al momento de ejecutar la simulación².

Como alternativa, existe una interfaz gráfica avanzada para EnergyPlus, llamada OpenStudio (OpenStudio, s.f.). Este programa permite integrar el montaje y la ejecución del EnergyPlus junto con otros programas de cómputo y es muy usado en simulaciones de gran o mediano porte. En particular, OpenStudio cuenta con plugins para programas de diseño CAD, lo que permite exportar la geometría de diseños arquitectónicos al formato de entrada de EnergyPlus. Existe una extensión para Revit, que fue el programa utilizado para generar la documentación del edificio presentada en el capítulo 3. Sin embargo, este plugin no es oficial (fue creado por un tercero). Como alternativa, se utilizó el plugin para SketchUp (Trimble, s.f.), otro programa de diseño CAD más sencillo³, que tiene la ventaja de disponer de una mayor documentación. Esto implicó redibujar una versión simplificada del modelo creado en Revit. La figura 9.3.1 muestra una vista del proyecto en SketchUp.

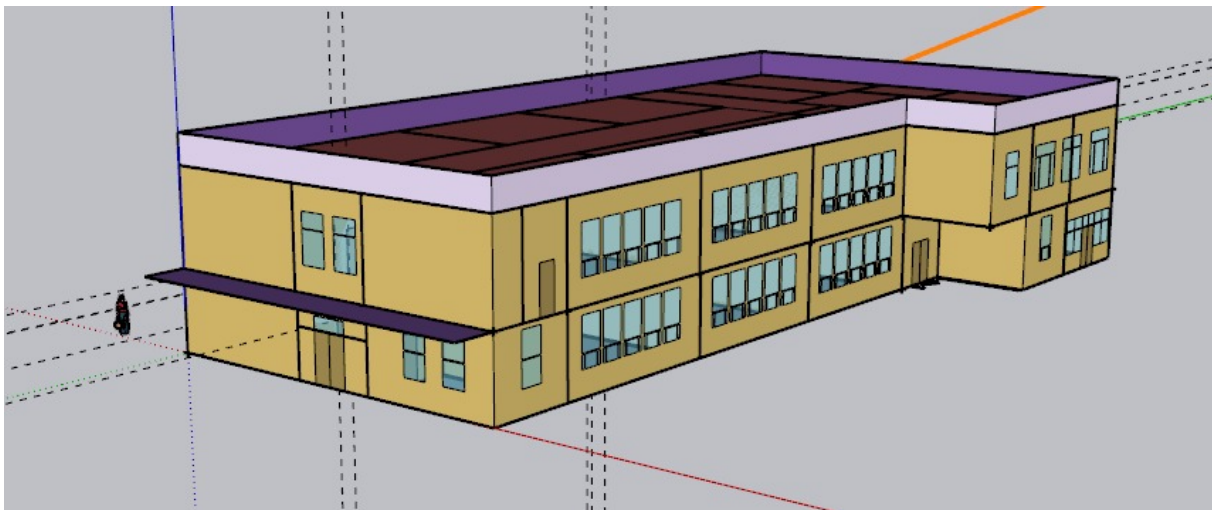


Figura 9.3.1 – Modelo de la escuela realizado en SketchUp. Se trata de una versión simplificada del modelo implementado en Revit.

²EnergyPlus no tiene sistemas que verifiquen las entradas del usuario. En su documentación especifica que se rige bajo un estándar de “*garbage in, garbage out*” (entradas basura, salidas basura) (EnergyPlus, 2021, pág. 7).

³SketchUp no integra servicios de HVAC, sanitaria, etc. Sin embargo, el plugin de OpenStudio permite definir en SketchUp, además de la geometría del edificio, las zonas térmicas y otras propiedades geométricas (ventanas y si son o no operables, puertas, superficies de sombra, categorías de ambientes, entre otras).

Definición de las zonas térmicas

Como se mencionó, las zonas térmicas admiten definiciones diversas. Para el caso en cuestión no se las puede definir de acuerdo a las zonas de servicio de las diferentes manejadoras de aire, puesto que se trata de un problema de diseño. Dado que el edificio no es muy grande y que se observó que los tiempos de cómputo eran reducidos, se decidió hacer coincidir cada zona térmica con cada uno de los ambientes de la escuela.

Las zonas térmicas fueron definidas en el modelo de SketchUp, como se muestra en la figura 9.3.2.

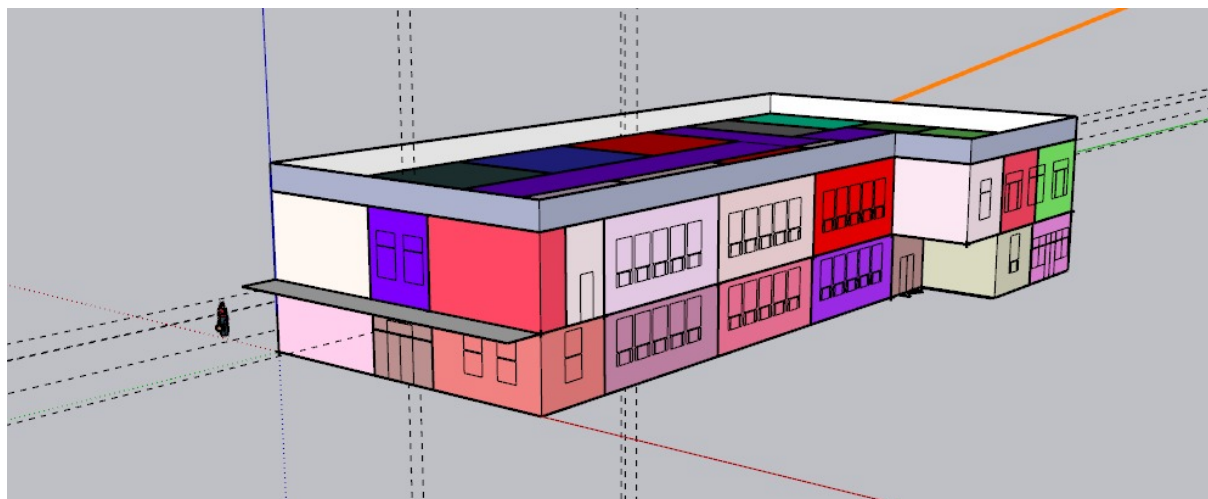


Figura 9.3.2 – Definición de las zonas térmicas en el modelo de SketchUp. La alternancia de colores identifica las zonas térmicas.

El proceso de montaje de la simulación podría haber continuado en OpenStudio, pero en su lugar se decidió exportar⁴ un archivo *idf* luego de generada la geometría y definidas las zonas térmicas y se continuó trabajando sobre el mismo directamente desde EnergyPlus.

Modelo de piso

EnergyPlus admite el uso de diversos modelos para resolver la conducción de calor en el piso. Gervaz Canessa (2021) señala que las principales dificultades para modelar este fenómeno radican en que es bidimensional o tridimensional (a diferencia de la conducción en las paredes) y en que su escala temporal (mensual) es en general diferente a la escala temporal de la simulación conducida (horaria).

La opción más sencilla consiste en imponer la temperatura del suelo en contacto con el edificio simulado como condición de borde. Sin embargo, esto requiere conocer dicha temperatura, algo que no es común.

Otra opción consiste en definir un dominio auxiliar para el piso, donde la temperatura se resuelve mediante un método de elementos finitos en cada paso temporal de la simulación. Si bien esto incrementa el costo computacional de la simulación, simplifica la prescripción de condiciones de borde y mejora los resultados (Gervaz Canessa, 2021).

Para el presente trabajo se utilizó el segundo modelo descrito, con resolución por elementos finitos. Se usó el caso montado por Gervaz Canessa (2021), provisto por la autora y descrito en profundidad en su trabajo.

⁴OpenStudio opera con un archivo de extensión *osm* (*Open Studio Model*), pero también permite exportar archivos *idf*.

Otras configuraciones

Se configuraron en el archivo `idf`:

- Los materiales de construcción. Estos fueron definidos en consulta con investigadores de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) que participaron en el proyecto de extensión en el cual se insertó el presente trabajo.
- Los patrones de ocupación del edificio. Se consideró para todos los salones una ocupación nominal de 30 personas de 8:00 a 10:00, de 10:30 a 12:00, de 13:00 a 15:00 y de 15:30 a 17:00.
- Las cargas térmicas. Se consideró la carga de las personas, de las luces y de algunos equipos electrónicos (computadoras, routers, etc.). Para las personas se utilizaron los valores indicados por ASHRAE (2021) y para las luces y los equipos se utilizó la carga típica por unidad de superficie para oficinas medianas de OpenStudio.
- El día de diseño del sistema de HVAC. Se utilizó el 30 de julio para configurar la carga solar. Para configurar las variables climáticas (temperatura y dirección y velocidad del viento) se utilizó la información media invernal de INUMET (2015)⁵.
- El modelo de infiltraciones. Se utilizó la opción `ZoneInfiltration:DesignFlowRate`, que supone un caudal de infiltración por unidad de área de pared exterior. Se utilizó⁶ un valor recomendado por OpenStudio de 0,320 L/m²s.

Casos estudiados

Se llevaron a cabo dos simulaciones. La primera buscó modelar el comportamiento de la escuela en su condición actual (sin un sistema de HVAC). Se configuraron abiertas todas las ventanas hacia el exterior y cerradas todas las puertas y ventanas interiores, con el objetivo de evaluar el confort térmico. Esta simulación fue ejecutada para todos los días del año típico.

Se destaca que esta primera simulación contempla un caso de ventilación unilateral. Es esperable, por lo tanto, una tasa de ventilación más baja que el máximo alcanzable. Por lo tanto, se trata de un modelo conservador. Si no se mantiene el confort térmico en este caso, la situación con ventilación cruzada será peor. EnergyPlus también permite modelar regímenes de ventilación cruzada, pero para ello es necesario configurar el cálculo de intercambio de masa entre distintas zonas térmicas, lo que escapa a los objetivos del presente trabajo.

La segunda simulación tuvo como objetivo dimensionar la carga térmica del sistema de HVAC a diseñar. Se modelaron todas las puertas y ventanas cerradas y se impuso una tasa de ventilación para cada salón y una temperatura objetivo. En este caso, el EnergyPlus calcula la potencia asociada al flujo de masa que debe aportar el sistema de HVAC para cerrar el balance. Dicha potencia puede ser expresada como

$$\dot{Q}_{\text{HVAC}} = \dot{m} c_p (T_{\text{in}} - T_{\text{salón}}) \quad (9.3.1)$$

donde $\dot{m}$ es el flujo másico de aire, c_p es la capacidad calorífica del aire a presión constante, T_{in} es la temperatura de entrada del aire (provisto por el sistema de HVAC) y $T_{\text{salón}}$ es la temperatura del salón. Al determinar $\dot{Q}_{\text{HVAC}}$ queda dada la temperatura a la que es necesario ingresar el aire al salón y, en consecuencia, la potencia térmica que deben aportar los equipos del sistema de HVAC.

⁵Se utilizaron datos invernales pues, como será expuesto más adelante, el diseño se restringirá a la temporada invernal.

⁶No se encontraron valores de referencia específicos para edificaciones típicas en Uruguay. Posiblemente este valor subestime las infiltraciones reales.

La tasa de ventilación impuesta fue de 9,3 L/s por persona. Asumiendo una ocupación de 30 personas, esto equivale a 280 L/s por salón. En todos los casos esto cumple con creces los requisitos del estándar 62.1 de la ASHRAE (2018)⁷ y es un valor muy cercano a la consigna de la OMS para la pandemia de COVID-19 (WHO, 2021a)⁸. Para el salón 2, el caudal impuesto corresponde con 6 ACH, para el cual se encontró que el riesgo de contagio era aceptable.

Por otra parte, se impuso una temperatura objetivo de 22 °C y se utilizó el rango objetivo de humedad específica por defecto, de entre 7,7 g/kg y 15,6 g/kg⁹. Esto cumple con los límites de confort del estándar 55 de la ASHRAE (2017).

9.3.2 Armado del archivo epw

Se utilizó un archivo **epw** que contiene un año típico para Montevideo, provisto por Gervaz Canessa (2021).

También se generó un archivo **epw** a partir de los datos relevados por la estación meteorológica del techo durante la campaña de medidas. Para ello, se utilizó el programa Elements (Big Ladder Software, s.f.). Finalmente, se decidió utilizar los datos del año típico para el diseño del sistema de HVAC, pero sería interesante utilizar los datos de la estación meteorológica para validar las simulaciones del EnergyPlus. Esto requeriría contar con medidas de temperatura interior.

9.4 Resultados del EnergyPlus

9.4.1 Simulación de ventilación natural

Se obtuvieron series temporales horarias de temperatura para cada salón de clases de la escuela para todos los días del año. A partir de dichas series se construyeron diagramas de caja mensuales de temperatura para cada salón dentro de los horarios de ocupación, para los meses de clase. Las figuras 9.4.1, 9.4.2 y 9.4.3 muestran los resultados obtenidos, donde además se superpone el rango de confort térmico dado por el estándar 55 de la ASHRAE, de aproximadamente entre 19,4 °C y 27,8 °C (ASHRAE, 2017, s.f.-a).

⁷5 L/s por persona más 0,6 L/s por metro cuadrado.

⁸10 L/s por persona.

⁹Para la temperatura objetivo, esto equivale a una humedad relativa de entre el 40% y el 80%

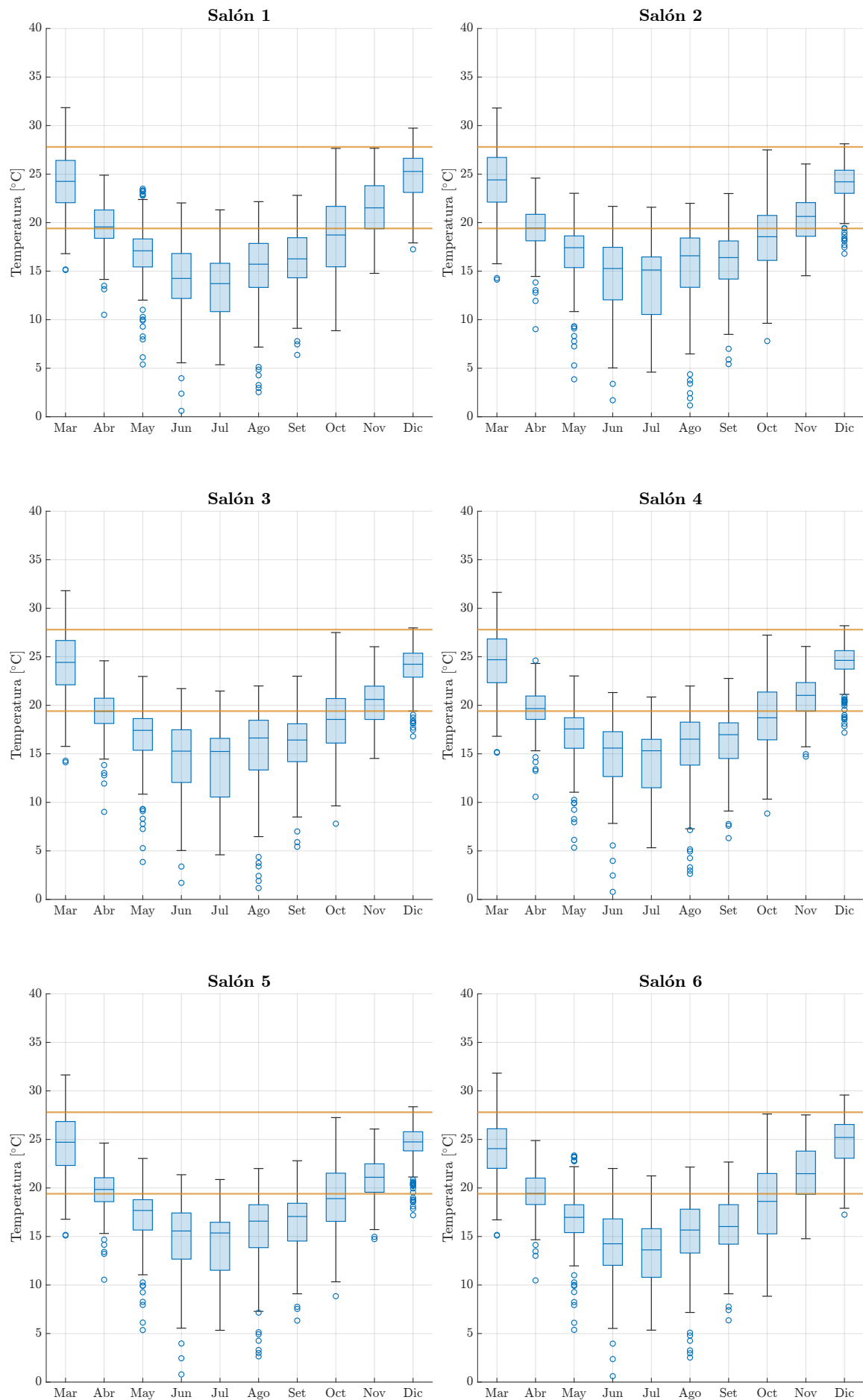


Figura 9.4.1 – Resultados de simulación sin acondicionamiento térmico para los salones sobre el corredor principal del primer piso.

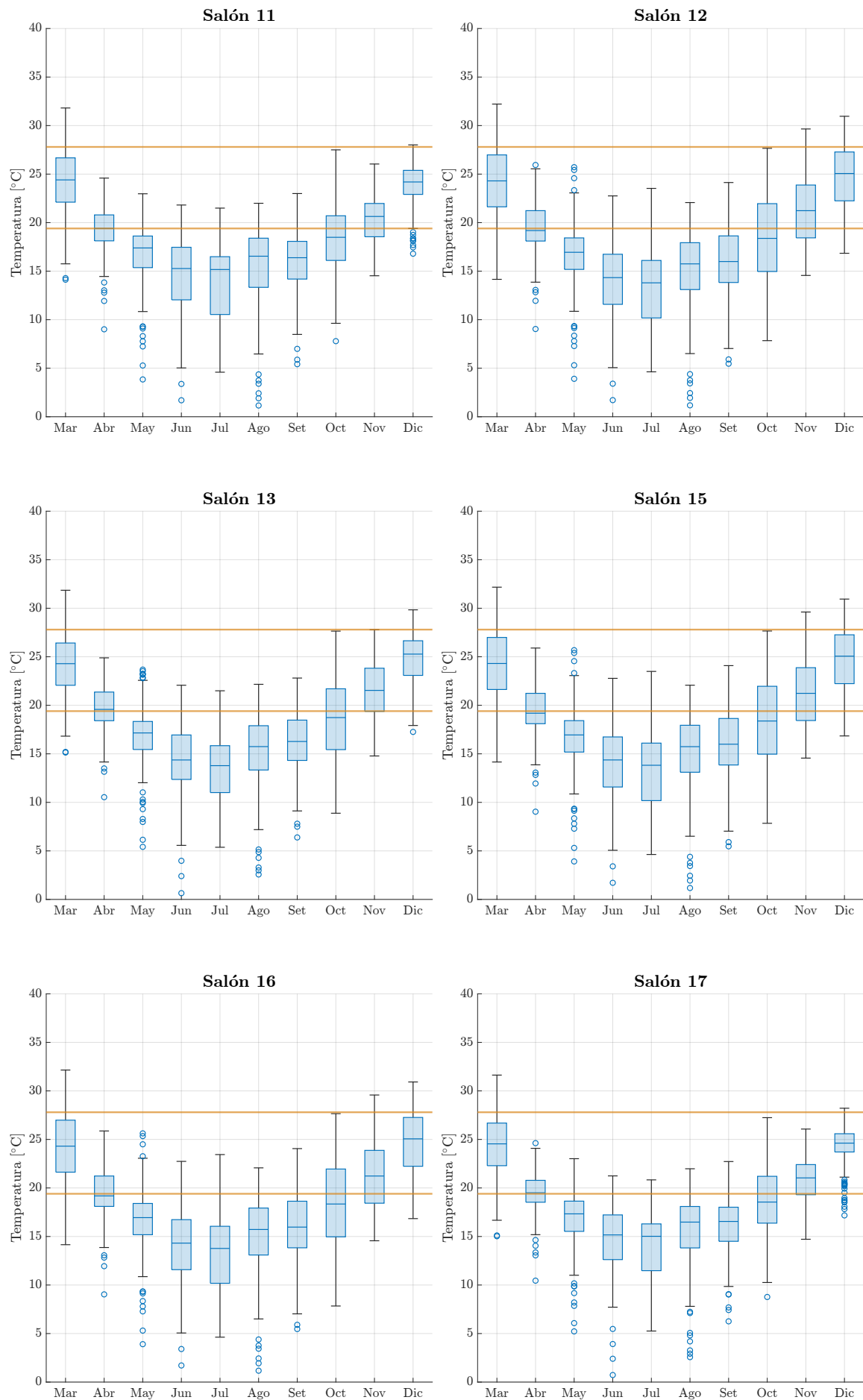


Figura 9.4.2 – Resultados de simulación sin acondicionamiento térmico para los salones sobre el 146corredor principal del segundo piso.

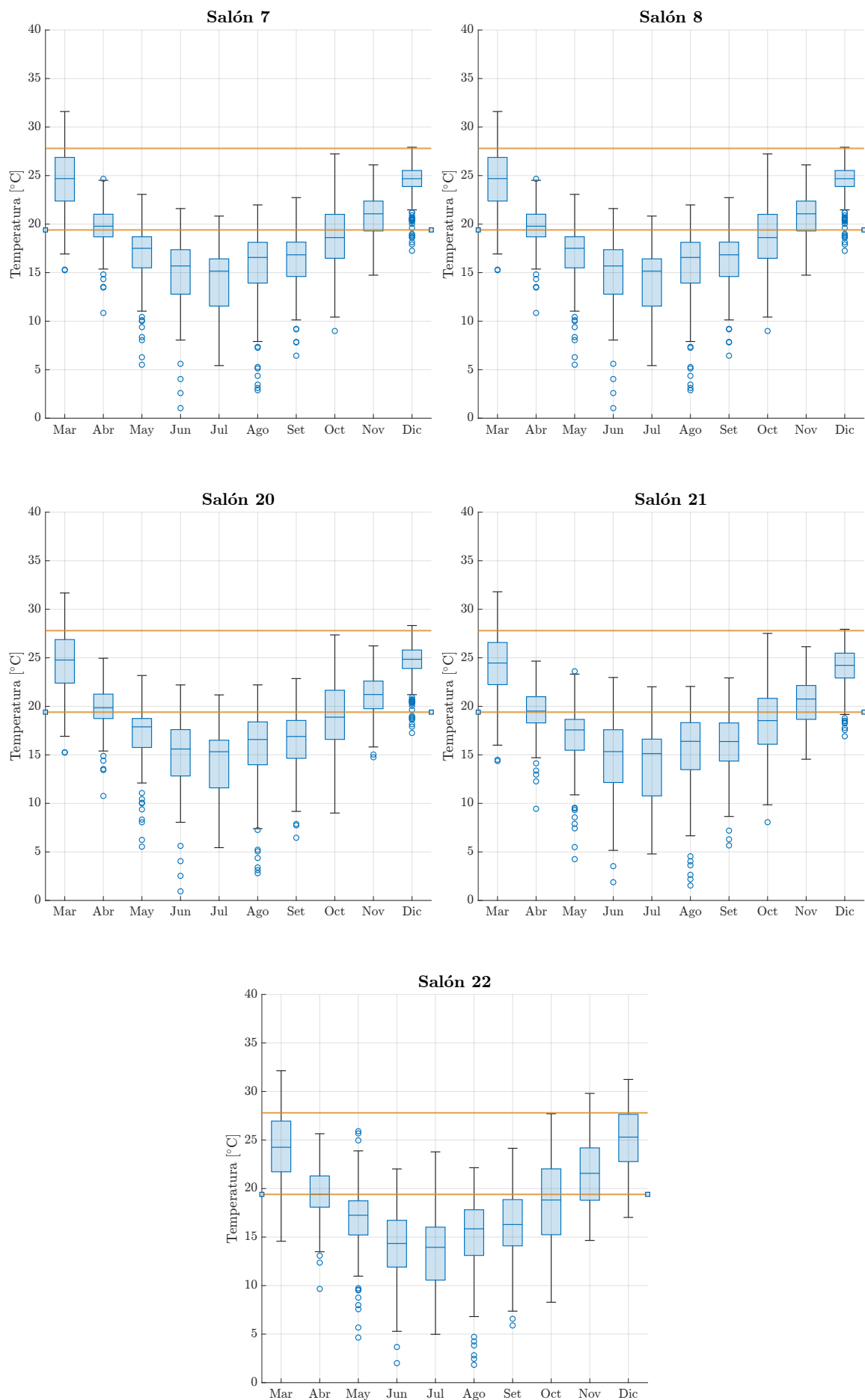


Figura 9.4.3 – Resultados de simulación sin acondicionamiento térmico para los salones al norte del edificio.

Como puede observarse, la ventilación permanente con apertura de todas las ventanas es, aún en un régimen unilateral, incompatible con el confort térmico de los ocupantes durante la mayor parte del año. En particular entre los meses de mayo y setiembre rara vez se alcanza una temperatura de confort. Asimismo, el comportamiento observado es similar para todos los salones.

Los resultados obtenidos, junto con las estimaciones de la tasa de ventilación y del riesgo de contagio, confirman la pertinencia de proyectar un sistema de HVAC centralizado. Es de particular interés la operación de dicho sistema en invierno, cuando la apertura de las ventanas compromete el confort térmico. En estas circunstancias es esperable que los ocupantes no abran las ventanas y que, por lo tanto, se deteriore la calidad del aire. En consecuencia, el presente trabajo se restringirá al modelado térmico y al diseño de un sistema de HVAC durante la temporada invernal, que caliente el aire tomado del exterior.

9.4.2 Simulación para dimensionamiento del sistema de HVAC

Para el día de diseño, se obtuvo la serie temporal horaria de la potencia $\dot{Q}_{\text{HVAC}}$ para cada zona salón. Las figuras 9.4.4 y 9.4.5 presentan los resultados obtenidos. Se han promediado las series de los salones sobre los corredores principales y sobre la cabecera norte, respectivamente, dado que presentan requisitos similares y, como se verá más adelante, serán agrupados en sendas instalaciones.

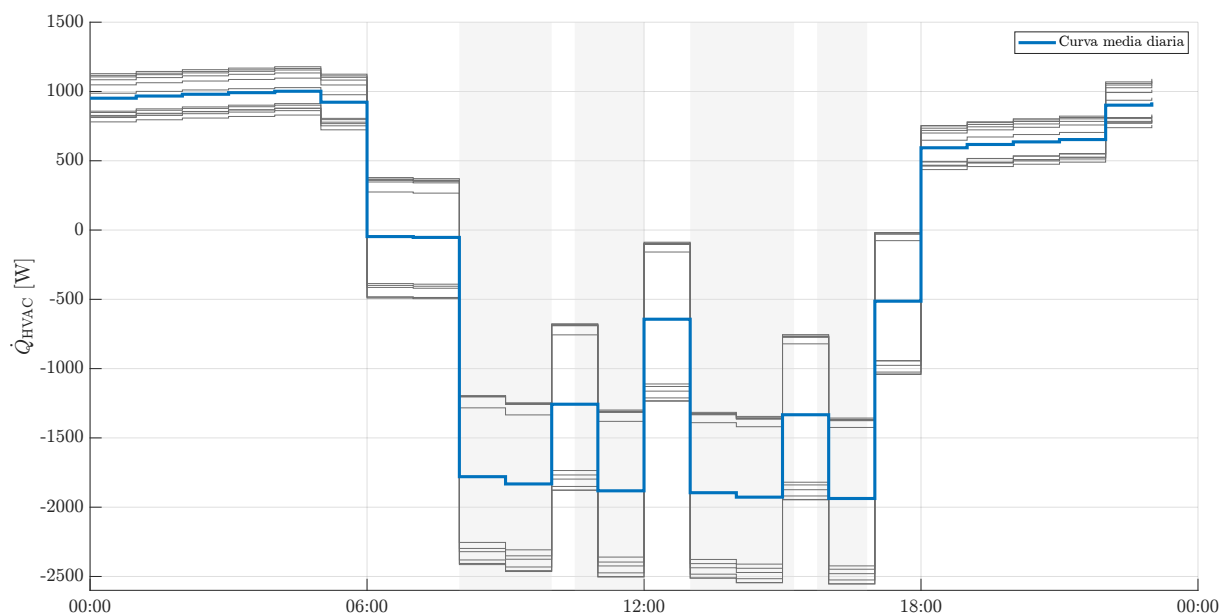


Figura 9.4.4 – Potencia de flujo demandada por los salones sobre los corredores principales. Las curvas grises corresponden a los resultados de cada zona térmica.

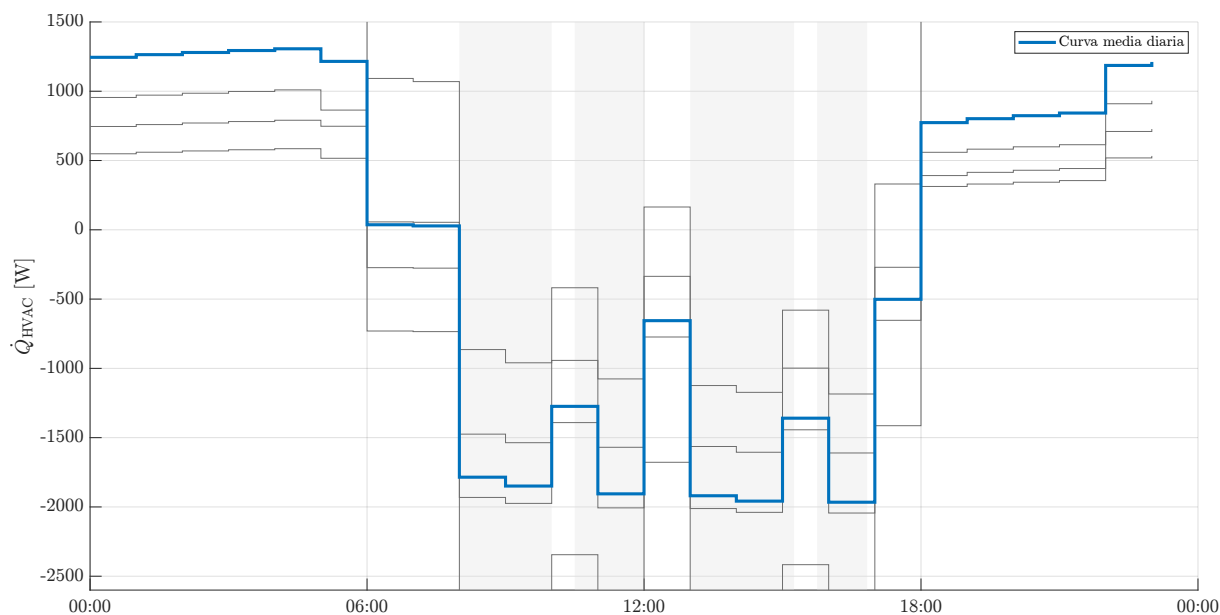


Figura 9.4.5 – Potencia de flujo demandada por los salones del norte. Las curvas grises corresponden a los resultados de cada zona térmica.

El andamio de las curvas presentadas es razonable. Al comenzar el horario de ocupación, la potencia demandada al sistema de HVAC decrece de forma pronunciada debido a que los alumnos comienzan a aportar su carga térmica al sistema¹⁰.

En la figura 9.4.4 se observa que las curvas de los salones individuales se agrupan en dos estratos diferenciados. El que demanda una potencia menor (mayor en términos absolutos) corresponde a los salones del segundo piso, mientras que el que demanda una potencia mayor (menor en valor absoluto) corresponde al primer piso. La diferencia sistemática entre ambos grupos puede explicarse en función de la carga solar y de la pérdida de calor por el piso. Los salones del segundo piso reciben la radiación solar por conducción a través del techo y los salones del primer piso presentan pérdidas de calor conductivas por el piso. Asimismo, los intercambios de calor conductivos entre ambas plantas (por el techo del primero y por el piso del segundo) no son significativos, dado que ambas plantas se encuentran acondicionadas a la misma temperatura. Por lo tanto, dado que los demás flujos de calor (cargas internas, pérdidas por las paredes, infiltraciones) son similares, es esperable que los salones del segundo piso demanden una potencia menor que los del primer piso.

Se observa que en ambas figuras el sistema de HVAC debe aportar una potencia $\dot{Q}_{HVAC}$ negativa. Esto significa que el aire debe ingresar al salón a una temperatura menor que la temperatura objetivo (22 °C), pero el sistema sigue operando en modo de calefacción. A efectos de la selección de un equipo de acondicionamiento, que será presentada en el capítulo 10, interesa la potencia demandada para calentar el aire desde la temperatura exterior a la temperatura de ingreso requerida. A modo de ejemplo, la figura 9.4.6 presenta dicha potencia térmica demandada para los salones sobre los corredores principales, considerando que el aire inyectado es calentado desde la temperatura exterior¹¹.

¹⁰Las figuras muestran la potencia que debería entregar el sistema de HVAC si permaneciera encendido todo el día. En la realidad el sistema se apagaría fuera del horario escolar.

¹¹Como se verá en el siguiente capítulo, el sistema propuesto no utilizará recirculación de aire, por lo que la potencia presentada deberá ser íntegramente aportada por el equipo de acondicionamiento térmico.

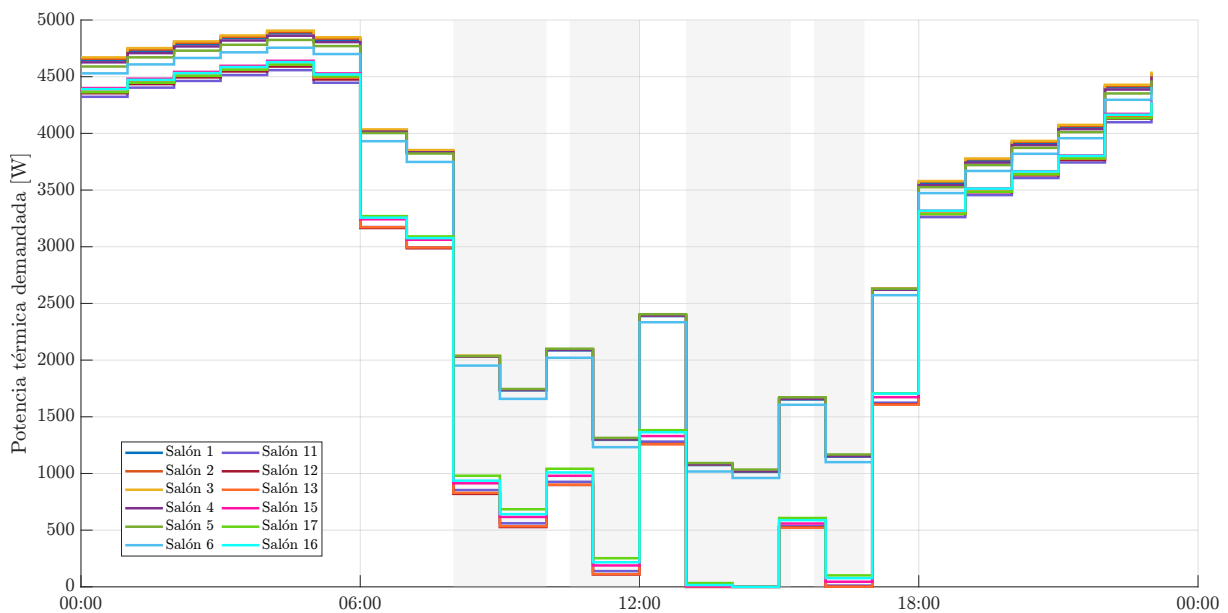


Figura 9.4.6 – Potencia de calefacción (aportada por el equipo de acondicionamiento) demandada por los salones sobre los corredores principales.

Por último, se simularon las zonas térmicas para todos los días de la temporada de calentamiento. Las figuras 9.4.7 y 9.4.8 muestran la potencia de flujo demandada, $\dot{Q}_{HVAC}$, promediada para todos los días entre mayo y setiembre. Al igual que para el día de diseño, se presentan por separado los resultados para los salones sobre los corredores principales y para los salones del norte.

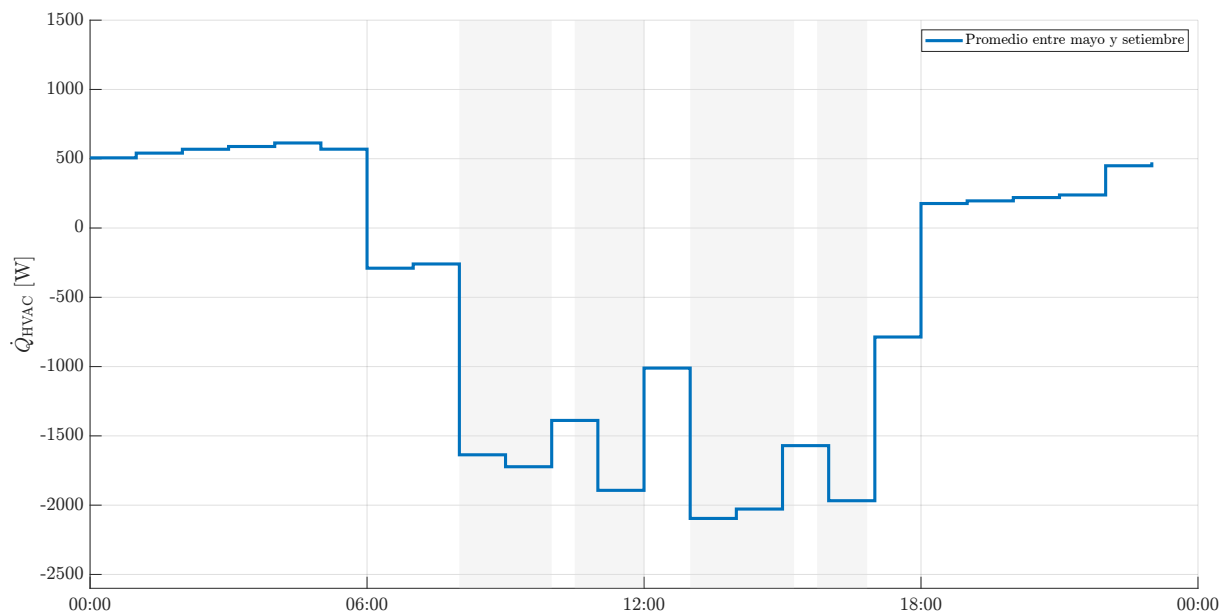


Figura 9.4.7 – Potencia de flujo demandada por los salones sobre los corredores principales. Promedio diario entre mayo y setiembre.

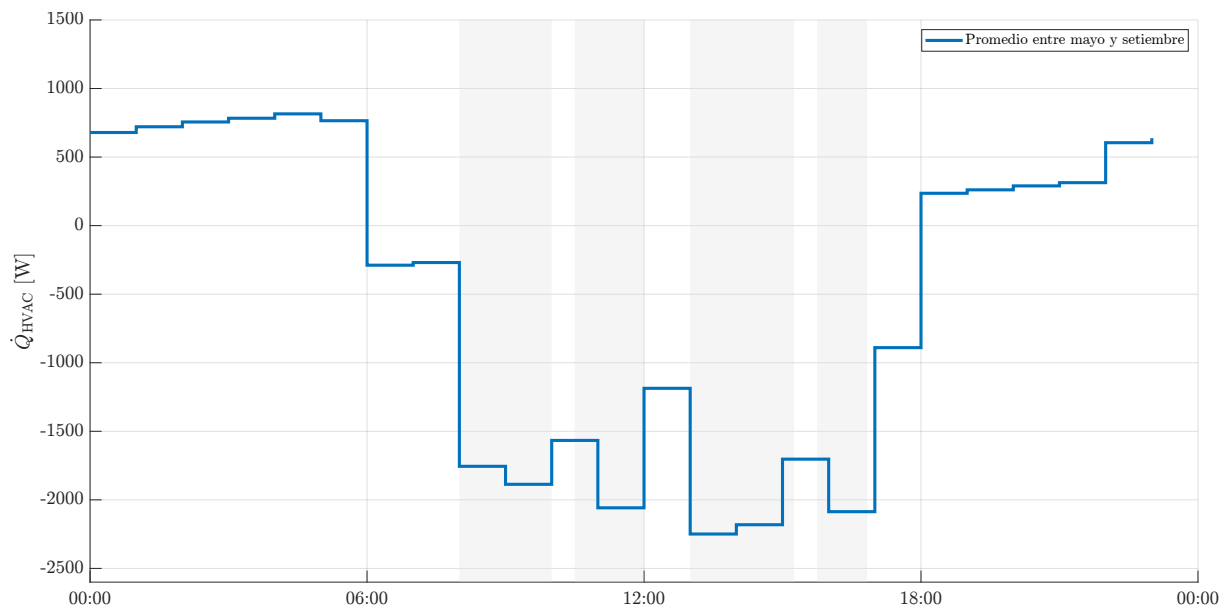


Figura 9.4.8 – Potencia de flujo demandada por los salones del norte. Promedio diario entre mayo y setiembre.

Se observa que la potencia media demandada en promedio durante toda la temporada invernal es similar a la demandada durante el día de diseño, lo que confirma su representatividad.

9.5 Verificación de los resultados de diseño

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos a partir de la simulación de diseño en EnergyPlus, se realizó de forma manual el balance de energía para algunos salones de la escuela.

9.5.1 Verificación para el salón 2

Se presenta a continuación el detalle de los cálculos para el salón 2. Éste será considerado representativo para todos los salones que se ubican sobre los corredores de distribución principal.

Hipótesis

Se partió de las siguientes hipótesis de diseño.

- Se desea mantener una tasa de ventilación de 6 ACH (280 L/s).
- La temperatura objetivo para el salón es de 22 °C, dentro de los rangos de confort recomendados por ASHRAE (2017) y Stoecker y Jones (1982).
- La humedad relativa objetivo para el salón es del 50%, dentro de los rangos de confort recomendados por ASHRAE (2017) y Stoecker y Jones (1982).
- Se supone una temperatura exterior de 11,5 °C y humedad relativa exterior del 80%, valores que corresponden a las medias invernales (junio, julio y agosto) en Uruguay (DNM, 2009).
- Se supone una velocidad de viento exterior media de 3,9 m/s, que corresponde a la media invernal (junio, julio y agosto) en Uruguay (DNM, 2009). Este es un valor razonable en comparación con la recomendación de Stoecker y Jones (1982) de 3,4 m/s.
- Se supone que el pasillo se encuentra a la misma temperatura que el aire exterior al edificio. Esto es el peor caso de diseño posible, y es razonable dado que por lo general las puertas al patio en ambos extremos del pasillo permanecen abiertas.

- No se incluyen en el balance las cargas térmicas por radiación solar, de acuerdo a lo indicado por ASHRAE (2021).
- Se supone una temperatura media del piso de 15 °C, que corresponde a la mínima temperatura media anual del suelo en Uruguay (Durán *et al.*, s.f.).

Balances de energía

En régimen estacionario, el balance de calor sensible del salón se puede expresar como

$$\dot{Q}_s + \dot{m}c_{p_{ah}}(T_{in} - T_{salón}) - \dot{Q}_{pérd_s} = 0 \quad (9.5.1)$$

donde $\dot{Q}_s$ es el calor¹² sensible asociado a las cargas del salón (calor sensible emitido por los ocupantes y por las luces), $\dot{m}$ es el flujo másico de ventilación, $c_{p_{ah}}$ es la capacidad calorífica a presión constante del aire húmedo, T_{in} es la temperatura de bulbo seco del aire suministrado por el sistema de HVAC, $T_{salón}$ es la temperatura de bulbo seco del salón (objetivo de acondicionamiento) y $\dot{Q}_{pérd_s}$ es la potencia sensible perdida a través del piso y las paredes, que incluye las infiltraciones de aire exterior a través de la envolvente del edificio.

Por otra parte, el balance de calor latente se puede escribir como

$$\dot{Q}_l + \dot{m}(w_{in}h_g(T_{salón}) - w_{salón}h_g(T_{in})) - \dot{Q}_{pérd_l} = 0 \quad (9.5.2)$$

donde $\dot{Q}_l$ es el calor latente asociado a las cargas del salón (personas), w_{in} es la humedad específica del aire ingresado por el sistema de HVAC, $w_{salón}$ es la humedad específica del aire del salón (objetivo de acondicionamiento), $h_g(T)$ es la entalpía del vapor de agua saturado a la temperatura T y $\dot{Q}_{pérd_l}$ es la pérdida de calor latente del sistema por infiltración de aire exterior a través de la envolvente del edificio.

La figura 9.5.1 esquematiza los flujos de calor sensible y latente considerados.

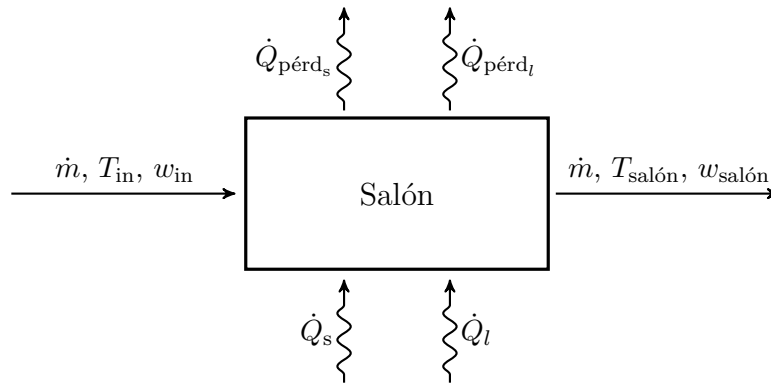


Figura 9.5.1 – Flujos de calor sensible y latente considerados para los balances del salón.

El objetivo es calcular la temperatura y la humedad del aire que debe proveer el sistema de acondicionamiento térmico para satisfacer el punto de diseño. Esto es, se desea resolver las ecuaciones (9.5.1) y (9.5.2) para obtener T_{in} y w_{in} .

Cálculo de los flujos de calor sensible y determinación de la temperatura de entrada

El calor de pérdidas sensibles se puede calcular como

$$\dot{Q}_{pérd_s} = \dot{Q}_{int\ wall} + \dot{Q}_{ext\ wall} + \dot{Q}_{floor} + \dot{Q}_{int\ win} + \dot{Q}_{ext\ win} + \dot{Q}_{door} + \dot{Q}_{inf} \quad (9.5.3)$$

¹²Se utiliza el término calor de forma laxa. En rigor se refiere a una potencia.

donde $\dot{Q}_{\text{int wall}}$ y $\dot{Q}_{\text{ext wall}}$ son las pérdidas de calor por las paredes este y oeste, respectivamente, $\dot{Q}_{\text{floor}}$ es la pérdida de calor por el piso, $\dot{Q}_{\text{int win}}$ y $\dot{Q}_{\text{ext win}}$ son las pérdidas de calor por las ventanas hacia el pasillo (banderola) y hacia el patio, respectivamente, $\dot{Q}_{\text{door}}$ es la pérdida de calor por la puerta y $\dot{Q}_{\text{inf}}$ es la pérdida de calor por infiltraciones a través de la envolvente del edificio. No se incluyen pérdidas por el techo ni por las paredes norte y sur, puesto que limitan con salones que estarán acondicionado a la misma temperatura.

Para calcular los flujos de calor por las paredes, éstas fueron modeladas como muros planos con conducción unidimensional. La tabla 9.5.1 resume las capas consideradas para la pared este (interior) y oeste (exterior), su espesor, su conductividad y la resistencia térmica equivalente por unidad de área resultante, calculada como

$$R'' = \frac{L}{k} \quad (9.5.4)$$

donde R'' es la resistencia de conducción por unidad de área de una capa de material, L es su espesor y k es su conductividad térmica.

ESTRUCTURA DE LAS PAREDES Y RESISTENCIAS TÉRMICAS DE CONDUCCIÓN ASOCIADAS				
Pared oeste (exterior)				
Capa	Descripción	L [mm]	k [W/mK]	R'' [m ² K/W]
1	Revoque exterior	1,5	0,062	0,0242
2	Ladrillo	90	0,125	0,125
3	Aislante	75	0,039	1,94
4	Ladrillo	90	0,062	0,125
5	Revestimiento interior	13	1,730	0,0075
Pared este (interior)				
Capa	Descripción	L [mm]	k [W/mK]	R'' [m ² K/W]
1	Revestimiento interior	13	1,730	0,0075
2	Ladrillo	90	0,125	0,125
3	Ladrillo	90	0,125	0,125
4	Revestimiento pasillo	13	1,730	0,0075

Tabla 9.5.1 – Estructura de las paredes y resistencia térmica por unidad de área asociada. Los espesores típicos y las conductividades térmicas fueron tomados de Bergman *et al.* (2011) y Stoecker y Jones (1982).

Además, se estimaron las siguientes resistencias térmicas convectivas, de acuerdo a lo establecido por Stoecker y Jones (1982).

- Para el aire exterior 0,044 m²K/W.
- Para el aire en el interior del salón y en el pasillo 0,12 m²K/W.

Sumando las resistencias detalladas para cada pared, se calcularon las siguientes resistencias equivalentes por unidad de área

$$R''_{\text{eq ext wall}} = 2,386 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (9.5.5)$$

$$R''_{\text{eq int wall}} = 0,505 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (9.5.6)$$

El calor perdido por cada pared se puede expresar a partir de su resistencia térmica equivalente como

$$\dot{Q} = \frac{A\Delta T}{R''_{\text{eq}}} \quad (9.5.7)$$

donde A es el área de intercambio (superficie de la pared) y $\Delta T = 10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ es la diferencia de temperatura entre el interior (a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el exterior (a $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Las áreas de intercambio de las paredes interior y exterior (descontando las aberturas) son $24,76\text{ m}^2$ y $18,63\text{ m}^2$, respectivamente. Se obtiene así que

$$\dot{Q}_{\text{int wall}} = 514,86\text{ W} \quad (9.5.8)$$

$$\dot{Q}_{\text{ext wall}} = 82,00\text{ W} \quad (9.5.9)$$

Por otra parte, tanto para la banderola como para las ventanas exteriores (todas supuestas cerradas) se consideró el siguiente coeficiente global de transferencia de calor típico, dado por Stoecker y Jones (1982) para ventanas con una única capa de vidrio en invierno.

$$U = 6,2\text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.10)$$

A partir de este último coeficiente se pueden calcular las pérdidas de calor por las ventanas como

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (9.5.11)$$

Sabiendo que el área total con vidrio es de $9,05\text{ m}^2$ para las ventanas exteriores y de $1,08\text{ m}^2$ para la banderola, se obtuvo que

$$\dot{Q}_{\text{int win}} = 70,50\text{ W} \quad (9.5.12)$$

$$\dot{Q}_{\text{ext win}} = 589,13\text{ W} \quad (9.5.13)$$

Para calcular las pérdidas de calor por la puerta (supuesta cerrada), también se la modeló como un muro plano con conducción unidimensional. Se utilizó una conductividad térmica de $0,1585\text{ W/mK}$ (Bergman *et al.*, 2011). Dado un espesor de 35 mm , se obtuvo una resistencia térmica conductiva de $0,2209\text{ m}^2\text{K/W}$. Considerando además las mismas resistencias térmicas convectivas que para la pared interior en el salón y en el pasillo, se obtuvo la siguiente resistencia térmica equivalente

$$R''_{\text{eqdoor}} = 0,461\text{ m}^2\text{K/W} \quad (9.5.14)$$

A partir de la ecuación (9.5.7) se tiene entonces que

$$\dot{Q}_{\text{door}} = 41,77\text{ W} \quad (9.5.15)$$

Para calcular las pérdidas por el piso, se siguió la formulación dada por ASHRAE (2021) para pisos a nivel con la superficie del suelo. La misma expresa dichas pérdidas como

$$\dot{Q}_{\text{floor}} = PF_P\Delta T \quad (9.5.16)$$

donde P es el perímetro del piso del salón, F_P es el coeficiente de pérdida de calor por metro de perímetro y ΔT es la diferencia de temperatura entre el aire interior y el suelo.

Para el salón 2 se tiene un perímetro de 28 m . Asimismo, de acuerdo con las indicaciones de ASHRAE (2021) se estimó un valor de $0,86\text{ W/mK}$ para F_P . Por último, se utilizó el valor de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura invernal del suelo dado por Durán *et al.* (s.f.), con lo que se tiene un valor de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para ΔT . Se tiene así que

$$\dot{Q}_{\text{floor}} = 168,56\text{ W} \quad (9.5.17)$$

Para estimar el caudal de infiltraciones se utilizó la formulación dada por Stoecker y Jones (1982). Se trata de una estimación empírica de las renovaciones por hora asociadas al caudal de infiltración, ACH_{inf} , dada por la siguiente expresión

$$\text{ACH}_{\text{inf}} = a + bv + c(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \quad (9.5.18)$$

donde a , b y c son constantes asociadas a la calidad de la construcción. Para una construcción media se tiene que (Stoecker y Jones, 1982)

$$a = 0,20 \quad (9.5.19)$$

$$b = 0,015 \quad (9.5.20)$$

$$c = 0,014 \quad (9.5.21)$$

Dadas las temperaturas y la velocidad de viento de diseño, resulta que

$$ACH_{inf} = 0,1115 \text{ h}^{-1} \quad (9.5.22)$$

Lo anterior equivale al siguiente caudal de infiltraciones

$$\dot{V}_{inf} = 5,14 \text{ L/s} \quad (9.5.23)$$

Entonces, las pérdidas de energía por infiltración se pueden escribir como

$$\dot{Q}_{inf} = \rho c_{p_{ah}} \dot{V}_{inf} (T_{salón} - T_{ext}) \quad (9.5.24)$$

donde ρ es la densidad del aire. Resulta entonces que

$$\dot{Q}_{inf} = 66,43 \text{ W} \quad (9.5.25)$$

A partir de los resultados anteriores y de la ecuación (9.5.3), se obtiene que

$$\dot{Q}_{pérdidas} = 1466,82 \text{ W} \quad (9.5.26)$$

Por otra parte, se calculó la carga de calor sensible del salón. Esta puede escribirse como

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_{s_{personas}} + \dot{Q}_{s_{luces}} \quad (9.5.27)$$

donde $\dot{Q}_{s_{personas}}$ y $\dot{Q}_{s_{luces}}$ son las cargas sensibles asociadas a los ocupantes del salón y a la iluminación, respectivamente.

La carga térmica sensible emitida por los ocupantes de la habitación fue estimada, según lo tabulado por ASHRAE (2021), en 70 W para un hombre adulto sentado con actividad física muy ligera (oficinas, hoteles y apartamentos). Para mujeres adultas dicha carga se reduce al 85% de su valor (59,5 W) y para niños al 75% (52,5 W). Considerando una situación de ocupación nominal, con 30 niños y una maestra (mujer adulta), resulta que

$$\dot{Q}_{s_{personas}} = 1634,5 \text{ W} \quad (9.5.28)$$

Por otra parte, la carga de iluminación fue estimada de acuerdo a la formulación presentada por Stoecker y Jones (1982). La misma establece que, para lámparas fluorescentes (tubo lux)

$$\dot{Q}_{s_{luces}} = PF_u F_b CLF \quad (9.5.29)$$

donde P es la potencia nominal de la lámpara, F_u es su factor de utilización, F_b es un factor dependiente del balasto electrónico de la lámpara y CLF es un factor de corrección que toma en cuenta la inercia térmica de los artefactos de iluminación.

Se estimó que cada artefacto tiene una potencia nominal de 43 W, con un factor de balasto de 0,88, de acuerdo a lo presentado por metroLED (s.f.). Asimismo, se consideró un factor de utilización unitario y un valor de 0,66 para el CLF (Stoecker y Jones, 1982). Resulta entonces que la carga sensible de los cuatro artefactos del salón es

$$\dot{Q}_{s_{luces}} = 99,9 \text{ W} \quad (9.5.30)$$

Sumando las cargas sensibles según la ecuación (9.5.27), resulta que

$$\dot{Q}_s = 1734,4 \text{ W} \quad (9.5.31)$$

Por último, a partir de la ecuación (9.5.1) y de los resultados dados en las ecuaciones (9.5.26) y (9.5.31), se obtuvo que

$$T_{\text{in}} = 21,40 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.5.32)$$

donde se ha calculado $\dot{m}$ a partir de las ACH de diseño, iterando el valor de la densidad del aire.

La figura 9.5.2 resume los flujos de calor sensible analizados en un diagrama de resistencias. Se ha designado como $\dot{Q}_{\text{HVAC}}$ al segundo término del primer miembro de la ecuación (9.5.1).

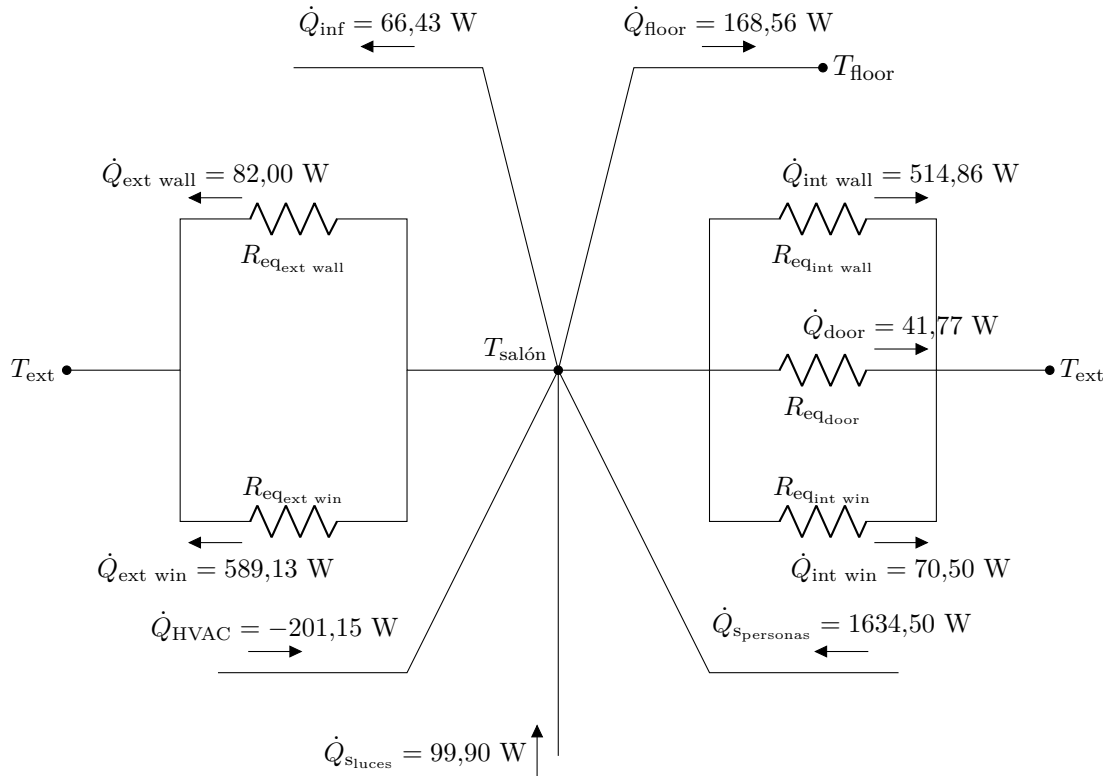


Figura 9.5.2 – Diagrama de resistencias para los flujos de calor sensible calculados.

Cálculo de los flujos de calor latente y determinación de la humedad de entrada

El calor de pérdidas latentes se reduce al asociado a las infiltraciones. Éste puede ser calculado como (Stoecker y Jones, 1982)

$$\dot{Q}_{\text{pérd}_l} = \dot{V}_{\text{inf}} \rho h_{fg} (w_{\text{salón}} - w_{\text{ext}}) \quad (9.5.33)$$

donde ρ es la densidad del aire y h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua. Stoecker y Jones (1982) sugieren utilizar un valor de $3 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ para el valor de ρh_{fg} , con lo que resulta que

$$\dot{Q}_{\text{pérd}_l} = 1,67 \text{ W} \quad (9.5.34)$$

donde se ha utilizado una humedad específica interior¹³ de 0,008 396 kg/kg y una humedad específica exterior¹⁴ de 0,008 287 kg/kg.

¹³Determinada con una carta psicrométrica a partir de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa interior.

¹⁴Se utiliza el valor para aire saturado a la temperatura exterior de diseño, de acuerdo a lo indicado por Stoecker y Jones (1982).

Por otra parte, la carga latente del salón se reduce a la de sus ocupantes. Ésta fue estimada, al igual que la carga sensible, según lo tabulado por ASHRAE (2021). Se estima que la carga latente de un hombre adulto sentado en actividad física muy ligera es de 45 W. Este valor se reduce a un 85% para mujeres adultas (38,25 W) y a un 75% para niños (33,75 W). Considerando la ocupación nominal del salón (30 niños y una maestra), resulta

$$\dot{Q}_l = 1050,75 \text{ W} \quad (9.5.35)$$

A partir de los resultados dados por las ecuaciones (9.5.34) y (9.5.35), se resolvió el balance dado por la ecuación (9.5.2) y se obtuvo que la humedad específica del aire provisto por el sistema de HVAC debe ser

$$w_{\text{in}} = 0,00710 \text{ kg/kg} \quad (9.5.36)$$

Dada la temperatura de bulbo seco calculada, esto equivale a una humedad relativa del 44%.

9.5.2 Otros salones

También se verificaron los cálculos para los salones al norte del edificio (7, 8, 20, 21 y 22). Estos son análogos a los del salón 2 y por brevedad se presentan únicamente los resultados finales.

RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS MANUALES PARA LOS SALONES DEL NORTE					
Salón	7	8	20	21	22
$T_{\text{in}} [^{\circ}\text{C}]$	20,90	21,09	19,41	19,73	19,74
$\text{HR}_{\text{in}} [\%]$	46	45	50	49	49

Tabla 9.5.2 – Resultados para los salones del norte. Se detallan la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa a la que debe ingresar el aire a cada salón para mantener una temperatura de 22 °C y una humedad relativa del 50% en el interior.

9.5.3 Comparación con los resultados del EnergyPlus

Para comparar los resultados manuales con los del EnergyPlus, se consideró la media de $\dot{Q}_{\text{HVAC}}$ durante las horas de ocupación para cada salón y se despejó la temperatura media de ingreso del aire. La tabla 9.5.3 compara los resultados para los salones en que se realizó el balance a mano.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CÁLCULO PARA LA TEMPERATURA DE ENTRADA						
Salón	2	7	8	20	21	22
$T_{\text{in}} [^{\circ}\text{C}]$ (EP)	19,05	20,46	20,62	18,87	17,03	17,46
$T_{\text{in}} [^{\circ}\text{C}]$ (CM)	21,40	20,90	21,09	19,41	19,73	19,74

Tabla 9.5.3 – Comparación de los resultados del EnergyPlus (EP) y de cálculo manual (CM) para la temperatura del aire a la entrada.

Se observa que los resultados de los cálculos realizados a mano arrojan temperaturas algo mayores que los resultados del EnergyPlus, en particular para los salones del segundo piso. Esto puede deberse, al menos en parte, a que la simulación en EnergyPlus considera la carga radiativa del sol. Asimismo, se observó que las pérdidas de calor por el techo del edificio son aproximadamente cuatro veces menores que las pérdidas de calor por el piso. Esto explica que los salones del segundo piso requieran un menor aporte energético que los del primer piso, como se discutió previamente.

9.6 Conclusiones

Se ha implementado un modelo térmico de la escuela en EnergyPlus. En primer lugar, se simuló el comportamiento actual con ventilación unilateral y se mostró que en general no se alcanza el rango de confort térmico en invierno si todas las ventanas exteriores se encuentran abiertas, lo que justifica la proyección de un sistema de acondicionamiento térmico invernal con ventilación forzada.

En segundo lugar, se computó la demanda térmica de cada salón para el día de diseño elegido, determinando la potencia que debe aportar el sistema de HVAC para mantener una tasa de ventilación de 9,3 L/s por persona, lo que cumple con la reglamentación de la ASHRAE y es muy cercano a la recomendación de la OMS para la pandemia. En el capítulo 7 se estimó que el riesgo de contagio de SARS-CoV-2 para este caudal es aceptable.

Por otra parte, se verificó la representatividad del día de diseño para el período de calefacción obteniendo la potencia media demandada para todos los días de operación proyectados.

Finalmente, los resultados del EnergyPlus fueron contrastados con cálculos manuales simplificados. Se obtuvieron resultados de temperatura de ingreso a los salones compatibles con los resultados de simulación, pero que sobrestiman la potencia que debe aportar el sistema de HVAC, en particular para el segundo piso. Esto puede deberse al efecto de la carga térmica solar.

Capítulo 10

Diseño del sistema de HVAC

Yo siempre he imaginado que el último día del mundo será aquel en que alguna inmensa caldera calentada a miles de millones de atmósferas haga estallar nuestro planeta.

— Julio Verne, *Cinco semanas en globo*

10.1 Introducción

El presente capítulo presenta un posible diseño para el sistema de HVAC de la escuela. El objetivo es lograr un diseño lo más sencillo posible con costos de operación razonables y que cumpla con los requisitos térmicos de la escuela y con los requisitos sanitarios de la pandemia de COVID-19. Asimismo, se busca que el diseño minimice las modificaciones estructurales sobre el edificio.

10.1.1 Requisitos de operación

El objetivo es acondicionar todos los salones de clase durante el invierno. No se proyectará el acondicionamiento de salones de uso ocasional (laboratorios, salón de música) ni de baños u oficinas. Tampoco se acondicionarán los pasillos principales.

En línea con lo presentado en capítulos anteriores, se asumirá que todos los salones tienen una ocupación de 30 personas y se buscará erogar un caudal de 280 L/s por salón. Esto surge de elegir 6 ACH para los salones sobre los pasillos principales y mantener el mismo caudal de ventilación por persona (9,3 L/s) para los salones de la cabecera norte.

Dado el contexto sanitario, el diseño presentado será sin retorno de aire. Esto es, todo el aire inyectado en los salones será tomado del exterior.

10.2 Diseño de ductos

Se presenta a continuación el diseño primario de los ductos, con el fin de estimar la pérdida de carga de la instalación y elegir un ventilador adecuado.

Se proyectarán dos instalaciones independientes. La instalación A alimentará los 12 salones que se encuentran sobre los corredores de distribución principales en ambos pisos (salones 1 al 6, 11 al 13 y 15 al 17) y la instalación B los 5 salones que se encuentran sobre la cabecera norte del edificio (7, 8 y 20 al 22). Este agrupamiento ha sido elegido a fin de simplificar el trazado de ductos y minimizar las intervenciones edilicias. Si bien los requisitos térmicos de los salones presentan algunas diferencias, estas son pequeñas, lo que permite cumplir con el rango de confort térmico para todos los salones. La mayor diferencia de demanda se observa entre los salones del

primer y del segundo piso. Los equipos de acondicionamiento del aire serán colocados en el techo de la escuela, por lo que los ductos serán trazados desde allí.

10.2.1 Instalación A

Trazado de los ductos

Se instalará un ducto que bajará del techo por el exterior del edificio, paralelo a la pared sur. Una ramificación ingresará por dicha pared al corredor del segundo piso y la otra ingresará al primer piso, también al corredor. A lo largo de cada pasillo discurrirá un ducto del cual partirán ramificaciones perpendiculares hacia cada salón. La figura 10.2.1 presenta un esquema de la instalación e identifica los caudales ($\dot{V}$) de cada tramo, así como los puntos donde se colocarán accesorios (bifurcaciones, codos y reducciones).

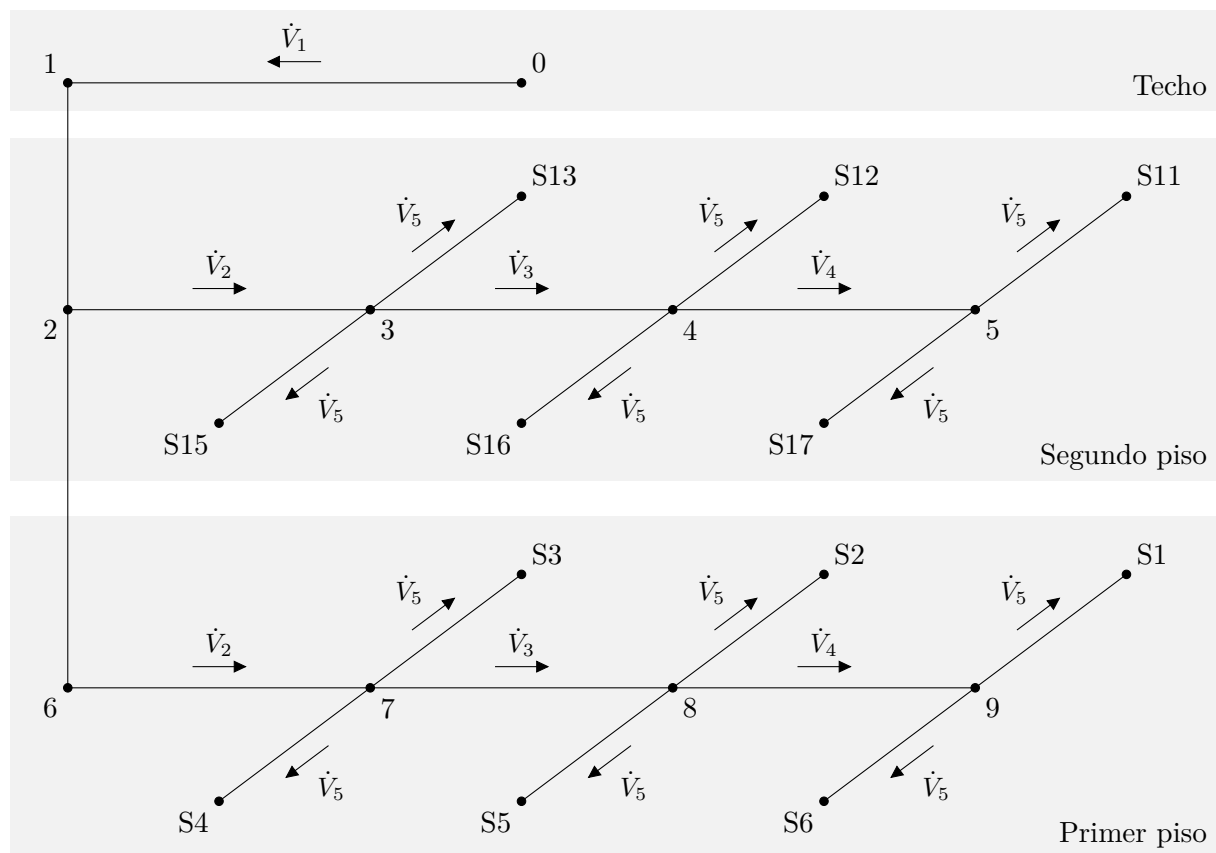


Figura 10.2.1 – Diagrama de ductos para la instalación A.

Como cada salón recibe 280 L/s, se tiene que

$$\dot{V}_1 = 3,36 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.1)$$

$$\dot{V}_2 = 1,68 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.2)$$

$$\dot{V}_3 = 1,12 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.3)$$

$$\dot{V}_4 = 0,56 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.4)$$

$$\dot{V}_5 = 0,28 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.5)$$

Dado que se proyectará una instalación sin recirculación de aire, se utilizarán rejillas de extracción que comuniquen el interior de los salones con el exterior del edificio. Las mismas serán colocadas cerca del techo para evitar que sean bloqueadas por objetos en el interior o en el exterior de los salones (mochilas, mobiliario, etc.). Además, para los salones del primer piso esto

evita que el aire extraído, potencialmente contaminado, sea expulsado a la altura de las personas en zonas transitables. Para el primer piso también se evita el ingreso de agua de lluvia. Por otra parte, colocar los difusores y las rejillas de extracción por encima del nivel de las personas evita que estas estén directamente sobre la corriente de aire, lo que contribuye a mejorar el confort.

Dimensionamiento de la sección

Las secciones serán determinadas según el método de pérdida de carga distribuida (fricción) constante (ASHRAE, 2021, pág. 21.19). Éste consiste en imponer una velocidad objetivo en cierto ducto, calcular la sección transversal para el caudal de diseño y despejar la pérdida de carga distribuida. Luego, se impone dicha pérdida de carga para los demás ductos y se despeja su área transversal. De esta manera, la pérdida de carga distribuida por unidad de longitud es constante a lo largo de todo el sistema.

De acuerdo con Carrier (2005), es recomendable que el ducto principal tenga una velocidad menor a 2000 fpm (10,16 m/s) para tener una pérdida de carga aceptable y menor a 1500 fpm (7,62 m/s) para tener un nivel de ruido aceptable. Se impuso entonces una velocidad de diseño de 7,62 m/s para el ducto entre el techo y la ramificación del segundo piso.

A partir del ábaco de pérdida de carga para ductos circulares de la ASHRAE (2021, pág. 21.8), disponible en el anexo B.5, se determinó que la pérdida de carga distribuida del sistema debe ser

$$f = 0,70 \text{ Pa/m} \quad (10.2.6)$$

Asimismo, se obtuvieron del ábaco los diámetros de cada tramo, imponiendo la pérdida de carga y el caudal correspondiente. Como se desea que los ductos sean de sección rectangular, se obtuvo una sección equivalente a partir de la tabla de equivalencia de la ASHRAE (2021, pág. 21.10), disponible en el anexo B.6, que garantiza el mismo caudal y la misma pérdida de carga distribuida que para la sección circular calculada. Las opciones dadas por dicha tabla de conversión se corresponden con medidas estandarizadas de ductos comerciales.

La tabla 10.2.1 resume los resultados obtenidos. ϕ denota el diámetro de la sección circular dada por el ábaco de pérdida de carga y a y b son el ancho y la altura, respectivamente, de la sección rectangular equivalente. Además, v denota la velocidad en el ducto rectangular.

RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS DUCTOS				
$\dot{V}$ [m ³ /s]	ϕ [mm]	a [mm]	b [mm]	v [m/s]
3,36	780	800	600	7,00
1,68	570	500	500	6,72
1,12	510	500	400	5,60
0,56	390	500	250	4,48
0,28	280	250	250	4,48

Tabla 10.2.1 – Resultados para las secciones de la instalación A. Se indican el caudal, el diámetro y las dimensiones y la velocidad de la sección rectangular equivalente para mantener una pérdida de carga distribuida constante de 0,70 Pa/m para toda la instalación.

Se observa que las velocidades obtenidas cumplen en todos los casos la recomendación de una velocidad máxima de 1600 fpm (8,13 m/s) dada por Carrier (2005) para ramales secundarios.

Estimación de la pérdida de carga

Es necesario estimar la carga hidráulica demandada por la instalación para elegir un equipo de acondicionamiento térmico adecuado, con un ventilador capaz de erogar el caudal requerido. Dada la simetría de la instalación, es evidente que la mayor pérdida de carga se dará entre

el techo y los salones 1 y 6. Estos caminos son los más largos (mayores pérdidas distribuidas) y tienen la mayor cantidad de pérdidas de carga localizadas. Se presenta a continuación una estimación de la pérdida de carga total asociada a dichos caminos.

Como primera aproximación, se omitirán las pérdidas de carga asociadas a los registros intermedios. Estos serán necesarios para lograr que todos los salones reciban el mismo caudal, pero para el camino de mayor pérdida de carga se encontrarán totalmente abiertos, por lo que su pérdida de carga localizada será pequeña. También se omitirán las contracciones, los difusores de cada salón y las rejillas de extracción de aire.

Para estimar las pérdidas de carga localizadas se consideraron los coeficientes dados por ASHRAE (2001) para codos de 90° y Ts de sección rectangular. Para las separaciones en cruz (las de los nodos 2, 4, 7 y 8 de la figura 10.2.1), se aproximó la pérdida de carga por la del ramal correspondiente de una T análoga, según sugiere Idelchik (2007). Las tablas de cálculo utilizadas se encuentran disponibles en el anexo B.7. La tabla 10.2.2 resume los coeficientes de pérdida de carga estimados para los diferentes accesorios considerados para el camino entre el techo y los salones 1 y 6 y las pérdidas de carga asociadas. Estas últimas son calculadas como

$$\zeta = k \frac{v^2}{2g} \quad (10.2.7)$$

donde ζ es la pérdida de carga, k es el coeficiente de pérdida de carga estimado, v es la velocidad de referencia¹ y g es la aceleración gravitatoria.

PÉRDIDAS DE CARGA LOCALIZADAS PARA LOS ACCESORIOS DE LA INSTALACIÓN A				
Nodo	Accesorio	k	v [m/s]	ζ [m]
1	Codo de 90°	0,19	7,00	0,475
2	T	0,40	3,50	0,250
6	Codo de 90°	0,21	6,72	0,484
7	Cruz	0,17	4,48	0,174
8	Cruz	0,40	2,80	0,160
9	T	0,30	4,48	0,307

Tabla 10.2.2 – Estimación de las pérdidas de carga localizadas asociadas a los accesorios de la instalación A. La numeración de los accesorios (nodos) se corresponde con la de la figura 10.2.1. Las pérdidas de carga se encuentran expresadas en metros de columna de aire.

Por otra parte, para calcular las pérdidas de carga distribuidas, fue necesario estimar la longitud (L) de los diferentes tramos de ductos. La tabla 10.2.3 resume los valores estimados.

LONGITUDES ESTIMADAS PARA LA INSTALACIÓN A							
Tramo	0 - 1	1 - 2	2 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - S
L [m]	5,70	1,52	2,30	9,20	7,75	7,45	1,32

Tabla 10.2.3 – Longitudes estimadas para los diversos tramos de la instalación A.

Por último, se calculó la pérdida de carga total de la instalación A, H_{inst_A} como

$$H_{\text{inst}_A} = \sum_i \frac{fL_i}{\rho g} + \sum_j \zeta_j \quad (10.2.8)$$

¹Los coeficientes utilizados se encuentran referidos a la sección de salida de interés del accesorio, sin considerar reducciones que pudieran encontrarse a continuación.

donde los índices i y j recorren los tramos de ducto y los accesorios, respectivamente. Se obtuvo que

$$H_{\text{inst}_A} = 4,0 \text{ m} \quad (10.2.9)$$

10.2.2 Instalación B

Trazado de los ductos

Se perforará la azotea y se instalará un ducto que entre a la habitación entre los salones 20 y 21, que actualmente se utiliza como depósito. Allí se instalará una cruz con dos ramales horizontales; uno alimentará el salón 20 y el otro los salones 21 y 22. Por otra parte, un tercer ramal atravesará el piso del depósito y bajará hasta el primer piso, entrando por el techo del salón 8, donde se bifurcará para alimentar los salones 7 y 8. La figura 10.2.2 presenta un esquema de la instalación y nombra los caudales de cada tramo, así como los puntos donde se colocarán accesorios (bifurcaciones, codos y reducciones).

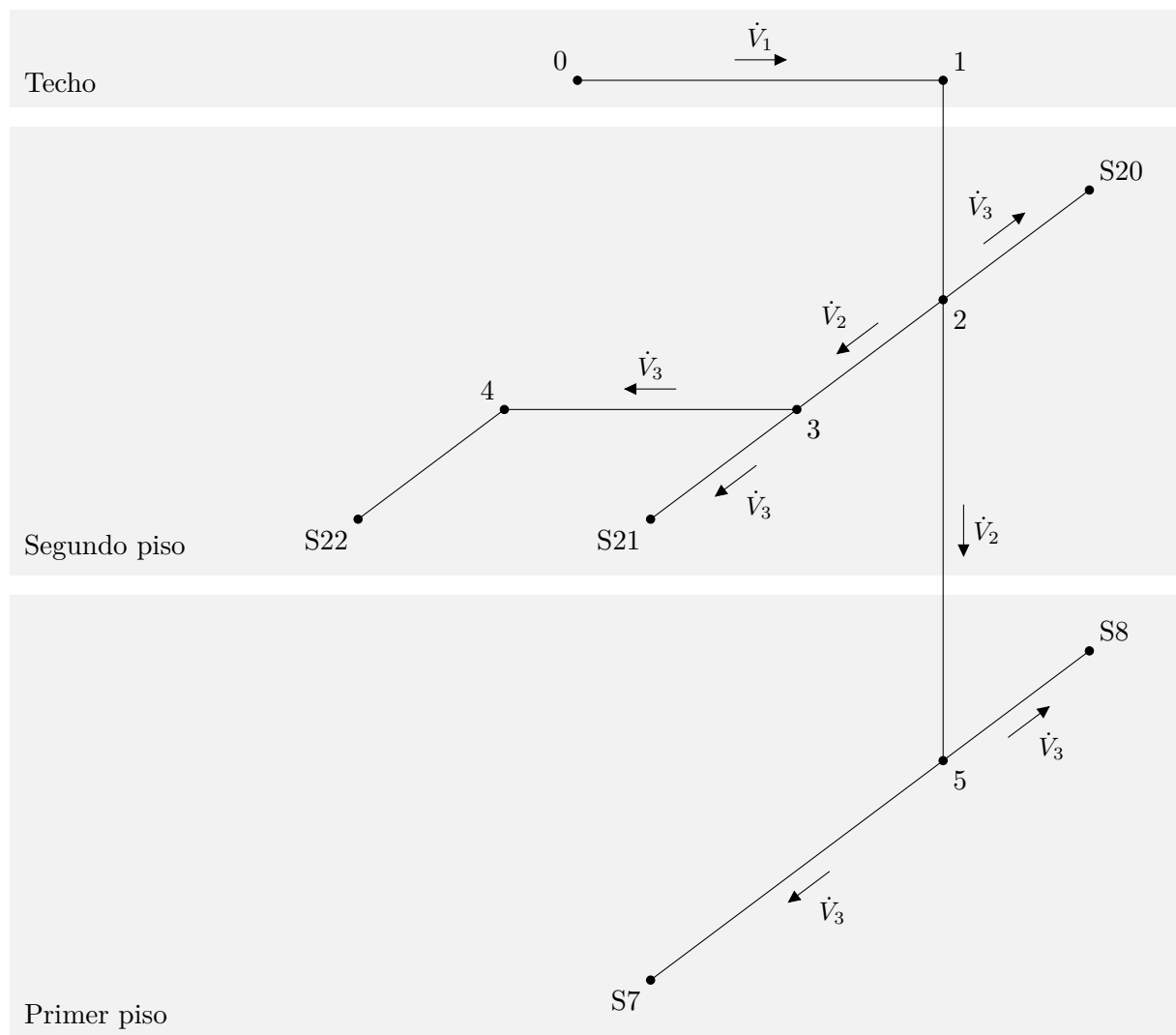


Figura 10.2.2 – Diagrama de los ductos para la instalación B.

Dado que cada salón recibe 280 L/s, se tiene que

$$\dot{V}_1 = 1,40 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.10)$$

$$\dot{V}_2 = 0,56 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.11)$$

$$\dot{V}_3 = 0,28 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.2.12)$$

Para la instalación B se utilizará la misma estrategia de extracción de aire que para la instalación A. Esto es, se colocarán rejillas de extracción contra el techo, que comuniquen con el exterior del edificio.

Dimensionamiento de las secciones

Las dimensiones de las secciones transversales de los ductos fueron estimadas de la misma forma que para la instalación A, con el método de pérdida de carga distribuida constante. En este caso, se impuso que la pérdida de carga distribuida fuera la misma que para la instalación A (0,7 Pa/m). Utilizando el ábaco para secciones circulares y la tabla de conversión a sección rectangular de la ASHRAE (2021) (anexos B.5 y B.6, respectivamente), se obtuvieron los resultados resumidos en la tabla 10.2.4.

RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS DUCTOS				
$\dot{V}$ [m ³ /s]	ϕ [mm]	a [mm]	b [mm]	v [m/s]
1,40	540	800	400	7,00
0,56	390	500	250	4,48
0,28	280	250	250	4,48

Tabla 10.2.4 – Resultados para las secciones de la instalación A. Se indican el caudal, el diámetro y las dimensiones y la velocidad de la sección rectangular equivalente para mantener una pérdida de carga distribuida constante de 0,70 Pa/m para toda la instalación.

Se observa que todos los ductos cumplen con las recomendaciones de velocidad dadas por Carrier (2005).

Estimación de la pérdida de carga

Se estimó la pérdida de carga de la instalación B de forma análoga que para la instalación A. En este caso, se identificó que el camino de máxima pérdida de carga es entre el techo (nodo 0 de la figura 10.2.2) y el salón 22.

Utilizando los ábacos del anexo B.5 (ASHRAE, 2001) se obtuvieron los resultados resumidos por la tabla 10.2.5.

PÉRDIDAS DE CARGA LOCALIZADAS PARA LOS ACCESORIOS DE LA INSTALACIÓN B				
Nodo	Accesorio	k	v [m/s]	ζ [m]
1	Codo de 90°	0,20	7,00	0,500
2	Cruz	0,64	4,48	0,655
3	T	0,52	4,48	0,532
4	Codo de 90°	0,15	4,48	0,154

Tabla 10.2.5 – Estimación de las pérdidas de carga localizadas asociadas a los accesorios de la instalación B. La numeración de los accesorios (nodos) se corresponde con la de la figura 10.2.2. Las pérdidas de carga se encuentran expresadas en metros de columna de aire.

Por otra parte, se estimaron las siguientes longitudes para el cálculo de las pérdidas de carga distribuidas.

LONGITUDES ESTIMADAS PARA LA INSTALACIÓN B					
Tramo	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - S22
<i>L</i> [m]	3,60	2,13	3,00	4,22	0,52

Tabla 10.2.6 – Longitudes estimadas para los diversos tramos de la instalación B.

Finalmente, se obtuvo que la carga demandada por la instalación B es

$$H_{\text{instB}} = 2,6 \text{ m} \quad (10.2.13)$$

10.3 Modelo CAD

Las instalaciones A y B fueron incorporadas al modelo desarrollado en Revit. Se trazaron los ductos y se incluyeron todos los accesorios necesarios, incluidos registros para garantizar que todos los salones reciban el caudal adecuado y difusores en la alimentación de cada salón. Una de las ventajas de implementar el diseño en Revit es que el programa utiliza partes comerciales reales.

Los registros de inyección y de extracción de aire fueron elegidos directamente en Revit a partir de su caudal nominal. Los primeros son rejillas del mismo tamaño que la sección de los ductos de inyección y los segundos son rejillas de 12'' × 12''. Para la extracción fue necesario instalar dos registros por salón.

A partir del modelo generado se exportaron planos de la instalación proyectada, que se encuentran disponibles en el apéndice A.9. Los mismos detallan el trazado de los ductos y todos los accesorios y su posición. Asimismo, la figura 10.3.1 muestra renders del modelo de la instalación exterior.



(a) Vista desde el sureste



(b) Vista desde el suroeste

Figura 10.3.1 – Renderizaciones del exterior del modelo de la escuela, realizadas con Autodesk Revit. Se muestran vistas desde los ángulos sureste y suroeste, pudiendo apreciarse los registros de extracción de aire de las fachadas principales y el ducto de distribución de aire de la instalación A sobre la fachada sur.

Por otra parte, Revit permite calcular la pérdida de carga total de la instalación. Se eligió que el programa utilizara los datos de referencia de la ASHRAE, y se obtuvieron los siguientes resultados.

$$H_{\text{inst}_A} = 5,61 \text{ m} \quad (10.3.1)$$

$$H_{\text{inst}_B} = 2,73 \text{ m} \quad (10.3.2)$$

Los resultados obtenidos son compatibles con las aproximaciones presentadas en la sección 10.2. Es razonable que las pérdidas de carga calculadas por Revit sean mayores que las calculadas a mano, puesto que consideran los registros intermedios y los difusores. Por lo tanto, se utilizarán los valores estimados con Revit para la selección de los equipos de la instalación.

10.4 Selección de un equipo comercial

Se buscaron equipos comerciales en plaza que pudieran cumplir con los requisitos térmicos e hidráulicos de la instalación propuesta. A continuación se presenta una posible solución.

10.4.1 Parámetros de selección

La selección de los equipos de acondicionamiento térmico depende de aspectos hidráulicos y térmicos. Los primeros implican que el ventilador instalado entregue la carga demandada por la instalación a la vez que eroga el caudal de diseño. Los segundos, consisten en que los equipos entreguen la potencia térmica requerida por el edificio.

La potencia térmica demandada por las instalaciones fue calculada en base a los resultados del modelado térmico presentado en el capítulo 9. Para cada instalación se sumaron los máximos de potencia (referida al aire exterior) demandados por cada ambiente para el día de diseño. Tomar el máximo de potencia de cada ambiente podría sobredimensionar ligeramente el sistema, dado que los diferentes ambientes podrían no alcanzar sus máximos de forma simultánea. Sin embargo, dado que las características geométricas y de uso de los ambientes de las respectivas instalaciones son muy similares, los máximos de potencia son, en general, simultáneos. Además, sobredimensionar ligeramente el sistema es razonable, puesto que la ocupación de los salones de clase podría ser un poco menor que el valor nominal de 30 personas elegido. En este caso, se requeriría que el sistema de HVAC aportara parte de la potencia que en la simulación conducida fue aportada por las personas.

Es importante señalar que el diseño presentado implica la selección de un punto de operación nominal, pero esto no quita que la instalación real pudiera tener cierta flexibilidad de operación. Por ejemplo, si la temperatura impuesta por el sistema de HVAC fuera demasiado elevada, un sistema de control podría manejar un variador de frecuencia para aumentar el caudal erogado por la instalación, lo que disminuiría la temperatura. Sin embargo, proyectar estos aspectos escapa a los objetivos del presente proyecto.

Instalación A

La instalación A alimenta 12 salones, por lo que debe manejar un caudal total de $3,36 \text{ m}^3/\text{s}$. Asimismo, la potencia térmica demandada para calentar dicho caudal se estimó en $25,0 \text{ kW}$. En suma, se tiene que

$$\dot{V}_A = 3,36 \text{ m}^3/\text{s} = 7119 \text{ cfm} \quad (10.4.1)$$

$$\dot{Q}_A = 25,0 \text{ kW} = 85,3 \text{ MBH} \quad (10.4.2)$$

$$H_{\text{inst}_A} = 5,61 \text{ m} = 0,247 \text{ iwg} \quad (10.4.3)$$

donde $\dot{Q}_A$ es la potencia térmica total demandada por la instalación A. Los resultados han sido transformados a pies cúbicos por minutos (cfm), miles de BTU por hora (MBH) y pulgadas de columna de agua (iwg) para el uso de catálogos comerciales.

Instalación B

De forma análoga a la instalación A, para la instalación B se tiene que

$$\dot{V}_B = 1,40 \text{ m}^3/\text{s} = 2966 \text{ cfm} \quad (10.4.4)$$

$$\dot{Q}_B = 11,2 \text{ kW} = 38,2 \text{ MBH} \quad (10.4.5)$$

$$H_{\text{inst}_B} = 2,73 \text{ m} = 0,129 \text{ iwg} \quad (10.4.6)$$

10.4.2 Tipos de equipos

Los equipos de acondicionamiento térmico pueden llegar a ser muy complejos. Es posible cubrir puntos de operación muy variados, pero esto suele implicar armar un sistema adquiriendo componentes (ventilador, manejadora de aire, etc.) por separado, lo que puede aumentar costos y dificultar el mantenimiento y la operación de la instalación.

Una opción atractiva es utilizar equipos “empaquetados”, que incluyen todos los componentes en un dispositivo modular. Esto simplifica la instalación y la operación y puede ser particularmente apropiado para una escuela. En particular, existen equipos modulares (*rooftops*) que pueden ser instalados en el techo, a la intemperie, lo que minimiza las intervenciones edilicias. Como contrapartida, estos equipos permiten puntos de operación más restringidos, dependientes de las opciones de personalización de los diferentes fabricantes.

Para el presente trabajo se buscó un equipo comercial tipo *rooftop* que opere con energía eléctrica, utilizando una bomba de calor. También existen equipos de este estilo que operan con gas natural², pero se decidió utilizar energía eléctrica para simplificar la instalación lo más posible y minimizar los costos de operación, que serán discutidos más adelante.

10.4.3 Selección

Resultó difícil encontrar un equipo que cumpliera los requisitos de selección. En general, se observó que los equipos que cumplían con el requisito de potencia erogaban un caudal mucho menor que lo requerido. Como solución, se propone elegir una máquina que cumpla con el requisito de potencia térmica e inyectar el caudal faltante con un ventilador auxiliar a la salida de dicha máquina. Este ventilador debe operar en paralelo con la máquina de acondicionamiento térmico, entregando la misma carga hidráulica. Una ventaja adicional de esta propuesta es que permite controlar fácilmente la temperatura del aire ingresado a los salones cambiando el caudal complementario inyectado. Esto puede hacerse de manera relativamente sencilla en base a un variador de frecuencia. Como se mencionó, el mismo podría ser integrado en un lazo de control.

Instalación A

Para la instalación A, se propone adquirir el modelo J07XP de *rooftop* de Johnson Controls (Johnson Controls, s.f.). Para una temperatura exterior de 8,3 °C, este equipo entrega una potencia térmica de 88 MBH (26,2 kW). Utiliza una bomba de calor con un coeficiente de performance (COP) de 3,40, lo que significa un consumo eléctrico de 7,7 kW.

Se considerará que la máquina mueve 3600 cfm y que el resto del caudal es inyectado por el ventilador complementario³. También se considerará que la máquina se encuentra equipada con un filtro MERV 13 de 4” (lo recomendado por la ASHRAE (s.f.-b) para la pandemia de COVID-19). En estas condiciones, el fabricante indica considerar una pérdida de carga adicional de 0,26 iwg, totalizando 0,507 iwg de carga hidráulica que debe aportar el ventilador.

²De acuerdo a MontevideoGas (s.f.-b), existe distribución de gas natural para la ubicación de la escuela.

³Esto es una decisión relativamente arbitraria. Se ha decidido que la máquina de acondicionamiento y el ventilador auxiliar muevan el mismo caudal por simetría. A los efectos del presente trabajo, se ha elegido un caudal como ejemplo, a fin de seleccionar un ventilador concreto en el catálogo del *rooftop*.

Interpolando en la tabla de selección del ventilador para salida lateral de aire, se obtuvo que el ventilador debe operar a 782 rpm, demandado una potencia de freno de 1,41 BHP (1,32 kW). A partir de la tabla de selección de motor del fabricante, se verificó la disponibilidad de un motor adecuado (motor 1VL40 con ventilador AK69).

Las partes de la guía técnica del equipo relevantes para su selección se encuentran disponibles en el anexo B.8.

Instalación B

Para la instalación B se propone adquirir el modelo APH16 48H41A* de *rooftop* de Amana (Amana, s.f.). Este equipo también opera con una bomba de calor. Para una temperatura exterior de 8,3 °C, este equipo entrega una potencia de 44 MBH (12,9 kW) con un COP de 3,8, lo que significa un consumo eléctrico de 3,4 kW.

Para la configuración por defecto del ventilador, esta máquina erogará un caudal de 1491 cfm, aproximadamente la mitad de la demanda total de la instalación B. Dicho caudal es declarado por el fabricante para una carga hidráulica de entre 0,1 iwg y 0,9 iwg. Es esperable que la instalación de filtros disminuya un poco dicho valor, pero el fabricante no especifica nada al respecto. De todas formas, la operación puede ser ajustada con el ventilador auxiliar.

Las partes de la guía técnica del equipo relevantes para su selección se encuentran disponibles en el anexo B.9.

10.4.4 Instalación y suministro eléctrico

El equipo de la instalación A es trifásico y opera en baja tensión (tensión compuesta de 400 V), mientras que el equipo de la instalación B es monofásico (opera a 230 V). Por lo tanto, el proyecto propuesto implicaría modificaciones en la instalación eléctrica actual, que tiene un suministro monofásico.

La proyección de una nueva instalación eléctrica y la estimación de los costos asociados no serán abordadas en el presente proyecto.

10.5 Costos de operación

Estimar los costos de inversión y analizar el costo del ciclo de vida para la instalación de HVAC propuesta escapa a los objetivos del presente proyecto. Sin embargo, se estimarán los costos⁴ anuales de operación. Esto permite justificar la elección de un equipo eléctrico y no uno que opere con gas natural.

10.5.1 Costo de operación del sistema proyectado

Se considerará que el sistema de HVAC opera todos los días entre las 7:30 y las 17:30, 5 días a la semana, entre mayo y octubre. Considerando 20 días de operación mensual, esto representa un tiempo anual de operación de

$$t = 1200 \text{ h} \quad (10.5.1)$$

Por otra parte, el pliego tarifario de UTE para el 2022 (UTE, 2022a) establece que el precio del kWh para el horario considerado⁵ en la tarifa residencial doble horario es

$$p_{UTE} = 4,147 \text{ \$/kWh} \quad (10.5.2)$$

⁴Se consideran los costos de operación para precios actuales. Un análisis más detallado debería evaluar posibles ajustes de precios, pero esto no invalida la posibilidad de comparar costos anuales en la medida en que la inflación de la energía eléctrica y del gas natural sea aproximadamente la misma.

⁵El horario de operación se ubica fuera del horario punta en su totalidad.

Además, las bombas de calor elegidas consumen la siguiente potencia eléctrica total⁶

$$P_E = 11,1 \text{ kW} \quad (10.5.3)$$

Por lo tanto, el costo variable anual de operación del sistema se puede calcular como

$$CV = p_{UTE} P_E t \quad (10.5.4)$$

de donde resulta que

$$CV = \$55.238 \quad (10.5.5)$$

A los costos variables se le deben agregar costos fijos mensuales (\$431,5) y por potencia contratada (74 \$/kW). Considerando una potencia contratada de 15 kW (valor normalizado para instalaciones trifásicas (UTE, 2022b)), resultan los siguientes cargos fijos anuales

$$CF = \$18.498 \quad (10.5.6)$$

Sumando los costos fijos y los variables, resulta que operar el sistema de HVAC implicará el siguiente costo anual total

$$C = \$73.736 \quad (10.5.7)$$

10.5.2 Comparación con el costo de operación con gas natural

Si se quisiera operar con gas natural, se debería aportar toda la potencia térmica quemando dicho combustible. Se requeriría la siguiente potencia térmica

$$\dot{Q}_{GN} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_B = 25,0 \text{ kW} + 11,2 \text{ kW} = 36,2 \text{ kW} \quad (10.5.8)$$

donde $\dot{Q}_A$ y $\dot{Q}_B$ son las potencias térmicas demandadas por las instalaciones A y B, respectivamente.

Por otra parte, MontevideoGas (s.f.-a) indica el siguiente poder calorífico de referencia para el gas natural.

$$Q_p = 9300 \text{ kcal/m}^3 = 38911 \text{ kJ/m}^3 \quad (10.5.9)$$

Por lo tanto, el consumo anual de gas natural sería

$$V_{GN} = \frac{\dot{Q}_{GN} t}{Q_p} = 4019 \text{ m}^3 \quad (10.5.10)$$

El costo del gas natural para calderas residenciales a febrero de 2022 es (MontevideoGas, s.f.-c)

$$p_{GN} = 49 \text{ $/m}^3 \quad (10.5.11)$$

Por lo tanto, los cargos variables anuales serían

$$CV_{GN} = \$196.931 \quad (10.5.12)$$

Por otra parte, el cargo fijo mensual de Montevideo Gas es de \$669,04, con lo que los cargos fijos anuales serían

$$CF_{GN} = \$8.028 \quad (10.5.13)$$

Sumando los costos fijos y los variables, resulta que operar un sistema de HVAC equivalente con gas natural implicaría el siguiente costo anual

$$C_{GN} = \$204.959 \quad (10.5.14)$$

El resultado obtenido es 2,8 veces mayor que el costo de operar con energía eléctrica. Por lo tanto, la elección de un sistema eléctrico y no uno a gas natural queda justificado desde la perspectiva de los costos de operación.

⁶Se considera únicamente la potencia eléctrica asociada a la bomba de calor (no se tiene en cuenta el consumo del ventilador del equipo ni del ventilador adicional).

10.5.3 Comparación con el actual sistema de *splits*

Actualmente la escuela cuenta en cada salón de clase con un equipo de aire acondicionado residencial, de 12 MBH (3,5 kW), sin tecnología inverter. Estimando el COP de estos equipos en 3,5, resulta que cada equipo consume 0,98 kW, de donde resulta que encender los equipos en los 17 salones de clase de forma simultánea consume la siguiente potencia eléctrica

$$P_{\text{split}} = 16,62 \text{ kW} \quad (10.5.15)$$

Se tiene entonces que la potencia requerida para usar los equipos de aire acondicionado actuales es mayor que la que demandarían los equipos de HVAC propuestos. Se considera por lo tanto que la propuesta presentada implica costos de operación razonables.

10.6 Operación en verano

Los equipos seleccionados y la infraestructura proyectada permiten operar en modo de refrigeración. Sin embargo, esto no parece necesario, dado que los resultados de la simulación en EnergyPlus para ventilación natural mostraron que fuera del período entre mayo y octubre el confort térmico es alcanzable con regímenes de ventilación natural. Por lo tanto, no se evaluará la capacidad de refrigeración del sistema proyectado.

10.7 Comentarios finales

La propuesta presentada para el sistema de HVAC no es un diseño completo. Hace falta proyectar en detalle la instalación eléctrica y los elementos de control y realizar un estudio de costos detallado. Sin embargo, muestra que con modificaciones edilicias menores y costos de operación razonables es posible mejorar sustancialmente el confort térmico y la calidad de aire interior en la escuela estudiada.

Asimismo, el trabajo presentado intenta avanzar en el sentido de la propuesta de Morawska y Milton (2020) de un cambio de paradigma que involucre aspectos sanitarios en el diseño de los sistemas de HVAC.

Un tema que podría ser interesante evaluar a futuro es el uso de energía solar para operar el sistema de calefacción. La azotea de la escuela estudiada dispone de una superficie considerable, donde se podrían instalar colectores solares para operar intercambiadores de calor.

Capítulo 11

Conclusiones

All human knowledge begins with intuitions, proceeds from thence to concepts, and ends with ideas.

— Immanuel Kant

To every complex question there is a simple answer... and it is wrong.

— H. L. Mencken

El presente trabajo ha caracterizado la calidad de aire, la ventilación y el riesgo de contagio de SARS-CoV-2 en el edificio de las escuelas N° 32 y N° 83 de Montevideo. Asimismo, se ha diseñado un posible sistema de acondicionamiento térmico para compatibilizar aspectos sanitarios con objetivos de confort térmico.

La campaña de medidas conducida caracterizó la calidad de aire dentro y fuera de la escuela en términos del material particulado en suspensión. Se concluyó que los niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ son aceptables a la luz de diversa normativa.

Asimismo, las medidas de concentración de CO₂ permitieron estimar la tasa de ventilación y proyectar el riesgo de contagio. Se concluyó que la ventilación natural permite alcanzar muy altas tasas de renovación de aire, pero en la operación cotidiana del salón esto ocurre con poca frecuencia. Esto probablemente se deba a la incompatibilidad de dichas tasas de ventilación con el confort térmico de los ocupantes.

En cuanto al riesgo de contagio de SARS-CoV-2 por vía de aerosoles, se observó que para tasas de emisión de quanta medias y altas existe un riesgo elevado de que ocurran contagios en el salón ante la presencia de un infectado, particularmente durante los meses de invierno. Además, el riesgo podría ser aún más elevado para nuevas variantes más contagiosas.

Por otra parte, se evaluó la ventilación natural periódica como posible medida de mitigación del riesgo de contagio y se concluyó que tiene un impacto muy significativo. Por ejemplo, abrir las ventanas durante 5 minutos cada media hora podría abatir el riesgo de contagio entre un 50% y un 75%, aproximadamente.

A futuro, podría ser interesante extender el alcance de las actividades experimentales. En particular, sería deseable medir en más salones durante todo el año escolar y relevar de forma continua otras variables como temperatura y humedad. Esto parece viable mediante el uso de sensores de bajo costo, que mostraron un desempeño satisfactorio. Su uso podría permitir caracterizar detalladamente la ventilación en el entorno escolar uruguayo.

En cuanto al modelado térmico del edificio de la escuela, se implementaron dos casos de simulación en EnergyPlus. El primero verificó la imposibilidad de alcanzar temperaturas dentro del rango de confort térmico de la ASHRAE (2017) con las ventanas abiertas en una configuración

unilateral durante el invierno. Esto puso de manifiesto la pertinencia de un sistema de HVAC que contemplara tanto aspectos térmicos como sanitarios. Por otra parte, el segundo caso simulado permitió estimar la demanda de potencia que dicho sistema debería satisfacer.

Por último, se propuso un diseño sencillo para un sistema de HVAC concreto, buscando minimizar las intervenciones edilicias. Se proyectó el diseño hidráulico de los ductos de distribución de aire y se eligieron equipos comerciales empaquetados para ser instalados en la azotea de la escuela. Asimismo, se evaluaron los costos de operación y se concluyó que la alternativa eléctrica presenta costos de operación mucho menores que el uso de gas natural. Además, se observó que el costo de operar dicho sistema sería levemente menor que el de operar los equipos tipo *split* actualmente instalados (lo cual no fue permitido por ANEP (2020, 2021) en el contexto de la pandemia).

El diseño presentado para el sistema de HVAC muestra que la calidad de aire interior y el acondicionamiento térmico son objetivos que pueden ser compatibilizados de forma razonable, en línea con lo argumentado por Morawska y Milton (2020). Sin embargo, se observó que los equipos comerciales actuales (al menos los modelos empaquetados) con una potencia adecuada para el sistema estudiado permiten erogar caudales mucho menores que los recomendados para la pandemia de COVID-19.

En suma, se ha cumplido con los objetivos del presente proyecto. Además, se destaca que el trabajo ha permitido sistematizar una metodología de estudio que podría ser aplicada a otras enfermedades de transmisión aérea. Por lo tanto, la utilidad de los resultados obtenidos trasciende la coyuntura actual.

A futuro sería interesante profundizar en varios de los desarrollos presentados, tanto de ejecución de campañas de medidas y de procesamiento de datos experimentales como de simulación edilicia y de calidad de aire interior.

Referencias

*If I have seen further it is by standing on the
shoulders of Giants.*

— Isaac Newton, carta a Robert Hooke, 1675

*Plagiarize! Plagiarize! Remember why God gave
you eyes!*

— Tom Lehrer, *Lobachevsky*

- Abbey, H. (1952). An examination of the Reed-Frost theory of epidemics. *Human Biology*, 24, 201-233. <https://www.jstor.org/stable/41449060>
- Aeroqual. (s.f.-a). *PM10 / PM2.5 Portable Particulate Monitor*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://aeroqual.de/product/pm10-pm2-5-portable-particulate-monitor-2/>
- Aeroqual. (s.f.-b). *Portable & Fixed Monitor Sensor Specifications*. Consultado el 27 de noviembre de 2021, desde <https://www.aeroqual.com/wp-content/uploads/Aeroqual-Portable-Fixed-Sensor-Specifications.pdf>
- Aeroqual. (s.f.-c). *Series 500 – Portable Air Quality Monitor*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://www.aeroqual.com/product/series-500-portable-air-pollution-monitor>
- Amana. (s.f.). *APH16H*. Consultado el 8 de febrero de 2022, desde <https://www.amana-hac.com/pdfviewer.aspx?pdfurl=docs/default-source/default-document-library/ss-aph16h.pdf?view=true>
- ANEP. (2020). *Protocolo de aplicación para el reintegro de estudiantes a centros educativos de la Administración Nacional de Educación Pública y a centros educativos habilitados o autorizados, en el marco de la pandemia COVID-19* (Standard). <https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/comunicacion/noticias/protocolo-anep-para-reintegro-presencial-voluntario-clases>
- ANEP. (2021). *Protocolo de aplicación para actividades presenciales de estudiantes en centros educativos públicos y centros habilitados o autorizados en el marco de la pademia Covid 19 durante el año lectivo 2021* (Standard). <https://www.anep.edu.uy/sites/default/files/images/Archivos/publicaciones-direcciones/secretaria-administrativa/circulares/2021/Circular%5C%20N%5C%C2%5C%B0%5C%2010-21.pdf>
- Arduino. (s.f.). *Arduino Uno Rev3*. Consultado el 22 de diciembre de 2021, desde <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/?selectedStore=us>
- ASHRAE. (2001). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*.
- ASHRAE. (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (Standard N° 55 - 2017). American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating y Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2018). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* (Standard N° 62.1 - 2019). American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating y Air-Conditioning Engineers.

- ASHRAE. (2021). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*.
- ASHRAE. (s.f.-a). *ASHRAE Technical FAQ*. Consultado el 25 de enero de 2022, desde <https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Technical%20FAQs/TC-02.01-FAQ-92.pdf>
- ASHRAE. (s.f.-b). *Filtration / disinfection*. Consultado el 9 de febrero de 2022, desde <https://www.ashrae.org/technical-resources/filtration-disinfection>
- ASHRAE. (s.f.-c). *Reopening Schools and Universities*. Consultado el 10 de enero de 2022, desde <https://www.ashrae.org/technical-resources/reopening-of-schools-and-universities>
- ASHRAE Epidemic Task Force. (2021). *Schools & universities*. www.ashrae.org/covid19
- ASTM D6245 - 18. (2018). *Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation* (Standard ASTM D6245 - 18). American Society for Testing y Materials.
- ASTM E741 - 11. (2011). *Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution* (Standard ASTM E741 - 11). American Society for Testing y Materials. <https://doi.org/10.1520/E0741-11>
- Batterman, S. (2017). Review and extension of CO₂-based methods to determine ventilation rates with application to school classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14. <https://doi.org/10.3390/ijerph14020145>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7^a ed.). Jhon Wiley & Sons.
- Big Ladder Software. (s.f.). *Elements*. Consultado el 23 de enero de 2022, desde <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>
- Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2020). Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>
- Buonanno, G., Stabile, L., & Morawska, L. (2020). Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>
- Burridge, H. C., Fan, S., Jones, R. L., Noakes, C. J., & Linden, P. F. (2021). Predictive and retrospective modelling of airborne infection risk using monitored carbon dioxide. *Indoor and Built Environment*, 1420326X2110435. <https://doi.org/10.1177/1420326x211043564>
- Cammarata, A., & Cammarata, G. (2021). Dynamic assessment of the risk of airborne viral infection. *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12862>
- Carrier. (2005). *Duct Design - Level 1: Fundamentals*.
- Circuitarte. (s.f.). *LM2596 Modulo Conversor Regulador Dc 1.25 V- 30 V*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://www.circuitarte.com/producto/lm2596/>
- Curto-Risso, P., Favre Samarra, F., Gervaz Canessa, Z., Galione Klot, P., Romero Barea, J., Picción Sánchez, A., López Salgado, M., Pereira Ruchansky, L., Camacho Roberts, M., & Rodríguez Muñoz, J. (2021). *Eficiencia energética en el sector residencial: situación actual y evaluación de estrategias de mejoramiento para distintas condiciones climáticas en el Uruguay. Primer reporte técnico*. (inf. téc.). UDELAR-FING, UDELAR-FADU y UDELAR-LES. Montevideo. Consultado el 23 de enero de 2022, desde <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29567>
- Davis Instruments. (s.f.-a). *Vantage Pro2*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2>
- Davis Instruments. (s.f.-b). *Wireless Vantage Pro2 & Vantage Pro2 Plus Stations*. Consultado el 27 de noviembre de 2021, desde https://cdn.shopify.com/s/files/1/0515/5992/3873/files/6152_62_53_63_ss.pdf?v=1623783718
- de Montevideo, I. M. (s.f.). *Sistema de Información Geográfica*. Consultado el 15 de septiembre de 2021, desde <https://sig.montevideo.gub.uy/>

- DNM. (2009). *El Invierno: Aspectos generales del clima durante el invierno en el Uruguay*. Consultado el 20 de enero de 2022, desde <https://uruguayeduca.anep.edu.uy/sites/default/files/2017-05/Invierno2009.pdf>
- Dostmann Electronic. (s.f.). *Air CO₂ntrol 5000*. Consultado el 7 de diciembre de 2021, desde <https://com-tradebyte-core-tbone-media-live.s3.eu-central-1.amazonaws.com/media/1768/22806-600f25caaf235.pdf>
- Duarte, R., Gomes, M. G., & Rodrigues, A. M. (2018). Estimating ventilation rates in a window-aired room using Kalman filtering and considering uncertain measurements of occupancy and CO₂ concentration. *Building and Environment*, 143, 691-700. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.016>
- Durán, A., Califra, A., & Molfino, J. H. (s.f.). *Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy (1999)*. Consultado el 21 de enero de 2022, desde <http://web.renare.gub.uy/media/suelos/informes/SuelosUruguaySoilTaxonomyInforme.PDF>
- Education & Skills Funding Agency. (2018). *Building Bulletin 101 - Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools* (Standard Building Bulletin 101). AE-ducation & Skills Funding Agency.
- El Observador. (2021a, 27 de agosto). *¿Es la variante delta el fin del sueño de la inmunidad colectiva mediante las vacunas?* Consultado el 4 de enero de 2022, desde <https://www.elobservador.com.uy/nota/es-la-variante-delta-el-fin-del-sueno-de-la-inmunidad-colectiva-mediante-las-vacunas--2021827181021>
- El Observador. (2021b, 29 de diciembre). *Abrió este miércoles la agenda para vacunar contra el covid-19 a niños de 5 a 11 años*. Consultado el 4 de enero de 2022, desde <https://www.elobservador.com.uy/nota/abrio-este-miercoles-la-agenda-para-vacunar-contr-el-covid-19-a-ninos-de-5-a-11-anos-2021122916125>
- El Observador. (2021c, 21 de diciembre). *Covid: ¿qué tan efectivas son las vacunas contra la variante ómicron?* Consultado el 4 de enero de 2022, desde <https://www.elobservador.com.uy/nota/covid-que-tan-efectivas-son-las-vacunas-contr-la-variante-omicron--20211221132049>
- Eneka. (s.f.). *Arduino Uno R3 dip con cable USB*. Consultado el 22 de diciembre de 2021, desde <https://www.eneka.com.uy/robotica/tarjetas-de-desarrollo/tarjetas-arduino/arduino-uno-r3-smd-7276-7386-detail.html>
- EnergyPlus. (2021, 23 de septiembre). *Getting Started* (9.6.0). Consultado el 19 de enero de 2022, desde https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/GettingStarted.pdf
- EnergyPlus. (s.f.). *Documentation*. Consultado el 21 de enero de 2022, desde <https://energyplus.net/documentation>
- EPA. (2009). *Indoor Air Quality Tools for Schools*. EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/reference_guide.pdf
- EPA. (2021a, 26 de mayo). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- EPA. (2021b, 10 de febrero). *NAAQS Table*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- EPA. (2021c, 26 de mayo). *Particulate Matter (PM) Basics*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- EUR-Lex. (2008, 21 de mayo). *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1486474738782&uri=CELEX:02008L0050-20150918>
- Fablet & Bertoni. (s.f.-a). *Arduino módulo lector memorias micro SD*. Consultado el 23 de diciembre de 2021, desde http://www.fabletybertoni.com/product.php?id_product=100076

- Fablet & Bertoni. (s.f.-b). *Módulo RTC3231C/EPROM 24C32 Arduino/Ras*. Consultado el 22 de diciembre de 2021, desde http://www.fabletybertoni.com/product.php?id_product=100099
- Fischer, A., Ljungström, E., Engman, L. H., & Langer, S. (2015). Ventilation strategies and indoor particulate matter in a classroom. *Indoor Air*, 25, 168-175. <https://doi.org/10.1111/ina.12133>
- Gammaitoni, L., & Nucci, M. C. (1997a). Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures. *Emerging Infectious Diseases*, 3, 335-342. <https://doi.org/10.3201/eid0303.970310>
- Gammaitoni, L., & Nucci, M. C. (1997b). Using Maple to Analyze a Model for Airborne Contagion. *MapleTech*, 4, 2-5.
- Gensdarnes, F. (2015). Chapter 1.3 - Methods of Detection and Characterization. En P. I. Dolez (Ed.), *Nanoengineering* (pp. 55-84). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62747-6.00003-8>
- Gervaz Canessa, S. (2021). *Modelling of energy requirements for thermal conditioning in the Uruguayan residential sector* (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Uruguay. Consultado el 23 de enero de 2022, desde <https://hdl.handle.net/20.500.12008/28602>
- Google. (s.f.). *Google Earth*. Consultado el 9 de noviembre de 2021, desde <https://earth.google.com/web/>
- Idelchik, I. E. (2007). *Handbook of Hydraulic Resistance* (4^a ed.). Begell House.
- IMFIA. (s.f.). *Canal de Pruebas Navales y Marítimas*. Consultado el 20 de enero de 2022, desde <https://www.fing.edu.uy/imfia/canal-pruebas-navales-y-pesqueras>
- IMPO. (2020). *Decreto N° 93/020*. Consultado el 23 de octubre de 2021, desde <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/93-2020>
- INUMET. (2015). *El Invierno: Año 2015*. Consultado el 18 de febrero de 2022, desde <https://www.inumet.gub.uy/reportes/dcd/invierno.pdf>
- Johnson Controls. (s.f.). *Technical Guide - R-410A J**XP PRO*. Consultado el 8 de febrero de 2022, desde <https://www.johnsoncontrols.com/-/media/jci/be/united-states/hvac-equipment/rooftop-units/files/pro/5167826-jtg-k-0120.pdf?la=en&hash=5794A60AD133DA4E1BA5453F6727C4295020C742>
- Jones, E., Young, A., Clevenger, K., Salimifard, P., Wu, E., Luna, M. L., Lahvis, M., Lang, J., Bliss, M., Azimi, P., Cedeno-Laurent, J., Wilson, C., & Allen, J. (2020). *Schools for Health: Risk Reduction Strategies for Reopening Schools*. Harvard T.H. Chan School of Public Health: Healthy Buildings program. <https://schools.forhealth.org/>
- Jones, R. M., & Brosseau, L. M. (2015). Aerosol transmission of infectious disease. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 57, 501-508. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000448>
- Killingley, B., & Nguyen-Van-Tam, J. (2013). Routes of influenza transmission. *Influenza and other Respiratory Viruses*, 7, 42-51. <https://doi.org/10.1111/irv.12080>
- Küçükhüseyin, Ö. (2021). CO monitoring and indoor air quality. *REHVA Journal*.
- Kuhfeld, M., Soland, J., Tarasawa, B., Johnson, A., Ruzek, E., & Liu, J. (2020). Projecting the Potential Impact of COVID-19 School Closures on Academic Achievement. *Educational Researcher*, 49, 549-565. <https://doi.org/10.3102/0013189X20965918>
- Kurnitski, J., Kiil, M., Wargocki, P., Boerstra, A., Seppänen, O., Olesen, B., & Morawska, L. (2021). Respiratory infection risk-based ventilation design method. *Building and Environment*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108387>
- Liu, X., Lv, X., Peng, Z., & Shi, C. (2020). Experimental study of airflow and pollutant dispersion in cross-ventilated multi-room buildings: Effects of source location and ventilation path. *Sustainable Cities and Society*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101822>

- Liu, X., Peng, Z., Liu, X., & Zhou, R. (2020). Dispersion characteristics of hazardous gas and exposure risk assessment in a multiroom building environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010199>
- Lussich, C. (2021). El 100% de los casos de COVID-19 en Uruguay son por la variante Delta. *El País*. Consultado el 27 de octubre de 2021, desde <https://www.elpais.com.uy/informacion/salud/casos-covid-uruguay-son-variante-delta.html>
- Macarulla, M., Casals, M., Forcada, N., & Gangoellés, M. (2021). Use of Grey-Box Modeling to Determine the Air Ventilation Flows in a Room. En J. L. A. Muñoz, J. L. Y. Blanco & S. F. Capuz-Rizo (Eds.). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54410-2_32
- Macarulla, M., Casals, M., Carnevali, M., Forcada, N., & Gangoellés, M. (2017). Modelling indoor air carbon dioxide concentration using grey-box models. *Building and Environment*, 117, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.022>
- Macarulla, M., Casals, M., Forcada, N., Gangoellés, M., & Giretti, A. (2018). Estimation of a room ventilation air change rate using a stochastic grey-box modelling approach. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 124, 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.029>
- Megri, A. C. (2014). The use of different levels of multi-room modeling approach - application to building pollution transport and efficiency of off-hour ventilation. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7, 88-98. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2014.88.98>
- Meroney, R. N. (2009). CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation. *11th Americas Conference on Wind Engineering*. <https://www.engr.colostate.edu/~meroney/PapersPDF/CEP09-10-1.pdf>
- Met One Instruments. (s.f.-a). *034E Wind Sensor Operation Manual*. Consultado el 27 de noviembre de 2021, desde <https://metone.com/wp-content/uploads/2020/11/034E-9800-Manual-Rev-A.pdf>
- Met One Instruments. (s.f.-b). *E-Sampler Dual Ambient Monitor/Sampler*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://metone.com/products/e-sampler/>
- Met One Instruments. (s.f.-c). *E-Sampler Particulate Monitor: Operation Manual (revision M)*. Consultado el 27 de noviembre de 2021, desde <https://metone.com/wp-content/uploads/2019/05/E-Sampler-9800-Rev-M.pdf>
- metroLED. (s.f.). *LED vs fluorescent tubes - comparison in energy consumption, lighting performance & efficiency*. Consultado el 21 de enero de 2022, desde <https://metroled.ca/led-vs-fluorescent-tubes-comparison-in-energy-consumption-lighting-performance-efficiency/>
- Minguillón, M. C., Querol, X., Alastuey, A., Riediker, M., Felisi, J. M., Garrido, T., Bekö, G., Nehr, S., Wiesen, P., & Carslaw, N. (2020). *Guide for ventilation towards healthy classrooms*. <http://hdl.handle.net/10261/225519>
- Ministerio de Ambiente. (2021, 4 de mayo). *Decreto 135/021: Reglamento de calidad del aire*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/DCA-Decreto_135_021_calidad_de_aire-2021.pdf
- Modern Device. (s.f.-a). *Wind Sensor Rev C*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://moderndevice.com/product/wind-sensor/>
- Modern Device. (s.f.-b). *Wind Sensor Rev P*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://moderndevice.com/product/wind-sensor-rev-p/>
- MontevideoGas. (s.f.-a). *¿Qué es el gas natural?* Consultado el 9 de febrero de 2022, desde http://www.montevideogas.com.uy/uc_9_1.html
- MontevideoGas. (s.f.-b). *Red de distribución de Gas Natural*. Consultado el 9 de febrero de 2022, desde <https://dgm.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6c25802083924212a2674cde96f2cd56>
- MontevideoGas. (s.f.-c). *Tarifas febrero 2022*. Consultado el 9 de febrero de 2022, desde http://www.montevideogas.com.uy/uc_43_1.html

- Morawska, L., & Milton, D. K. (2020). It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Clinical Infectious Diseases*, 71, 2311-2313. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa939>
- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L. C., ... Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>
- MSP. (s.f.). *Monitor de datos de vacunación COVID-19*. Consultado el 4 de enero de 2022, desde <https://monitor.uruguaysevacuna.gub.uy/>
- Muelas, Á., Pina, A., Remacha, P., Tizné, E., Aranda, D., Ruiz, A., & Ballester, J. (2020). *Ventilación natural en aulas: guías práctica*. Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC) de la Universidad Zaragoza. <http://www.isna.info/wp-content/uploads/2020/12/Guia-Practica-Ventilacion.pdf>
- Nardell, E. A. (2016). Wells Revisited: Infectious Particles vs. Quanta of Mycobacterium tuberculosis Infection—Don't Get Them Confused. *Mycobacterial Diseases*, 06. <https://doi.org/10.4172/2161-1068.1000231>
- NOAA. (2022, 5 de enero). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html#global>
- OMS. (2006). *Guías de calidad de aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Actualización mundial 2005*. Organización Mundial de la Salud. http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?jsessionid=42F4D21601DEA1303D77964C9A423CE5?sequence=1
- OMS. (s.f.). *Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?* Consultado el 4 de enero de 2022, desde <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>
- OpenStudio. (s.f.). Consultado el 1 de febrero de 2022, desde <https://openstudio.net/>
- OSHA. (s.f.). *Carbon Dioxide*. Consultado el 6 de enero de 2022, desde <https://www.osha.gov/chemicaldata/183>
- Our World in Data. (s.f.). *Coronavirus Pandemic (COVID-19) - the data*. Consultado el 4 de enero de 2022, desde <https://ourworldindata.org/coronavirus-data>
- Pavilonis, B., Ierardi, A. M., Levine, L., Mirer, F., & Kelvin, E. A. (2021). Estimating aerosol transmission risk of SARS-CoV-2 in New York City public schools during reopening. *Environmental Research*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110805>
- Pelliccioni, A., Monti, P., Cattani, G., Boccuni, F., Cacciani, M., Canepari, S., Capone, P., Catrambone, M., Cusano, M., D'ovidio, M. C., Santis, A. D., Bernardino, A. D., Bucchianico, A. D. M. D., Renzi, S. D., Ferrante, R., Gaeta, A., Gaddi, R., Gherardi, M., Giusto, M., ... Perrino, C. (2020). Integrated evaluation of indoor particulate exposure: The viepi project. *Sustainability (Switzerland)*, 12, 1-25. <https://doi.org/10.3390/su12229758>
- Pereira, d. (2022). *Wind Rose*. Consultado el 10 de enero de 2022, desde <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47248-wind-rose>
- Persily, A. (2015). Indoor Carbon Dioxide Concentrations in Ventilation and Indoor Air Quality Standards. *Proceedings of 36th AIVC, Conference on Effective Ventilation in High Performance Buildings*, 810-819.
- Persily, A., & Polidoro, B. (2020). Development and Application of an Indoor Carbon Dioxide Metric. *The 16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (Indoor Air 2020)*. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=931555
- Remion, G., Moujalled, B., & Mankibi, M. E. (2021). Dynamic measurement of the airflow rate in a two-zones dwelling, from the CO2 tracer gas-decay method using the Kalman filter. *Building and Environment*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107493>

- Riley, E. C., Murphy, G., & Riley, R. L. (1978). Airborne Spread of Measles in a Suburban Elementary School. *American Journal of Epidemiology*, 107, 421-432. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112560>
- Rosbach, J., Krop, E., Vonk, M., van Ginkel, J., Meliefste, C., de Wind, S., Gehring, U., & Brunekreef, B. (2016). Classroom ventilation and indoor air quality—results from the FRESH intervention study. *Indoor Air*, 26, 538-545. <https://doi.org/10.1111/ina.12231>
- Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13, 237-245. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0668.2003.00189.x>
- Saint-Maurice, P. F., Kim, Y., Welk, G. J., & Gaesser, G. A. (2015). Kids are not little adults: what MET threshold captures sedentary behavior in children? *European Journal of Applied Physiology*, 116, 29-38. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3238-1>
- Schibuola, L., & Tambani, C. (2021). High energy efficiency ventilation to limit COVID-19 contagion in school environments. *Energy and Buildings*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110882>
- SINAE. (s.f.). *Comunicados*. Consultado el 4 de enero de 2022, desde https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/comunicacion/comunicados?field_tematica_target_id=204&year=all&month=all&field_publico_target_id=All
- Stabile, L., Pacitto, A., Mikszewski, A., Morawska, L., & Buonanno, G. (2021). Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms. *Building and Environment*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108042>
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning* (2^a ed.). McGraw-Hill.
- Syar. (s.f.). *Medidor de CO₂ AirCO₂ntrol 5000*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://syar.com.uy/outlet/instrumentos-profesionales/medidor-de-co2-aircontrol-5000-detail.html>
- Sze To, G. N., & Chao, C. Y. H. (2010). Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases. *Indoor Air*, 20, 2-16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x>
- Taylor, T. (s.f.). *Monitor dimensions*. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde https://support.aeroqual.com/Wiki/Monitor_dimensions
- Trimble. (s.f.). *SketchUp*. Consultado el 1 de febrero de 2022, desde <https://www.sketchup.com/es>
- TRNSYS. (s.f.). *What is TRNSYS?* Consultado el 1 de febrero de 2022, desde <http://www.trnsys.com/>
- University of Strathclyde Glasgow. (s.f.). *Energy Systems Research Unit ESP-r*. Consultado el 1 de febrero de 2022, desde <https://www.strath.ac.uk/research/energysystemsresearchunit/applications/esp-r/>
- UTE. (2022a). *Pliego tarifario*. Consultado el 9 de febrero de 2022, desde <https://www.ute.com.uy/sites/default/files/docs/Pliego%20Tarifario%20Vigente%20desde%201%20de%20Enero%20de%202022.pdf>
- UTE. (2022b). *Potencias normalizadas*. Consultado el 9 de febrero de 2022, desde <https://portal.ute.com.uy/clientes/tramites-y-servicios/potencia-contratada>
- Vouriot, C. V., Burridge, H. C., Noakes, C. J., & Linden, P. F. (2021). Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. *Indoor Air*, 31, 1154-1163. <https://doi.org/10.1111/ina.12818>
- Vystronic. (s.f.). *Protoboard 400 puntos*. Consultado el 22 de diciembre de 2021, desde <https://vystronic.com/product/protoboard-400-puntos/>
- Wang, Y., Chen, R., Hu, F., Lan, Y., Yang, Z., Zhan, C., Shi, J., Deng, X., Jiang, M., Zhong, S., Liao, B., Deng, K., Tang, J., Guo, L., Jiang, M., Fan, Q., Li, M., Liu, J., Shi, Y., ... Tang, X. (2021). Transmission, viral kinetics and clinical characteristics of the emergent

- SARS-CoV-2 Delta VOC in Guangzhou, China. *EClinicalMedicine*, 40, 101129. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.101129>
- Weather Spark. (s.f.). *Datos históricos meteorológicos de 2021 en Montevideo*. Consultado el 9 de enero de 2022, desde <https://es.weatherspark.com/h/y/29220/2021/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2021-en-Montevideo-Uruguay#Figures-Summary>
- Wells, W. F. (1934). On air-borne infection. Study II. Droplets and droplet nuclei. *American Journal of Epidemiology*, 20, 611-618. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a118097>
- Wells, W. F. (1955). *Airborne Contagion and Air Hygiene*. Harvard University Press.
- Wells, W. F., & Brown, H. W. (1936). Recovery of influenza virus suspended in air and its destruction by ultraviolet radiation. *American Journal of Epidemiology*, 24, 407-413. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a118273>
- Wells, W. F., & Stone, W. R. (1934). On air-borne infection. Study III. Viability of droplet nuclei infection. *American Journal of Epidemiology*, 20, 619-627. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a118098>
- WHO. (2006). *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf
- WHO. (2013). *Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*. WHO - Regional office for Europe. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf
- WHO. (2021a). *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*.
- WHO. (2021b). *Timeline of WHO's response to COVID-19*. Consultado el 23 de octubre de 2021, desde <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/interactive-timeline>
- Winsen. (2020). *Infrared CO2 Sensor Module (Model: MH-Z19B) - User's Manual*. Consultado el 7 de diciembre de 2021, desde [https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/ndir-co2-sensor/mh-z19b-co2-manual\(ver1_6\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/ndir-co2-sensor/mh-z19b-co2-manual(ver1_6).pdf)
- Zhang, H., & Srinivasan, R. (2020). A systematic review of air quality sensors, guidelines, and measurement studies for indoor air quality management. *Sustainability (Switzerland)*, 12, 1-40. <https://doi.org/10.3390/su12219045>
- Zhang, H., Srinivasan, R., & Ganesan, V. (2021). Low cost, multi-pollutant sensing system using raspberry pi for indoor air quality monitoring. *Sustainability (Switzerland)*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.3390/su13010370>
- Zhang, X., & Wang, J. (2021). Dose-response Relation Deduced for Coronaviruses From Coronavirus Disease 2019, Severe Acute Respiratory Syndrome, and Middle East Respiratory Syndrome: Meta-analysis Results and its Application for Infection Risk Assessment of Aerosol Transmission. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 73, e241-e245. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1675>
- Zhang, X., Weerasuriya, A. U., & Tse, K. T. (2020). CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: Comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms. *Energy and Buildings*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110516>

Apéndices y anexos

A. Apéndices

A.1 Referencia general de notación

Se incluye a continuación una referencia general de notación, que comprende siglas y abreviaturas, símbolos y variables y subíndices.

A.1.1 Siglas y abreviaturas

SIGLAS Y ABREVIATURAS	
Sigla	Descripción
ABC	<i>Automatic Baseline Correction</i> Corrección Automática de Referencia
AC1, AC2	Monitores AirCO ₂ ntrol 5000
ACH ¹	<i>Air Changes per Hour</i> Renovaciones de Aire por Hora
ANEP	Administración Nacional de Educación Pública
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
AQ1,AQ2	Monitores Aeroqual 500 con cabezal de CO ₂
AQ3	Monitor Aeroqual 500 con cabeza de PM2.5 y PM10
AR1, AR2	Monitores de CO ₂ construidos en base a sensores MH-Z19B y placas Arduino
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
ASTM ²	<i>ASTM International</i> ASTM Internacional
BEM	<i>Building Energy Modeling</i> Modelado Energético de Edificios
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> Diseño Asistido por Computadora

¹En ocasiones utilizado como unidad (h^{-1}).

²Anteriormente *American Society for Testing and Materials*, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

Tabla A.1.1 – continúa de la página anterior

SIGLAS Y ABREVIATURAS	
Sigla	Descripción
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> Dinámica de Fluidos Computacional
DIA	Departamento de Ingeniería Ambiental
DNM	Dirección Nacional de Meteorología
DOE	<i>United States Department of Energy</i> Departamento de Energía de Estados Unidos
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
FADU	Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
FS	<i>Full Scale</i> Fondo de Escala
GCA	Valores Guía de Calidad de Aire
HVAC	<i>Heating Ventilation and Air Conditioning</i> Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado
IIE	Instituto de Ingeniería Eléctrica
IMFIA	Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
MO	Estación de calidad de aire Met One E-Sampler 9800
NDIR	<i>Non Dispersive Infrared Detector</i> Sensor infrarrojo no dispersivo
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
OI	Objetivos Intermedios
OMS	Organización Mundial de la Salud
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i> Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos
P1, P2, P3, P4	Posiciones de las pruebas controladas en el salón 2, definidas en la figura 6.4.8
PM	<i>Particulate Matter</i> Material Particulado
rdg	<i>Reading</i> Lectura (indicación de un instrumento)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> Raíz del Error Cuadrático Medio

Tabla A.1.1 – continúa de la página anterior

SIGLAS Y ABREVIATURAS	
Sigla	Descripción
RTC	<i>Real Time Clock</i> Reloj de Tiempo Real
TSP	<i>Total Suspended Particules</i> Total de Partículas en Suspensión
WHO	<i>World Health Organization</i> Organización Mundial de la Salud
WS	Estación meteorológica Weather Station Davids Instruments Vantage Pro2

Tabla A.1.1 – Referencia general de siglas y abreviaturas.

A.1.2 Símbolos

SÍMBOLOS Y VARIABLES	
Símbolo	Descripción
a	Coeficiente de infiltración Ancho de la sección de un ducto
A	Área de transferencia de calor
ACH	Renovaciones de aire por hora
b	Coeficiente de infiltración Altura de la sección de un ducto
c	Coeficiente de infiltración
c_p	Capacidad calorífica a presión constante
C	Concentración volumétrica de CO ₂ Costo total
C_q	Concentración volumétrica de quanta
CF	Costo fijo
CLF	Factor de corrección por inercia térmica para lámparas
CV	Costo variable
D	Número de infecciones secundarias
e	Error relativo de linealización
f	Fracción de aire en un recinto que ya fue respirado por un individuo Pérdida de carga por unidad de longitud
F_b	Factor de balasto electrónico
F_u	Factor de utilización
F_P	Coeficiente de pérdida de calor por el piso
g	Función genérica Aceleración gravitatoria
G	Tasa de generación de CO ₂ por persona
h_{fg}	Entalpía de vaporización
h_g	Entalpía de vapor saturado
H_{inst}	Carga hidráulica demandada por la instalación
HR	Humedad relativa
i	Índice de una sumatoria
I	Número de infectados primarios en una población
k	Número natural genérico Conductividad térmica Coeficiente de pérdida de carga localizada

Tabla A.1.2 – continúa de la página anterior

SÍMBOLOS Y VARIABLES	
Símbolo	Descripción
L	Espesor de un muro Longitud de un tramo de ducto
$\dot{m}$	Flujo másico de aire
n	Cantidad de personas en un ambiente Total de datos ajustados en una serie de medidas Cantidad de sustancia Total de individuos en una población
N	Total de datos procesados en un histograma Número de quanta en un ambiente
p	Caudal de ventilación pulmonar Precio
P	Presión absoluta Probabilidad de infección Perímetro del piso Potencia nominal de una lámpara Potencia
PMX	Concentración de material particulado con un diámetro medio menor a X μm
q	Tasa de generación de quanta por infectado
Q	Caudal volumétrico de aire
Q_p	Poder calorífico a presión constante
$\dot{Q}$	Potencia térmica
R	Constante de los gases ideales Factor de filtrado (referido a algunos modelos de Wells-Riley) Resistencia térmica
R^2	Coefficiente de determinación
R''	Resistencia térmica por unidad de área
R_o	Número básico de reproducción
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
s_{ACH}	Desvío estándar de la tasa de ventilación
S	Número de individuos susceptibles en una población
t	Tiempo
T	Temperatura Tiempo de un día cubierto por ventanas de ajuste del modelo de caja Periodo de tiempo
U	Coefficiente global de transferencia de calor

Tabla A.1.2 – continúa de la página anterior

SÍMBOLOS Y VARIABLES	
Símbolo	Descripción
v	Velocidad Número de ventanas de ajuste del modelo de caja en un día
V	Volumen
$\dot{V}$	Caudal volumétrico
w	Humedad específica
x	Variable independiente genérica
X	Variable aleatoria genérica
y	Variable dependiente genérica
ζ	Pérdida de carga localizada
η	Eficiencia
λ	Número total de quanta inhalado por un individuo Parámetro de una variable aleatoria discreta con distribución de Poisson Tasa de inactivación, pérdida de viabilidad o deposición de un patógeno, según el subíndice
ρ	Densidad
σ	Operador de Heaviside (escalón unitario)
ϕ	Diámetro

Tabla A.1.2 – Referencia general de símbolos y variables.

A.1.3 Subíndices

SUBÍNDICES	
Subíndice	Descripción
1	Primer valor de una serie de medidas
a	Referido al aire espirado
A	Referido a la instalación A
ah	Aire húmedo
B	Referido a la instalación B
c	Indicación instrumental de una variable (dato crudo no corregido)
cr	Valor crítico (para el cual $R_o = 1$)
d, depo	Refiere a la deposición de un patógeno
e	Referido al aire espirado
E	Eléctrico
eq	Valor de equilibrio Equivalente
end	Último valor de una serie de medidas
ext	Exterior
ext wall	Pared exterior
f	Denota magnitudes asociadas al filtrado de aire
floor	Piso
GN	Gas natural
high	Alto (referido a una tasa de ventilación)
HVAC	Referido al sistema de HVAC
<i>i</i>	Valor inicial de una iteración
in	Propiedades del aire en el difusor de entrada
inac	Refiere a la inactivación viral
inf	Infiltración
int wall	Pared interior
<i>l</i>	Latente (referido a una carga térmica)
low	Bajo (referido a una tasa de ventilación)
o	Valor inicial
p	Ponderado (referido a una media)
pérd	Pérdidas
s	Sensible (referido a una carga térmica)
salón	Propiedades del aire en el salón

Tabla A.1.3 – continúa de la página anterior

SUBÍNDICES	
Subíndice	Descripción
split	Referido a un equipo de aire acondicionado doméstico tipo split
UTE	Referido a UTE
UV	Refiere a desinfección por luz ultravioleta
v	Refiere a la pérdida de viabilidad de un patógeno

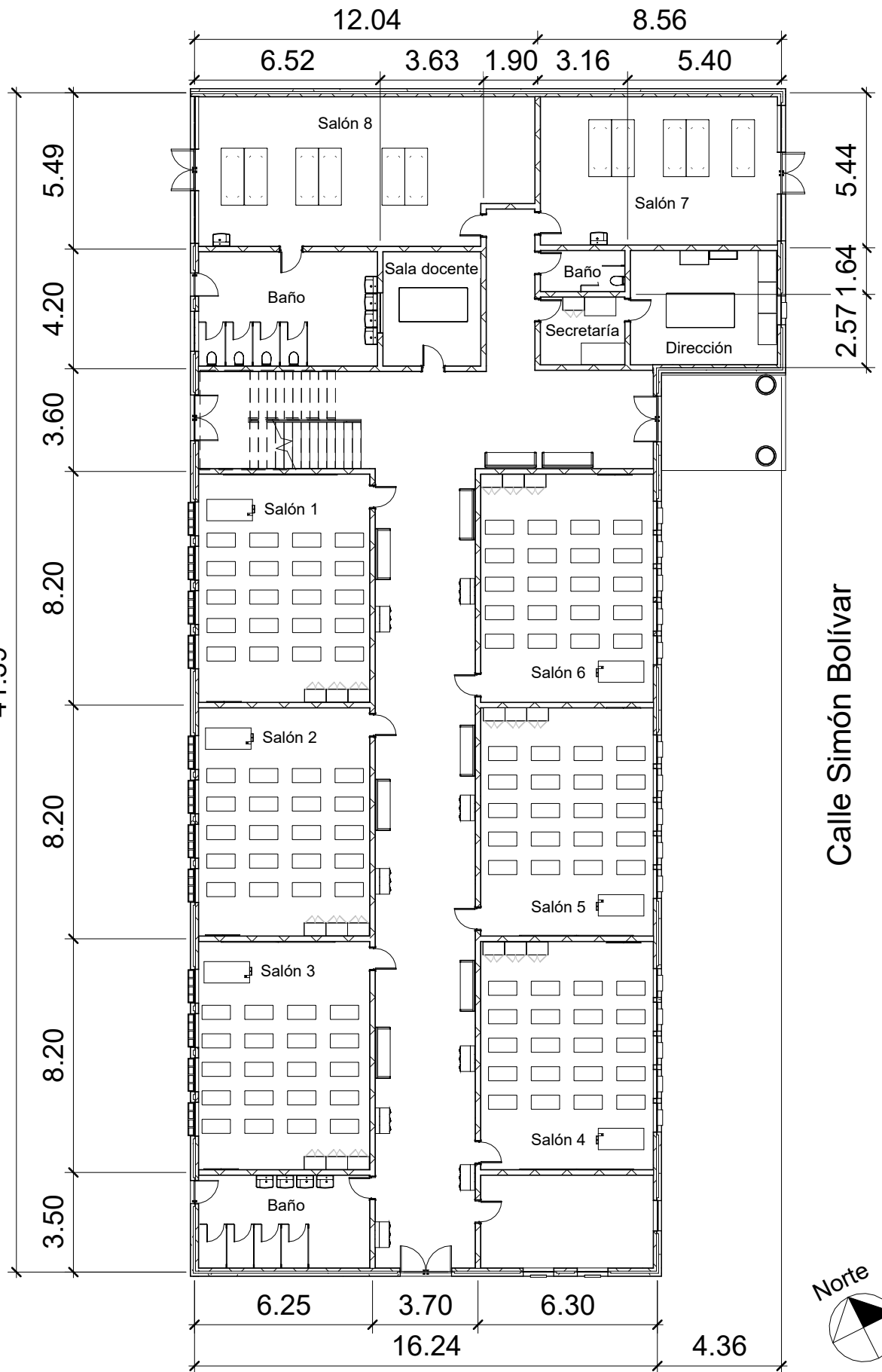
Tabla A.1.3 – Referencia general de subíndices.

A.2 Planos estructurales de la escuela

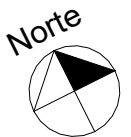
Se incluyen a continuación los planos estructurales de la escuela (proyecciones de planta y alzados). El mobiliario incluido es ilustrativo. Todas las cotas se encuentran en metros.

Patio

41.39



Calle Simón Bolívar



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

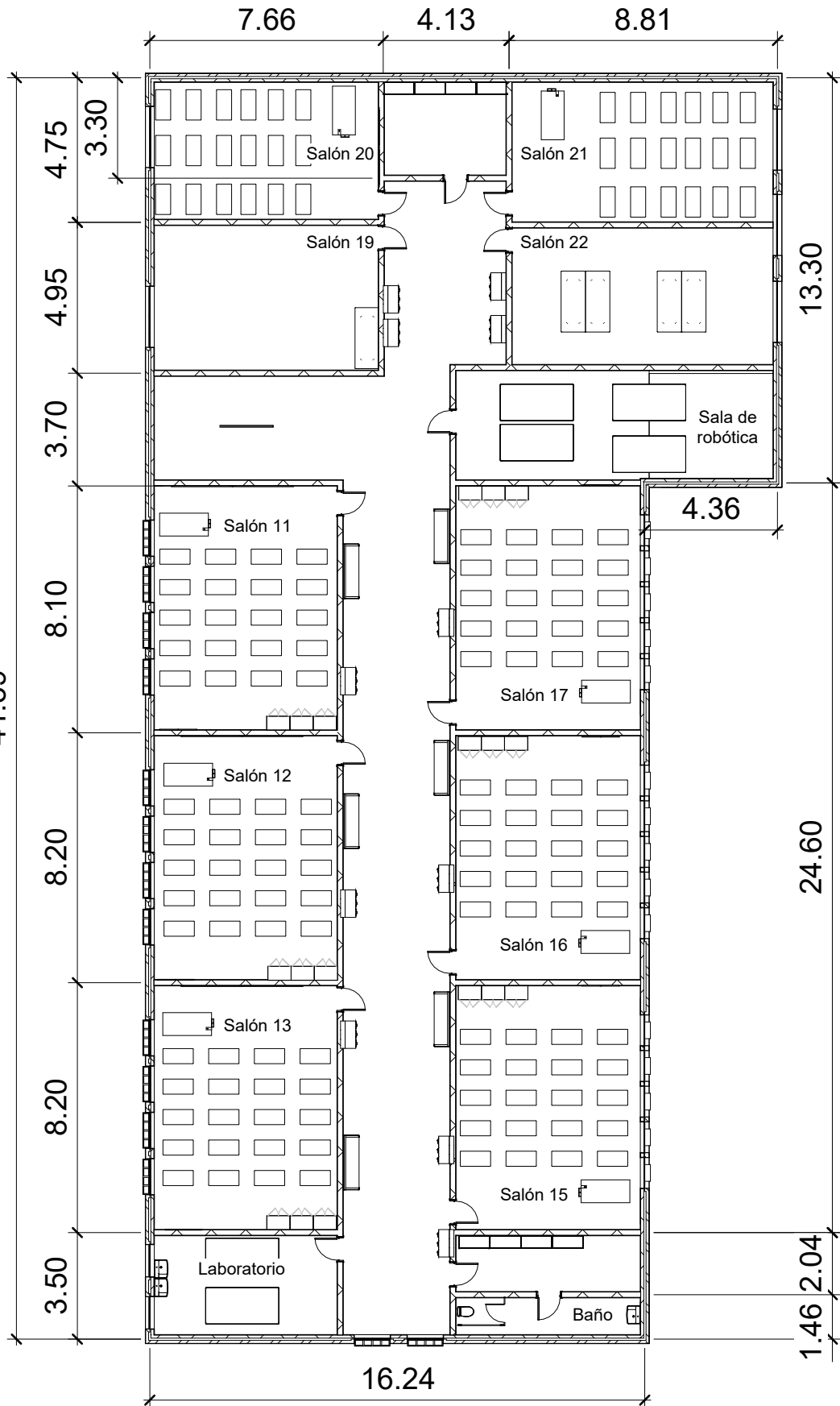
Plano de planta - primer piso

Número de plano	E1	Escuela N° 32
Fecha	13/12/2021	Escuela N° 83
Dibujado por	APG	Escala
Comprobado por	AVC	1 : 200

Ventilación y COVID-19

Patio

41.39



Calle Simón Bolívar



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ventilación y COVID-19

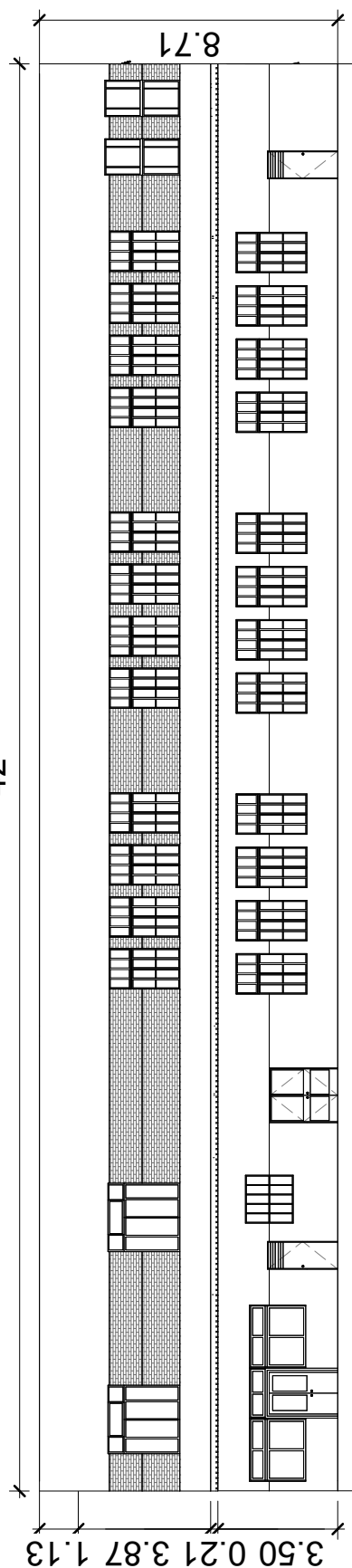
Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Plano de planta - segundo piso

Número de plano	E2	Escuela N° 32
Fecha	13/12/2021	Escuela N° 83
Dibujado por	Autor	
Comprobado por	Verificador	Escala 1 : 200

42

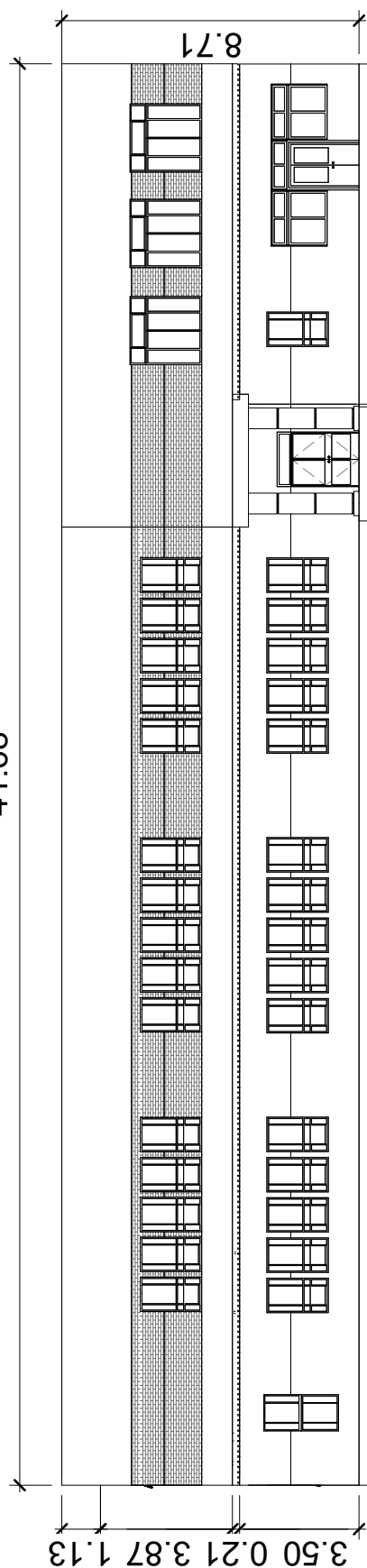


Fachada este (patio)

1 : 200

1

41.68



Fachada oeste (frente)

1 : 200

2



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



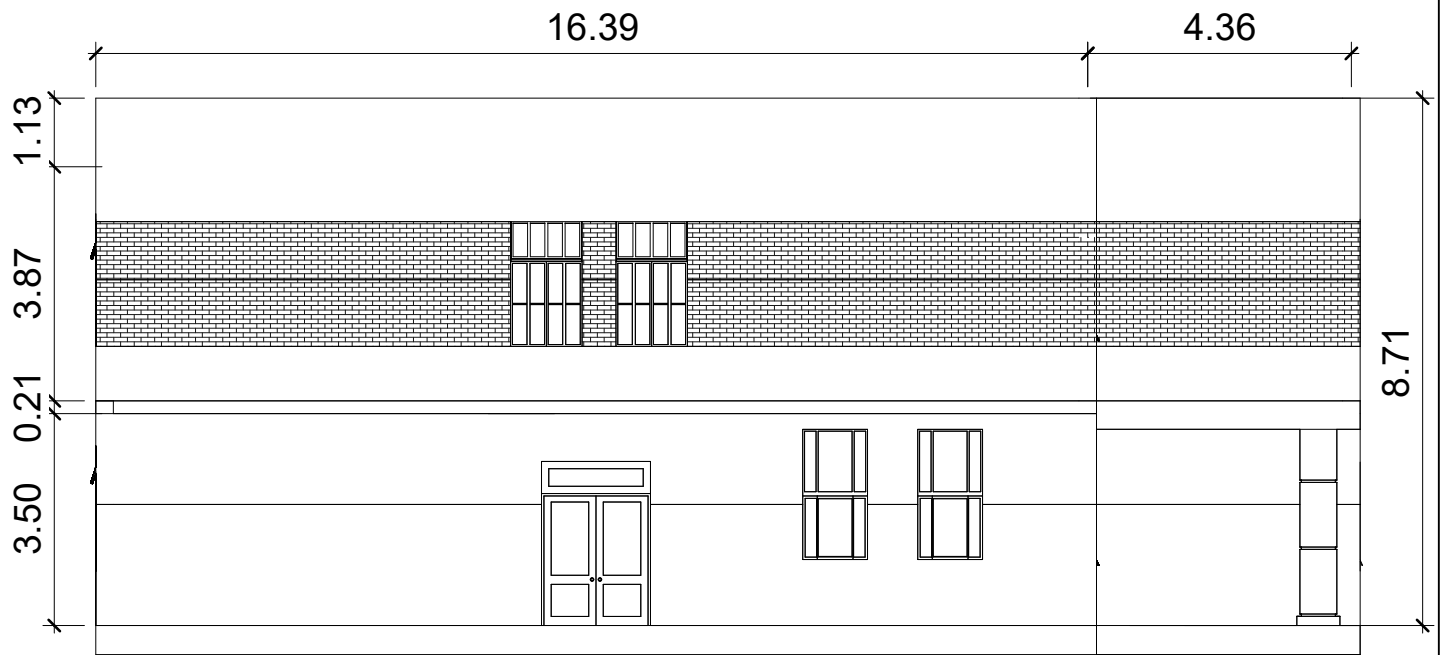
Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Alzados de las fachadas

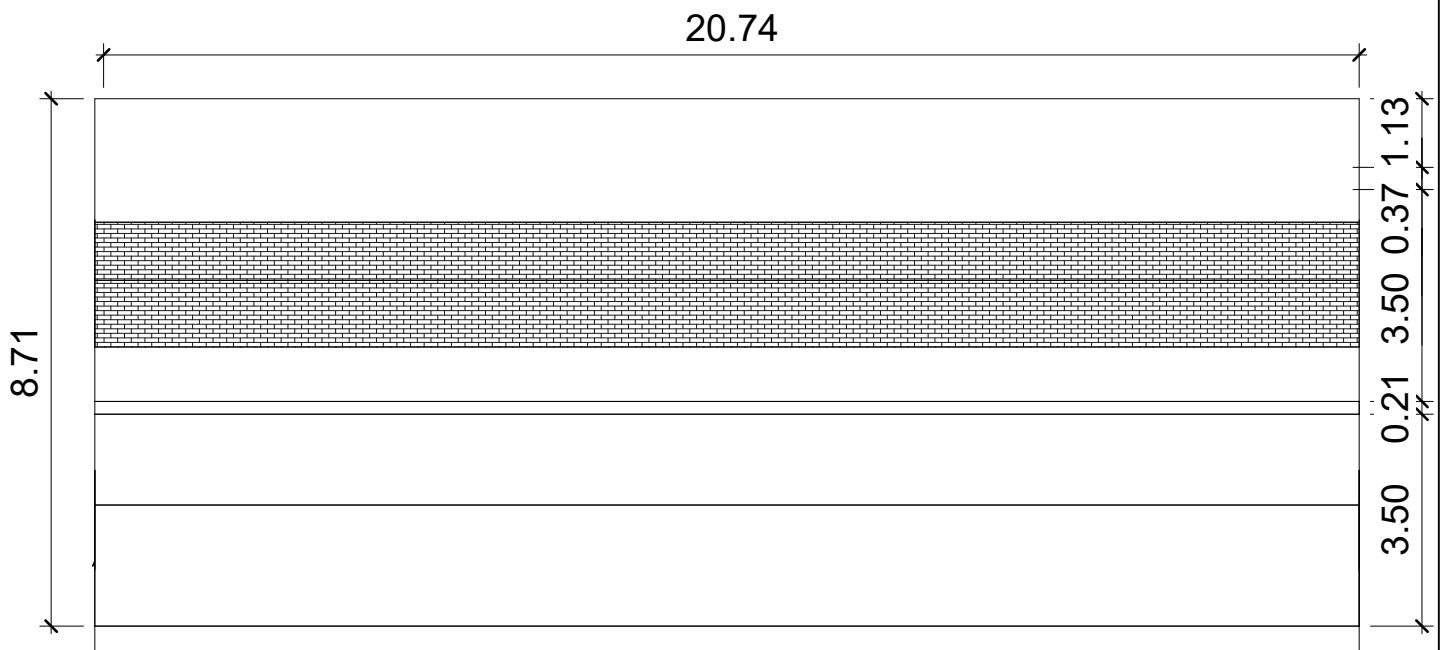
Número de plano	E3	Escuela N° 32
Fecha	13/12/2021	Escuela N° 83
Dibujado por	APG	
Comprobado por	AVC	Escala 1 : 200



1

Fachada sur (corredor)

1 : 125



2

Medianera norte (oculta)

1 : 125



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



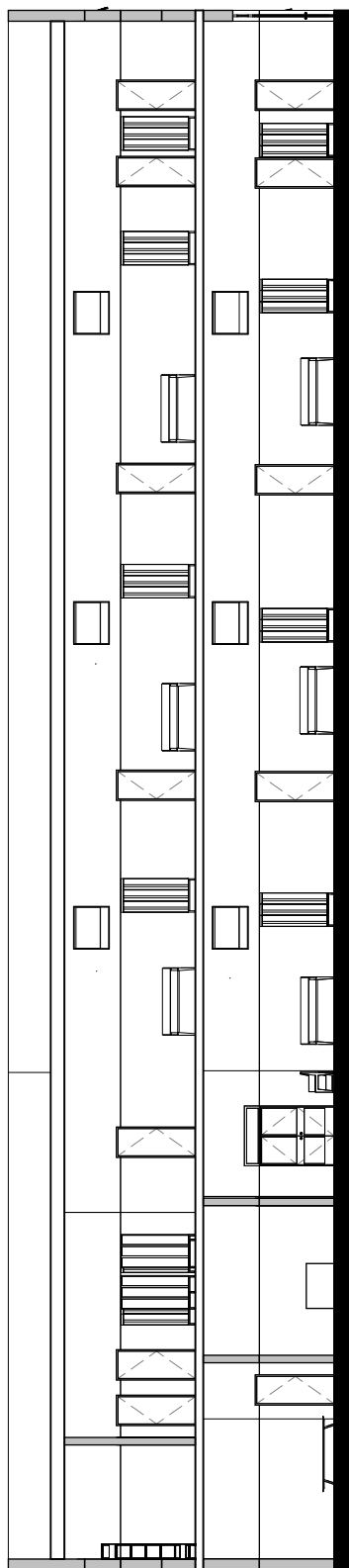
Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Alzados laterales

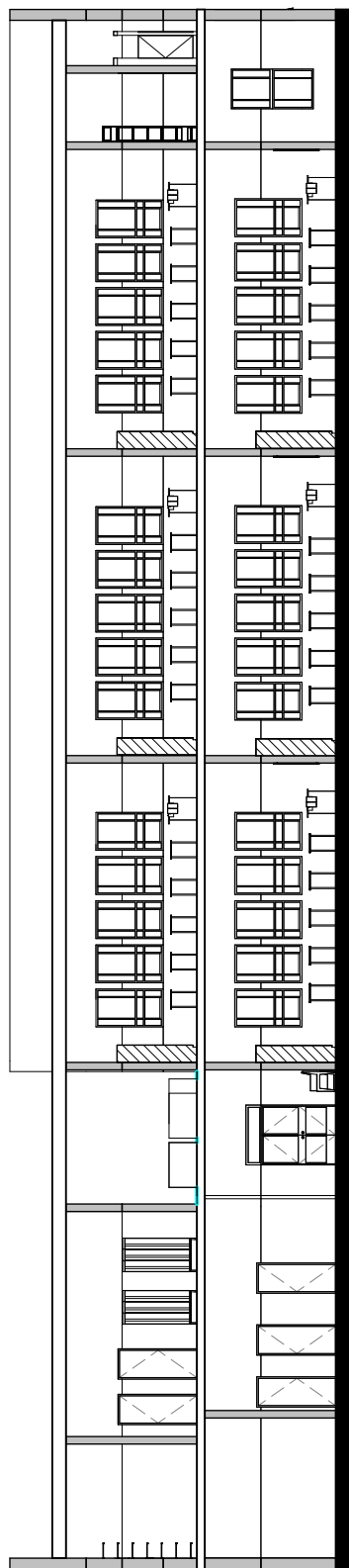
Número de plano	E4	Escuela N° 32
Fecha	13/12/2021	Escuela N° 83
Dibujado por	APG	
Comprobado por	AVC	Escala 1 : 125



Pasillo (hacia salones sobre el frente)

1 : 200

1



Salones (hacia el frente)

1 : 200

2



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



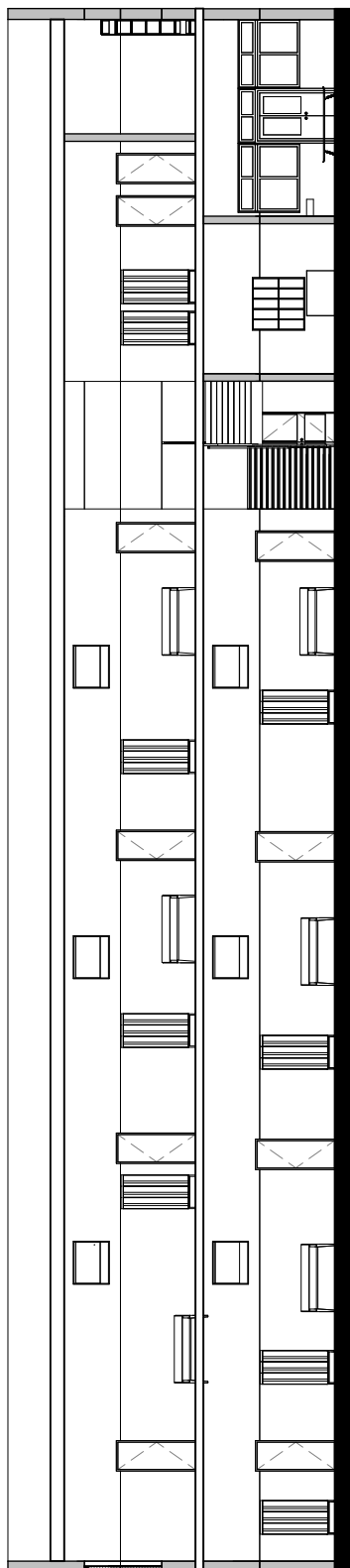
Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Alzados interiores hacia el este

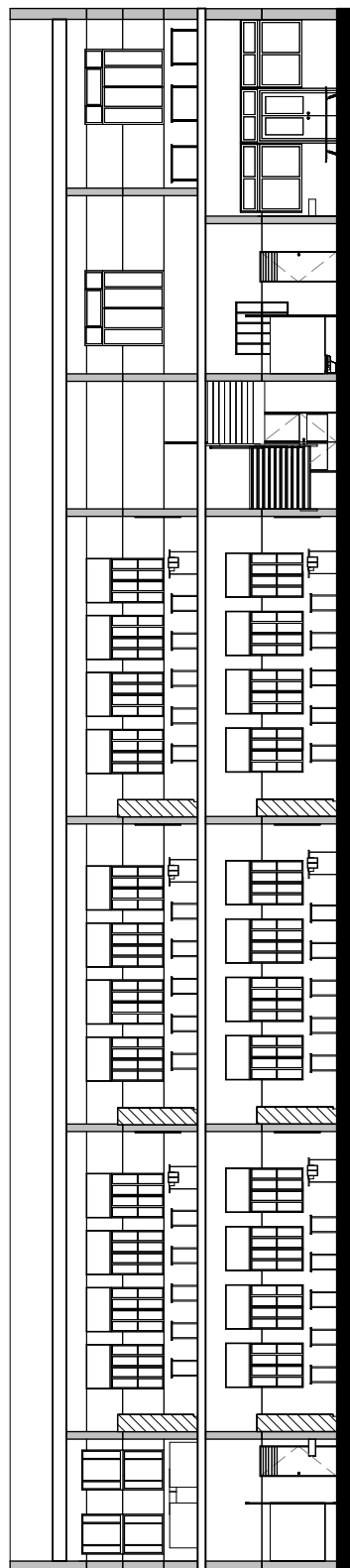
Número de plano	E5	Escuela N° 32
Fecha	13/12/2021	Escuela N° 83
Dibujado por	APG	
Comprobado por	AVC	Escala 1 : 200



Paseillo (hacia salones sobre el patio)

1 : 200

1



Salones (hacia el patio)

1 : 200

2



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Alzados interiores hacia el oeste

Número de plano	E6	Escuela N° 32
Fecha	13/12/2021	Escuela N° 83
Dibujado por	APG	
Comprobado por	AVC	Escala 1 : 200

A.3 Ocupación de los salones

La dirección del turno vespertino informó los siguientes datos de ocupación para cada salón de clase.

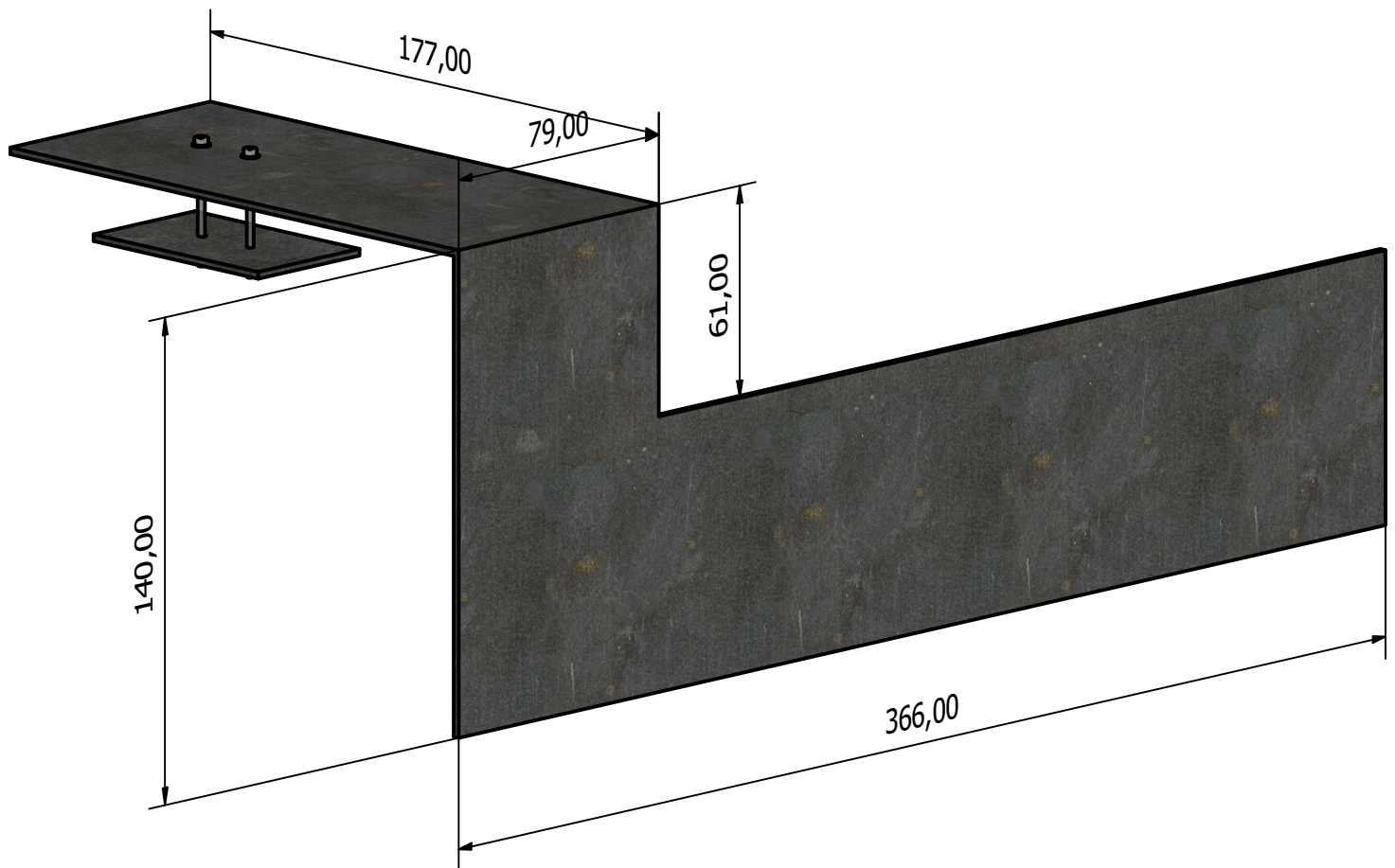
DATOS DE OCUPACIÓN PARA EL TURNO VESPERTINO			
Primer piso		Segundo piso	
Salón	Niños	Salón	Niños
1	-	11	30
2	30	12	30
3	30	13	29
4	26	15	27
5	27	16	29
6	25	17	28
7	30	20	27
8	31	21	28
		22	27

Tabla A.3.1 – Ocupación nominal de los salones de clase para el turno vespertino.

A.4 Planos del soporte del escritorio para los sensores AQ1 y AQ3

Se adjuntan a continuación los planos correspondientes al soporte construido para los monitores Aeroqual 500 colocados en el escritorio al frente del salón 2 durante la campaña de medidas. Las cotas se encuentran en milímetros.

Perspectiva del soporte



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Perspectiva del soporte del escritorio

Número de plano M1

Fecha 22/06/2021

Dibujado por AVC

Comprobado por APG

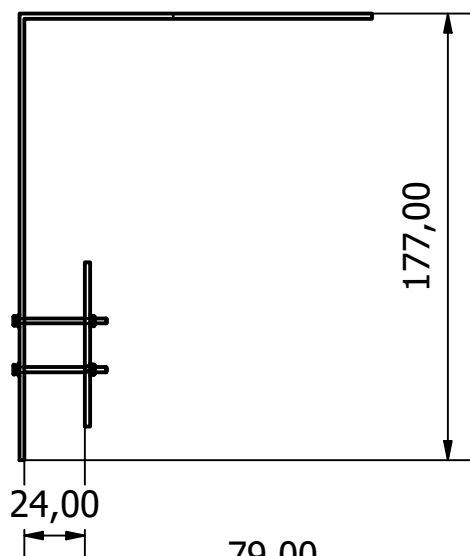
Escuela N° 32

Escuela N° 83

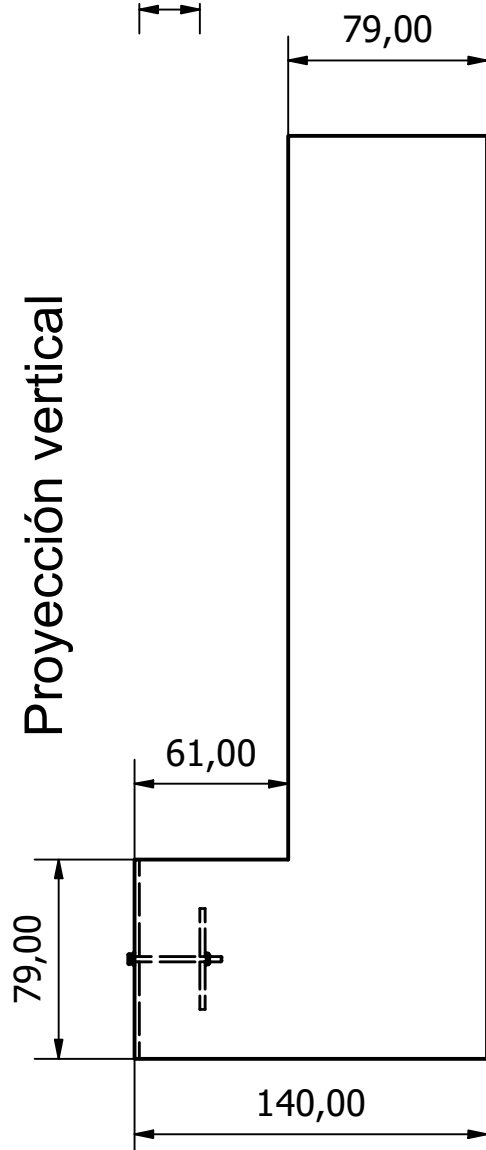
Escala 1 : 2

Ventilación y COVID-19

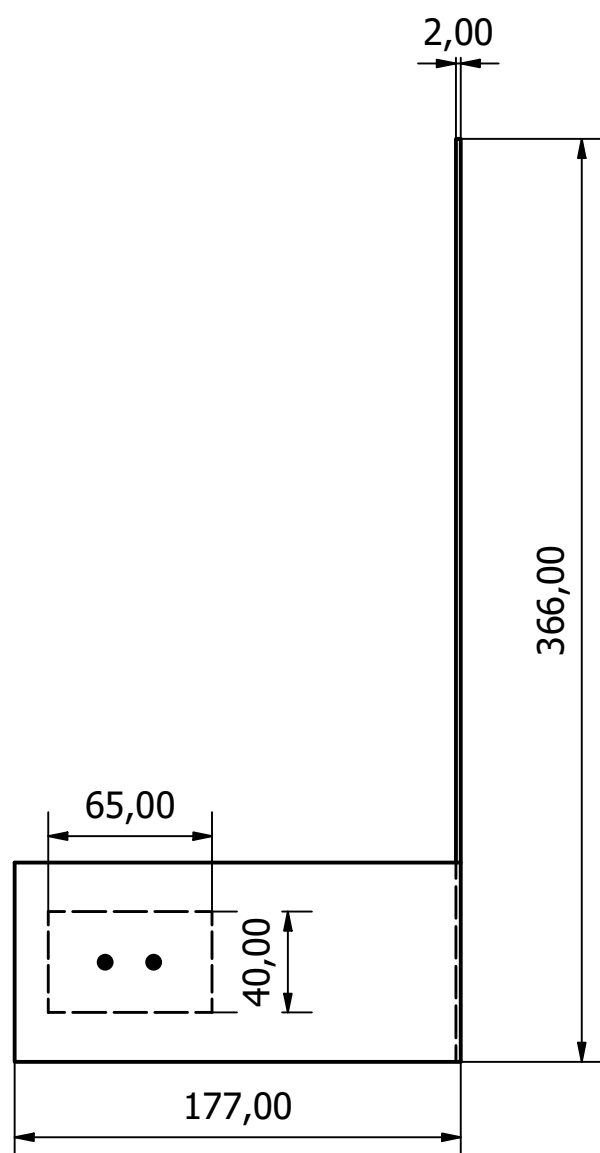
Proyección lateral



Proyección vertical



Proyección horizontal



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERIA

Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Proyecciones del soporte
del escritorio

Número de plano M2

Fecha 22/06/2021

Dibujado por AVC

Comprobado por APG

Escuela N° 32

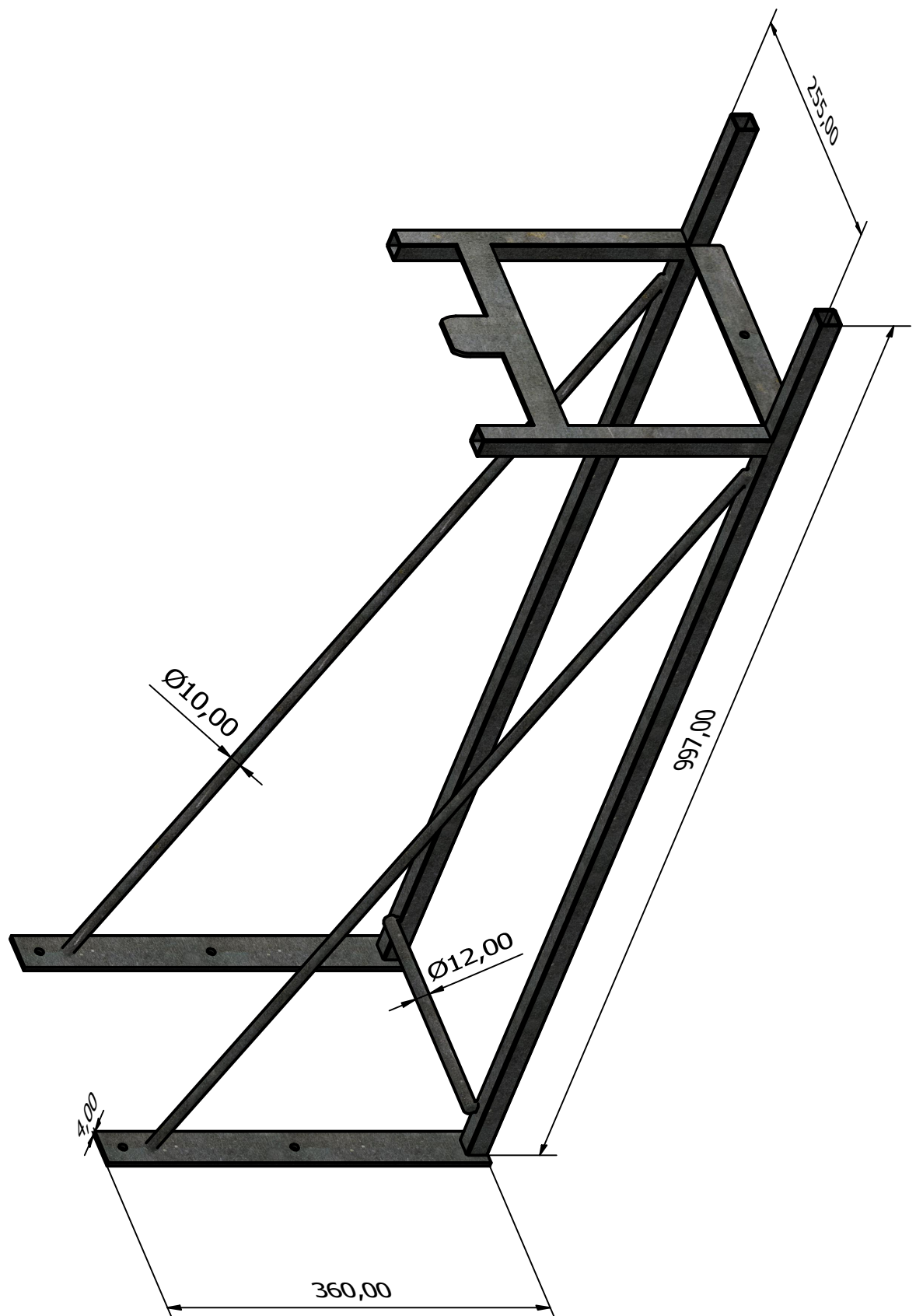
Escuela N° 83

Escala 1 : 3

A.5 Planos de la ménsula del Met One E-Sampler 9800

Se adjuntan a continuación los planos correspondientes a la ménsula diseñada para la colocación del Met One E-Sampler 9800 sobre la fachada Oeste de la escuela. Las cotas se encuentran en milímetros.

Perspectiva de la ménsula



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Perspectiva de la ménsula

Número de plano M3

Fecha 16/12/2021

Dibujado por AVC

Comprobado por APG

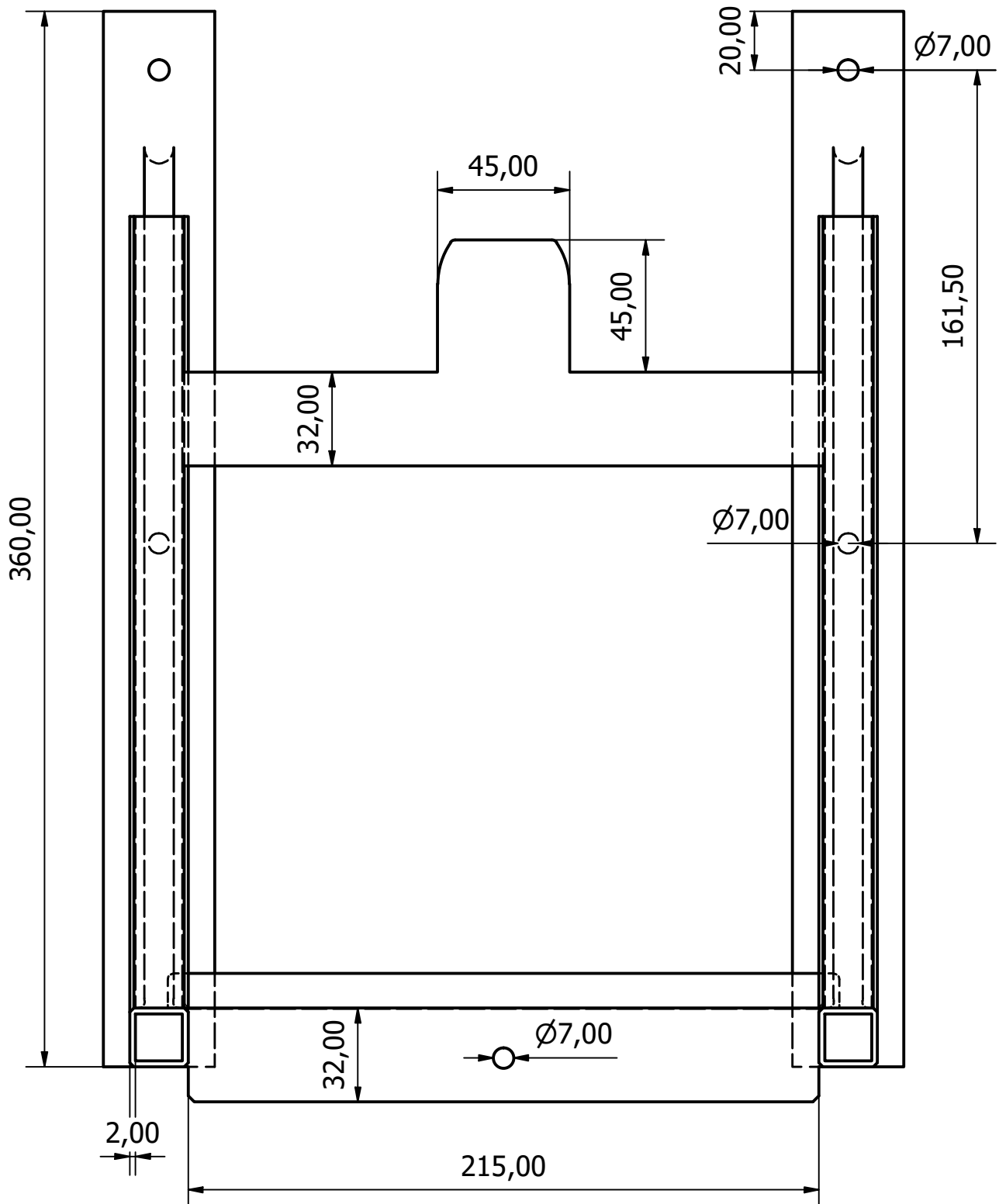
Escuela N° 32

Escuela N° 83

Escala 1 : 5

[illegible]

Proyección frontal



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Grupo
Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores
Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

Proyección frontal de la
ménsula

Número de plano M5

Fecha 16/12/2021

Dibujado por AVC

Comprobado por APG

Escuela N° 32

Escuela N° 83

Escala 1 : 2

Ventilación y COVID-19

A.6 Calendario de medidas

Se incluye a continuación el calendario de medidas continuas realizadas en la escuela. No se incluyen las instancias de medición especiales, a saber, las pruebas controladas del salón 2 y la instancia de medida en el salón 11.

Para cada día se detallan los instrumentos con registros disponibles. Las siglas WS y MO se refieren a la estación meteorológica del techo y a la estación Met One, respectivamente. Para el resto de los instrumentos se mantiene la convención detallada en el capítulo 4.

El código de colores denota si las medidas cubren ambos turnos (en azul), sólo la mañana (en naranja) o sólo la tarde (en rojo).

Las posiciones de medida son las usuales, excepto para el monitor AQ2, cuyo subrayado denota los días de medida en el pasillo.

JULIO							
D	L	M	M	J	V	S	
				1	2	3	
4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30	31	

AGOSTO							
D	L	M	M	J	V	S	
1	2	3	4	5	6	7	
8	9	10	11	12	13	14	
15	16	17	18	19	20	21	
22	23	24	25	26	27	28	
29	30	31					

SEPTIEMBRE							
D	L	M	M	J	V	S	
			1	2	3	4	
5	6	7	8	9	10	11	
12	13	14	15	16	17	18	
19	20	21	22	23	24	25	
26	27	28	29	30			

OCTUBRE							
D	L	M	M	J	V	S	
					1	2	
3	4	5	6	7	8	9	
10	11	12	13	14	15	16	
17	18	19	20	21	22	23	
24	25	26	27	28	29	30	
31							

NOVIEMBRE							
D	L	M	M	J	V	S	
	1	2	3	4	5	6	
7	8	9	10	11	12	13	
14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	
28	29	30					

DICIEMBRE							
D	L	M	M	J	V	S	
			1	2	3	4	
5	6	7	8	9	10+	11	
12	13	14	15	16	17	18	
19	20	21	22	23	24	25	
26	27	28	29	30	31		

A.7 Gráficos de ajuste del modelo de caja

Se muestran a continuación algunos resultados de ajuste del modelo de caja para los datos de CO₂ relevados en el salón 2 de la escuela, para ambos turnos de ocupación (matutino y vespertino). Por claridad no se incluyen los parámetros ajustados.

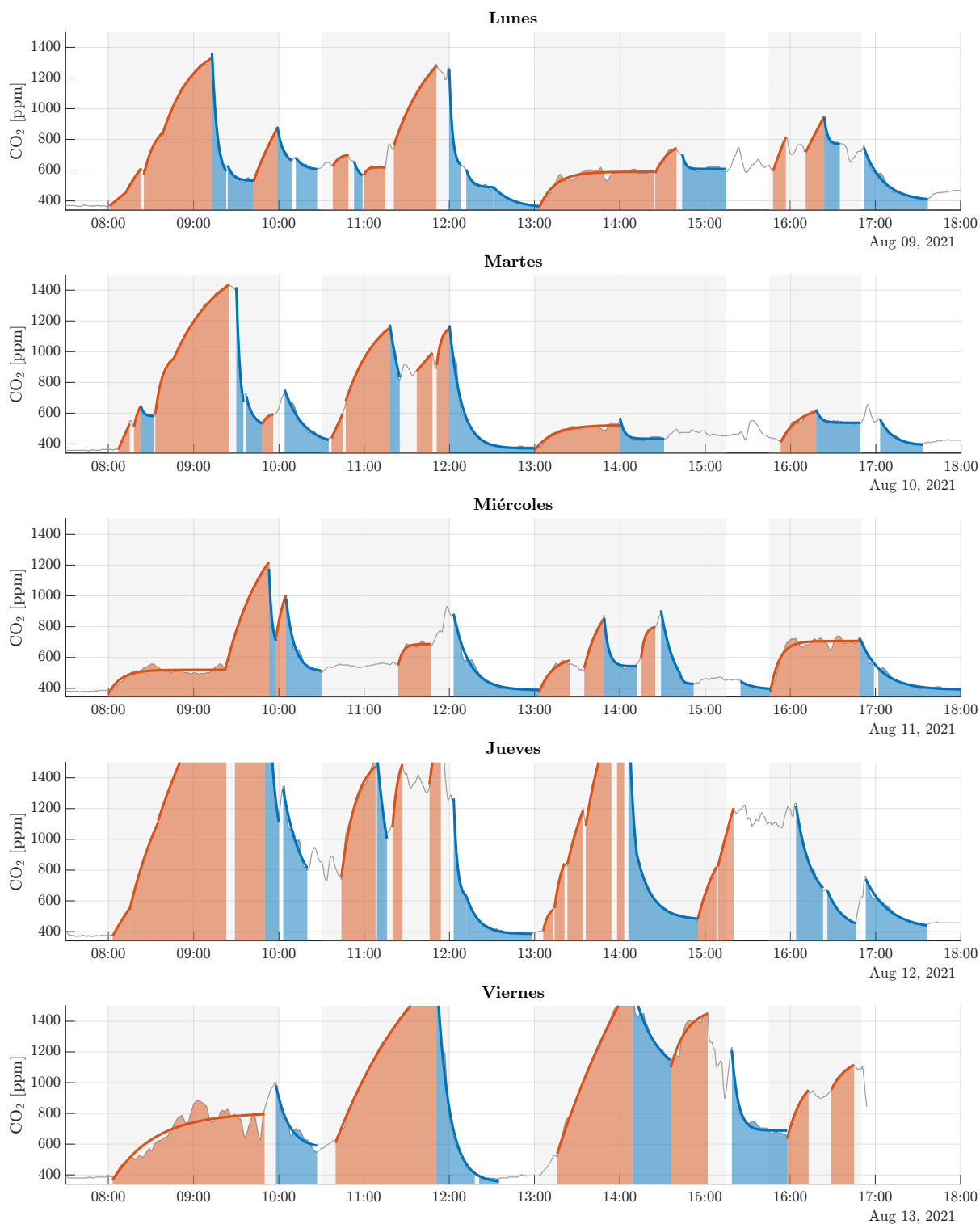


Figura A.7.1 – Resultados de ajuste del modelo de caja para la segunda semana de agosto.

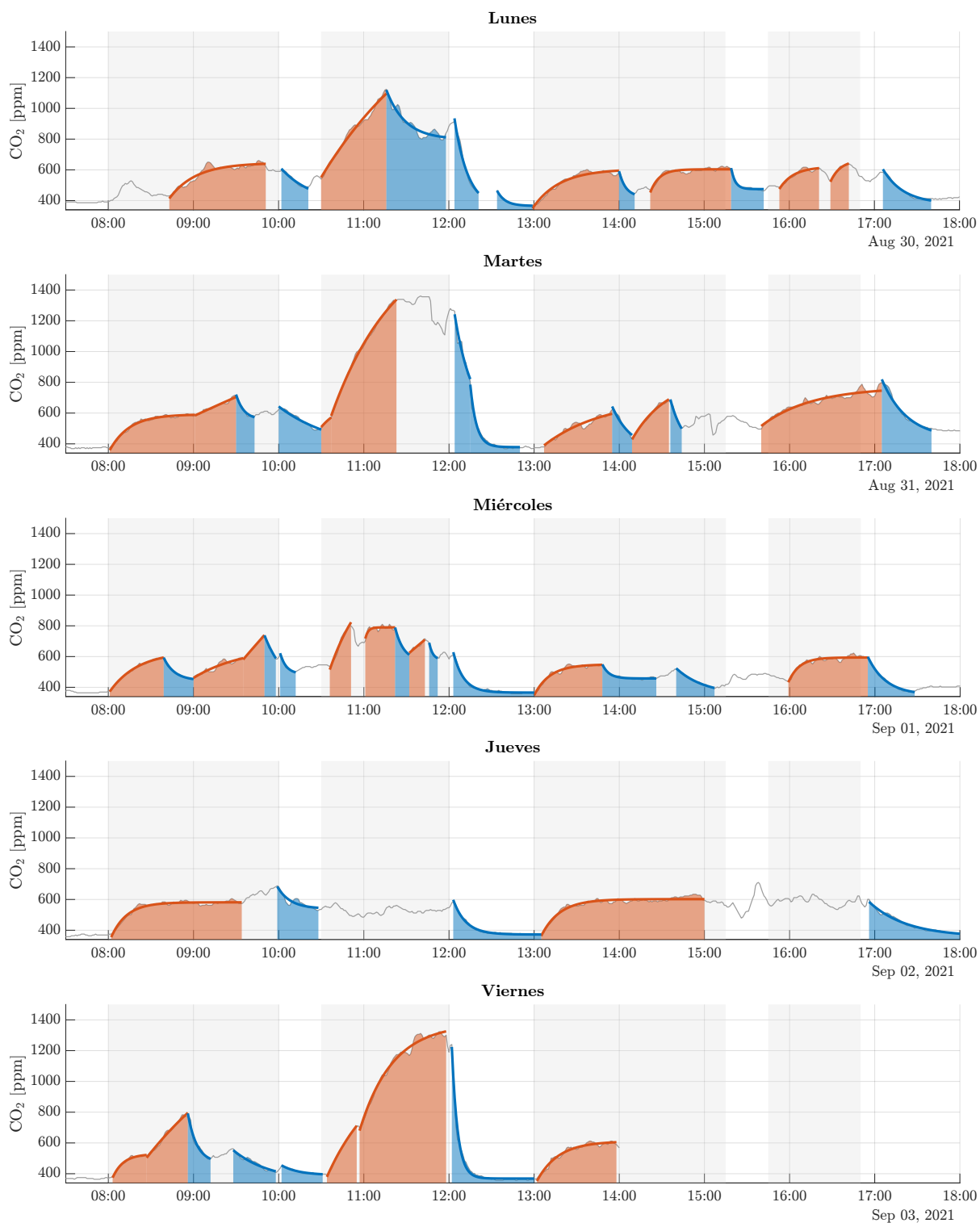


Figura A.7.2 – Resultados de ajuste del modelo de caja para la última semana de agosto / primera semana de setiembre.



Figura A.7.3 – Resultados de ajuste del modelo de caja para la primera semana de octubre.

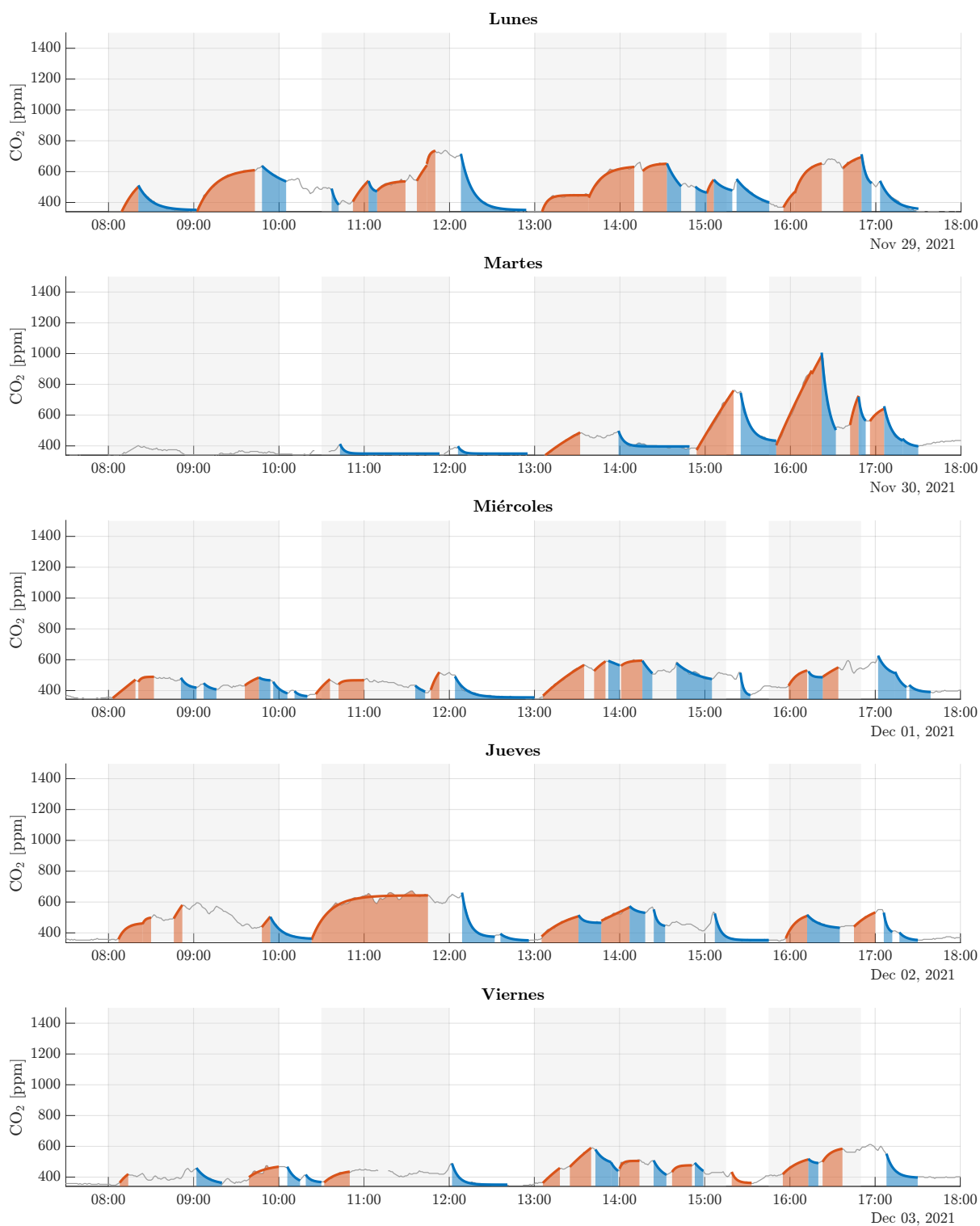


Figura A.7.4 – Resultados de ajuste del modelo de caja para la última semana de noviembre / primera semana de diciembre.

A.8 Gráficos de riesgo semanal

Se muestran a continuación los gráficos de evolución temporal del riesgo de contagio por vía aérea de las semanas analizadas para cada turno de ocupación. Observar que, por claridad, las escalas pueden variar.

A.8.1 Turno matutino

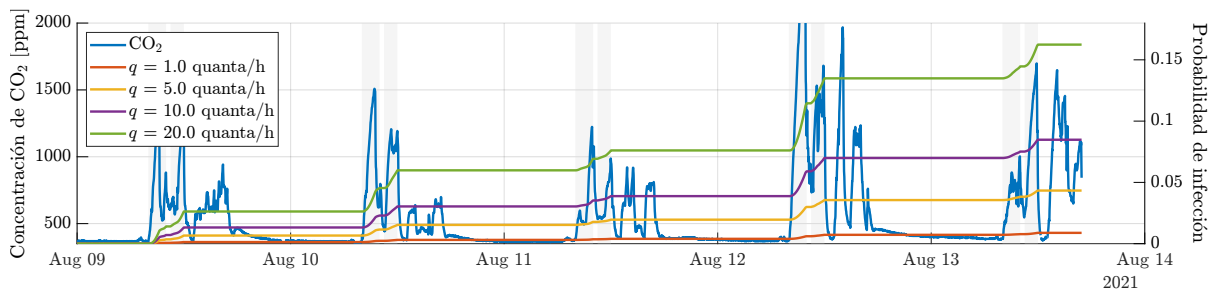


Figura A.8.1 – Estimación del riesgo de contagio para la tercera semana de agosto.

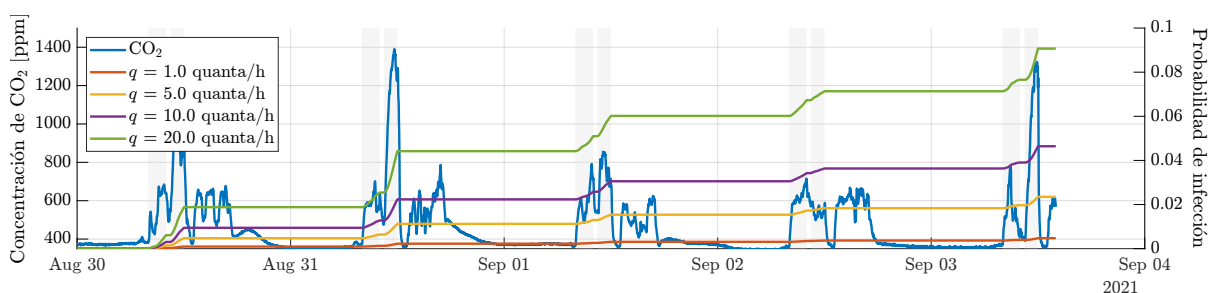


Figura A.8.2 – Estimación del riesgo de contagio para la primera semana de septiembre.

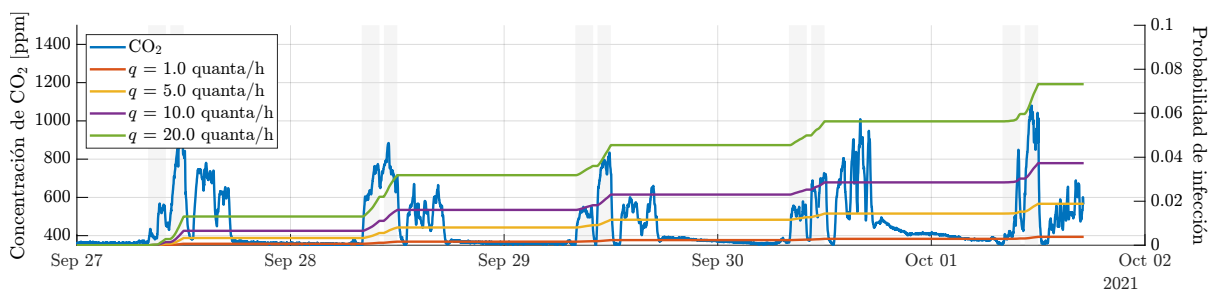


Figura A.8.3 – Estimación del riesgo de contagio para la última semana de septiembre.

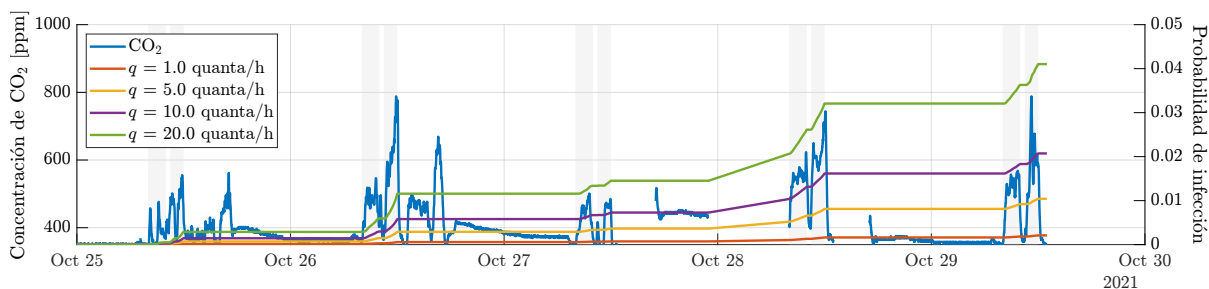


Figura A.8.4 – Estimación del riesgo de contagio para la última semana de octubre.

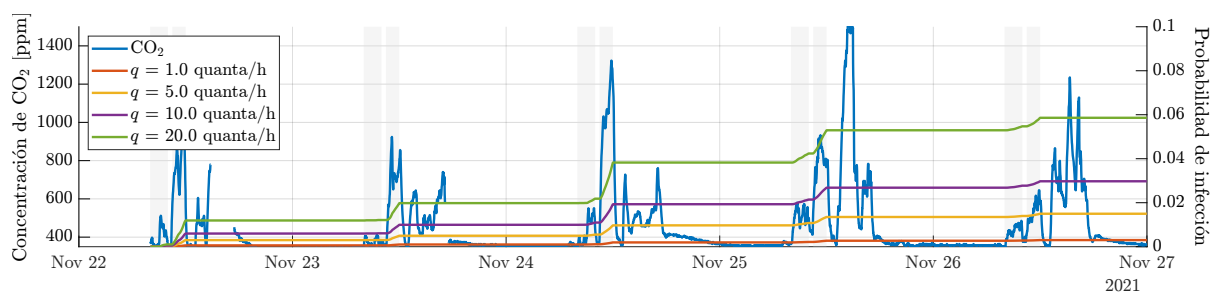


Figura A.8.5 – Estimación del riesgo de contagio para la cuarta semana de noviembre.

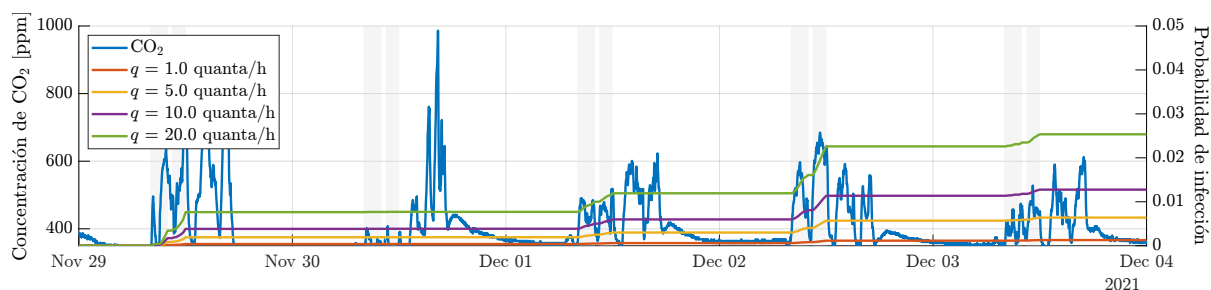


Figura A.8.6 – Estimación del riesgo de contagio para la última semana de noviembre / primera semana de diciembre.

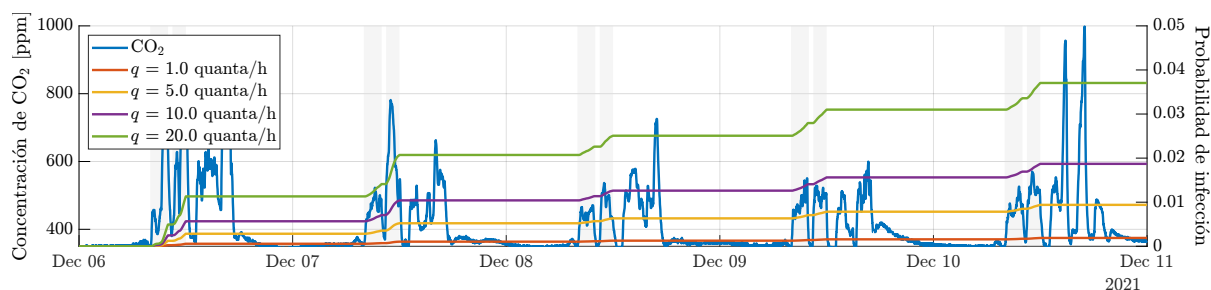


Figura A.8.7 – Estimación del riesgo de contagio para la segunda semana de diciembre.

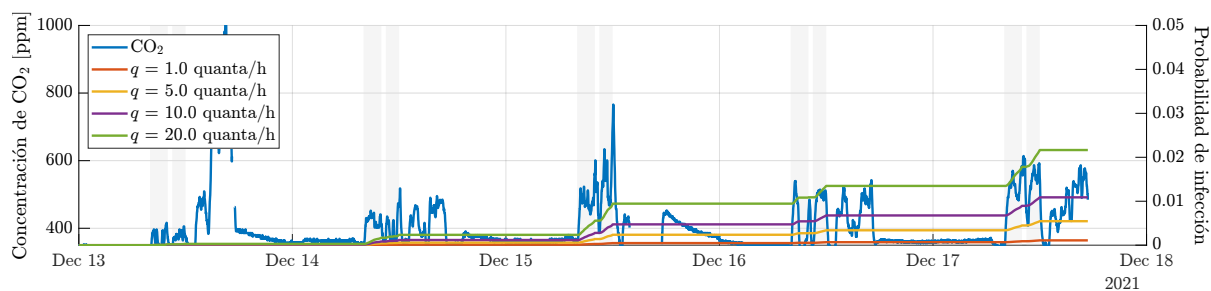


Figura A.8.8 – Estimación del riesgo de contagio para la tercera semana de diciembre.

A.8.2 Turno vespertino

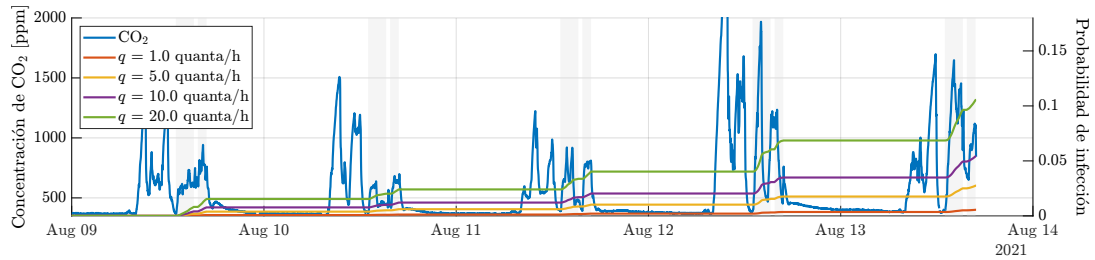


Figura A.8.9 – Estimación del riesgo de contagio para la segunda semana de agosto.

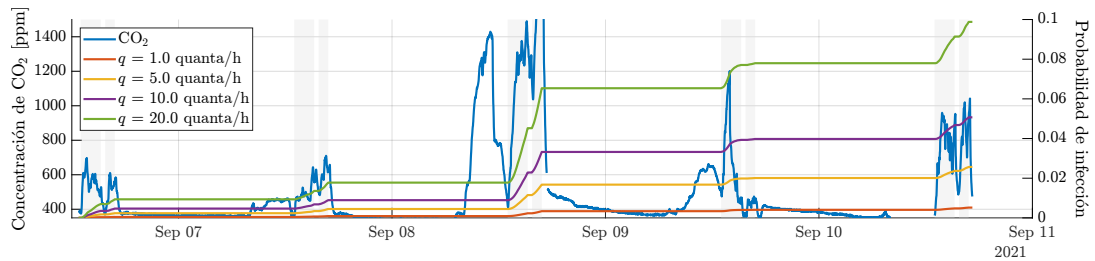


Figura A.8.10 – Estimación del riesgo de contagio para la segunda semana de setiembre.

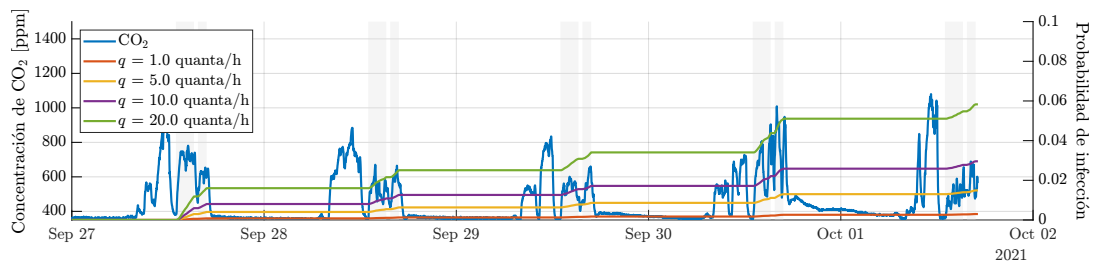


Figura A.8.11 – Estimación del riesgo de contagio para la última semana de setiembre.

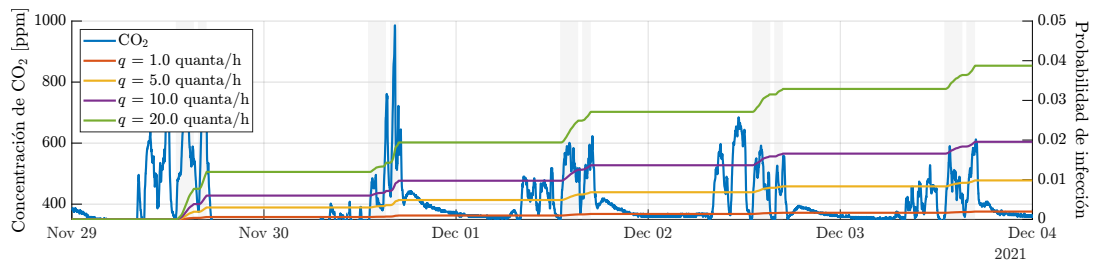


Figura A.8.12 – Estimación del riesgo de contagio para la última semana de noviembre / primera semana de diciembre.

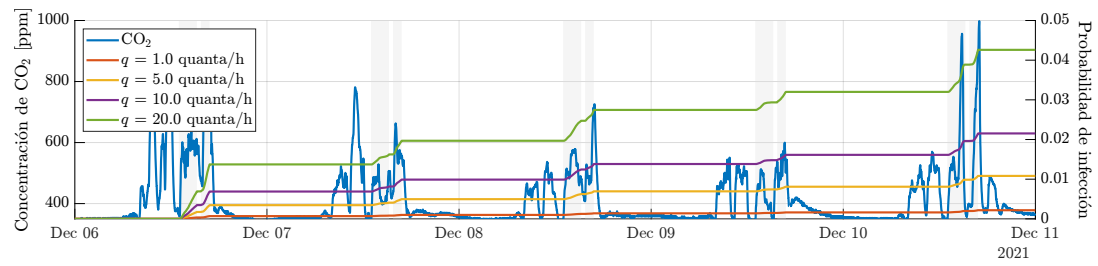
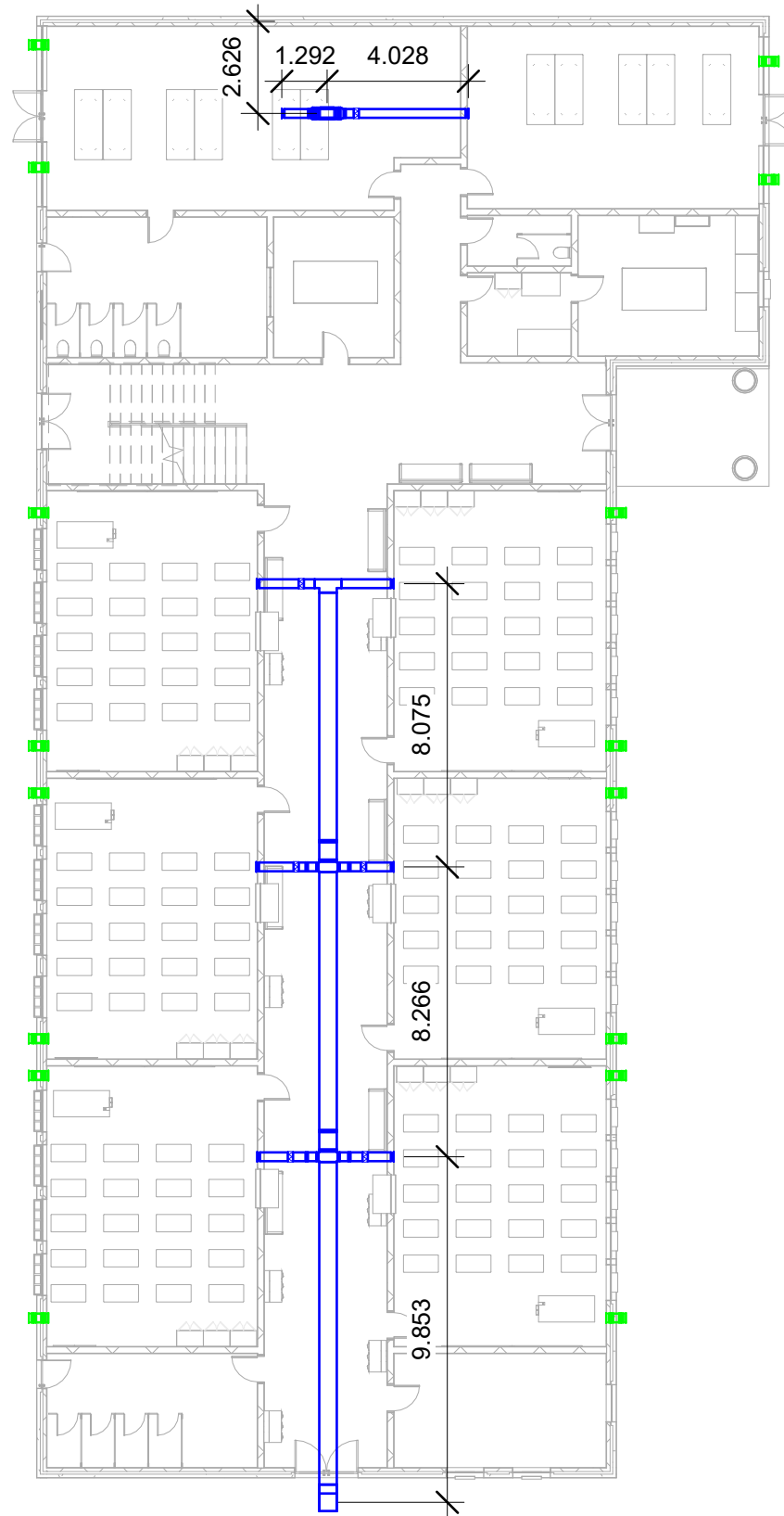


Figura A.8.13 – Estimación del riesgo de contagio para la segunda semana de diciembre.

A.9 Planos del sistema de HVAC proyectado

Se incluyen a continuación los planos de la instalación de HVAC. En azul se señalan los ductos de la instalación de distribución de aire y en verde los registros de extracción.

Patio



Calle Simón Bolívar



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

HVAC - Primer piso

Número de plano HVAC1

Fecha 07/02/22

Dibujado por Autor

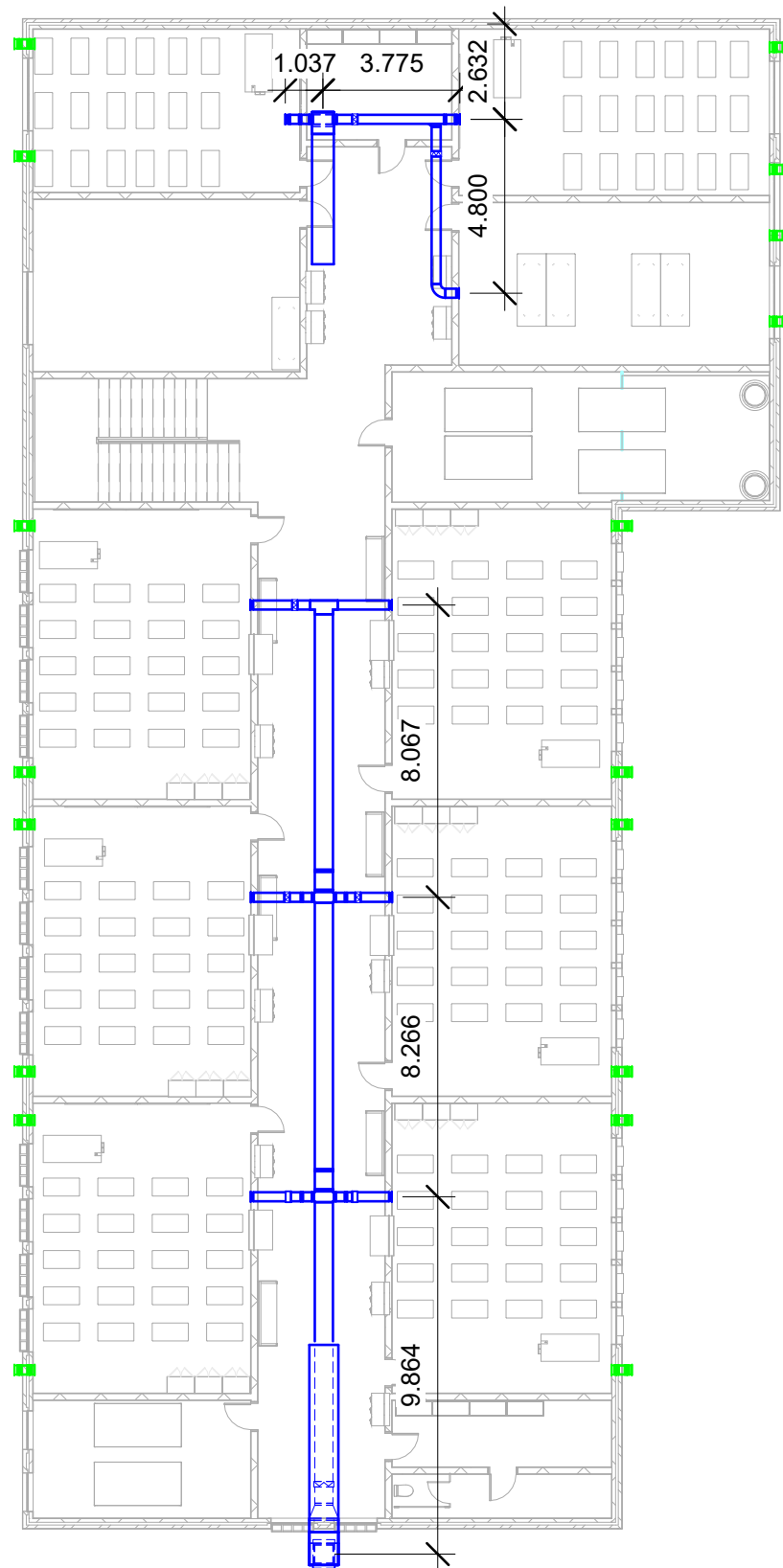
Comprobado por Verificador

Escuela N° 32

Escuela N° 83

Escala 1 : 200

Patio



Calle Simón Bolívar



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



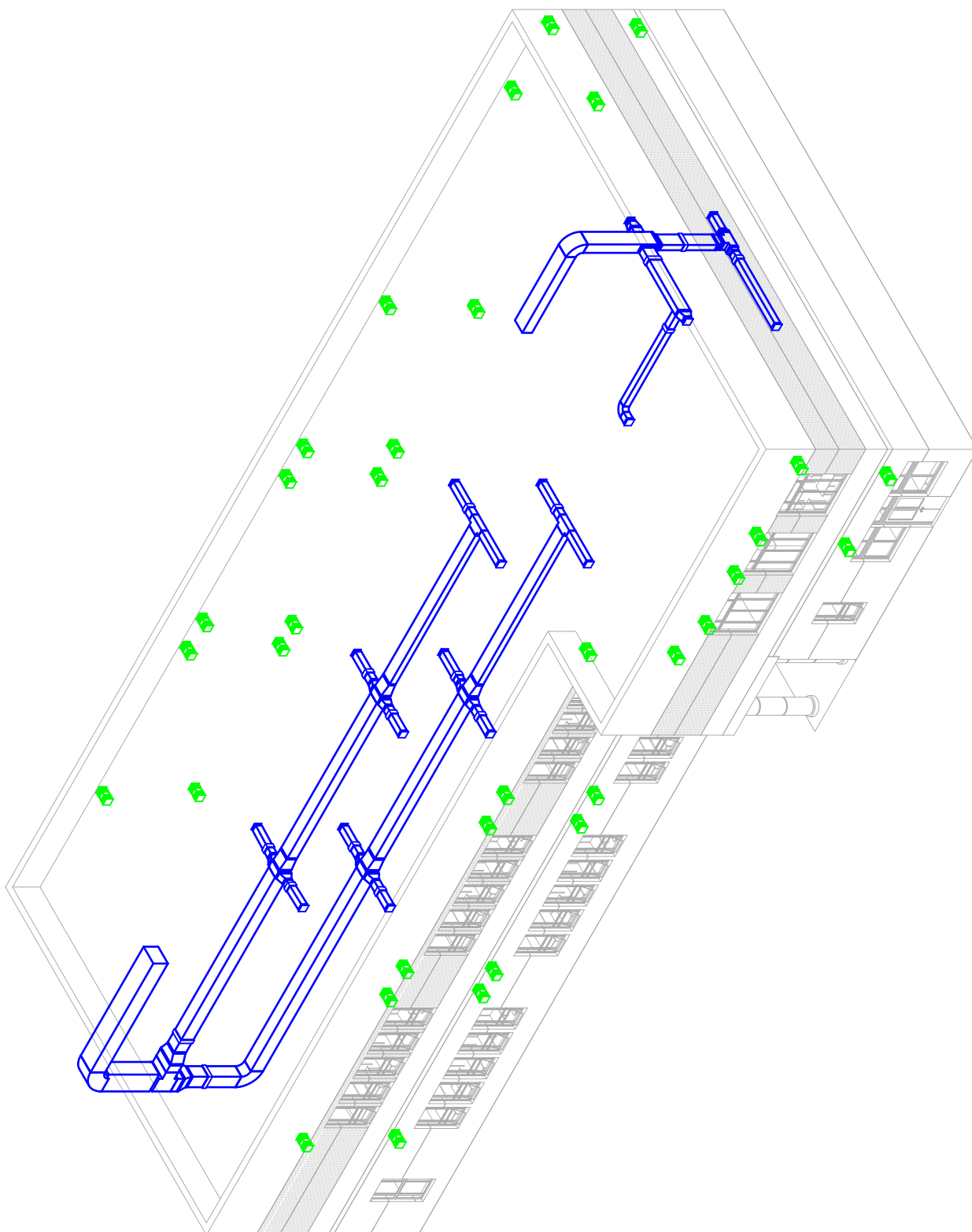
Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

HVAC - Segundo piso

Número de plano	HVAC2	Escuela N° 32
Fecha	07/02/22	Escuela N° 83
Dibujado por	Autor	
Comprobado por	Verificador	Escala 1 : 200



Isometría desde el noreste

1



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ventilación y COVID-19

Grupo Ana Paula Gómez
Andrés Vignolo
Natalia Azul Wener

Tutores Dr. Ing. Martín Draper
Dra. Ing. Mariana Mendina

HVAC - Isometría

Número de plano HVAC3

Fecha 07/02/22

Dibujado por APG

Comprobado por AVC

Escuela N° 32

Escuela N° 83

Escala

B. Anexos

B.1 Plano catastral de la escuela

El siguiente plano releva los padrones de la manzana en la que se emplaza la escuela estudiada (padrón 28804). Fue obtenido del Sistema de Información Geográfica de la de Montevideo (s.f.).

1988

NOMBRE DEL ARCHIVO: 1768.dwg



B.2 Certificados de calibración de los cabezales Aeroqual 500

Los siguientes certificados de calibración de fábrica corresponden a los cabezales utilizados, de acuerdo al siguiente detalle según los números de serie de los cabezales:

- **CE-2001211-011:** cabezal de CO₂ utilizado por el monitor AQ1 (escritorio de la maestra del salón 2).
- **CE-1412201-005:** cabezal de CO₂ utilizado por el monitor AQ2 (sobre el armario al fondo del salón 2).
- **SHPM 5003-6193-001:** cabezal de PM utilizado por el monitor AQ3 (escritorio de la maestra del salón 2).



Aeroqual Limited

460 Rosebank Road, Avondale, Auckland 1026, New Zealand.

Phone: +64-9-623 3013 Fax: +64-9-623 3012

www.aeroqual.com

Calibration Certificate No. 49712

Calibration Date: 19 Feb 2021 12:21

Model: Carbon dioxide 0-5000ppm

Serial No: CE--2001211-011

Environmental Conditions

Temperature 35.5 °C

Relative Humidity 19.3 %

Measurements

Calibration Standard /ppm	0	4,000	0	0
AQL Sensor(Mean) /ppm	0	4,012	0	0
AQL Sensor(Std. Dev) /ppm	0.000	0.000	0.000	0.000

*The Mean and Standard Deviation are calculated from three consecutive readings.

Calibration Standard

This sensor was calibrated against a certified mixture of carbon dioxide in synthetic air diluted with zero air using mass flow controllers with calibrations traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST).

QC Approval: Takao Yamasaki

Date: 05 Oct 2021



Aeroqual Limited

460 Rosebank Road, Avondale, Auckland 1026, New Zealand.

Phone: +64-9-623 3013 Fax: +64-9-623 3012

www.aeroqual.com

Calibration Certificate No. 48555

Calibration Date: 06 Jan 2021 12:28

Model: Carbon dioxide 0-5000ppm

Serial No: CE--1412201-005

Environmental Conditions

Temperature 34.7 °C

Relative Humidity 29.0 %

Measurements

Calibration Standard /ppm	0	4,000	0	0
AQL Sensor(Mean) /ppm	0	3,995	0	0
AQL Sensor(Std. Dev) /ppm	0.000	0.000	0.000	0.000

*The Mean and Standard Deviation are calculated from three consecutive readings.

Calibration Standard

This sensor was calibrated against a certified mixture of carbon dioxide in synthetic air diluted with zero air using mass flow controllers with calibrations traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST).

QC Approval: Takao Yamasaki

Date: 05 Oct 2021



Aeroqual Limited
460 Rosebank Road, Auckland 1026, New Zealand.
Phone: +649-623 3013 Fax: +64-9-623 3012
www.aeroqual.com

Calibration Certificate

Calibration Date: 14 August 2020

Model: PM2.5 PM10 0-1.000 mg/m3

Serial No: SHPM 5003-6193-001

Measurements

	PM2.5 mg/m3	PM10 mg/m3
Reference Zero	0.000	0.000
AQL Sensor Zero	0.000	0.000
Reference Span	0.121	0.170
AQL Sensor Span	0.121	0.165

Calibration Standard

Standard	Manufacturer	Model	Serial number
Optical Particle Counter	Met One Instruments	9722-1	U11996
Test aerosol	ATI	0.54 µm latex microspheres	n/a

QC Approval: _____ TY

Date: _____ 14-Aug-20

B.3 Informe de calibración del módulo de anemómetros Rev C y Rev P

Se incluye a continuación el informe de calibración realizado por personal de DIA a partir de los datos relevados en el Canal de Pruebas Navales y Pesqueras del IMFIA, el día 9 de setiembre de 2021.

Calibración de anemómetros

Fecha: 14/09/2021

Marca: Modern Device

Modelo: Rev C y Rev P

Tipo: Anemómetro de hilo caliente

Parámetros obtenidos de la calibración

Anemómetro 1 – Rev P

Pendiente: $m = 0,308$

Ordenada al origen: $b = 0,066 \text{ m/s}$

Coefficiente de correlación: $R^2 = 0,999$

Incertidumbre estándar de la pendiente: $u_m = 0,098$

Incertidumbre estándar de la ordenada en el origen: $u_b = 0,15 \text{ m/s}$

Coefficiente de correlación entre m y b: $r(m,b) = -0,915$

Anemómetro 2 – Rev C

Pendiente: $m = 0,103$

Ordenada al origen: $b = 0,046 \text{ m/s}$

Coefficiente de correlación: $R^2 = 0,99$

Incertidumbre estándar de la pendiente: $u_m = 0,032$

Incertidumbre estándar de la ordenada en el origen: $u_b = 0,15 \text{ m/s}$

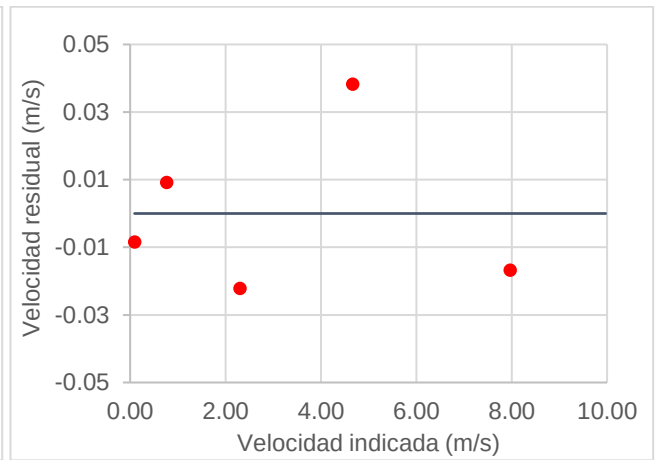
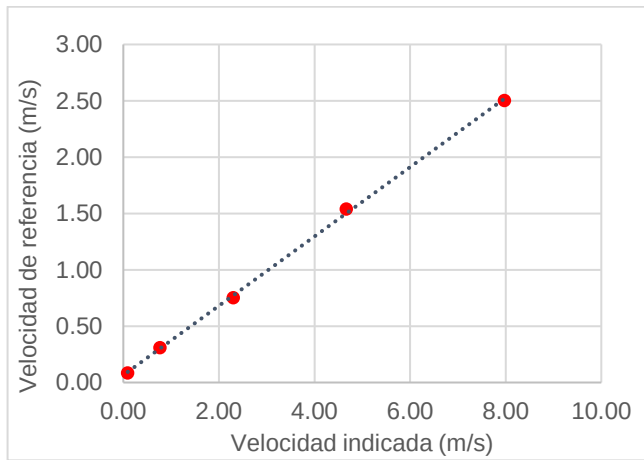
Coefficiente de correlación entre m y b: $r(m,b) = -0,917$

Datos obtenidos de la calibración

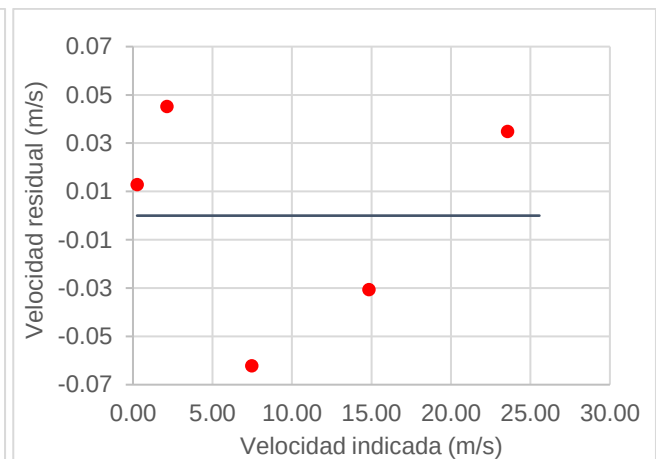
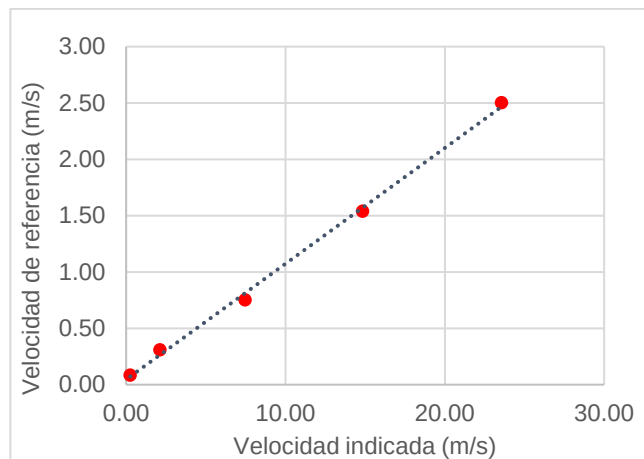
Velocidad de referencia (m/s)	Incertidumbre expandida (m/s)	Indicación del anemómetro 1 (m/s)	Incertidumbre expandida (m/s)	Indicación del anemómetro 2 (m/s)	Incertidumbre expandida (m/s)
0,085	0,02	0,09	0,00	0,26	0,00
0,310	0,05	0,77	0,01	2,13	0,04
0,752	0,19	2,30	0,05	7,48	0,14
1,540	0,29	4,67	0,03	14,84	0,09
2,501	0,84	7,97	0,07	23,56	0,13

Gráficos

Anemómetro 1 – Rev P

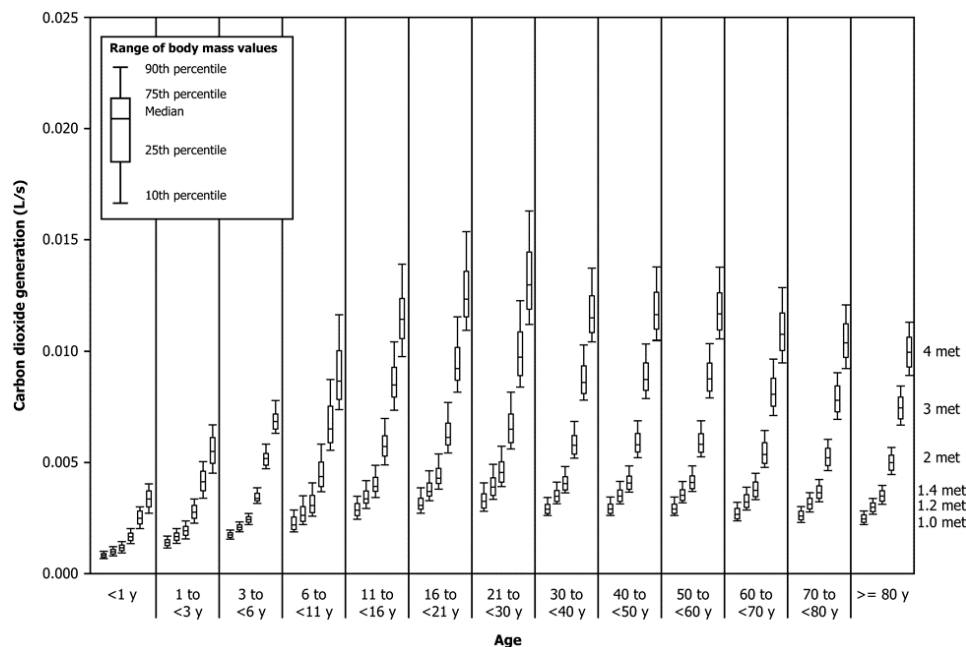


Anemómetro 2 – Rev C

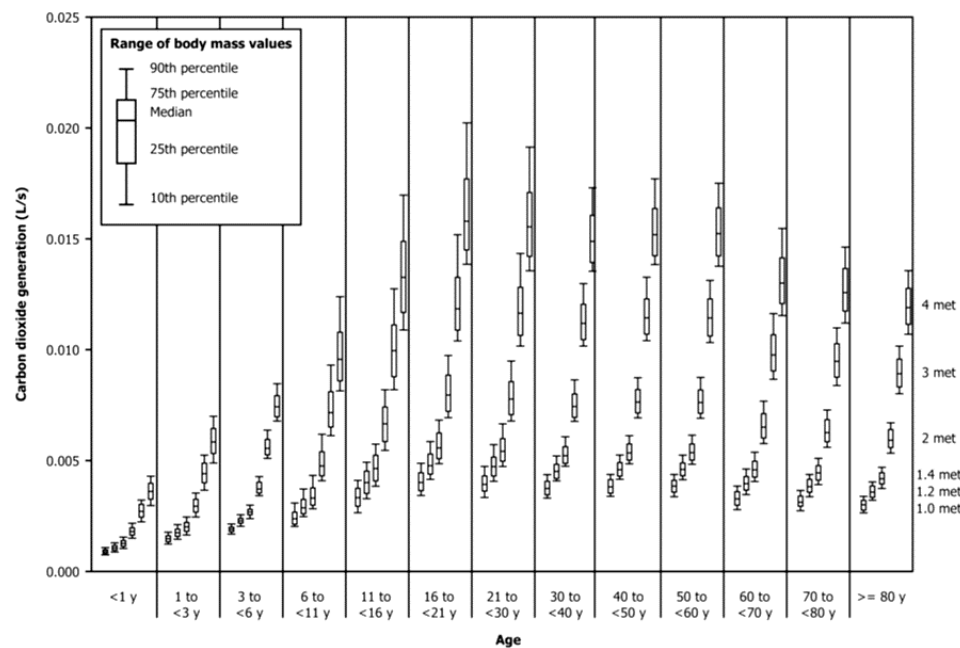


B.4 Estimación de la tasa de generación de dióxido de carbono

La norma ASTM D6245 - 18 (2018) presenta los siguientes gráficos, que muestran la variabilidad de la tasa de generación de CO_2 de una persona según su masa corporal en función del sexo, la edad y la actividad metabólica. Cada caja muestra la variabilidad según los percentiles de masa corporal para un rango etario y un nivel de actividad metabólica por unidad de superficie corporal.



(a) Mujeres



(b) Hombres

Figura B.4.1 – Variabilidad de la tasa de generación de CO_2 por persona según su masa corporal en función del sexo, la edad y el nivel de actividad metabólica. Tomado de la norma ASTM D6245 - 18 (2018).

En la figura anterior, la actividad metabólica por unidad de superficie es cuantificada en términos de MET, un coeficiente adimensionado. La norma ASTM D6245 - 18 (2018) indica que 1,3 MET corresponden a un oficinista sentado en un escritorio, pero no detalla estimaciones específicas para niños de escuela. Saint-Maurice *et al.* (2015) señalan que los valores para adultos no son adecuados para niños. Batterman (2017) indica que las estimaciones más recientes implican utilizar 1,4 MET para niños sentados estudiando, pero que el rango de actividad sedentaria, que para adultos es en general inferior a entre 1,0 MET y 1,5 MET puede llegar a elevarse hasta 2,0 MET.

Por más detalles sobre cómo estimar la tasa de emisión, consultar la norma ASTM D6245 - 18 (2018) y el trabajo de Batterman (2017).

B.5 Ábaco de pérdida de carga distribuida para ductos de sección circular

Se incluye a continuación el ábaco de pérdida de carga distribuida para el diseño de ductos de sección circular, tomado de la ASHRAE (2021).

Se señalan los puntos de diseño para las instalaciones A y B en azul y en naranja, respectivamente.

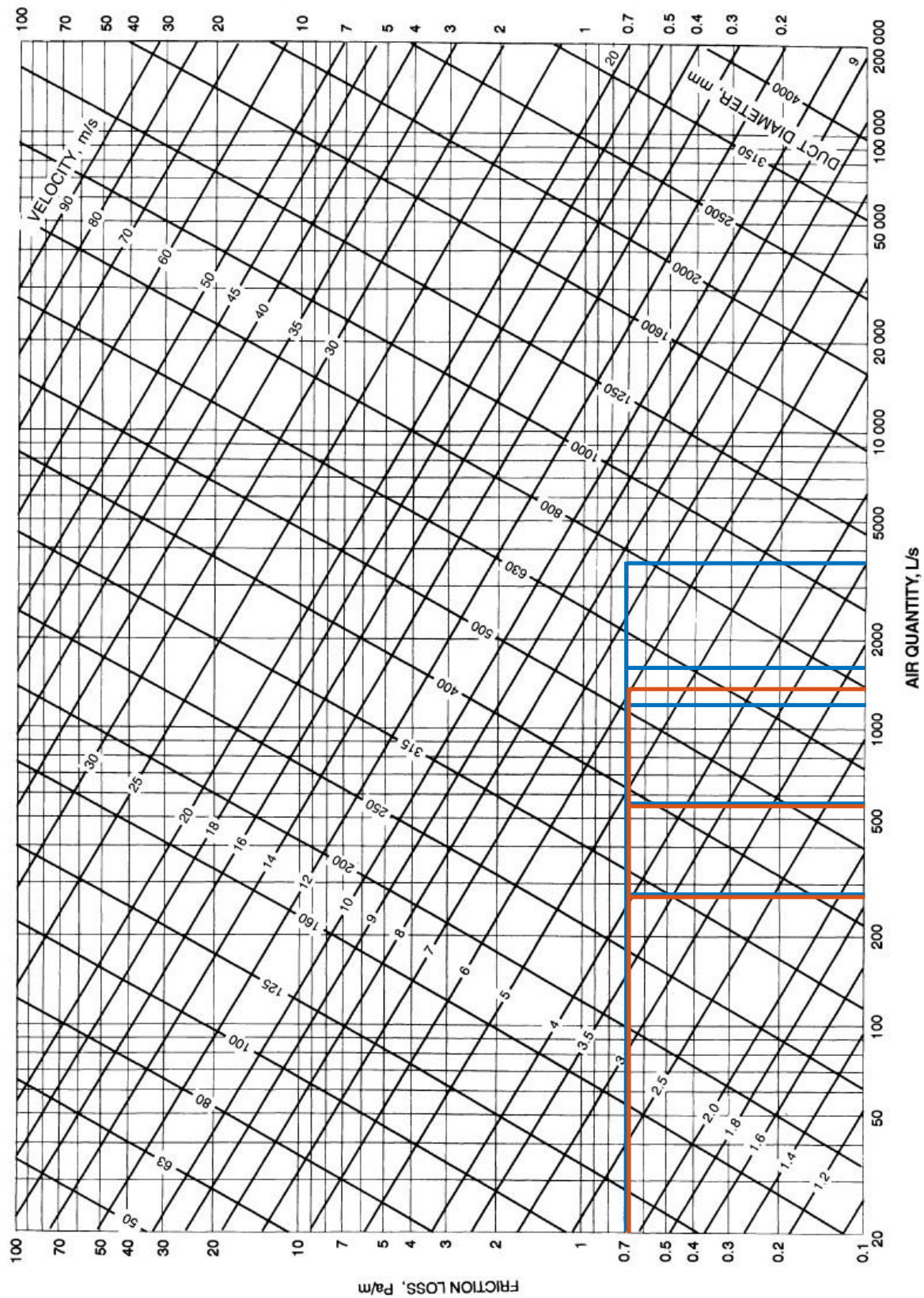


Fig. 9 Friction Chart for Round Duct ($\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$ and $\varepsilon = 0.09 \text{ mm}$)

B.6 Tabla para selección de secciones rectangulares equivalentes

Se incluye a continuación el ábaco para la selección de secciones rectangulares equivalentes a una cierta sección circular. La equivalencia de ductos mantiene invariables el caudal, la pérdida de carga distribuida por unidad de longitud y la longitud.

Las dimensiones de los posibles ductos rectangulares son valores comerciales estandarizados.

Table 3 Circular Equivalents of Rectangular Duct for Equal Friction and Airflow*										
Side Lengths, mm	Length of One Side of Rectangular Duct a , mm									
	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1 000
Circular Duct Diameter, mm										
200	152	189	219							
250	169	210	244	273						
300	183	229	266	299	328					
400	207	260	305	343	378	437				
500		287	337	381	420	488	547			
600		310	365	414	457	533	598	656		
800			414	470	520	609	687	755	875	
1 000				517	574	674	762	840	976	1 093
1 200					620	731	827	914	1 066	1 196
1 400						781	886	980	1 146	1 289
1 600						827	939	1 041	1 219	1 373
1 800							988	1 096	1 286	1 451
2 000							1 034	1 147	1 348	1 523

*Table based on Equation (25).

Figura B.6.1 – Tabla de selección de ductos rectangulares equivalentes a un cierto ducto circular. Tomado de ASHRAE (2021).

B.7 Tablas de coeficientes de pérdida de carga localizada

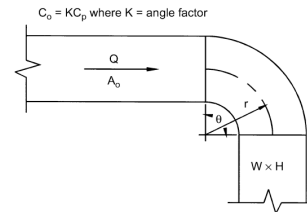
Se incluyen a continuación las tablas utilizadas para estimar los coeficientes de pérdida de carga localizada para algunos accesorios de los ductos de la instalación de HVAC. Dichas tablas fueron extraídas de ASHRAE (2001).

C es el coeficiente de pérdida de carga. Los subíndices identifican la sección a la cual corresponde la pérdida y a cuya velocidad se encuentra referido el coeficiente.

CR3-1 Elbow, Smooth Radius, Without Vanes

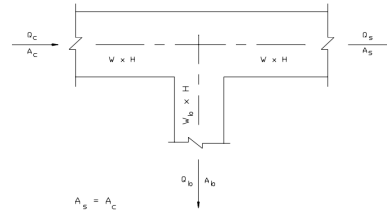
C_p Values											
r/W	H/W										
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00
0.50	1.53	1.38	1.29	1.18	1.06	1.00	1.00	1.06	1.12	1.16	1.18
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.00	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21
1.50	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.00	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

Angle Factor K											
θ	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K	0.00	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40

SR5-5 Tee of the Type $A_s + A_b > A_c$, $A_s = A_c$ Diverging

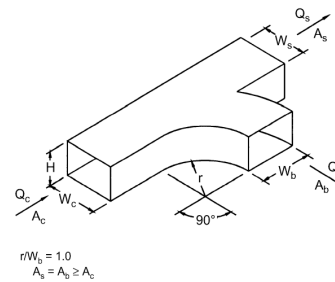
C_b Values										
A_b/A_c	Q_b/Q_c									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
0.1	2.06	1.20	0.99	0.87	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86	
0.2	5.16	1.92	1.28	1.03	0.99	0.94	0.92	0.90	0.89	
0.3	10.26	3.13	1.78	1.28	1.16	1.06	1.01	0.97	0.94	
0.4	15.84	4.36	2.24	1.48	1.11	0.88	0.80	0.75	0.72	
0.5	24.25	6.31	3.03	1.89	1.35	1.03	0.91	0.84	0.78	
0.6	34.56	8.73	4.04	2.41	1.64	1.22	1.04	0.94	0.87	
0.7	46.55	11.51	5.17	3.00	2.00	1.44	1.20	1.06	0.96	
0.8	60.80	14.72	6.54	3.72	2.41	1.69	1.38	1.20	1.07	

Q_c/Q_c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
C_i	32.00	6.50	2.22	0.87	0.40	0.17	0.03	0.00

SR5-1 Smooth Wye of Type $A_s + A_b \geq A_c$, Branch 90° to Main, Diverging

C_b Values										
A_s/A_c	A_b/A_c	Q_b/Q_c								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.50	0.25	3.44	0.70	0.30	0.20	0.17	0.16	0.16	0.17	0.18
	0.50	11.00	2.37	1.06	0.64	0.52	0.47	0.47	0.47	0.48
	1.00	60.00	13.00	4.78	2.06	0.96	0.47	0.31	0.27	0.26
0.75	0.25	2.19	0.55	0.35	0.31	0.33	0.35	0.36	0.37	0.39
	0.50	13.00	2.50	0.89	0.47	0.34	0.31	0.32	0.36	0.43
	1.00	70.00	15.00	5.67	2.62	1.36	0.78	0.53	0.41	0.36
1.00	0.25	3.44	0.78	0.42	0.33	0.30	0.31	0.40	0.42	0.46
	0.50	15.50	3.00	1.11	0.62	0.48	0.42	0.40	0.42	0.46
	1.00	67.00	13.75	5.11	2.31	1.28	0.81	0.59	0.47	0.46

C_i Values										
A_s/A_c	A_b/A_c	Q_b/Q_c								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.50	0.25	8.75	1.62	0.50	0.17	0.05	0.00	-0.02	-0.02	0.00
	0.50	7.50	1.12	0.25	0.06	0.05	0.09	0.14	0.19	0.22
	1.00	5.00	0.62	0.17	0.08	0.08	0.09	0.12	0.15	0.19
0.75	0.25	19.13	3.38	1.00	0.28	0.05	-0.02	-0.02	0.00	0.06
	0.50	20.81	3.23	0.75	0.14	-0.02	-0.05	-0.05	-0.02	0.03
	1.00	16.88	2.81	0.63	0.11	-0.02	-0.05	0.01	0.00	0.07
1.00	0.25	46.00	9.50	3.22	1.31	0.52	0.14	-0.02	-0.05	-0.01
	0.50	35.00	6.75	2.11	0.75	0.24	0.00	-0.10	-0.09	-0.04
	1.00	38.00	7.50	2.44	0.81	0.24	-0.03	-0.08	-0.06	-0.02

SR5-14 Wye, Symmetrical, Dovetail, $Q_b/Q_c = 0.5$, Diverging

A_b/A_c	0.5	1.0
	0.30	1.00
C_b		
0.30		

Branches are identical: $Q_{b1} = Q_{b2} = Q_b$, and $C_{b1} = C_{b2} = C_b$

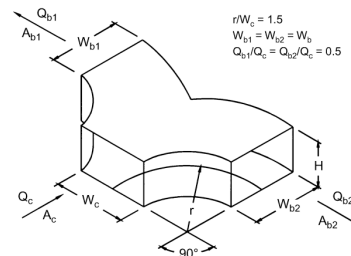


Figura B.7.1 – Tablas para el cálculo de coeficiente de pérdida de carga de diversos accesorios. Adaptado de ASHRAE (2001).

B.8 Guía técnica del equipo para la instalación A

Se incluyen a continuación algunas páginas de la guía técnica del equipo elegido para la instalación A Johnson Controls (s.f.).

Physical Data

J06 thru 12XP Physical Data

Component	Models				
	J06XP	J07XP	J08XP	J10XP	J12XP
Nominal Tonnage	6.5	7.5	8.5	10	12.5
AHRI COOLING PERFORMANCE					
Gross Capacity @ AHRI A point (Mbh)	80000	92550	105600	122000	153000
AHRI net capacity (Mbh)	78000	90000	100000	114000	145000
EER	12.0	11.4	11.2	11.0	10.6
IEER with Constant Volume	12.2	12.2	12.4	11.6 ¹	10.8 ¹
IEER with Intellispeed	13.2	12.6	13.5	13.5	13.5
Nominal CFM	2600	3000	3750	3750	4700
System power (KW)	6.78	8.18	9.27	10.45	13.59
Refrigerant type	R-410A	R-410A	R-410A	R-410A	R-410A
Refrigerant charge (lb-oz)					
System 1	14-2	13-0	13-12	12-14	17-2
System 2	12-10	13-2	13-13	12-12	15-8
AHRI HEATING PERFORMANCE					
47°F capacity rating (Mbh)	75.0	88.0	94.0	106.0	135.0
System power (KW) / COP	6.2 / 3.40	7.7 / 3.40	7.9 / 3.40	8.6 / 3.40	13.2 / 3.2
17°F capacity rating (Mbh)	43.0	51.0	53.0	59.0	90.0
System power (KW) / COP	5.7 / 2.25	6.4 / 2.25	6.9 / 2.25	7.8 / 2.25	12.1 / 2.05
DIMENSIONS (inches)					
Length	89	89	89	89	119-7/16
Width	59	59	59	59	59
Height	50-3/4	50-3/4	50-3/4	50-3/4	50-3/4
OPERATING WT. (lbs.)	1080	1090	1137	1135	1403
COMPRESSORS²					
Type	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll
Quantity	2	2	2	2	2
Unit Capacity Steps (%)	50 / 100	50 / 100	50 / 100	50 / 100	50/100
CONDENSER COIL DATA					
Face area (Sq. Ft.)	29.0	29.0	29.0	29.0	47.5
Rows	2	2	2	2	2
Fins per inch	16	16	16	16	15
Tube diameter (in.)	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8
Circuitry Type	Split-face	Split-face	Split-face	Split-face	Split-face
Refrigerant control	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV
EVAPORATOR COIL DATA					
Face area (Sq. Ft.)	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
Rows	4	4	4	4	4
Fins per inch	15	15	15	15	15
Tube diameter	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8
Circuitry Type	Split-face	Split-face	Split-face	Split-face	Split-face
Refrigerant control	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV

J06 thru 12XP Physical Data (Continued)

Component	Models									
	J06XP		J07XP		J08XP		J10XP		J12XP	
Nominal Tonnage	6.5		7.5		8.5		10		12.5	
CONDENSER FAN DATA										
Quantity of Fans	2		2		2		2		4	
Fan diameter (Inch)	24		24		24		24		24	
Type	Prop		Prop		Prop		Prop		Prop	
Drive Type	Direct		Direct		Direct		Direct		Direct	
Quantity of motors	2		2		2		2		4	
Motor HP each	1/3		1/3		1/3		1/3		1/3	
No. speeds	1		1		1		1		1	
RPM	850		850		850		850		850	
Nominal total CFM	6800		6800		6800		6800		14000	
BELT DRIVE EVAP FAN DATA										
Quantity	1		1		1		1		1	
Fan Size (Inch)	15 x 15		15 x 15		15 x 15		15 x 15		15 x 15	
Type	Centrifugal		Centrifugal		Centrifugal		Centrifugal		Centrifugal	
Motor Sheave	VL40	VL44	1VL40	1VM50	1VP50	1VP50	1VM50	1VM50	1VM50	1VP56
Blower Sheave	AK84	AK71	AK69	AK69	AK89	AK74	AK84	AK74	AK74	BK77
Belt	A54	A52	A52	A54	A56	A54	A56	A54	A54	BX56
Motor HP each	1-1/2	2	1-1/2	3	2	3	2	3	3	5
RPM	1725	1725	1725	1725	1725	1725	1725	1725	1725	1725
Frame size	56	56	56	56	56	56	56	56	56	184T
FILTERS										
Quantity - Size	4 - (24 x 20 x 2) ^{3,4}		4 - (24 x 20 x 2) ^{3,4}		4 - (24 x 20 x 2) ^{3,4}		4 - (24 x 20 x 2) ^{3,4}		4 - (24 x 20 x 2) ^{3,4}	
	4 - (24 x 20 x 2) ⁵		4 - (24 x 20 x 4) ⁵		4 - (24 x 20 x 4) ⁵		4 - (24 x 20 x 2) ⁵		4 - (24 x 20 x 4) ⁵	

1. Does not meet DOE 2018 minimum efficiency requirements.
2. J06XP, J07XP, J08XP, J10XP, J12XP have crankcase heaters standard
3. 2 In. Throwaway, Standard, MERV (Minimum Efficiency Reporting Value) 3.
4. 2 In. Pleated, Optional, MERV 8.
5. 4 In. Pleated, Optional, MERV 13.

J06 thru 12XP Unit Limitations

Size (Tons)	Model	Unit Voltage	SCCR (kVA)	Unit Limitations		
				Applied Voltage		Outdoor DB Temp
				Min	Max	Max (°F)
J06 (6.5)	XP	208/230-3-60	5	187	252	125
		460-3-60	5	432	504	125
		575-3-60	5	540	630	125
J07 (7.5)	XP	208/230-3-60	5	187	252	125
		460-3-60	5	432	504	125
		575-3-60	5	540	630	125
J08 (8.5)	XP	208/230-3-60	5	187	252	125
		460-3-60	5	432	504	125
		575-3-60	5	540	630	125
J10 (10)	XP	208/230-3-60	5	187	252	125
		460-3-60	5	432	504	125
		575-3-60	5	540	630	125
J12 (12.5)	XP	208/230-3-60	5	187	252	125
		460-3-60	5	432	504	125
		575-3-60	5	540	630	125

J06 thru 12XP Heating Capacities**J06 thru 12XP**

Size (Tons)	Model	Air Over Evaporator Coil		Capacity ¹ & kW	Outdoor Temperature (°F @ 72% RH)							
		CFM	DB (°F)		-10	0	10	20	30	40	50	60
J06 (6.5)	XP	1950	55	MBH	10.1	21.7	33.3	44.8	56.4	68.0	79.5	91.1
				kW	4.10	4.30	4.50	4.70	4.89	5.09	5.29	5.49
			70	MBH	4.8	16.4	28.0	39.5	51.1	62.7	74.2	85.8
				kW	4.95	5.15	5.35	5.55	5.75	5.94	6.14	6.34
			80	MBH	0.9	12.5	24.1	35.7	47.2	58.8	70.4	81.9
				kW	5.54	5.74	5.94	6.14	6.33	6.53	6.73	6.93
		2600	55	MBH	13.4	25.0	36.6	48.1	59.7	71.3	82.8	94.4
				kW	3.63	3.83	4.03	4.22	4.42	4.62	4.82	5.02
			70	MBH	8.0	19.6	31.2	42.7	54.3	65.9	77.4	89.0
				kW	4.45	4.65	4.85	5.05	5.24	5.44	5.64	5.84
			80	MBH	4.3	15.8	27.4	39.0	50.5	62.1	73.7	85.2
				kW	5.07	5.27	5.47	5.67	5.86	6.06	6.26	6.46
		3250	55	MBH	13.8	25.3	36.9	48.5	60.0	71.6	83.2	94.7
				kW	3.25	3.45	3.65	3.85	4.05	4.24	4.44	4.64
			70	MBH	8.5	20.0	31.6	43.2	54.7	66.3	77.9	89.5
				kW	4.11	4.30	4.50	4.70	4.90	5.10	5.29	5.49
			80	MBH	4.6	16.2	27.7	39.3	50.9	62.4	74.0	85.6
				kW	4.69	4.89	5.09	5.29	5.48	5.68	5.88	6.08
J07 (7.5)	XP	2250	55	MBH	17.4	29.3	41.1	53.0	64.9	76.7	88.6	100.5
				KW	5.0	5.2	5.4	5.6	5.9	6.1	6.3	6.5
			70	MBH	15.4	27.3	39.1	51.0	62.8	74.7	86.6	98.4
				KW	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.4	7.6
			80	MBH	13.0	24.9	36.7	48.6	60.4	72.3	84.2	96.0
				KW	6.9	7.1	7.3	7.5	7.7	7.9	8.1	8.4
		3000	55	MBH	20.1	32.0	43.8	55.7	67.6	79.4	91.3	103.2
				KW	4.4	4.6	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9
			70	MBH	18.0	29.9	41.8	53.6	65.5	77.3	89.2	101.1
				KW	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3	6.6	6.8	7.0
			80	MBH	15.9	27.7	39.6	51.5	63.3	75.2	87.1	98.9
				KW	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
		3750	55	MBH	21.2	33.0	44.9	56.7	68.6	80.5	92.3	104.2
				KW	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.1	5.3	5.5
			70	MBH	19.1	31.0	42.9	54.7	66.6	78.5	90.3	102.2
				KW	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3	6.6
			80	MBH	16.7	28.6	40.5	52.3	64.2	76.1	87.9	99.8
				KW	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3
J08 (8.5)	XP	2550	55	MBH	9.4	22.3	35.1	48.0	60.8	73.7	86.5	99.4
				KW	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3
			70	MBH	12.2	25.1	37.9	50.8	63.7	76.5	89.4	102.2
				KW	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3	7.5
			80	MBH	11.1	24.0	36.8	49.7	62.5	75.4	88.2	101.1
				KW	6.9	7.1	7.3	7.5	7.7	7.9	8.2	8.4
		3400	55	MBH	14.9	27.8	40.6	53.5	66.3	79.2	92.0	104.9
				KW	4.3	4.5	4.7	4.9	5.2	5.4	5.6	5.8
			70	MBH	17.7	30.6	43.4	56.3	69.1	82.0	94.8	107.7
				KW	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0
			80	MBH	16.6	29.4	42.3	55.1	68.0	80.8	93.7	106.6
				KW	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
		4250	55	MBH	17.2	30.1	42.9	55.8	68.6	81.5	94.3	107.2
				KW	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4
			70	MBH	20.0	32.9	45.7	58.6	71.4	84.3	97.1	110.0
				KW	5.2	5.4	5.6	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7
			80	MBH	18.9	31.8	44.6	57.5	70.3	83.2	96.0	108.9
				KW	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3	7.5

Airflow Performance

J06 thru 12XP Side Duct Application

J06XP (6.5 Ton) Side Duct

Air Flow (CFM)	Available External Static Pressure - IWG ¹																							
	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4		1.6		1.8		2.0					
	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP				
	FS ⁴				Standard 1.5 HP & Drive						Hi Static 2 HP & Drive													
1800	441	0.44	552	0.54	639	0.63	719	0.72	785	0.81	859	0.99	920	1.16	966	1.25	1018	1.35	1066	1.43				
2000	470	0.48	571	0.59	654	0.69	730	0.79	795	0.89	870	1.09	932	1.25	978	1.35	1030	1.44	1078	1.53				
2200	500	0.54	591	0.66	669	0.76	743	0.87	806	0.97	882	1.18	944	1.35	990	1.44	1042	1.54	1090	1.62				
2400	529	0.60	612	0.73	686	0.85	756	0.96	819	1.07	894	1.29	956	1.45	1002	1.55	1054	1.64	1102	1.73				
2600	558	0.68	635	0.82	705	0.94	771	1.05	832	1.17	906	1.40	968	1.56	1014	1.66	1066	1.75	1114	1.84				
2800	587	0.78	658	0.92	725	1.04	788	1.16	847	1.29	918	1.51	980	1.68	1026	1.77	1078	1.87	1126	1.95				
3000	616	0.88	683	1.02	746	1.15	806	1.28	863	1.41	931	1.63	992	1.80	1038	1.89	1090	1.99	1138	2.07				
3200	645	1.00	710	1.14	768	1.27	825	1.41	879	1.55	943	1.76	1005	1.92	1051	2.02	1103	2.12	1151	2.20				
3400	674	1.14	737	1.27	792	1.40	846	1.55	897	1.70	956	1.89	1018	2.06	1064	2.15	1116	2.25	-	-				
	FS ⁴																							

1. Blower performance includes gas heat exchangers and 2" filters. See STATIC RESISTANCE table for additional applications.
2. See RPM SELECTION table to determine desired motor sheave setting and to determine the maximum continuous BHP.
3. kW = BHP x .932.
4. Field Supplied Drive.

J07XP (7.5 Ton) Side Duct

Air Flow (CFM)	Available External Static Pressure - IWG ¹																			
	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4		1.6		1.8		2.0	
	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
	FS ⁴				Standard 1.5 HP & Drive								Hi Static 3 HP & Drive							
2000	-	-	656	0.24	711	0.48	768	0.73	826	0.96	886	1.19	945	1.41	1003	1.61	1058	1.79	1110	1.95
2200	619	0.07	670	0.32	724	0.57	781	0.81	840	1.04	899	1.27	959	1.49	1016	1.69	1072	1.87	1124	2.04
2400	631	0.16	682	0.41	736	0.66	793	0.90	852	1.14	911	1.36	970	1.58	1028	1.78	1084	1.97	1136	2.13
2600	642	0.27	692	0.52	747	0.76	804	1.01	862	1.24	922	1.47	981	1.69	1039	1.89	1094	2.07	1146	2.24
2800	652	0.39	703	0.64	757	0.88	814	1.13	873	1.36	932	1.59	992	1.81	1049	2.01	1105	2.19	1157	2.36
3000	663	0.53	714	0.77	768	1.02	825	1.26	884	1.50	943	1.73	1003	1.94	1060	2.14	1116	2.33	1168	2.49
3200	675	0.68	726	0.92	780	1.17	837	1.41	896	1.65	955	1.88	1014	2.09	1072	2.29	1128	2.48	1180	2.64
3400	688	0.84	739	1.09	793	1.34	850	1.58	909	1.82	968	2.04	1027	2.26	1085	2.46	1141	2.65	1193	2.81
3600	703	1.03	753	1.28	807	1.52	864	1.76	923	2.00	983	2.23	1042	2.44	1100	2.64	1155	2.83	-	-
3800	718	1.23	769	1.47	823	1.72	880	1.96	939	2.20	998	2.43	1058	2.64	1115	2.84	1171	3.03	-	-

1. Blower performance includes gas heat exchangers and 2" filters. See STATIC RESISTANCE table for additional applications.
2. See RPM SELECTION table to determine desired motor sheave setting and to determine the maximum continuous BHP.
3. kW = BHP x 0.932.
4. Field Supplied Drive.

J08XP (8.5 Ton) Side Duct

Air Flow (CFM)	Available External Static Pressure - IWG ¹																							
	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4		1.6		1.8		2.0					
	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP				
	2 HP & Field Supplied Drive				Standard 2 HP & Drive								Hi Static 3 HP & Drive											
2200	632	0.23	684	0.44	734	0.65	783	0.84	830	1.03	876	1.21	921	1.39	966	1.56	1009	1.74	1051	1.91				
2400	639	0.32	691	0.53	741	0.74	790	0.93	837	1.12	883	1.30	928	1.48	972	1.65	1015	1.83	1058	2.00				
2600	646	0.41	698	0.62	748	0.82	797	1.02	844	1.21	890	1.39	936	1.57	980	1.74	1023	1.92	1065	2.09				
2800	654	0.50	706	0.71	756	0.92	805	1.11	852	1.30	898	1.48	943	1.66	987	1.83	1031	2.01	1073	2.18				
3000	663	0.60	714	0.81	765	1.02	813	1.21	861	1.40	907	1.58	952	1.76	996	1.93	1039	2.11	1082	2.28				
3200	673	0.71	724	0.93	774	1.13	823	1.32	871	1.51	917	1.69	962	1.87	1006	2.05	1049	2.22	1091	2.39				
3400	684	0.84	735	1.05	785	1.25	834	1.45	882	1.63	928	1.82	973	2.00	1017	2.17	1060	2.34	1102	2.52				
3600	696	0.98	747	1.19	798	1.39	846	1.59	894	1.78	940	1.96	985	2.14	1029	2.31	1072	2.48	1115	2.66				
3800	709	1.14	761	1.35	811	1.55	860	1.75	907	1.93	953	2.12	999	2.29	1043	2.47	1086	2.64	1128	2.81				
4000	724	1.31	776	1.52	826	1.72	874	1.92	922	2.11	968	2.29	1013	2.47	1057	2.64	1100	2.82	1143	2.99				
4200	740	1.50	792	1.71	842	1.92	890	2.11	938	2.30	984	2.48	1029	2.66	1073	2.83	1116	3.01	1159	3.18				
													3 HP & Field Supplied Drive											

1. Blower performance includes 2" filters. See STATIC RESISTANCE table for additional applications.
2. See RPM SELECTION table to determine desired motor sheave setting and to determine the maximum continuous BHP.
3. kW = BHP x 0.932.

J10XP (10 Ton) Bottom Duct

Air Flow (CFM)	Available External Static Pressure - IWG ¹																					
	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4		1.6		1.8		2.0			
	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP		
	2 HP & Field Supplied Drive				Standard 2 HP & Drive								Hi Static 3 HP & Drive									
2600	693	0.75	748	0.90	801	1.04	852	1.18	901	1.31	949	1.44	996	1.56	1041	1.68	1085	1.80	1129	1.92		
2800	712	0.88	767	1.03	819	1.17	871	1.31	920	1.44	968	1.57	1014	1.69	1060	1.81	1104	1.94	1148	2.06		
3000	733	1.03	788	1.18	841	1.33	892	1.46	941	1.59	989	1.72	1036	1.84	1081	1.97	1125	2.09	1169	2.21		
3200	757	1.20	811	1.36	864	1.50	915	1.64	964	1.77	1012	1.89	1059	2.02	1104	2.14	1149	2.26	1192	2.38		
3400	782	1.40	837	1.55	890	1.69	941	1.83	990	1.96	1038	2.09	1085	2.21	1130	2.33	1174	2.45	1218	2.58		
3600	810	1.61	865	1.76	918	1.91	969	2.04	1018	2.18	1066	2.30	1113	2.43	1158	2.55	1203	2.67	1246	2.79		
3800	841	1.85	896	2.00	948	2.14	999	2.28	1049	2.41	1097	2.54	1143	2.66	1189	2.78	1233	2.91	1276	3.03		
4000	874	2.11	928	2.26	981	2.40	1032	2.54	1082	2.67	1130	2.80	1176	2.92	1222	3.04	1266	3.16	1309	3.28		
4200	909	2.38	963	2.53	1016	2.68	1067	2.81	1117	2.95	1164	3.07	1211	3.20	1256	3.32	1301	3.44	-	-		
4400	946	2.68	1000	2.83	1053	2.98	1104	3.11	1154	3.24	1202	3.37	-	-	-	-	-	-	-	-		
4600	985	3.00	1040	3.15	1092	3.29	1143	3.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
4800	1026	3.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	3 HP & Field Supplied Drive																					

1. Blower performance includes 2" filters. See STATIC RESISTANCE table for additional applications.
2. See RPM SELECTION table to determine desired motor sheave setting and to determine the maximum continuous BHP.
3. kW = BHP x 0.932.

J12XP (12.5 Ton) Bottom Duct

Air Flow (CFM)	Available External Static Pressure - IWG ¹																							
	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4		1.6		1.8		2.0					
	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP				
	3 HP & Field Supplied Drive								Standard 3 HP & Drive								Hi Static 5 HP & Drive							
3200	757	1.20	811	1.36	864	1.50	915	1.64	964	1.77	1012	1.89	1059	2.02	1104	2.14	1149	2.26	1192	2.38				
3400	782	1.40	837	1.55	890	1.69	941	1.83	990	1.96	1038	2.09	1085	2.21	1130	2.33	1174	2.45	1218	2.58				
3600	810	1.61	865	1.76	918	1.91	969	2.04	1018	2.18	1066	2.30	1113	2.43	1158	2.55	1203	2.67	1246	2.79				
3800	841	1.85	896	2.00	948	2.14	999	2.28	1049	2.41	1097	2.54	1143	2.66	1189	2.78	1233	2.91	1276	3.03				
4000	874	2.11	928	2.26	981	2.40	1032	2.54	1082	2.67	1130	2.80	1176	2.92	1222	3.04	1266	3.16	1309	3.28				
4200	909	2.38	963	2.53	1016	2.68	1067	2.81	1117	2.95	1164	3.07	1211	3.20	1256	3.32	1301	3.44	1344	3.56				
4400	946	2.68	1000	2.83	1053	2.98	1104	3.11	1154	3.24	1202	3.37	1248	3.49	1294	3.62	1338	3.74	1381	3.86				
4600	985	3.00	1040	3.15	1092	3.29	1143	3.43	1193	3.56	1241	3.69	1287	3.81	1333	3.93	1377	4.05	1420	4.18				
4800	1026	3.33	1081	3.48	1133	3.63	1184	3.76	1234	3.90	1282	4.02	1328	4.15	1374	4.27	1418	4.39	1461	4.51				
5000	1069	3.69	1124	3.84	1177	3.98	1228	4.12	1277	4.25	1325	4.38	1372	4.50	1417	4.62	1461	4.74	1505	4.87				
5200	1114	4.06	1169	4.21	1222	4.35	1273	4.49	1322	4.62	1370	4.75	1417	4.87	1462	5.00	1506	5.12	1550	5.24				
5400	1161	4.45	1216	4.60	1268	4.74	1319	4.88	1369	5.01	1417	5.14	1463	5.26	1509	5.38	1553	5.51	1596	5.63				
5600	1210	4.86	1264	5.01	1317	5.15	1368	5.29	1418	5.42	1465	5.55	1512	5.67	-	-	-	-	-	-				
5800	1260	5.28	1315	5.43	1367	5.57	1418	5.71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	5 HP & Field Supplied Drive																							

1. Blower performance includes 2" filters. See STATIC RESISTANCE table for additional applications.
2. See RPM SELECTION table to determine desired motor sheave setting and to determine the maximum continuous BHP.
3. kW = BHP x 0.932.

RPM Selection

Size (Tons)	Model	HP	Max BHP	Motor Sheave	Blower Sheave	6 Turns Open	5 Turns Open	4 Turns Open	3 Turns Open	2 Turns Open	1 Turn Open	Fully Closed
J06 (6.5)	XP	1.5	1.73	VL40	AK84	NA	576	618	661	702	748	792
		2.0	2.30	VL44	AK71	NA	790	843	887	936	989	1041
J07 (7.5)	XP	1.5	1.73	1VL40	AK69	N/A	690	743	796	849	902	955
		3	3.45	1VM50	AK69	N/A	955	1008	1062	1115	1168	1221
J08 (8.5)	XP	2	2.30	1VP50	AK89	N/A	735	775	815	851	889	930
		3	3.45	1VP50	AK74	N/A	880	928	972	1016	1067	1110
J10 (10)	XP	2	2.30	1VM50	AK84	N/A	785	821	858	901	940	980
		3	3.45	1VM50	AK74	N/A	880	928	972	1016	1067	1110
J12 (12.5)	XP	3	3.45	1VM50	AK74	N/A	880	928	972	1016	1067	1110
		5	5.75	1VP56	BK77	1052	1095	1136	1175	1216	1272	N/A

Additional Static Resistance

Size (Tons)	Model	CFM	Economizer ^{1 2}	4" Filter ¹	Electric Heat kW ¹				
					9	18	24	36	54
J06 (6.5) J07 (7.5) J08 (8.5) J10 (10) J12 (12.5)	XP	1900	0.02	0.12	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10
		2100	0.02	0.13	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
		2300	0.04	0.14	0.07	0.08	0.09	0.10	0.13
		2500	0.11	0.16	0.08	0.09	0.10	0.11	0.14
		2700	0.18	0.17	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16
		2900	0.25	0.19	0.10	0.11	0.13	0.14	0.18
		3100	0.31	0.20	0.12	0.13	0.15	0.16	0.20
		3300	0.37	0.22	0.13	0.14	0.17	0.18	0.22
		3500	0.43	0.26	0.15	0.16	0.19	0.20	0.24
		3700	0.49	0.27	0.17	0.18	0.21	0.22	0.26
		3900	0.54	0.29	0.19	0.20	0.23	0.24	0.28
		4100	0.58	0.32	0.21	0.22	0.25	0.26	0.31
		4300	0.65	0.35	0.23	0.24	0.28	0.29	0.34
		4500	0.69	0.38	0.25	0.26	0.30	0.31	0.37
		4700	0.74	0.41	0.28	0.29	0.33	0.34	0.40
		4900	0.78	0.44	0.30	0.31	0.35	0.37	0.43
		5100	0.82	0.47	0.33	0.34	0.38	0.40	0.46
		5300	0.86	0.51	0.35	0.37	0.41	0.43	0.49
		5500	0.89	0.55	0.38	0.40	0.44	0.46	0.53
		5700	0.93	0.58	0.41	0.43	0.47	0.49	0.56
		5900	0.96	0.62	0.44	0.46	0.50	0.53	0.59
		6100	0.98	0.67	0.47	0.49	0.53	0.56	0.62
		6300	1.01	0.71	0.50	0.53	0.56	0.59	0.65

1. Deduct these values from the available external static pressure shown in the respective Blower Performance Tables.
2. The pressure drop through the economizer is greater for 100% outdoor air than for 100% return air. If the resistance of the return air duct is less than 0.25 IWG, the unit will deliver less CFM during full economizer operation.

Drive Selection

1. Determine side or bottom supply duct Application.
2. Determine desired airflow.
3. Calculate or measure the amount of external static pressure.
4. Using the operating point determined from steps 1, 2 & 3, locate this point on the appropriate supply air blower performance table. (Linear interpolation may be necessary.)
5. Noting the RPM and BHP from step 4, locate the appropriate motor and, or drive on the RPM selection table.
6. Review the BHP compared to the motor options available. Select the appropriate motor and, or drive.
7. Review the RPM range for the motor options available. Select the appropriate drive if multiple drives are available for the chosen motor.
8. Determine turns open to obtain the desired operation point.

Example

1. 2600 CFM
2. 1.6 iwg
3. Using the supply air blower performance table below, the following data point was located: 1268 RPM & 1.95 BHP.
4. Using the RPM selection table below, Size X and Model Y is found.
5. 1.95 BHP exceeds the maximum continuous BHP rating of the 1.5 HP motor. The 2 HP motor is required.
6. 1268 RPM is within the range of the 2 HP drives.
7. Using the 2 HP motor and drive, .5 turns open will achieve 1268 RPM.

Airflow Performance**Example Supply Air Blower Performance**

Air Flow (CFM)	Available External Static Pressure - IWG													
	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2		1.4	
	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
2200	804	0.50	1.5 HP & Field Supplied Drive				Standard 1.5 HP & Drive				Alternate 2 HP & Drive			
			866	0.71	925	0.90	982	1.06	1038	1.21	1092	1.35	1147	1.48
2400	835	0.66	897	0.87	956	1.06	1013	1.22	1069	1.37	1124	1.51	1178	1.64
2600	869	0.84	931	1.05	990	1.24	1047	1.40	1103	1.55	1158	1.69	1212	1.82
2800	906	1.03	968	1.25	1027	1.43	1084	1.60	1139	1.75	1194	1.89	1249	2.02
													1268	1.95
													1324	2.07
													1361	2.27
													-	-

Table X: RPM Selection

Size (Tons)	Model	HP	Max BHP	Motor Sheave	Blower Sheave	6 Turns Open	5 Turns Open	4 Turns Open	3 Turns Open	2 Turns Open	1 Turn Open	Fully Closed
X	Y	1.5	1.73	1VM50	AK74	N/A	897	945	991	1035	1079	1126
		2	2.30	1VM50	AK64	N/A	1039	1094	1150	1207	1256	1308

B.9 Guía técnica del equipo para la instalación B

Se incluyen a continuación algunas páginas de la guía técnica del equipo elegido para la instalación B Amana (s.f.).

	APH16 24H41A*	APH16 30H41A*	APH16 36H41A*	APH16 36H41BA	APH16 36H41BB	APH16 42H41A*	APH16 42H41B*	APH16 48H41A*	APH16 60H41A*
COOLING CAPACITY									
Cooling Capacity (BTU/h)	24,000	28,400	36,000	35,600	35,600	42,000	42,000	46,000	57,500
Sensible BTU/h	18,200	21,400	27,000	27,000	27,400	30,000	30,000	34,600	40,500
SEER / EER	16.0 / 13.0	16.0 / 12.5	16.0 / 13.0	16.0 / 13.0	16.0 / 13.0	16.0 / 12.0	16.0 / 12.0	16.0 / 12.0	15.5/12
Decibels	76	76	78	78	78	78	79	80	80
AHRI Numbers	7953730	7953731	7953732	202327490	202327490	7953733	10259475	7953734	9008585
HEATING CAPACITY									
BTU/h (47°F)	22,800	27,600	32,200	32,200	32,200	40,000	40,000	44,000	54,500
C.O.P. (47°F)	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.6
BTU/h (17°F)	13,000	15,400	20,400	19,700	19,700	21,600	21,600	26,000	33,800
C.O.P. (17°F)	2.4	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
HSPF	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.2	8.0	8.2
EVAPORATOR MOTOR									
Type	ECM	ECM	ECM	ECM	ECM	ECM	ECM	ECM	ECM
Wheel (D x W)	10 x 8	10 x 8	10 x 8	10 x 8	10 x 8	10 x 8	10 x 8	10 x 8	11X8
Cooling CFM	875	1,050	1,200	1,200	1,200	1,300	1,300	1,600	1,700
Fan-Only CFM	800	950	1,100	1,100	1,100	1,200	1,200	1,400	1,600
RLA	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	6.8	6.8
No. of Speeds	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
Horsepower- RPM	½- 1,050	½- 1,050	½- 1,050	½- 1,050	½- 1,050	¾- 1,050	¾- 1,050	¾- 1,050	¾- 1,050
EVAPORATOR COIL									
Face Area (ft ²)	5.2	5.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	7
Rows Deep/ Fins per Inch	3/ 14	3/ 14	4/ 14	4/ 14	4/ 14	4/ 14	4/ 14	4/ 14	4/ 14
Indoor Metering Device Size	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV	TXV
Filter Size (ft ²)	20 x 20 x 1	20 x 25 x 1	25 x 25 x 1	25 x 25 x 1	25 x 25 x 1	(2) 20 x 20 x 1	(2) 20x20x1	(2) 20 x 20 x 1	(2) 20x25x1
Drain Size (NPT)	¾"	¾"	¾"	¾"	¾"	¾"	¾"	¾"	¾"
Refrigerant Charge (oz.)	116	116	170	170	170	170	170	170	175
CONDENSER FAN / COIL									
Horsepower- RPM	1/6- 815	1/6- 815	¼- 1075	¼- 1075	¼- 1075	¼- 1075	¼- 1075	¼- 1075	¼- 1075
RLA/LRA	1.1 / 1.7	1.1 / 1.7	1.5 /3.0	1.3 /3.0	1.6 / 3.5	1.4 / 2.9	1.4 / 2.9	1.4 / 2.9	1.4 / 2.9
Fan Diameter / # Fan Blades	22 / 3	22 / 3	22 / 4	22 / 4	22 / 4	22 / 4	22 / 4	22 / 4	22 / 4
Face Area (ft ²)	14.3	14.3	17	17	17	17	17	17	19
Outdoor Metering Device Size	0.047	0.047	0.057	0.057	0.057	0.059	TXV	TXV	TXV
Rows Deep/ Fins per Inch	2 / 16	2 / 16	2 / 16	2 / 16	2 / 16	2 / 16	2 / 16	2 / 16	2 / 20
COMPRESSOR									
Quantity / Type	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll	1 / Scroll
Stage	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Two	Two	Two
Compressor RLA/LRA	12.8 / 58.3	14.1 / 73	16.7 / 79	15.7 / 72.2	15.7 / 72.2	17.9 / 112	17.9 / 96	21.2 / 104	27.1/ 152.9
ELECTRICAL DATA									
Voltage/Phase (60 Hz)	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1	208-230/ 1
Indoor Blower FLA	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	6.8	6.8
Outdoor Fan RLA	1.1	1.1	1.4	1.3	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4
Total Unit Amps	18.2	19.5	22.4	21.3	21.6	23.6	23.6	29.4	35.3
Min. Circuit Ampacity ¹	21	23	27	25.2	25.5	28	28	35	42.1
Min. Overcurrent Protection (amps) ²	30	35	40	40	40	45	45	50	60
OPERATING WEIGHTS (LBS)									
SHIPPING WEIGHTS (LBS)									
	315	315	375	375	375	375	375	400	405
	324	324	387	385	387	387	387	412	417

¹ Wire size should be determined in accordance with National Electrical Codes. Extensive wire runs will require larger wire sizes.

² Must use time-delay fuses or HACR-type circuit breakers of the same size as noted.

NOTE: Always check the S&R plate for electrical data on the unit being installed.

APH1624H41					
COOLING/ HP SPEED	ADJUST TAP	CFM*	ELECTRIC HEAT	ADJUST TAP	CFM*
D	Minus	858	D	Minus	858
	Normal	953		Normal	953
	Plus	1,048		Plus	1,048
C	Minus	800	C	Minus	800
	Normal	905		Normal	905
	Plus	986		Plus	986
B	Minus	743	B	Minus	743
	Normal**	847		Normal**	847
	Plus	939		Plus	939
A	Minus	714	A	Minus	714
	Normal	815		Normal	815
	Plus	903		Plus	903

* @ 0.1- 0.9 ESP **Factory Default is "B" Normal

APH1642H41A*					
COOLING/ HP SPEED	ADJUST TAP	CFM*	ELECTRIC HEAT	ADJUST TAP	CFM*
D	Minus	1,289	D	Minus	1,289
	Normal	1,392		Normal	1,392
	Plus	1,440		Plus	1,440
C	Minus	1,219	C	Minus	1,219
	Normal	1,323		Normal	1,323
	Plus	1,419		Plus	1,419
B	Minus	1,182	B	Minus	1,182
	Normal**	1,294		Normal**	1,294
	Plus	1,384		Plus	1,384
A	Minus	1,105	A	Minus	1,105
	Normal	1,219		Normal	1,219
	Plus	1,304		Plus	1,304

* @ 0.1- 0.9 ESP **Factory Default is "B" Normal

APH1630H41					
COOLING/ HP SPEED	ADJUST TAP	CFM*	ELECTRIC HEAT	ADJUST TAP	CFM*
D	Minus	969	D	Minus	969
	Normal	1,073		Normal	1,073
	Plus	1,180		Plus	1,180
C	Minus	930	C	Minus	930
	Normal**	1,032		Normal**	1,032
	Plus	1,135		Plus	1,135
B	Minus	834	B	Minus	834
	Normal	984		Normal	984
	Plus	1,101		Plus	1,101
A	Minus	833	A	Minus	833
	Normal	937		Normal	937
	Plus	1,036		Plus	1,036

* @ 0.1- 0.9 ESP **Factory Default is "B" Normal

APH1642H41B*					
COOLING/ HP SPEED	ADJUST TAP	CFM*	ELECTRIC HEAT	ADJUST TAP	CFM*
D	Minus	1,289	D	Minus	1,289
	Normal	1,392		Normal	1,392
	Plus	1,440		Plus	1,440
C	Minus	1,219	C	Minus	1,219
	Normal**	1,323		Normal**	1,323
	Plus	1,419		Plus	1,419
B	Minus	1,182	B	Minus	1,182
	Normal	1,294		Normal	1,294
	Plus	1,384		Plus	1,384
A	Minus	1,105	A	Minus	1,105
	Normal	1,219		Normal	1,219
	Plus	1,304		Plus	1,304

* @ 0.1- 0.9 ESP **Factory Default is "C" Normal

APH1636H41					
COOLING/ HP SPEED	ADJUST TAP	CFM*	ELECTRIC HEAT	ADJUST TAP	CFM*
D	Minus	1,135	D	Minus	1,135
	Normal	1,270		Normal	1,270
	Plus	1,371		Plus	1,371
C	Minus	1,042	C	Minus	1,042
	Normal	1,178		Normal	1,178
	Plus	1,307		Plus	1,307
B	Minus	932	B	Minus	932
	Normal**	1,065		Normal**	1,065
	Plus	1,181		Plus	1,181
A	Minus	823	A	Minus	823
	Normal	952		Normal	952
	Plus	1,080		Plus	1,080

* @ 0.1- 0.9 ESP **Factory Default is "B" Normal

APH1648H41					
COOLING/ HP SPEED	ADJUST TAP	CFM*	ELECTRIC HEAT	ADJUST TAP	CFM*
D	Minus	1,506	D	Minus	1,506
	Normal	1,699		Normal	1,699
	Plus	1,872		Plus	1,872
C	Minus	1,420	C	Minus	1,420
	Normal**	1,596		Normal**	1,596
	Plus	1,764		Plus	1,764
B	Minus	1,323	B	Minus	1,323
	Normal	1,491		Normal	1,491
	Plus	1,642		Plus	1,642
A	Minus	1,217	A	Minus	1,217
	Normal	1,385		Normal	1,385
	Plus	1,537		Plus	1,537

* @ 0.1- 0.9 ESP **Factory Default is "B" Normal