



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR EN AULAS  
ESCOLARES CON Y SIN ESTRATEGIAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA UBICADAS  
EN CONCEPCIÓN**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y  
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**AUTOR: PABLO MATUS ARANEDA**

**PROFESOR GUÍA: DRA. MAUREEN TREBILCOCK KELLY**

**CONCEPCIÓN, Marzo de 2015**

## Resumen

La presente tesis centra su interés en la Calidad del Aire Interior (CAI) en aulas escolares ubicadas en Concepción, Chile. El contexto para ello radica en que los ambientes cerrados donde existen fuentes de contaminación internas poseen el riesgo de generar condiciones adversas para la salud o disminución en las capacidades cognitivas de sus ocupantes. En el interés de que las edificaciones tengan menores consumos por pérdidas de calor, se promueve actualmente que éstas sean construidas con estándares de hermeticidad superiores a lo que tradicionalmente se hacía. Esta iniciativa también incluye las aulas escolares, siendo la concentración de dióxido de carbono el indicador que permite evaluar la Calidad del Aire Interior. El dióxido de carbono es un bioefluente que emana de la respiración de los mismos ocupantes. Su impacto negativo implica no solo discomfort para las personas sino que también –según se ha estudiado- una disminución en las habilidades cognitivas necesarias para un buen desempeño en el aprendizaje.

Así, renovar el aire interior cobra especial relevancia. Existen edificios de reciente ejecución que incorporan tecnologías para ello: ventilación mecanizada o bien sistemas híbridos. En el marco de una edificación sustentable, estas construcciones debieran responder a un diseño pasivo para conseguir el confort térmico de los usuarios, lo cual conlleva incorporación de tecnologías constructivas para lograr una alta hermeticidad en la envolvente y así evitar las pérdidas de calor por infiltraciones.

El desafío de estas edificaciones radica en lograr adecuados estándares en la calidad del aire interior en zonas donde las temperaturas son bajas o por debajo del rango de confort, escenario donde se pondrá a prueba qué ocurre con las concentraciones internas de CO<sub>2</sub>.

El proceso investigativo contempló monitorizaciones de campo usando sensores de dióxido de carbono (principal indicador de la calidad del aire interior en un aula escolar), temperatura y humedad relativa ubicados simultáneamente en dos aulas en período de ocupación normal. Dichas aulas, fueron seleccionadas por representar, la primera (Caso A), una edificación tradicional ventilada a través de ventanas y con calefacción centralizada. La segunda (Caso B), en cambio, se seleccionó puesto que incorpora estrategias de eficiencia energética mediante calefacción pasiva, alto estándar de hermeticidad y ventilación mecanizada para abordar la contaminación interior.

La evaluación se realizó a través de dos métodos de calificación vigentes, los cuales indicaron que la calidad del aire interior en ambas aulas es insatisfactoria, pese a tener estrategias diferentes para abordar el problema. No obstante, el análisis de los datos levantados, también permitió observar que detrás de los valores que son reflejados por los dos métodos de calificación, asoman importantes diferencias, las que radican en que el caso A alcanza recurrentemente valores críticos de contaminación interior, situación que no ocurre en el caso B.

Palabras clave: Ventilación, Calidad del Aire interior, Renovación, Dilución y Remoción del Aire.

## **Abstract**

This thesis focuses its interest in Indoor Air Quality (IAQ) in classrooms located in Concepción, Chile. The context for this is that closed environments where there are internal sources of pollution have the risk of causing adverse health conditions or decrease cognitive abilities on its occupants. In the interest of having buildings with lower energy consumption due to heat losses, it is currently promoted that buildings should include higher standards of tightness than what was traditionally made. This initiative also includes classrooms, where the concentration of carbon dioxide is the main indicator that allows evaluating the IAQ. Carbon dioxide is a bio effluent that emanates from same occupant's breathing. Its negative impact implies not only discomfort for people but also -as has been studied- a decline in cognitive skills that are necessary to perform well in learning.

Thus, ventilating or renewing interior air is particularly relevant. There are buildings that incorporate newly implemented technologies for this: mechanized ventilation or hybrid systems. In the context of sustainable architecture, these buildings should respond to a passive design to achieve thermal comfort of users, incorporating building technologies to achieve high tightness and prevent heat loss by infiltration.

The challenge of these buildings relies in achieving appropriate standards of indoor air quality in areas where temperatures are low or below the comfort range, environments where the behavior

of internal concentrations of CO<sub>2</sub> will be tested.

This article discusses, through comparison, how indoor air quality is in classrooms designed with and without energy efficiency strategies in Concepción, Chile.

The investigative process included field monitoring using sensors for carbon dioxide (main indicator of indoor air quality in a classroom), temperature and relative humidity located simultaneously in two classrooms in period of normal occupation. These classrooms were selected because they represent, in the first case (A), a traditional building ventilated through windows and with central heating. The second case (B), on the other hand, was selected since it incorporates energy efficiency strategies through passive heating, high standard of air tightness and mechanized ventilation to address indoor pollution produced by the occupants themselves as they exhale carbon dioxide.

The evaluation was carried out through two methods of qualification in use, which indicated that the indoor air quality in both classrooms was unsatisfactory, despite having different strategies to address the problem. However, the analysis of the data raised, allows us to see that behind the values that are reflected by the two scoring methods, there are important differences, which rely in the fact that the case A recurrently reached critical values of internal pollution, situation that did not occur in case B.

Keywords: Ventilation, Indoor Air Quality, Renewal, Dilution and Removal of Air.

## Índice

### Resumen y Abstract

<b>Capítulo 1. Introducción, Objetivos y Metodología</b> .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Metodología .....	3
<b>Capítulo 2. Marco Teórico: Calidad del aire interior y ventilación en el aula escolar</b> .....	5
2.1 El CO <sub>2</sub> como principal indicador de la contaminación al interior del aula escolar .....	6
2.2 La concentración de dióxido de carbono y su efecto sobre las habilidades cognitivas de las personas .....	9
2.3 La hermeticidad de la envolvente y sus efectos sobre la calidad del aire interior .....	12
2.4 Normas y recomendaciones de ventilación para el aula escolar .....	14
2.5 Sistemas de ventilación .....	19
2.6 Precedentes: Casos estudiados en Chile .....	22
<b>Capítulo 3. Casos de Estudio</b> .....	33
<b>Capítulo 4. Planificación e implementación de la monitorización</b> .....	44
4.1 Descripción .....	44
4.2 Implementación de la monitorización .....	46
<b>Capítulo 5. Resultados</b> .....	50
5.1 Resultados de monitorización .....	50
5.2 Correlaciones entre temperatura y concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	67
5.3 Comparación de valores promedio .....	71
5.4 Análisis de frecuencias .....	74
5.5 Evaluación de la calidad del aire .....	76
<b>Capítulo 6. Conclusiones</b> .....	82
<b>Capítulo 7. Glosario</b> .....	86
<b>Capítulo 8. Bibliografía</b> .....	88
<b>Capítulo 9. Anexos</b> .....	90

## **Capítulo 1. Introducción**

La calidad del aire interior en un recinto destinado a la enseñanza y el aprendizaje es particularmente importante debido a que tiene implicancias sobre las habilidades cognitivas y el confort de los usuarios. Tal es el caso del aula escolar, donde la principal fuente de contaminación es la respiración de sus ocupantes. Allí, el indicador principal para medirla es la concentración de dióxido de carbono, la que se expresa en Partes por Millón (PPM). Se ha demostrado que la presencia de mayores concentraciones de dióxido de carbono en el aula escolar trae como consecuencia una merma en el desempeño de los usuarios, aumento de problemas en su salud y discomfort general. (Satish, U. Mendell, M. Environmental Health Perspectives, 2012).

En climas fríos, se produce el problema que para resguardar la temperatura interior, es improbable que se desee abrir las ventanas, con el consiguiente riesgo de ventilar por debajo de las tasas de renovación que permitan la dilución y remoción de los contaminantes emanados de la respiración de los ocupantes.

Los estándares de edificación actuales, conllevan que el diseño y la construcción incorporen eficiencia energética y, por lo tanto, aspectos como el aislamiento térmico y la hermeticidad adquieren alta relevancia. Junto con ello se incorporan sistemas mecanizados de ventilación para controlar dicha variable, lo cual supone un cambio importante respecto de la manera tradicional de ventilar los recintos. En este nuevo escenario surge el interés por medir el desempeño en la manera de ventilar, teniendo como punto de comparación las edificaciones escolares sin estrategias de eficiencia energética ni ventilación mecanizada.

En el contexto internacional, existen múltiples estudios que han permitido fijar parámetros aceptables para las concentraciones de CO<sub>2</sub> como indicador principal de la calidad del aire interior (CAI) en el aula escolar y Chile también está avanzando en esa dirección. En este contexto, es importante conocer cómo es el desempeño de aulas edificadas con los estándares constructivos que se promueven para comprobar la realidad post ocupacional.

En la búsqueda de estos escenarios, la presente tesis medirá dos casos construidos en Concepción correspondientes a aulas escolares de primero básico en régimen de uso normal.

A partir de las respectivas monitorizaciones, se espera obtener conclusiones respecto de la calidad del aire interior en un aula sin estrategias de eficiencia energética, ventilación natural y calefacción central, versus una edificación con eficiencia energética, con ventilación mecanizada y sin sistema calefacción.

Será de particular interés observar qué ocurre con las concentraciones de CO<sub>2</sub> cuando la temperatura interior se ubica por debajo de los rangos de confort, de modo de contraponer las dos estrategias de ventilación utilizadas.

## **1.1 Objetivo General**

Evaluar los estándares de Calidad del Aire Interior en aulas escolares ubicadas en Concepción, las que utilizan diferentes estrategias para abordar los requerimientos térmicos y de ventilación: sistema de ventilación natural asociado a edificación tradicional con sistema de calefacción y sistema de ventilación mecanizado asociado a edificación con eficiencia energética sin sistema de calefacción.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Generar un marco referencial para evaluar los casos de estudio, basándose en la teoría sobre la ventilación y la contaminación del aire interior, las normativas y recomendaciones más utilizadas; y el panorama nacional de acuerdo con estudios previamente realizados.
- Seleccionar casos de estudio, caracterizados por tener estrategias de diseño diferentes en cuanto a acondicionamiento térmico y calidad del aire interior.
- Monitorizar el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> y ambiente térmico en dos casos de análisis durante el período de invierno y ponderar el estándar de calidad del aire que se alcanza dependiendo del modelo de ventilación utilizado.
- Identificar relaciones posibles entre las variables que se medirán: CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa.

### **Capítulo 1.3 Metodología**

El diseño para llevar a cabo la investigación está orientado principalmente a levantar información de terreno en un contexto específico, de modo que, a partir de esas mediciones se pueda procesar la información estadísticamente.

La monitorización de la Calidad del Aire Interior tendrá como principal indicador las concentraciones de CO<sub>2</sub>, pero la medición de temperatura y humedad relativa permitirán comprender el ambiente climático en el que se encuentran las respectivas aulas.

Los casos seleccionados, junto con entregar información de una localidad en que las aulas escolares no han sido monitorizadas, permitirán visualizar cuánto y cómo se modifica la calidad del aire interior cuando ha existido un diseño con eficiencia energética. Para ello, será un punto de referencia la inclusión de un caso que no posee estrategias de eficiencia energética y que, por tanto, podría considerarse representativo de una realidad en cuanto a calidad de la construcción en la zona estudiada.

La figura 1.1 grafica la secuencia metodológica que se utilizará para desarrollar la presente investigación.



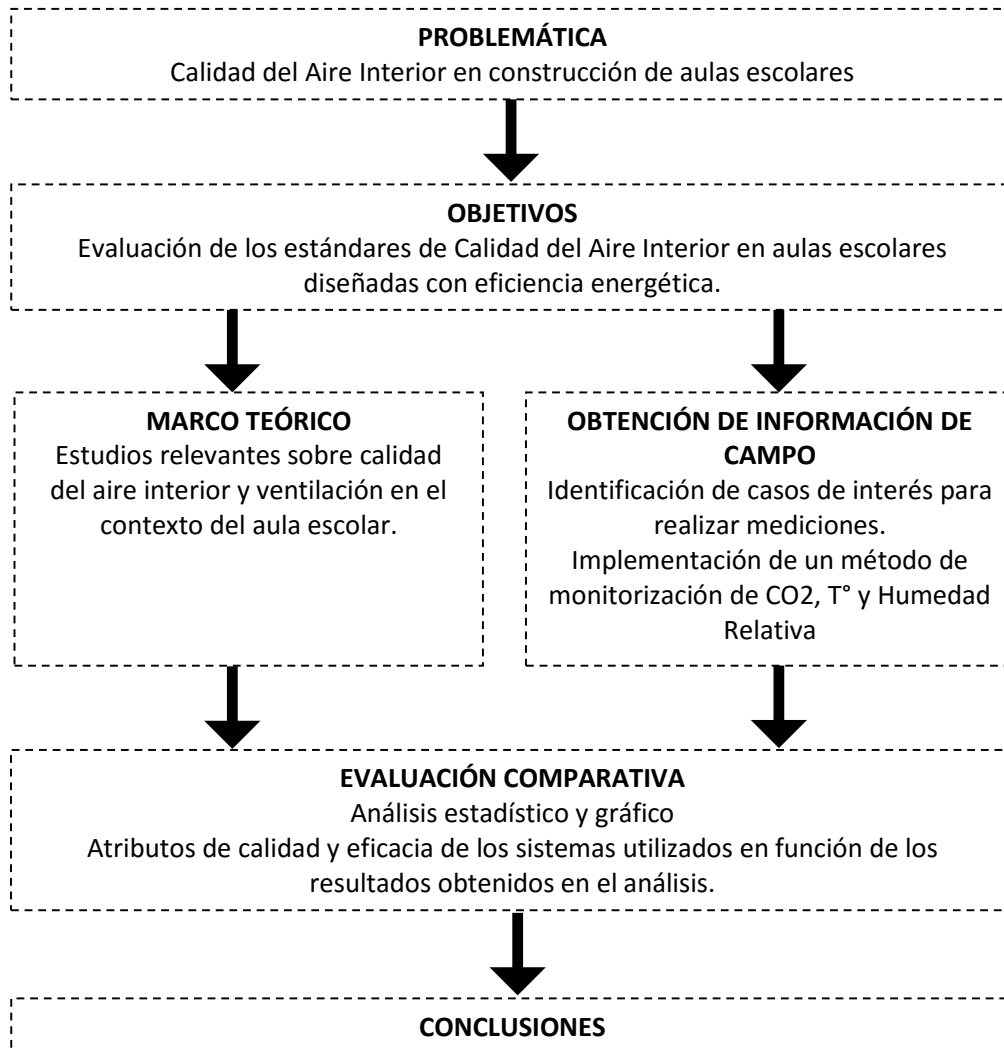


Figura 1.1: Esquema de la metodología a utilizar

## **Capítulo 2. Marco Teórico: Calidad del Aire Interior y Ventilación en el Aula Escolar.**

El presente capítulo abordará los distintos temas que permiten comprender el espectro en el que se inserta la temática de la Calidad del Aire Interior en el Aula Escolar. Se abordará, por lo tanto, la relevancia de observar las concentraciones de dióxido de carbono a las cuales se exponen las personas, tanto por los efectos en su salud, en sus habilidades cognitivas y en su confort general. El conjunto de ellas, según se observará, podrá tener un impacto sobre el desempeño en el aula escolar.

Como respuesta a los efectos negativos se explicarán las estrategias de ventilación y los marcos normativos chilenos y extranjeros. El caso chileno será observado en el contexto que este país avanza en la incorporación de eficiencia energética en las construcciones y por lo tanto, en particular en climas fríos, se promueve mejorar la hermeticidad de la envolvente. Este aspecto será subrayado por cuanto limita el potencial de ventilación natural en las construcciones.

Finalmente, el panorama se completará con la recopilación y análisis de otros casos de estudio chilenos, particularmente en la Zona Sur del país, donde se han monitorizado aulas escolares con diversas estrategias para lograr el confort ambiental. Se verá que entre los casos existen diferentes niveles de desempeño, desde deficientes a buenos, prevaleciendo la idea que aún no se consigue un adecuado balance entre el confort térmico y la calidad del aire interior. Frente a ello se subraya la relevancia de profundizar en los aspectos perfectibles en el diseño arquitectónico y de especialidad, así como en la promoción de hábitos culturales que apoyen en la solución del problema.

## **2.1 El CO<sub>2</sub> como principal indicador de la contaminación al interior del aula escolar.**

El aire que los seres humanos respiramos es esencial para tener una vida saludable y, por lo tanto, las alteraciones en su composición pueden afectar el buen funcionamiento de nuestro organismo. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) cada año 4,3 millones de personas en el mundo desarrollan enfermedades graves atribuibles a la calidad del aire respirado en el interior de los espacios. Puede ocurrir, por ejemplo, cuando se calefacciona con fuego de llama abierta quemando carbón o bien cuando se inhala aire contaminado con otros gases.

En general, la propensión a enfermarse en los niños por efecto de un aire contaminado es mayor a las de un adulto debido a que su metabolismo es más alto: un niño respira hasta un 50% más respecto de su peso que un adulto (Del Campo, V. Mendivil, 2006). En este marco, la OMS indica que el riesgo de padecer neumonías es el doble en un niño respecto de un adulto, particularmente en menores de cinco años, debido a la infección aguda que se produce en las vías respiratorias por inhalación de aire contaminado con combustibles sólidos. Dado que este estudio contempla monitorizar aulas (ambientes cerrados) donde los usuarios son niños de siete años, se considera relevante comprender cómo afecta la calidad del aire sobre ellos.

La Calidad del Aire interior está determinada por las concentraciones de múltiples elementos que se consideran contaminantes. Algunos de ellos son emitidos por fuentes externas al edificio, no obstante la mayoría son producidos por fuentes internas. Ejemplos de fuentes externas son el material en suspensión que se libera desde una calle de tierra al pasar un vehículo o los gases de combustión emanados por los vehículos en su combustión interna. En cuanto a las fuentes internas, ellas están relacionadas con la función o las prácticas que se realicen. Ejemplo de ello son la respiración de los ocupantes, la quema de combustibles en sistemas de llama abierta para calefacción o emisión de compuestos orgánicos volátiles emanados desde barnices y pinturas utilizadas en la mueblería o revestimientos de construcción.

En el caso de las aulas escolares ubicadas en lugares donde el aire exterior es limpio, se considera que la principal fuente contaminante son los mismos usuarios, de cuya respiración emana dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Es decir, se trata de una fuente de contaminación interna. El CO<sub>2</sub> es un gas incoloro e inodoro que, tratándose de ambientes no industriales o sin fuentes artificiales de contaminación, emana principalmente de la respiración humana. Este gas es un asfixiante simple que actúa básicamente por desplazamiento de oxígeno, pero su impacto dependerá de las concentraciones que se alcancen. Como referencia, un ambiente exterior posee niveles entre 300ppm y 400ppm, pero en zonas urbanas se alcanzan 550ppm. (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. España. 2000)

En los ambientes interiores, este escenario se mide en función de las concentraciones de CO<sub>2</sub> y monitorizarlo permitiría realizar un diagnóstico del comportamiento del edificio y los posibles efectos sobre la salud de sus ocupantes. Consecuentemente ello permitiría correlacionar dicho problema con la eficacia de la estrategia de ventilación utilizada en el edificio (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. España. 2000).

Si se considera que la ocupación de una sala de clases es alta, el control de la ventilación es un factor clave para prevenir los efectos adversos que un aire contaminado tendría sobre sus usuarios. Entre ellos, se contarían enfermedades y sensación de discomfort, lo cual podría afectar el estado de alerta necesario para llevar a cabo el proceso de estudio y aprendizaje, o incluso redundar en ausentismo escolar. De ahí la importancia de monitorizar la calidad del aire interior en recintos con altas cargas de ocupación, para así prevenir enfermedades de transmisión aérea, mejor desempeño de las personas, y sensación de bienestar general (AChEE. CITEC UBB, 2012).

Las variables que pueden incidir sobre la calidad del aire interior son diversas e irán cambiando caso a caso. De ahí la importancia de estudiar el contexto, tanto interno como externo, para analizar: calidad del aire exterior, contaminación emanada de fuentes internas, tipo de ventilación y el estado en el que se encuentra, infiltraciones que se produzcan a través de la envolvente y capacidad del ambiente natural para ventilar o refrigerar. Asimismo, se deberá observar la carga de ocupación del recinto y el comportamiento de los usuarios. (AChEE. CITEC UBB, 2012. Newsletter AIVC Air Infiltration and Ventilation Center)

La ventilación lleva implícita la renovación del aire interior del recinto con el fin de diluir la concentración de los contaminantes internos y así mantener el ambiente en niveles de contaminación adecuados. Conjuntamente, una adecuada extracción permitirá limpiar el ambiente por efecto de remoción.

Como se mencionó previamente, el principal indicador que permite evaluar la calidad del aire interior en ambientes, tales como un aula escolar es el CO<sub>2</sub>. Dado que allí se produce una alta ocupación de personas, existe el riesgo latente que ésta aumente si es que no existe una ventilación adecuada. El problema se acentúa cuando la ventilación es deficiente, puesto que las concentraciones de CO<sub>2</sub> pueden elevarse por sobre los niveles aceptables.

## **2.2 La concentración de dióxido de carbono y su efecto sobre las habilidades cognitivas de las personas.**

La presencia del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el aula escolar es la variable que centra la atención de este estudio por cuanto su efecto contaminante tendrá consecuencias sobre las habilidades que puedan ejercer los estudiantes sometidos a tal ambiente.

De acuerdo con el artículo “Calidad del Aire Interior en los Centros de Educación Infantil del País Vasco” (Del Campo, V. Mendivil, A.2006), cuando las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aula escolar superan en 800ppm las concentraciones exteriores, habrá personas que somatizarán a través de dolor de cabeza o cansancio, situación que se acentuaría en el caso de los niños debido a su mayor actividad metabólica. Tales niveles de contaminación es lo que se constató en las mediciones realizadas en tres aulas escolares a través de un año y hacerse cargo de esa situación –indican- es un tema que debe ser abordado interdisciplinariamente y que concierne a salud pública.

En la misma dirección, la Agencia de Protección de Estados Unidos plantea que: “La deficiente calidad del aire en interiores tiene un efecto negativo en los estudiantes de las escuelas. Esa calidad interior del aire agrava el problema de las ausencias de los estudiantes, disminuye la concentración y el rendimiento no sólo de éstos sino también del personal y aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias, tales como asma y otras.” (EPA, Agencia de Protección del Medio Ambiente. United States Environmental Protection Agency).

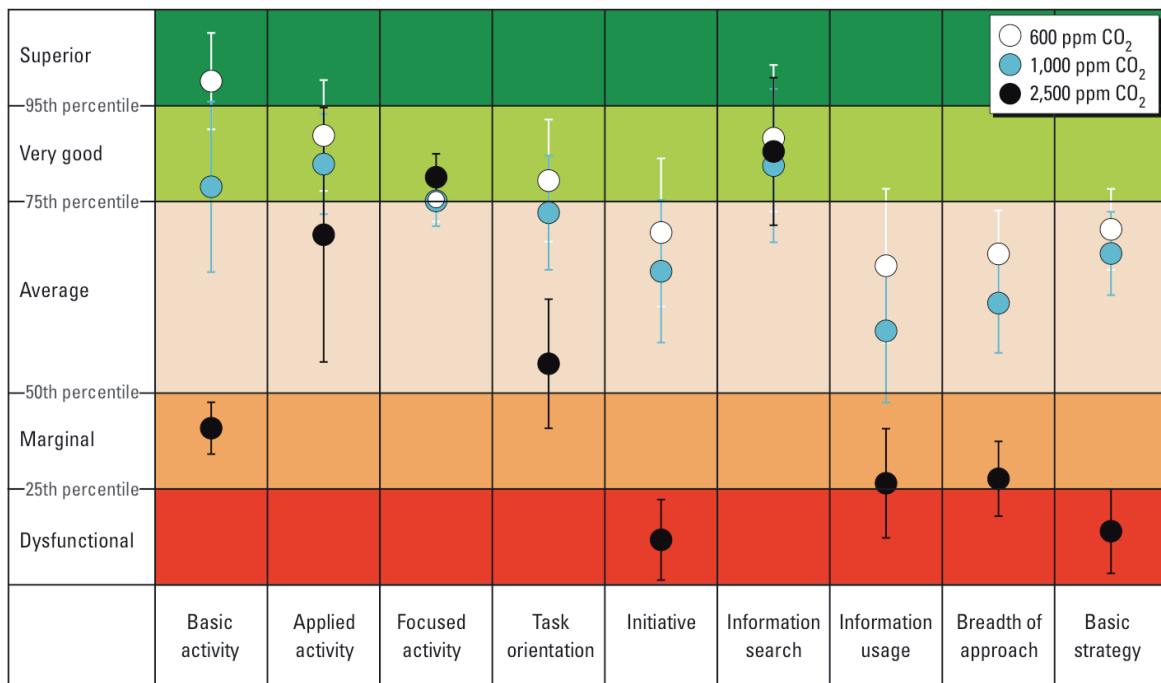
Si consideramos que las concentraciones de CO<sub>2</sub> son cambiantes y los tiempos de exposición son determinantes para definir la nocividad del ambiente, hay antecedentes que vinculan la exposición a este contaminante con dolores de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios. O sea, se trata de alteraciones físicas y mentales, lo cual supone una merma en las habilidades de los estudiantes al momento de atender la clase.

Investigadores del Berkeley Lab han realizado una investigación sobre los efectos en la capacidad de toma de decisiones que producen mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire. Para ello sometieron a un grupo de personas a pruebas en que, en un escenario de crisis, debían tomar decisiones.

Los resultados arrojaron un marcado empeoramiento del desempeño cuando el CO<sub>2</sub> se incrementaba desde los 600ppm a los 2500ppm. En particular, fueron las pruebas de “Pensamiento Estratégico” y “Toma de Iniciativa”, las que mostraron una declinación más acentuada en el desempeño.

El gráfico 2.1 presenta que aumentos moderados en los niveles de CO<sub>2</sub> (desde 600ppm a 1000ppm y 2500ppm) implicaron menores puntajes en seis de nueve ámbitos del desempeño en la toma de decisiones. Los ámbitos medidos fueron: actividad básica, actividad aplicada, actividad focalizada, orientación a objetivos, iniciativa, orientación de la información, uso de información, espectro de aproximación y estrategia básica. Los resultados indican que las principales mermas en el desempeño se produjeron en “iniciativa” y “estrategia”.

Gráfico 2.1: Impacto de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el desempeño en toma de decisiones.  
(Fuente: Berkeley Lab)







### **2.3 La hermeticidad de la envolvente y sus efectos sobre la calidad del aire interior**

En Chile, las características de la construcción, incluyendo las de recintos educacionales, han evolucionado en pos de reducir los consumos energéticos de las edificaciones y mejorar el confort para sus usuarios. El resguardo por tener ambientes con adecuado confort térmico ha llevado a implementar soluciones constructivas que reduzcan las infiltraciones de aire en la envolvente, lo cual se traduce en un aumento de la hermeticidad en la edificación. Esta condición es altamente deseable en pos de resguardar la temperatura interior y se hace altamente necesaria en escenarios de bajas temperaturas, principalmente en condición invernal.

El diseño y construcción de la envolvente juega un rol fundamental en la hermeticidad, dado que será allí donde se controlen las infiltraciones. La relevancia de ello queda establecida en la definición entregada por CITEC-UBB, que indica que las infiltraciones son “el paso de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la envolvente. Generan cargas térmicas, de frío o calor según la temporada, que inciden en el desempeño energético del edificio y, además, sirven de transporte de ruidos y contaminantes atmosféricos, que afectan el confort ambiental.” (CITEC UBB, 2014).

En cuanto a las soluciones constructivas disponibles en el mercado nacional, actualmente es fácil encontrar ventanas con soluciones mejoradas en cuanto a sellos para reducir infiltraciones de aire, así como membranas, burletes y espumas que permitan mejorar la hermeticidad de los muros y techos. Ello es una realidad que también ha sido incorporada por las nuevas edificaciones educacionales.

Si en el caso de las aulas, consideramos que las fuentes emisoras de CO<sub>2</sub> son los mismos usuarios, entonces es esperable que si dicha edificación es más hermética se produzcan alzas importantes en las concentraciones del contaminante. En consecuencia, el método de ventilación jugará un rol crucial para reducir dicha contaminación interna, recurriendo tanto a la dilución como a la extracción.

Si bien las infiltraciones pueden ser consideradas como un aporte a las renovaciones del aire interior, tienen el inconveniente que al no ser controladas impiden alcanzar una regulación de acuerdo con parámetros o valores.

Por lo tanto, se refuerza la idea de “construir herméticamente y ventilar apropiadamente”, para que el aire que ingresa al recinto lo haga en cantidades, ubicación y momento adecuados.

## 2.4 Normas y Recomendaciones de Ventilación para el aula escolar

La ventilación en el aula escolar es una problemática que se presenta transversalmente en distintas latitudes y ha sido abordada mediante marcos normativos con distintos niveles de exigencia. En algunos casos dichas normas son prescriptivas y en otras son prestacionales, sin embargo, en el marco de esta investigación, es de interés observar aquellas que regulan la “calidad del aire” de manera específica. Este es el caso de las normas europeas y estadounidenses. (AChEE, 2012).

En el caso de Chile, la ventilación de las edificaciones escolares está regida por la OGUC (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones), el DS 548 (2011) del Ministerio de Educación Pública y se complementa con los Términos de Referencia Estandarizados (Decon UC, CITEC UBB, 2011). Adicionalmente, existe en Chile la Certificación Edificio Sustentable (Instituto de la Construcción, MOP, 2014), que permite certificar el estándar de ventilación sobre la base del cumplimiento de requerimientos en cuanto a comportamiento ambiental.

El Decreto 548 establece que en la zona en que se encuentra Concepción, debe existir una temperatura garantizada de 12°C. Mientras que, en cuanto a la ventilación, se debe cumplir con un sistema que permita generar al menos dos renovaciones por hora, ya sea mediante vanos o de modo mecanizado.

La OGUC, por su parte, establece en el Artículo 4.5.5 superficies mínimas de vanos, los que serán un porcentaje de la superficie interior del recinto. Así, para “Recintos Docentes” ubicados en la VIII Región de Chile, los vanos serán de un 8% de la superficie interior. Conjuntamente, estos recintos deberán contemplar un volumen de aire de 3,0 m<sup>3</sup>/alumno y una superficie de 1,1m<sup>2</sup>/alumno. (Artículo 4.5.6).

Los antecedentes presentados respecto de la normativa chilena, reflejan un marco regulatorio de carácter prescriptivo, los que serán aplicados independientemente de las condiciones de uso particulares. Cabe notar que, siendo indicaciones referidas a la ventilación natural de los recintos, no hay una mención relacionada con los niveles de contaminación interior.

Complementariamente, se han desarrollado en Chile el “Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia

Energética en Edificios Públicos” (2012), los “Términos de Referencia Estandarizados TDRé Confort Ambiental y Eficiencia Energética” y la “Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos” (AChEE, 2012), citados en la presente investigación.

En esta última, se indica que el desempeño se medirá en función de la capacidad del sistema de ventilación para limitar las concentraciones de CO<sub>2</sub>, la cual será medida a la altura de un individuo sentado, no debiendo exceder los 1000ppm en período de ocupación. En caso de que este valor sea sobrepasado, el sistema deberá tener la capacidad de bajar los niveles hasta los 1000ppm. En cuanto a los volúmenes de aire fresco, se citan los valores entregados por el Department for Education (2007):

Un mínimo de 3 l/s por persona, un promedio mínimo diario de 5 l/s por persona y la capacidad para conseguir un mínimo de 8 l/s por persona en cualquier momento.

El aporte de aire fresco se condice con la estrategia de dilución, aplicada a los usos normales y eventuales sobrecargas ocupacionales. Se toma como valor base, que una persona emite en torno a 18/l de CO<sub>2</sub> en un volumen ambiente, lo cual puede variar entre 3 y 4 m<sup>3</sup>/alumno en un aula. Al suministrarse aire fresco a un rango de 8 l/s por persona es esperable que la concentración de CO<sub>2</sub> se mantenga por debajo de los 1000ppm. Para conseguir esta tasa de ventilación, será necesario incorporar estrategias activas o al menos híbridas, aun cuando existan ambientes específicos en que ello se pueda conseguir recurriendo a estrategias de ventilación natural. (AChEE, 2012)

En cuanto a los caudales de ventilación mínimo para recintos de edificios de uso terciario, estos se definirán para el uso, densidad ocupacional y programa de funcionamiento de acuerdo con el caso. (CITEC UBB, 2014).

Los “Términos de Referencia Estandarizados TDRé de Confort Ambiental y Eficiencia Energética” (DECON UC, CITEC UBB), a través de la Guía Técnica de Apoyo N°6, referida a “Calidad del Aire Interior”, estipula que las edificaciones deberán eliminar los contaminantes mediante sistemas de ventilación que inyecten aire exterior y extraigan el aire contaminado. Conjuntamente, tal como se desprende de la Tabla 2.1, se utilizan dos indicadores de calidad del aire:

Tasa de aire exterior por persona, Tap (m<sup>3</sup>/h persona) y Tasa de aire exterior por superficie, Tas (m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>).

Tabla 2.1: Caudales de ventilación mínimo exigidos en Edificios Educativos. (Fuente: la Guía Técnica de Apoyo N°6. Términos de Referencia Estandarizados Confort Ambiental y Eficiencia Energética. DECON UC, CITEC UBB. Basado en ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1.2010)

<b>RANGOS MÍNIMOS DE VENTILACIÓN EN EDIFICIOS EDUCACIONALES</b>		
<b>Tipo de recinto</b>	<b>Índice de aire exterior por persona</b>	<b>Índice de aire exterior por Área</b>
	<b>l/s-persona</b>	<b>l/s-m<sup>2</sup></b>
Sala Cuna y Jardín Infantil (hasta edad 4 años)	5	0,9
Enfermería en Sala Cuna y Jardín Infantil	5	0,9
Sala de clase (edad 5-8 años)	5	0,6
Sala de clase (sobre 9 años )	5	0,6
Auditorio	3,8	0,3
Sala de clases de arte	5	0,9
Taller de maderas / metales	5	0,9
Laboratorios	5	0,9
Laboratorio de Computación	5	0,6
Centro multimedia	5	0,6
Música / teatro / danza	5	0,3
Sala de uso múltiple	3,8	0,3

La Certificación CES, por su parte, establece requerimientos obligatorios y voluntarios en cuanto a la ventilación de un edificio educacional, incorporando la posibilidad de evaluación prestacional.

Los requerimientos obligatorios comprenden, para arquitectura: superficie mínima de ventana y las renovaciones de aire hora (RAH) o caudal de aire mínimo (CAM). Mientras que, para instalaciones: tasas mínimas de ventilación, eficiencia mínima de filtraje y no utilizar sistemas de calefacción de combustión en base a llama abierta.

Los requerimientos voluntarios incluyen, para arquitectura: cobertura de tasas de renovaciones por ventilación natural y concentraciones COV. Y para instalaciones: caudal y filtraje para ventilación mecanizada, y sistema de monitoreo de la calidad del aire (CO2).

La definición de los requerimientos se rige según la norma internacional UNE 13779/2008 o la norma ASHRAE 62.1-2007. Según el caso, se podrá optar por la realización de un cálculo según metodología de TDR (MOP), Bernoulli o Evaluación Dinámica con programa informático especializado. (CES, 2014, Manual 1 Evaluación y Calificación).

La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) establece en el documento “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality” que el parámetro de medición de la Calidad del Aire Interior será la concentración de CO<sub>2</sub> medido en PPM (partes por millón). En el caso del aula escolar, se aplicará como valor máximo recomendado 1000PPM de CO<sub>2</sub>. En el documento “Interpretations for ASHRAE Standard 62-1989 Ventilation for Acceptable Indoor Air

Quality)” se precisa que dicho valor no es un valor límite, sino un valor de referencia en cuanto a la confortabilidad ambiental.

Cabe destacar que la recomendación de respetar un “valor objetivo” en cuanto a las concentraciones de CO<sub>2</sub> supone una especificación prestacional, con lo cual se pone el énfasis en el objetivo a alcanzar por sobre el procedimiento para lograrlo.

Por su parte, la Norma Europea UNE-EN2008: 13779 “Ventilación de los edificios no residenciales” establece requisitos de prestación de sistemas de ventilación y categoriza la calidad de aire, tanto interior como exterior. Para las aulas escolares, indica una categoría “IDA 2” correspondiente a “calidad del aire interior buena”. Esta clasificación contempla que el escenario será específico según el tipo de contaminante, su distribución y los efectos que pueda tener sobre la salud de los ocupantes, lo cual será cuantificado de acuerdo con un método propuesto por la misma norma.

Tabla 2.2: Aplicaciones del dióxido de carbono en la evaluación de la calidad de un aire interior. (Guía de Buenas Prácticas NTP549. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).

MEDIDA	TÉCNICA EMPLEADA	OBSERVACIONES
CO <sub>2</sub> como contaminante	Medidas puntuales	Aire exterior: 300-400 ppm LEP: 5.000 ppm
CO <sub>2</sub> como indicador de la contaminación generada por los ocupantes	Medidas puntuales (final de mañana/ tarde) o series de datos	UNE 100-011-91 recomienda una concentración máxima de 1.000 ppm
CO <sub>2</sub> como indicador básico de un adecuada o inadecuada renovación de aire	Medidas puntuales (final de mañana/ tarde) o series de datos	Algunos organismos proponen la realización de mediciones para, por ej. a 800 ppm, aconsejar la revisión del funcionamiento del sistema de ventilación.
de aire exterior/caudal de ventilación	Medida de las concentraciones de CO <sub>2</sub> en el aire de suministro, de retorno y exterior y del caudal total de aire	Determina la cantidad de aire exterior suministrado a una zona por la unidad de tratamiento de aire. No tiene en cuenta las infiltraciones. Se basa en la diferencia entre CO <sub>2</sub> interior y exterior
Caudal de ventilación	Utilización del CO <sub>2</sub> como gas trazador. Almacenamiento de datos durante un periodo de tiempo, hasta alcanzar el equilibrio	Se requieren medidas muy exactas de CO <sub>2</sub> . Es conveniente una tasa de renovación alta (para alcanzar las condiciones de equilibrio). El cálculo viene afectado por la estimación del CO <sub>2</sub> generado por los ocupantes
Caudal de ventilación	Registro continuo de la disminución de los niveles de CO <sub>2</sub> utilizado como gas trazador	Es conveniente una tasa de renovación baja si se utiliza el CO <sub>2</sub> generado por los ocupantes. Es preferible introducir CO <sub>2</sub> sin ocupación
Reentrada de aire	Comprobación puntual de los niveles de CO <sub>2</sub> en el aire exterior y en el aire de entrada	Sencilla comprobación de la reentrada de aire procedente de la expulsión
Distribución de la ventilación	Medida de CO <sub>2</sub> en varios puntos del edificio	Comprobación de la mezcla adecuada y de la distribución del aire exterior a las zonas ocupadas
Cortocircuito	Medida de CO <sub>2</sub> en varios puntos del edificio	Comprobación rápida, habitación por habitación, de la velocidad y perfil de los chorros de aire de los difusores
Vías de distribución de la contaminación	Introducción de CO <sub>2</sub> , diferencias entre medidas puntuales	Cualitativo. Generalmente sólo es efectivo si el edificio no está ocupado
Idoneidad de la ventilación nocturna	Registro continuo de datos de CO <sub>2</sub>	Sólo es efectivo si las zonas medidas no están ocupadas durante la noche
Reajuste del sistema de ventilación	Registro antes y después del reajuste del sistema	Método comparativo muy exacto y fácil

En el panorama global, se puede apreciar que Chile posee una reglamentación básica de carácter prescriptivo que está avanzando hacia un marco prestacional, el que incluye aspectos relacionados con la contaminación interior y resguardando la eficiencia energética del conjunto. Es de interés observar que la reglamentación europea otorga una mirada a la ventilación como un conjunto de variables complejo, el que tendrá particularidades que deberán sopesarse caso a caso. Por ello, se incorporan recomendaciones para el análisis referidas al entorno y al comportamiento de los usuarios. Ello podría acercarse a lo que posteriormente se refrendará con una evaluación post ocupacional, no obstante se subraya que el clima del lugar y los comportamientos culturales serán un factor clave para que el desempeño sea adecuado.

## 2.5 Sistemas de Ventilación

La presente investigación se basa en el comportamiento de ciertos parámetros ambientales dentro del aula escolar. Uno de los factores más importantes que diferencian los casos de estudio es el sistema de ventilación utilizado, siendo ventilación natural en un caso y ventilación mecanizada en el otro.

En ambos casos, e independiente de su desempeño, el objetivo general del sistema de ventilación previsto es mantener una calidad del aire adecuada para los usuarios del recinto. En tal sentido, se presenta la siguiente definición para comprender su alcance:

“Se entiende por ventilación al cambio de una porción de aire que se considera indeseable por otra de mejor calidad, que mejora su pureza, temperatura, humedad, etc. El objetivo de la ventilación de los edificios es, precisamente, mantener la calidad del aire interior para asegurar tanto la salud de sus ocupantes como la conservación y el funcionamiento del edificio. La ventilación implica el suministro y extracción de aire de una zona o recinto del edificio y los costos asociados a movilizar y eventualmente acondicionar el aire (filtrar, enfriar, calentar, etc.). Una buena estrategia de ventilación supone hoy cumplir los objetivos de ésta con costos mínimos óptimos.” (CITEC UBB, 2014, Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones, pág. 195).

Si bien en la fase de proyecto se puede plantear una estrategia y sistema de ventilación, su complejidad radica en que hay diversos elementos que podrán influir sobre su eficacia en la consecución del objetivo. Entre ellos se encuentran la calidad que posea el aire exterior que se esté tomando para ser suministrado al interior, el que podrá incluso tener niveles de contaminación tales que hagan poco recomendable su uso sin un tratamiento previo. También influyen de manera muy significativa la naturaleza de los emisores de contaminación, lo cual determinará qué y cuánto es lo que se desea diluir o extraer.

La definición de los elementos constructivos que componen la envolvente de la construcción, serán por su parte, un elemento clave en cuanto a la hermeticidad. Ello podrá considerarse como un elemento que restringe o propicia la aptitud del edificio para permitir el ingreso de aire exterior, generando de por sí un complemento a la ventilación. Su inconveniente, no obstante, es que es un



factor no controlable, más bien asociado a imperfecciones de la construcción que generan pérdidas de calor.

De acuerdo con las Guías de Buenas Prácticas del Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España, las instalaciones de ventilación deben cumplir con la exigencia técnica de “mantener una calidad de aire interior aceptable en lugares ocupados por las personas, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los mismos, aportando un caudal suficiente de aire exterior y garantizando la extracción y expulsión del aire viciado” (Centro Normalización Técnica, 2008).

Así, las funciones de la ventilación se resumen en los conceptos de: renovar, remover y expulsar, siendo para el caso del aula su función primordial el suministro de oxígeno, la dilución y extracción del CO<sub>2</sub>, olores y exceso de humedad. En el segundo caso de estudio, dado que se mantiene con las ventanas cerradas, el sistema de ventilación también evita el sobrecalentamiento en el interior.

Según el mecanismo utilizado para abordar la problemática de la ventilación se distinguirán los siguientes tipos: Natural, Mecánica e Híbrida.

La Ventilación Natural se logra a través de las aberturas dispuestas en la envolvente arquitectónica y el desplazamiento de las masas de aire, los que se producen gracias a la presión del viento y/o los diferenciales térmicos (cambio de densidad del aire).

Su control habitualmente lo realizan los mismos usuarios del recinto, operando manualmente la apertura de ventanas o celosías, lo cual lleva implicado un uso más bien de “reacción” ante una “percepción” de un aire que ya está produciendo insatisfacción. Consecuentemente, su uso es de muy bajo consumo energético lo cual redundará en ahorros por este concepto, sin embargo, su regulación para evitar pérdidas térmicas excesivas es compleja. Su potencial radica en poder remover y diluir el aire, para evitar que éste se perciba “viciado”; y asimismo enfriar los recintos. Sin embargo, las aberturas dispuestas para ventilación también podrán permitir el ingreso de polución externa, como partículas en suspensión, gases indeseados o ruidos molestos. (CITEC UBB, 2014)

La Ventilación Mecánica recurre al uso de equipos electromecánicos para conseguir el ingreso de aire exterior y la extracción del aire viciado. Bajo este concepto, se pueden combinar una admisión mecanizada con una extracción natural o vice versa (simple flujo) ; o bien, ser ambas mecanizadas (doble flujo). Este sistema podrá programarse de acuerdo con un cálculo de ventilación, con el propósito de satisfacer estándares de higienización y confort térmico. Al contar con un sistema mecanizado, se puede lograr un esquema controlado de renovación de aire, lo cual sería compatible con una envolvente diseñada con alto estándar de hermeticidad. (CITEC UBB, 2014)

La Ventilación Híbrida es una combinación entre el sistema natural y mecánico, recurriendo a la segunda sólo cuando la primera alcanza su mayor potencial de trabajo. Para ello, requiere de un sistema de control asociado a los equipos mecánicos, de modo que se activen cuando no se cumplan los estándares deseados. (CITEC UBB, 2014)

Independiente del tipo de ventilación utilizado, así como de la estrategia para implementarla, es fundamental identificar cuáles son las fuentes de contaminación, dónde se ubican, y cuáles son los valores límite que se aceptarán al interior del recinto. Ello permitirá calcular un caudal de ventilación. (CITEC UBB, 2014)

## 2.6 Precedentes: Casos Estudiados en Chile.

La calidad del aire interior es un problema que se ha estudiado en establecimientos educacionales ubicados en distintas latitudes, tanto nacionales como extranjeras. Estos estudios han buscado diagnosticar cómo es el ambiente en estos espacios para que sus usuarios realicen una actividad especial: estudiar y aprender. Para el caso del aire, el indicador de referencia en estos estudios es la concentración de CO<sub>2</sub> y, en algunos de ellos, se incluye el tiempo de exposición según rangos de contaminación.

A continuación se presentan los resultados de estudios referidos a la calidad del aire interior en aulas escolares chilenas. Se ha elegido este conjunto de estudios pues refleja la trayectoria en esta materia a nivel nacional, enmarcada en el contexto que Chile posee edificaciones escolares sin incorporación de estrategias de eficiencia energética y, progresivamente, nuevas edificaciones que sí la incorporan.

Las investigaciones realizadas han abarcado aulas ubicadas en distintas zonas climáticas de Chile y con diversas especificaciones de construcción. Entre ellas se incluyen, por un lado, las más convencionales, en que las consideraciones respecto de la ventilación se restringen a la norma existente. Y, por otro lado, diseños con eficiencia energética con combinación de estrategias pasivas y activas.

En este marco nacional de referencia, será de particular interés observar aquellos casos en que el clima invernal es frío: principalmente la zona sur del país. Es allí donde, el hecho de tener temperaturas por debajo de los rangos de confort térmico, produce la contraposición entre los requerimientos de una alta hermeticidad en la envolvente versus la renovación del aire interior.

El estudio “Evaluación Post Ocupacional en Colegios Estatales”, realizado durante los años 2008 y 2009 por investigadores de la Universidad Central de Chile, contempló mediciones de concentraciones de CO<sub>2</sub> en aulas escolares ubicadas en distintas zonas climáticas a lo largo del país, tal como se muestra en la tabla 2.3. La medición de este indicador permitió realizar un diagnóstico que resultó poco favorable respecto de la calidad del aire en que se estudiaba en estos colegios. Las monitorizaciones fueron realizadas a comienzos de otoño y comienzos de verano.

Es importante señalar que todos los casos que abarcó este estudio contemplan ventilación natural mediante ventanas que se abren directamente hacia el exterior. Esta condición –indican los autores del estudio- sería una de las razones por las cuales todos los casos muestran una pobre calidad del aire interior. Encuestas realizadas a los usuarios de las aulas revelaron que en todos los casos, excepto uno, los profesores manifestaban renuencia a abrir las ventanas debido a la contaminación externa de polvo, ruido, bajas temperaturas o corrientes de aire indeseadas.

Entre las conclusiones arrojadas por el estudio, se indica que si bien la ventilación natural es una de las estrategias deseables cuando se habla de arquitectura sustentable, a la luz de los resultados ésta no sería una solución óptima para el ambiente de enseñanza, particularmente tratándose de colegios ubicados en áreas urbanas con polución o zonas de bajas temperaturas. Adicionalmente, se indica de que el hecho que abrir las ventanas dependa de los profesores constituye un problema ya que las consideraciones sobre acústica o discomfort térmico serían prioritarias para ellos por sobre la calidad del aire interior y la ventilación.

Tabla 2.3: Mediciones realizadas en aulas ubicadas en diferentes zonas climáticas de Chile. Se aprecia que la contaminación interior es muy superior a la exterior, excediendo los límites recomendados. Esta situación se acentúa en localidades donde la temperatura del ambiente es inferior a los 17°C. Fuente: “Evaluación Post Ocupacional de Colegios Estatales en 5 zonas climáticas de Chile” (Armijo, Whitman, Casals) 2010

Caso 1: Copiapó (semi desierto)				Caso 4: Santiago (c. mediterráneo)			
Table 2. Table of measurements, school A. 11:00, 30/03/2009, early autumn				Table 5. Table of measurements, school D East classroom 12:00, 04/12/2008, early summer			
Parameter	Units	External	Internal	Parameter	Units	External	Internal
Air Temp.	°C	23.4	23.6	Air Temp.	°C	24	25
Rel. Humidity	%	54	72	Rel. Humidity	%	-	52
CO2 levels	P.P.M.	600	1350	CO2 levels	P.P.M.	-	1350
Average Surface Temp.	°C	-	22.9	Average Surface Temp.	°C	-	25.5
Background Noise level	dBA	75	75	Background Noise level	dBA	-	69-76
External light level	lux	10,800	-	External light	lux	7000	-
Caso 6: Puerto Montt (templado frío marítimo)				Caso 7: Ancud (sub polar oceánico)			
Table 8. Table of measurements, school F. 15:20, 18/03/2009, early autumn				Table 9. Table of measurements, school G. 10:30, 19/03/2009, early autumn			
Parameter	Units	External	Internal	Parameter	Units	External	Internal
Air Temp.	°C	17	24	Air Temp.	°C	14	22
Rel. Humidity	%	82	84	Rel. Humidity	%	99	85
CO2 levels	P.P.M.	630	2600	CO2 levels	P.P.M.	-	2600
Average Surface Temp.	°C	-	23	Average Surface Temp.	°C	-	20.1
Background Noise level	dBA	76-80	79-80	Background Noise level	dBA	-	66-73
Average light level	lux	6000	1417	Average light level	lux	1,500	578

El siguiente estudio forma parte de un proyecto Innova Chile, en que el Centro de Investigación CITEC UBB realizó la monitorización de parámetros ambientales a las aulas de una escuela con internado ubicada en Reigolil (Latitud: 39°S, Longitud: 71°W), zona cordillerana de la Región de la Araucanía. Esta ubicación corresponde al clima “Sur Interior” (Ref. NCh1079) y la Zona Climática es “6” (Ref. NCh 853). La medición se realizó en los escenarios de invierno y verano (comienzos de Septiembre, fines de noviembre y comienzos de diciembre).

En este caso, se trata de aulas que se ventilan naturalmente a través de ventanas (vidrio simple y marco de madera) mientras que su sistema de calefacción son estufas de combustión lenta ubicadas dentro del aula.

Los gráficos 2.3 y 2.4 reflejan el marcado aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> durante los períodos de ocupación. No obstante, al comparar el escenario de invierno versus el de verano, se observa que en el primer caso las concentraciones se elevan diariamente por sobre los 1500ppm, situación que no ocurre durante el verano. Si lo ubicamos dentro del contexto “Clima Sur Interior” (Ref. NCh1079), este resultado se explicaría en que, en pos de mantener la temperatura interior, es poco esperable que se abran las ventanas, impidiendo la entrada de aire fresco al aula. La ausencia de un sistema de ventilación en un ambiente de bajas temperaturas conduce, en este caso, a que la calidad del aire interior diariamente no satisface los parámetros recomendados internacionalmente.

Gráfico 2.3: Gráficos con resultados de medición de CO<sub>2</sub> obtenidos en aulas escolares ubicadas en Clima Sur Interior de Chile. (Fuente: Trebilcock et al, 2012)

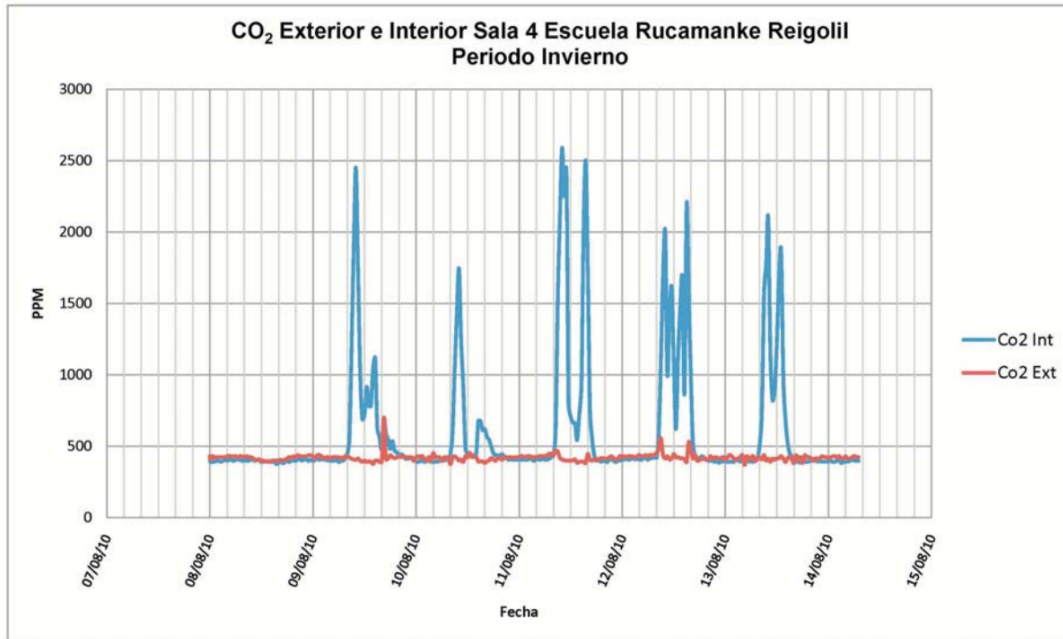
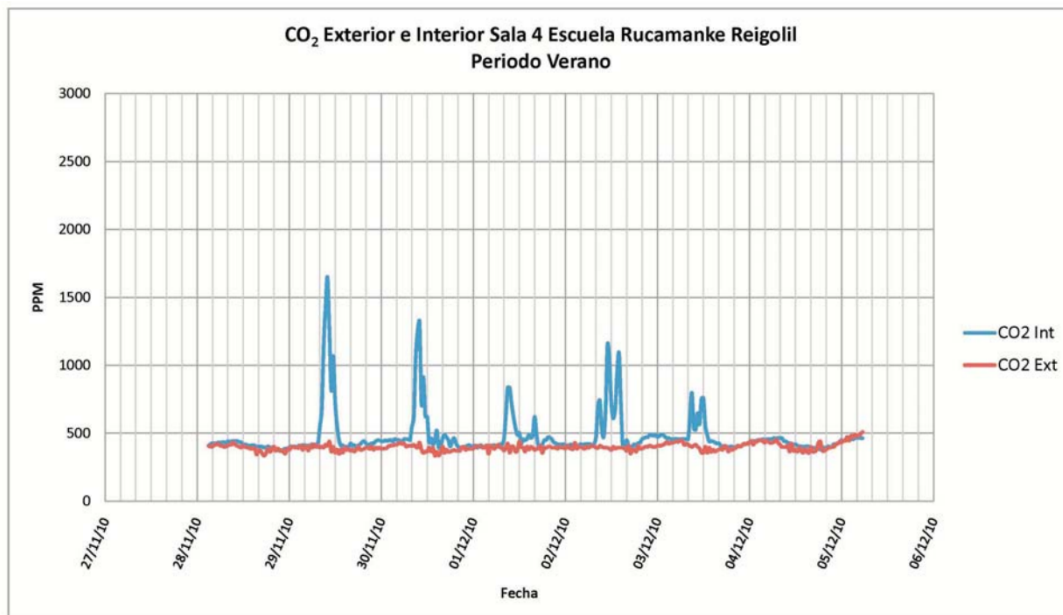


Gráfico 2.4: Gráficos con resultados de medición de CO<sub>2</sub> obtenidos en aulas escolares ubicadas en Clima Sur Interior de Chile. (Fuente: Trebilcock et al, 2012)



Para la misma zona, el artículo “Environmental Performance of Schools in Areas of Cultural Sensivity” (Trebilcock et al, 2012) describe el estudio sobre comportamiento ambiental y realiza Evaluación Pos Ocupacional de dos salas de clases, en escenarios de invierno y verano. Se incluyen la monitorización de temperatura del aire, humedad relativa, emisiones de CO<sub>2</sub>, iluminancia, ruido ambiental y calidad del aire. Adicionalmente, se realizaron encuestas a los ocupantes en relación al confort térmico, acústico, visual y de calidad del aire interior.

Uno de los casos elegidos fue edificado bajo los principios de eficiencia energética y constituye el primer ejemplo en la Región de la Araucanía edificado bajo este concepto.

La relevancia de citar este caso de estudio radica en el hecho que sea una edificación realizada en un clima donde las temperaturas suelen ubicarse por debajo de la temperatura de confort: entre julio y agosto, ésta se definió en el rango de 17°C a 22°C con 50% de HR. A través del año, el clima de la zona presenta períodos estivales cortos y secos, mientras que los inviernos son fríos y muy húmedos, con una temperatura promedio de 8°C en julio y registros bajo cero en las zonas altas de la región.

Cabe mencionar que en esta edificación hubo un especial énfasis en la envolvente térmica, luminarias energéticamente eficientes y controles. No obstante lo anterior, una primera observación –según los autores del estudio- es que el partido general de ambos colegios no evidencia haber considerado el recorrido solar para propósitos bioclimáticos. El sistema de calefacción son estufas a leña ubicadas en cada sala, debido a que es el combustible de menor costo en la zona.

En cuanto a las mediciones realizadas sobre calidad del aire interior, el indicador fue definido como el porcentaje de mediciones durante el tiempo de ocupación en que los niveles de CO<sub>2</sub> se mantuvieron bajo los 1000ppm. De acuerdo con esta categorización de resultados, se estableció que los dos colegios, el de Reigolil y el de Curarrehue, poseen calidad del aire interior inadecuada en invierno, tal como se expresa en los gráficos 2.5 y 2.6. Ello, presumiblemente, sería consecuencia que en períodos de menor temperatura, la estrategia de ventilación no alcanza a diluir ni remover el aire contaminado al interior de las aulas.

Gráfico 2.5: Calidad del Aire Interior en colegio Rucamanke de Reigolil. Fuente: Artículo “Environmental Performance of Schools in Areas of Cultural Sensitivity”. (Fuente: Trebilcock et al, 2012)

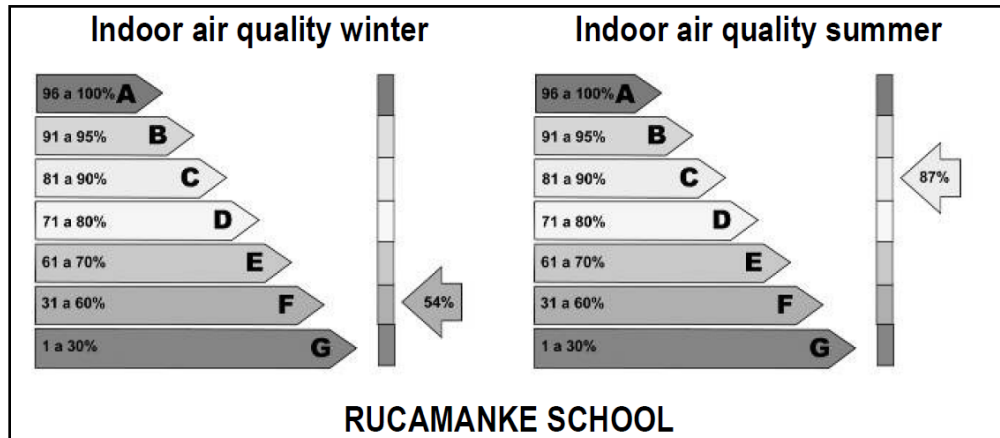
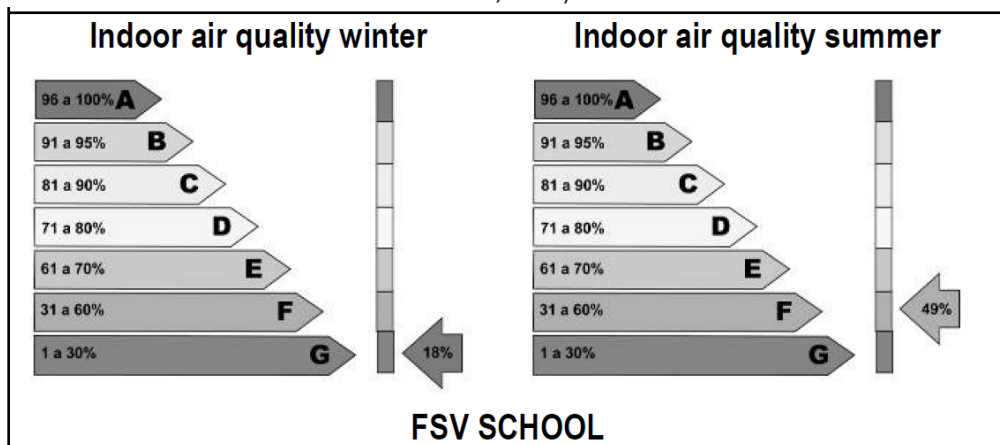


Gráfico 2.6: Calidad del Aire Interior en colegio Francisco Valdés Subercaseaux de Curarrehue. Fuente: Artículo “Environmental Performance of Schools in Areas of Cultural Sensitivity”. (Fuente: Trebilcock et al, 2012)



Un factor revelador que se aprecia, es que el colegio en el que se utilizaron estrategias de eficiencia energética queda categorizado en el último eslabón de la calificación durante el invierno. Lo anterior, debido a que sólo el 16% del tiempo se mantuvo por debajo de los 1000ppm.

Adicionalmente, las aulas del colegio Francisco Valdés Subercaseaux (Curarrehue) alcanzaron concentraciones máximas de 4.773ppm en invierno y 4.526ppm en verano, lo cual sería consecuencia, probablemente, de la alta hermeticidad e inadecuada estrategia de ventilación. Ello se refleja en los gráficos 2.7 y 2.8, que muestran el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en invierno y verano respectivamente.



A pesar de ello, los usuarios encuestados manifestaron un alto nivel de conformidad respecto de la calidad del aire interior en los dos colegios. Ello es importante de analizar por cuanto pone en evidencia que una mala calidad del aire no necesariamente es perceptible por los usuarios.

Gráfico 2.7: Comportamiento del CO<sub>2</sub> en colegio F.V.S. en período invernal (Fuente: Resultados de las Mediciones. Proyecto Innova Chile N°09CN14-5706 “Evaluación de estrategias de diseño constructivo y de estándares de calidad ambiental y uso eficiente de energía en edificaciones públicas, mediante monitorización de edificios construidos”)

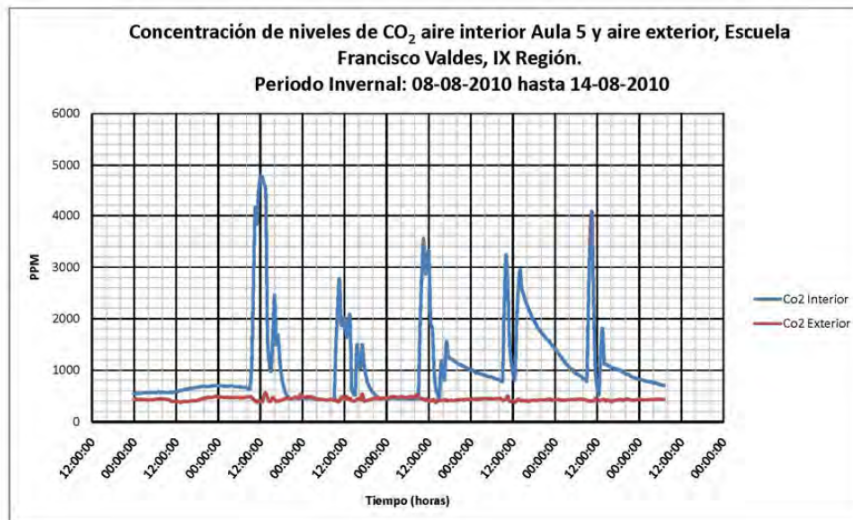
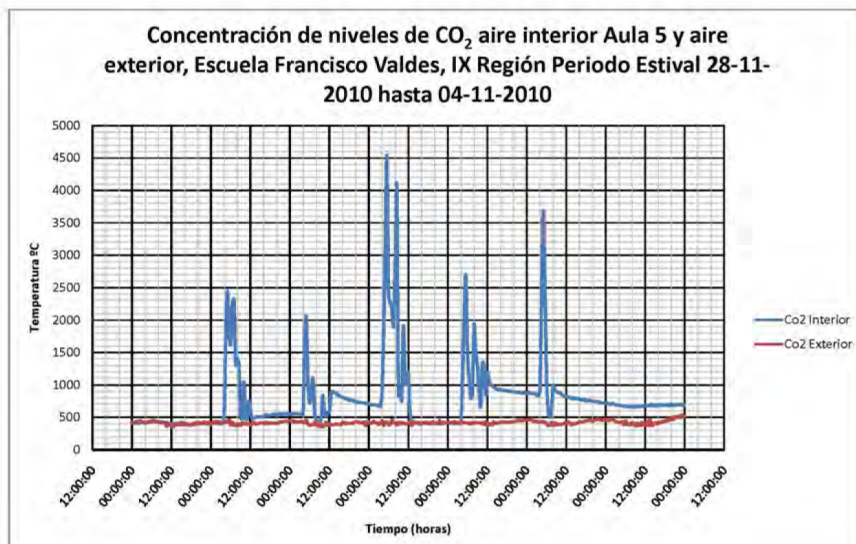


Gráfico 2.8: Comportamiento del CO<sub>2</sub> en colegio F.V.S. en período estival (Fuente: Resultados de las Mediciones. Proyecto Innova Chile N°09CN14-5706 “Evaluación de estrategias de diseño constructivo y de estándares de calidad ambiental y uso eficiente de energía en edificaciones públicas, mediante monitorización de edificios construidos”)



El estudio realizado por Molina et al (2012) abordó los niveles de dióxido de carbono y confort térmico en el aula escolar a través de encuestas de satisfacción. Este método se utilizó para generar indicadores dado que -según explica el artículo- los altos niveles de CO<sub>2</sub> tendrían consecuencias sobre el aprendizaje, concentración, productividad y salud.

Una de las premisas que se plantea es que, en zonas del país con bajas temperaturas donde se utilice ventilación natural, normalmente no se abrirán las ventanas en pos de conservar el confort térmico en el aula. Ello generaría un alza en los niveles de CO<sub>2</sub>. Las encuestas se realizaron en dos colegios del extremo austral de Chile (Aysén y Cochrane), zona caracterizada por ser fría y húmeda durante la mayor parte del año. En los casos estudiados, se midió que la hermeticidad se encontraba levemente por sobre los rangos definidos en el estándar del RT2005 francés. Si bien estas infiltraciones podrían implicar un beneficio a la CAI, son insuficientes para garantizarlo y generan importantes fugas de calor en un clima donde lo que se desea es conservarlo.

Los gráficos 2.9 y 2.10, presentan el porcentaje del tiempo en que las concentraciones de CO<sub>2</sub> se ubican en cada rango de medición, en las respectivas aulas.

Gráfico 2.9: Distribución de la concentración del CO<sub>2</sub> durante una semana de clases en el colegio 1. Los límites aceptables son excedidos en un 84% del horario de clase. La mayor parte del tiempo la calidad del aire es “mala” (Fuente: Molina et al, 2012)

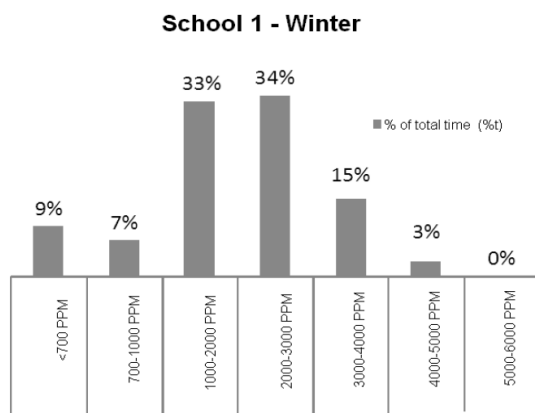
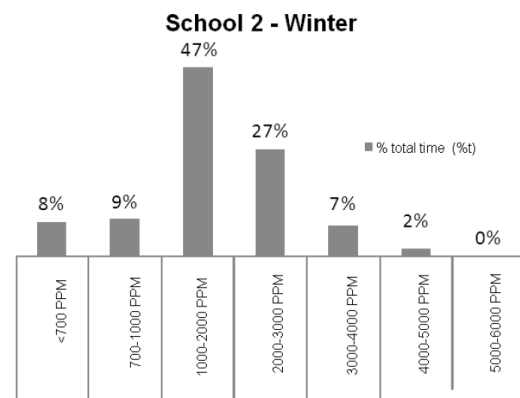


Gráfico 2.10: Distribución de la concentración del CO<sub>2</sub> durante una semana de clases en el colegio 2, con su respectiva escala de calificación. Sólo en el 17% del horario de clase se presenta una calidad del aire “buena o inocua” (Fuente: Molina et al, 2012)



Al realizar las encuestas de percepción sobre la calidad del aire durante la clase, el 100% de los usuarios en el Colegio 1 respondieron “negativamente o no satisfechos”, refiriéndose a la ausencia de ventilación y malos olores. En el Colegio 2, en cambio, el 80% de los usuarios respondieron esa misma percepción.

El artículo hace alusión a que la ausencia de una normativa adecuada en Chile, puesto que define valores prescriptivos relacionados con el tamaño de la sala y porcentaje de ventanas practicables, pero no fija un objetivo en cuanto a las concentraciones de CO<sub>2</sub> o las renovaciones de aire por hora y temperaturas de confort.

Finalmente, el último estudio que se presenta el caso del Liceo Politécnico de Curacautín ubicado en la Región de la Araucanía, Zona Climática Sur Interior (Ref. NCh.1079Of.2008), Zona Térmica 6, que ha sido diseñado en base a estrategias de diseño pasivo. En él, se ha contemplado el requerimiento de calefacción para todo el período de clases debido a que, excepto en un mes, las temperaturas del lugar se ubican por debajo de la zona de confort.

Así, el edificio privilegia las estrategias de diseño pasivo en cuanto a ganancias solares y conservación del calor. La ventilación, por su parte, se contempla a través de muros Trombe, tal como lo expresan los cortes esquemáticos de la figura 2.1.

El énfasis en la ventilación está puesto en el control de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas, debido a que, dadas las bajas temperaturas en el entorno, la construcción deberá mantenerse lo más hermética posible en pos de resguardar el ambiente térmico interior.

En el caso de las aulas expuestas hacia el norte, la ventilación trabaja mediante muros Trombe en esa misma fachada para precalentar el aire exterior que ingresa. Conjuntamente, se dispone de un sistema de recuperación de calor para aprovechar la temperatura del aire extraído de las aulas y traspasarlo al aire inyectado.

La siguiente figura muestra aulas con diseño pasivo en Zona Sur Interior de Chile. En ellas se propone el uso de un muro trombe para abordar la problemática de renovar el aire versus la necesidad de conservar el calor. En este caso se destaca el énfasis que se ha puesto en implementar estrategias de eficiencia energética mediante diseño pasivo. El principal atributo del muro trombe, es que permite precalentar el aire mediante efecto invernadero, por lo que se presume que su incorporación dentro del sistema de ventilación generaría resultados más efectivos en invierno

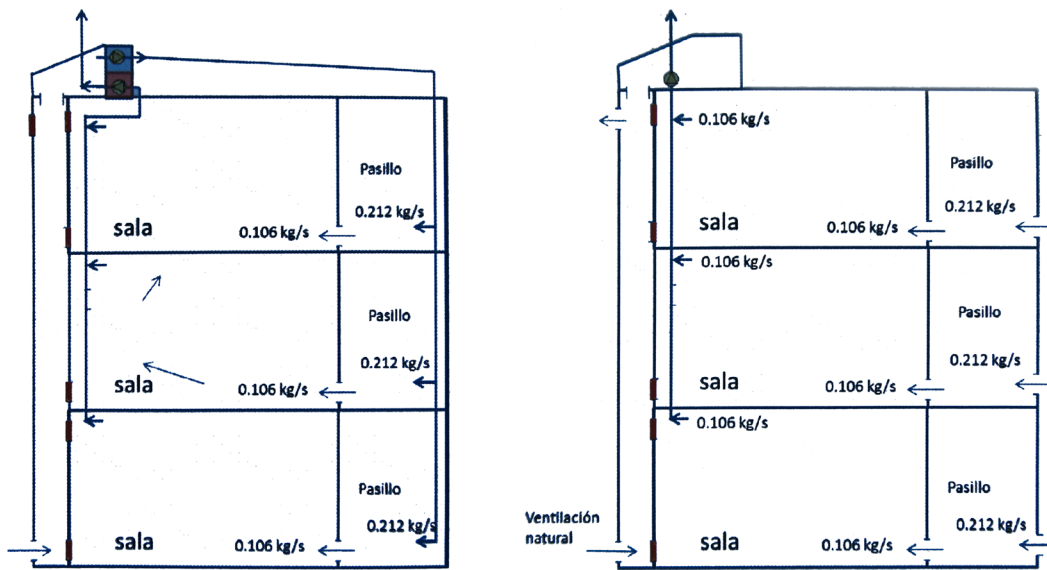


Figura 2.1: Diagrama de funcionamiento muro trombe, invierno con recuperador de calor (der.) y verano (izq). Fuente

Como comentarios concluyentes respecto del capítulo “Marco Teórico”, se tiene que la concentración de dióxido de carbono al interior del aula escolar es una variable que amerita ser monitorizada por cuanto su exceso tendrá repercusiones sobre el ejercicio cognitivo de los estudiantes. Existen numerosos casos que demuestran que los parámetros establecidos por organismos internacionales no son alcanzados en la mayor parte de los casos chilenos estudiados.

Si bien existe una base normativa y guías, tanto nacionales como extranjeras, que hacen referencia a buenas prácticas en materia de ventilación, las evaluaciones pos ocupacionales en que se han hecho mediciones a la calidad del aire interior, son en su mayoría insatisfactorias. En el panorama general, la incorporación de nuevos estándares en materia de hermeticidad de la envolvente y el hecho que la eficiencia energética sea un aspecto innovador a nivel nacional, permiten suponer que aún no hay suficiente trayectoria como para equilibrar el conjunto de objetivos a los que aspira el proyecto arquitectónico y de especialidades. Conjuntamente, las guías de eficiencia energética enfocadas al aula escolar, así como los términos de referencia para fijar un estándar calidad del aire interior, son de reciente edición, por lo que sería esperable que futuras experiencias alcancen niveles más satisfactorios.

En particular, la observación empírica de casos muestra que el problema se acentúa cuando las temperaturas caen por debajo de los rangos de confort y, conjuntamente, el sistema de ventilación disponible son ventanas cuya apertura depende de la decisión del usuario. Algunos casos abordan este problema integrando la aspiración de mantener un adecuado confort térmico y, en tal sentido, incorporan estrategias arquitectónicas de precalentamiento del aire. No obstante, ello no alcanza a compensar el alza en las concentraciones de dióxido de carbono en el aula. Si se consideran las estrategias de ventilación explicadas en el capítulo, podría sugerirse que habría que avanzar hacia sistemas híbridos con monitorización permanente, para así no ventilar en exceso y contraponerse al objetivo de conservar la temperatura interior en escenarios de invierno.

### Capítulo 3. Casos de estudio

Para llevar a cabo el análisis se seleccionaron dos casos de estudio, ambos ubicados en la Comuna de Concepción. Respectivamente, se consideró que son representativos de dos realidades en cuanto a diseño y tecnologías constructivas en arquitectura escolar mientras que, cada uno de ellos está asociado a estrategias diferentes de ventilación y calefacción. Los casos serán denominados como Caso A y Caso B.

La localización de los casos, Concepción, Chile, tiene coordenadas 36°S,73°O. De acuerdo con la norma NCh1079Of.2008, esta localidad se encuentra dentro de la Zona Climático Habitacional llamada “Sur Litoral”, lo cual está reflejado en la figura 3.1.

De acuerdo con la misma norma, la Zona Climático Habitacional Sur Litoral se define como: “Zona de clima marítimo, lluvioso. Inviernos largos. Suelo y ambiente salinos y húmedos. Vientos fuertes de componente W. Vegetación robusta. Temperatura templada fría.”

Su temperatura media en el mes de julio es 8,7°C, lo cual se considera “frío”, mientras que su Humedad Relativa media en el mismo mes es de 88%, la cual se considera “muy alta” (Tabla 3, NCh1079). Su altitud media es 12msnm.

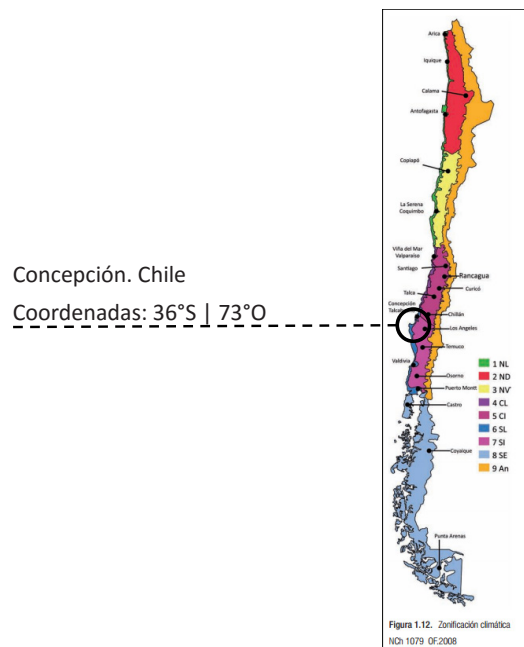


Figura 3.1: Zonificación Climática. Fuente: NCh 1079 Of. 2008

En la tabla 3.1, se resumen las características principales de los respectivos casos de estudio.

Tabla 3.1: Los casos A y B presentan características que son representativas de dos realidades presentes en la arquitectura escolar, reflejada en la incorporación de criterios de eficiencia energética.

		<b>CASO A</b>	<b>CASO B</b>
Arquitectura	Superficie Aula	42,6m2	45,2m2
	Volumen Aula	115 m3	124 m3
	Área Total Ventanas	9,54 m2 (100%)	9,24 m2 (100%)
	Área de Ventanas Fijas	4,62 m2 (48%)	4,62 m2 (50%)
	Área de Ventanas Abatibles	4,92 m2 (52%)	4,62 m2 (50%)
	Área de Puertas	1,8 m2	1,8 m2
	Área Celosía sobre puerta	0,3 m2	No posee
Sistemas de Calefacción y Ventilación	Calefacción	Calefacción central con radiador en la sala.	Diseño Pasivo. Captación solar y aislación térmica.
	Ventilación	Ventilación Natural a través de ventanas operables y celosía sobre la puerta de ingreso al recinto.	Sistema mecanizado de inyección accionado por timer. Sistema pasivo de extracción mediante dumpers que se abren por sobrepresión.
Materialidad	Estructura	Hormigón armado	Hormigón
	Ventanas	Carpintería de Aluminio. Doble vidrio hermético.	Carpintería de PVC. Doble vidrio hermético
	Cielo	Cielo Americano	Yeso Cartón
	Aislación Térmica en muros	No posee.	Aislación Térmica Exterior (EIFS)
Usuarios	Número	28 alumnos(edad promedio 7 años) 1 Docente (adulto)	28 alumnos(edad promedio 7 años) 1 Docente (adulto)
	Actividad	Estudiantes de Primero Básico	Estudiantes de Primero Básico
Orientación		Poniente	Norte

Los casos presentados están ubicados en la misma ciudad y ambos son aulas destinadas a alumnos de primero básico, cuya número y edad de usuarios es la misma. Se consideró estos antecedentes como fundamentales puesto que fija las variables de localización y perfil de los ocupantes, dentro de un mismo período de tiempo.

En cuanto a los sistemas de ventilación que interesa estudiar, el Caso A se ventila naturalmente mediante ventanas que se abren según las instrucciones del docente a cargo y, complementariamente, mediante la celosía ubicada por sobre la puerta, la que conecta con un pasillo cerrado. El porcentaje de ventanas que se abren es reflejo de la Ordenanza Chilena, que establece un valor prescriptivo y en el evento que éstas sean abiertas, se produciría ventilación cruzada en conjunto con la celosía ubicada sobre la puerta. La calefacción en este caso es mediante un radiador con agua caliente, que forma parte de un sistema centralizado que opera durante todo el período invernal para un bloque de varias aulas.

El Caso B, en cambio, tiene un diseño con eficiencia energética basado en alcanzar el confort térmico de manera pasiva. Ello se refleja en la orientación de las salas y alto estándar de aislamiento térmico y hermeticidad. Este caso posee un sistema de ventilación con inyección de aire fresco y extracción de aire viciado, accionado por un timer que trabaja de manera continua. Dada la condición de arquitectura con diseño pasivo en la variable térmica (sin sistema de calefacción), los usuarios están instruidos para no abrir las ventanas durante el invierno para conservar la temperatura alcanzada mediante ganancias solares y permitir que el sistema de ventilación opere por si solo.

A continuación, la tabla 3.2, resume qué tipo de estrategias se utilizan en cada caso:

Tabla 3.2: Clasificación de las estrategias de calefacción y ventilación en los casos de estudio.

	<b>Calefacción</b>	<b>Ventilación</b>	<b>Aislación Térmica</b>
CASO A	Activa: Sistema centralizado con radiadores.	Pasiva: Ventanas de apertura manual y celosía sobre la puerta de acceso.	Baja-Media: No posee.
CASO B	Pasiva: Orientación de ventanales hacia el norte y alto estándar de aislamiento térmica.	Activa: Sistema mecanizado de inyección y extracción.	Alta: Aislación térmica exterior de poliestireno expandido.



Las figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 comprenden los planos del caso A, caracterizado por no tener estrategias de eficiencia energética, a la vez que se ventila mediante ventanas practicables y utiliza calefacción centralizada para lograr el confort térmico interior. El hecho que tenga ventanas por una sola fachada permite presumir que la renovación de aire puede producirse a través de tiro térmico puro (en ausencia de viento), por presiones de viento o por ambos efectos. Se considera que su rendimiento general es bajo ya que es muy sensible a la altura de la ventana (AChEE, CITEC UBB, 2012).

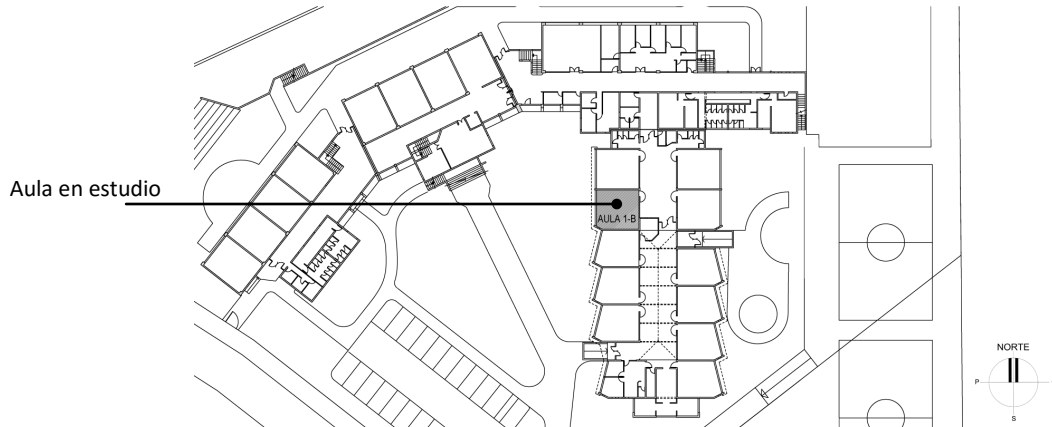


Figura 3.2: Emplazamiento del aula a monitorizar (Caso A)

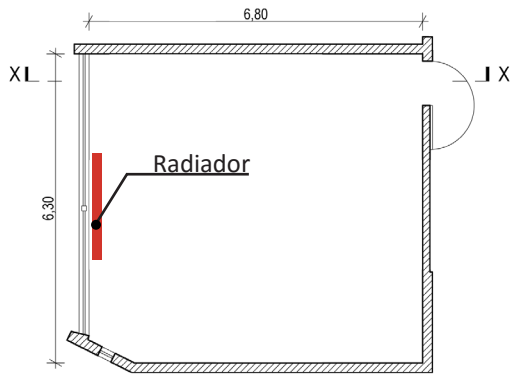


Figura 3.3: Planta aula Caso A.

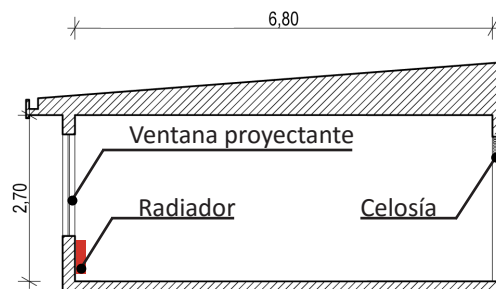


Figura 3.4: Corte X-X.

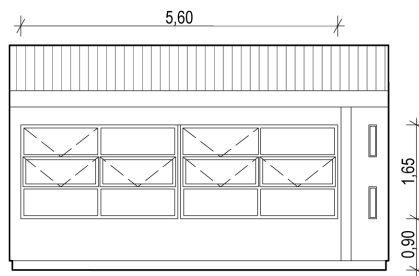


Figura 3.5: Elevación poniente del aula Caso A

La figura 3.6 presenta fotografías del Caso A en uso durante el período de monitorización



Figura 3.6: Fotografías exteriores e interiores del Caso A. Se aprecian los elementos que permiten calefaccionar y ventilar naturalmente.

A continuación se presentan los planos del Caso B (Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10) construcción en que se han incorporado, desde la fase de diseño, estrategias de eficiencia energética. Ello conlleva un alto grado de aislación térmica, hermeticidad en la envolvente y una orientación que aprovecha las ganancias solares. Conjuntamente, dado que se ha instruido a los usuarios a no abrir las ventanas en pos de mantener mejor controlado el confort térmico, existe un sistema de ventilación mecanizado que inyecta aire para diluir y extrae por otro lado para remover.

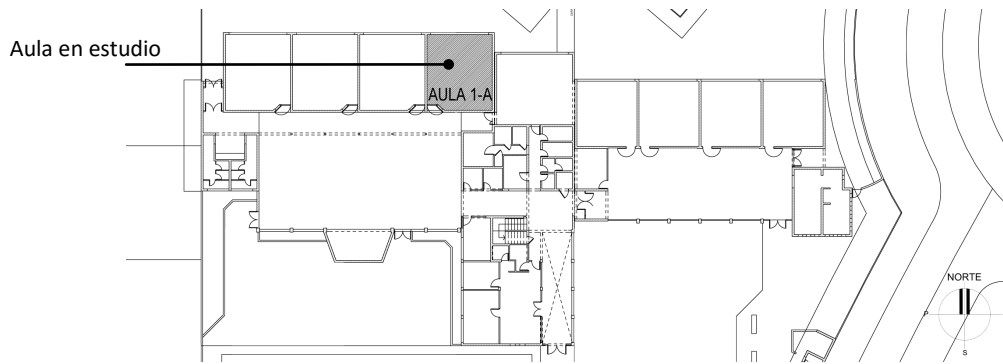


Figura 3.7: Emplazamiento del aula a monitorizar (Caso B)

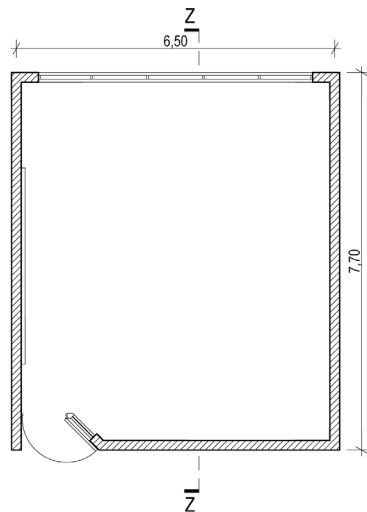


Figura 3.8: Planta aula Caso B.

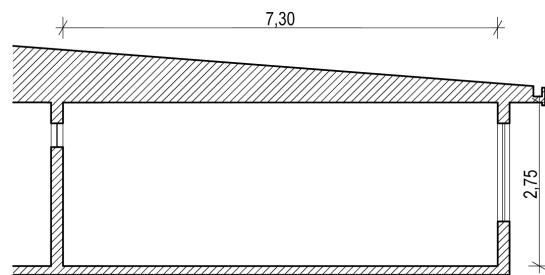


Figura 3.9: Corte Z-Z.

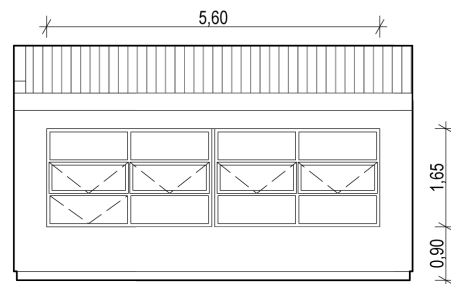


Figura 3.10: Elevación norte del aula Caso B

La figura 3.11 presenta fotografías del Caso B en uso durante el período de monitorización

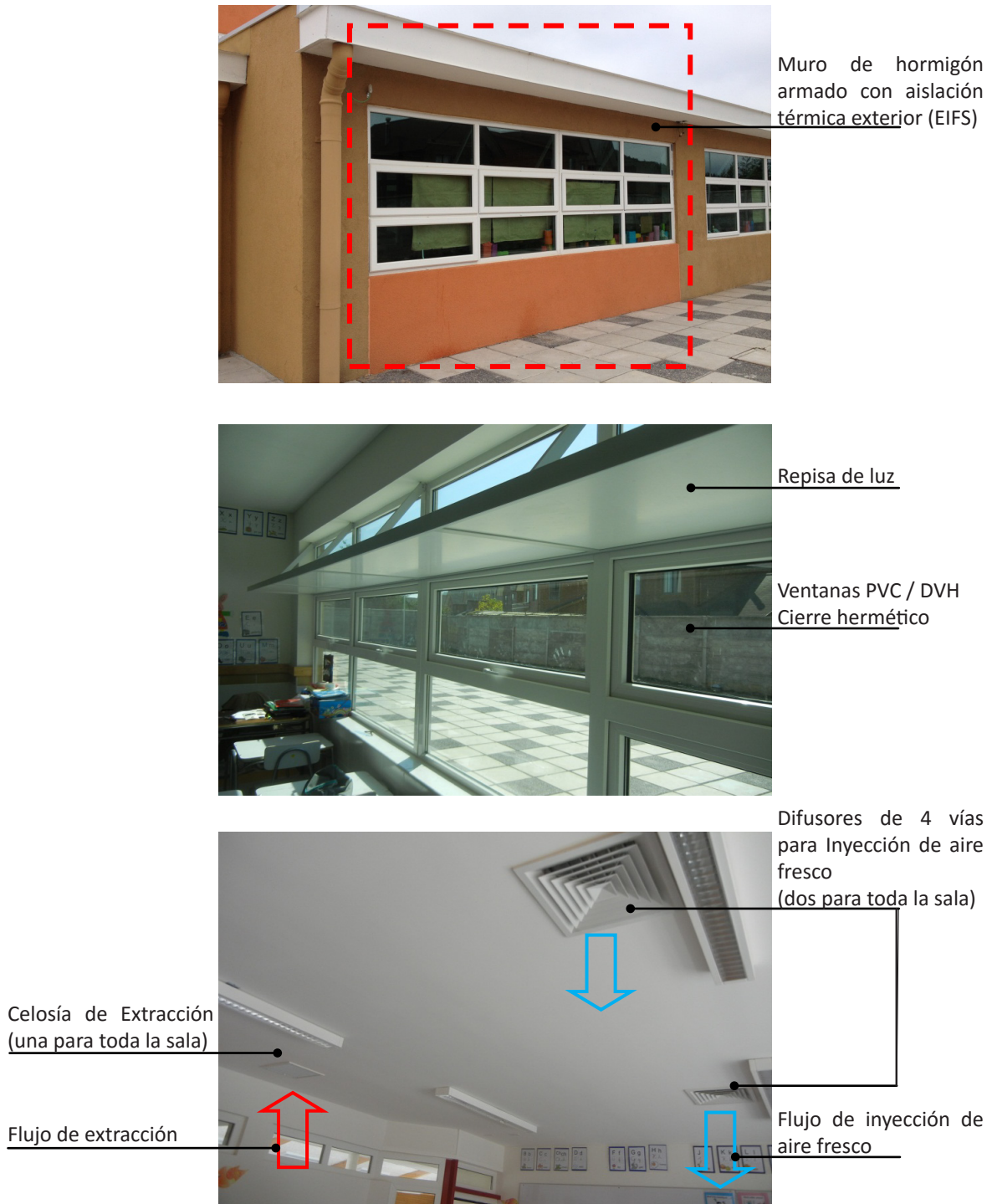


Figura 3.11: Fotografías exteriores e interiores del Caso B. Se aprecian los elementos que permiten ventilar mecánicamente, junto con la fachada que permite la captación solar para calefaccionar de modo pasivo.

La figura 3.12 presenta el sistema de ventilación mecanizado que utiliza el Caso B, en que se plantean los siguientes parámetros de funcionamiento en condiciones de régimen estacionario:

- Tasa de Ventilación Mecánica: 15 m<sup>3</sup> / h por persona
- Ocupancia: 28 personas
- Caja de Ventilación con ventilador centrífugo
- Caudal de Aire: 3.360 m<sup>3</sup>/h (para 8 aulas)
- Funcionamiento: automático accionado por timer

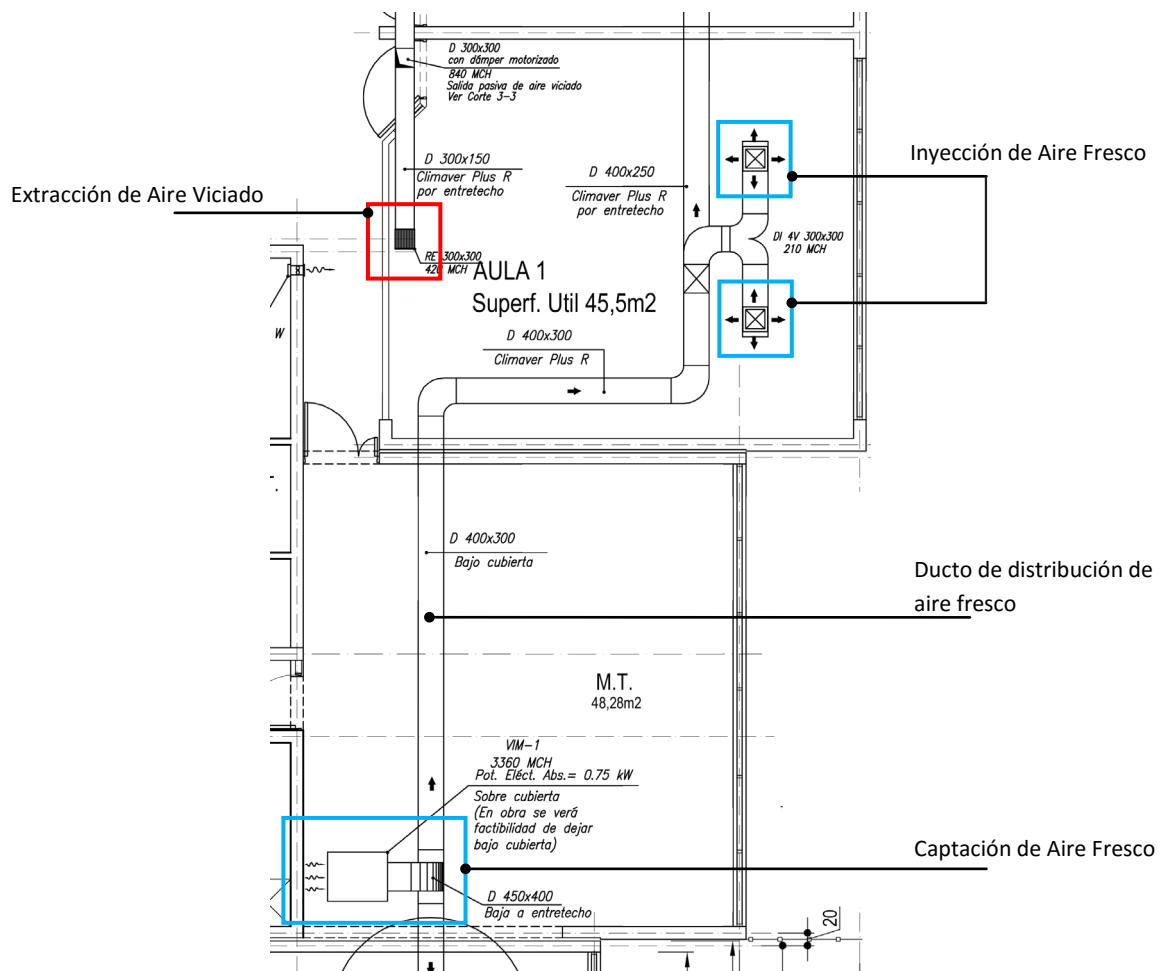


Figura 3.12: Planta del sistema de ventilación mecanizado en Caso B. (Fuente: Proyecto de especialidad ventilación caso B).

El corte expresado en la figura 3.13 muestra la sección típica para aulas en el colegio, donde la inyección y extracción se ubican en los bordes opuestos de la sala para generar la remoción deseada.

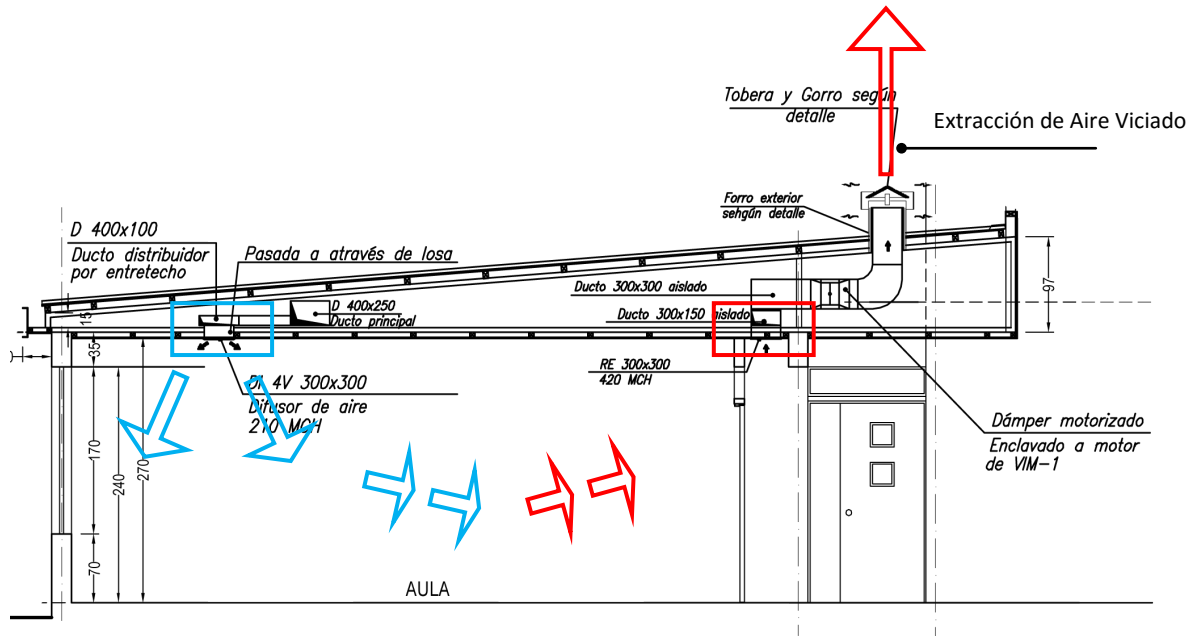


Figura 3.13: Corte del sistema de ventilación mecanizado en Caso B. (Fuente: Proyecto de especialidad ventilación caso B).

Se considera importante comprender el contexto climático referido en la primera parte del presente capítulo pues ello otorga un marco general para referirse al confort térmico de los ocupantes del aula en esta localidad. Esto será una referencia para comprender cuándo hace “frío” o “calor” en el ambiente monitorizado. Sin embargo, esta referencia puede acotarse con mayor precisión si consideramos las temperaturas registradas por la estación meteorológica de la ciudad durante los meses de estudio.

A continuación se indican las temperaturas medias en Septiembre y Octubre de 2013 (meses en que se realizaron las mediciones de campo) registradas por la DGAC, cuya estación meteorológica está ubicada en Carriel Sur.

- Temperatura Media Mes de Septiembre 2013 (30 días) = 10,2 °C (Fuente: DGAC)
- Temperatura Media Mes de Octubre 2013 (31 días) = 11,7 °C (Fuente: DGAC)

Con estos datos es posible determinar una temperatura media para ambos meses, ponderando los valores según el número de días que cada mes posee.

- Temperatura Media período Septiembre y Octubre= 11,0°C

Si tenemos en cuenta que el confort térmico de los usuarios será determinante en su disposición favorable o adversa a abrir las ventanas para ventilar (relevante para el Caso A) entonces debemos conocer cuál es esa zona de confort. Dado que ésta es un rango de temperaturas relacionado con las temperaturas de un período de tiempo, para el caso de estudio se calculará utilizando la Temperatura Media del período Septiembre-Octubre 2013, basándose en la fórmula contenida en el Modelo de Neutralidad Térmica planteado por Auliciems & de Dear.

$$TN = 17,6 \text{ °C} + (0,31 \times TM)$$

$$TC = TN \pm 2,5 \text{ °C}$$

Donde:

TN=Temperatura Neutra

TM= Temperatura Promedio Exterior de Bulbo Seco

TC=Temperatura de Confort

Cálculo de Temperatura Neutra (TN)

$$TN = 17,6^{\circ}\text{C} + (0,31 \times 11,0^{\circ}\text{C})$$

$$TN = 17,6^{\circ}\text{C} + 3,41^{\circ}\text{C}$$

$$TN = 21,0^{\circ}\text{C}$$

Cálculo Temperatura de Confort (TC)

$$TC = 21,0^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$$

$$TC = \text{desde } 18,5^{\circ}\text{C hasta } 23,5^{\circ}\text{C}$$

En consecuencia tenemos que, si durante el invierno las temperaturas exteriores se ubican por debajo de la zona de confort térmico de los usuarios, es esperable que en el aula se desee evitar la fuga de calor manteniendo cerradas las ventanas, lo cual predispone un ambiente adverso a la renovación del aire interior a menos que se cuente con otro método de ventilación.



## Capítulo 4. Planificación e implementación de la monitorización

### 4.1 Descripción

En el presente capítulo se exponen el procedimiento y la planificación que se realizó para monitorizar las tres variables de interés: Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Temperatura (T°) y Humedad Relativa (HR). Todas ellas fueron medidas en los dos casos de estudio presentados en el Capítulo 4, tanto en el interior como en el exterior de las aulas y en tiempo simultáneo.

La importancia de monitorizar el comportamiento del ambiente exterior radica en conocer, primeramente, cómo son los niveles de CO<sub>2</sub> exterior debido a que ellos podrían ser una fuente adicional de contaminación del ambiente interior. Asimismo, conocer el comportamiento de las temperaturas exteriores permitirá comprender cómo era tal condición en relación con la temperatura de confort, para así visualizar posibles correlaciones.

En ambos casos se trata de salas de primero básico con igual número de usuarios, para así fijar las variables de uso y ocupancia.

La monitorización que permitió levantar datos se realizó respetando las siguientes condiciones:

- Los sensores captaron mediciones cada 30 minutos, de manera continua, durante 16 días en primavera, del 24/9 al 9/10. Durante este período se esperaba temperaturas relativamente bajas (por debajo del rango de confort) para poder visualizar los escenarios más desfavorables para la ventilación. Ver tabla 4.1
- Durante los días de monitoreo los colegios tuvieron régimen normal de ocupación, lo cual incluyó el uso del sistema de calefacción en el Caso A y el régimen normal de ventanas cerradas en el Caso B. La tabla 4.2 y figura 4.1 muestran los períodos de interés analizados según los propósitos del estudio.
- Se ubicaron equipos dentro y fuera de la sala. Ver figura 4.2
- La ubicación de los sensores interiores es en el centro de la sala. Ver figura 4.2
- La altura de los sensores interiores es 1,5m para medir el aire que respira una persona sentada.

Capítulo 4: Planificación e implementación de la monitorización

Tabla 4.1: Período de medición. Los sensores operaron de manera continua y en simultáneo a través de 16 días, a contar del martes 24 de septiembre de 2013.

Período de Medición															
Inicio: 24 de septiembre, 2013. Término: 9 de octubre, 2013. Total : 16 días															
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16
Mar	Mie	Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Mar	Mie
24/9	25/9	26/9	27/9	28/9	29/9	30/9	1/10	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10

Tabla 4.2: Muestra para análisis. Dentro de los 16 días de levantamiento de datos, se consideró como muestra relevante aquel período en que las aulas se encuentran en uso. Eso abarcó desde lunes a viernes en los horarios de clase. Adicionalmente, se incluyó un tiempo previo y posterior, que permitirá observar el comportamiento de las variables antes y después de la ocupación del aula.

Muestra para Análisis																	
Correspondiente a los períodos de tiempo en que las aulas están en uso. Total : 12 días, de 7:30hrs. a 15:00hrs.																	
D1	D2	D3	D4	FIN DE SEMANA			D7	D8	D9	D10	D11	FIN DE SEMANA			D14	D15	D16
Mar	Mie	Jue	Vie				Lun	Mar	Mie	Jue	Vie				Lun	Mar	Mie
24/9	25/9	26/9	27/9				30/9	1/10	2/10	3/10	4/10				7/10	8/10	9/10

Curso: 1ºBásico-A

Fecha de Impresión: martes, 14 de mayo de 2013

Prof. Jefe: #N/A

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
1	E.FISICA Gustavo Barrera Sala: 8:00-8:45	ENGLISH Carolina Sanchez Sala: 8:00-8:45	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 8:00-8:45	SCIENCE Carolina Sanchez Sala: 8:00-8:45	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 8:00-8:45
2	E.FISICA Gustavo Barrera Sala: 8:45-9:30	ENGLISH Carolina Sanchez Sala: 8:45-9:30	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 8:45-9:30	SCIENCE Carolina Sanchez Sala: 8:45-9:30	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 8:45-9:30
3	RELIGION Gerardo Ulloa Sala: 9:40-10:25	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 9:40-10:25	ART Carolina Sanchez Sala: 9:40-10:25	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 9:40-10:25	TECHNOLOGY Carolina Sanchez Sala: 9:40-10:25
4	RELIGION Gerardo Ulloa Sala: 10:25-11:10	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 10:25-11:10	ART Carolina Sanchez Sala: 10:25-11:10	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 10:25-11:10	ENGLISH Carolina Sanchez Sala: 10:25-11:10
5	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 11:30-12:15	MUSICA Omar Garcia Sala: 11:30-12:15	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 11:30-12:15	ENGLISH Carolina Sanchez Sala: 11:30-12:15	E.FISICA Gustavo Barrera Sala: 11:30-12:15
6	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 12:15-13:00	MUSICA Omar Garcia Sala: 12:15-13:00	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 12:15-13:00	ENGLISH Carolina Sanchez Sala: 12:15-13:00	E.FISICA Gustavo Barrera Sala: 12:15-13:00
7	SOCIAL Carolina Sanchez Sala: 13:10-13:55	C.CURSO Carolina Sanchez Sala: 13:10-13:55	SCIENCE Carolina Sanchez Sala: 13:10-13:55	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 13:10-13:55	ENGLISH Carolina Sanchez Sala: 13:10-13:55
8	SOCIAL Carolina Sanchez Sala: 13:55-14:40	LENGUAJE Angélica Diaz Sala: 13:55-14:40	SOCIAL Carolina Sanchez Sala: 13:55-14:40	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 13:55-14:40	MATEMATICA Angélica Diaz Sala: 13:55-14:40

INICIO MUESTREO. 7.30hrs. →

INICIO JORNADA. 8:00hrs. →

TÉRMINO JORNADA. 14.40hrs. →

TÉRMINO MUESTREO. 15:30hrs. →

Figura 4.1: Ejemplo del horario de clases (Caso B).

## Capítulo 4.2 Implementación de la Monitorización

Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 presentan la ubicación de los sensores en las respectivas aulas, así como la descripción de los mismos y la obtención de los datos.

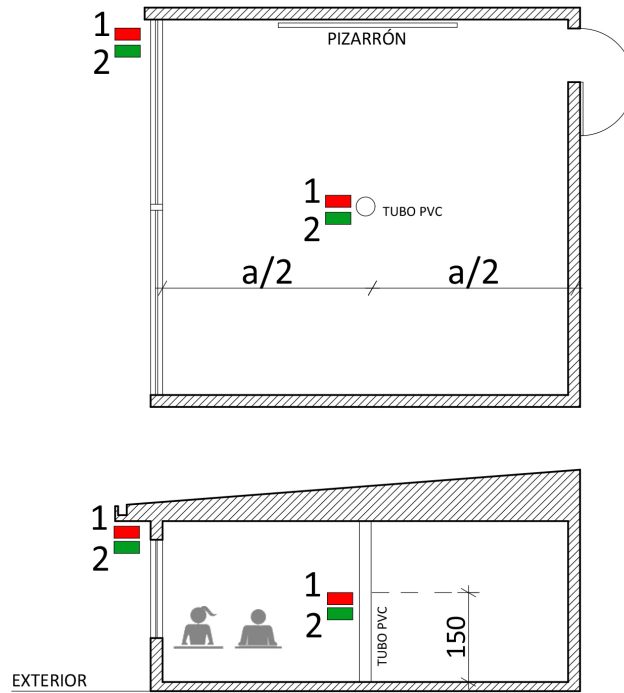


Figura 4.2: Planta y corte esquemáticos de instalación de sensores interiores y exteriores



Figura 4.3:  
Registrador de CO2  
Marca: Hobo  
Modelo: Uni-K30



Figura 4.4:  
Data Logger con Sensor de T° y HR.  
Marca: Hobo  
Modelo: U12-013

Los datos registrados por los respectivos sensores son almacenados durante todo el período de trabajo en el Data Logger, el que se encuentra alimentado con energía eléctrica del recinto.

Al finalizar el período de medición, la información registrada en el Data Logger es llevada a un computador desde el que se rescatan los datos en una planilla Excel, tal como lo ilustra la figura 4.5.

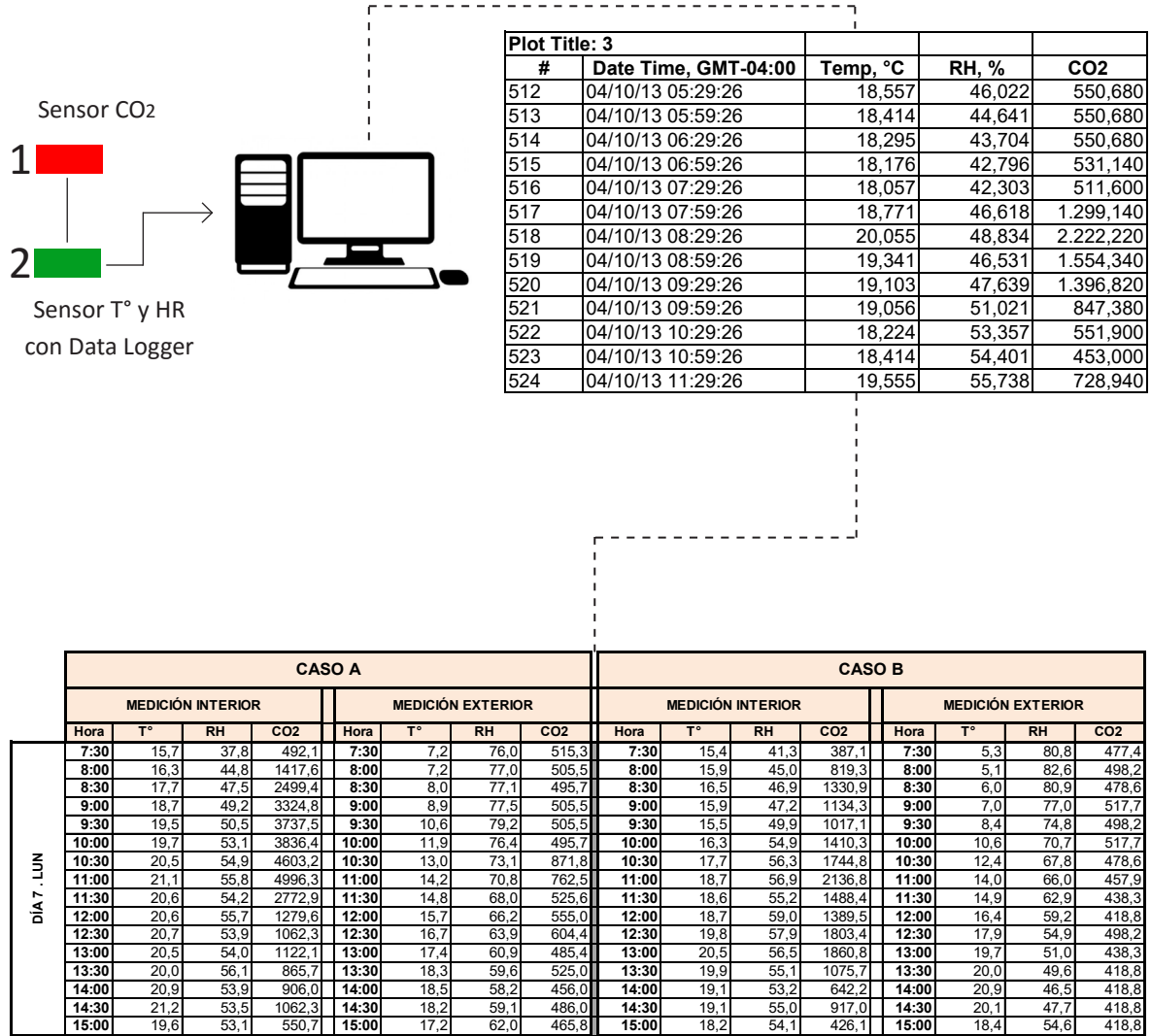


Figura 4.5: Obtención de datos y tabulación de los mismos

Las figuras 4.6 a 4.11 muestran fotografías tomadas en los casos A y B durante el período de monitorización y en régimen de uso normal de las respectivas aulas.



Figura 4.6: Vista del aula Caso A en régimen de uso normal, con los sensores instalados.



Figura 4.7: Tubo de PVC con los sensores para medir en el interior del aula Caso A.



Figura 4.8: Sensores ubicados en el exterior del aula Caso A.



Figura 4.9: Vista del aula Caso B en régimen de uso normal, con los sensores instalados.



Figura 4.10: Tubo de PVC con los sensores para medir en el interior del aula Caso B.



Figura 4.11: Sensores ubicados en el exterior del aula Caso B.

## CAPÍTULO 5 Resultados

### 5.1 Resultados de Monitorización

#### Mediciones de CO<sub>2</sub> durante los días 1 a 16

Habiendo implementado la monitorización y obtención de datos en las respectivas aulas, se procedió a graficar la información para visualizar el comportamiento de las variables medidas.

Primeramente, estos datos se mostrarán individualmente por caso (Caso A y Caso B), para visualizar el comportamiento del CO<sub>2</sub> medido en PPM a través del período de medición. Posteriormente, se presentará un gráfico en el que se sobrepondrán los resultados de ambos casos para obtener una visualización comparativa.

En todos los gráficos, se incluye como referencia una línea en los 1.000ppm, correspondiente a la recomendación de la ASHRAE para espacios educacionales.

Los gráficos 5.1 y 5.2 presentan el comportamiento del CO<sub>2</sub> parcelado en tramos de ocho días, con el propósito de analizar con mayor detalle la medición. Los resultados revelan que las concentraciones de CO<sub>2</sub> tienen marcadas alzas en todos los días de uso del aula. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> interior se equiparan a las exteriores durante la noche y en los fines de semana, cuando las aulas se encuentran desocupadas. Siendo el caso A una edificación sin un proyecto de ventilación, se aprecia una pronunciada alza de las concentraciones de CO<sub>2</sub> durante el período de ocupación.

Gráfico 5.1: Comportamiento del CO2 en el Caso B durante los días 1 a 8.

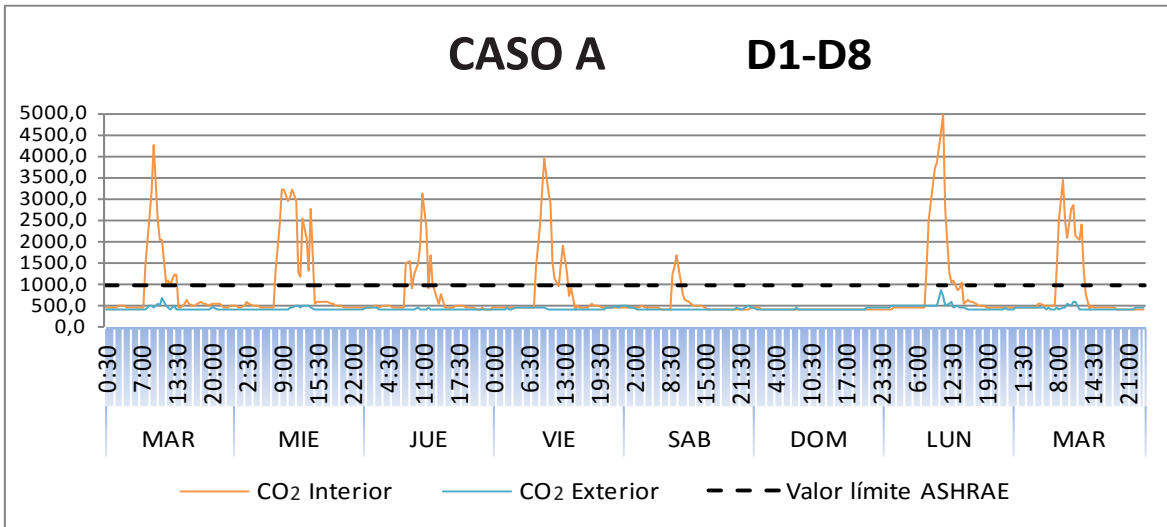
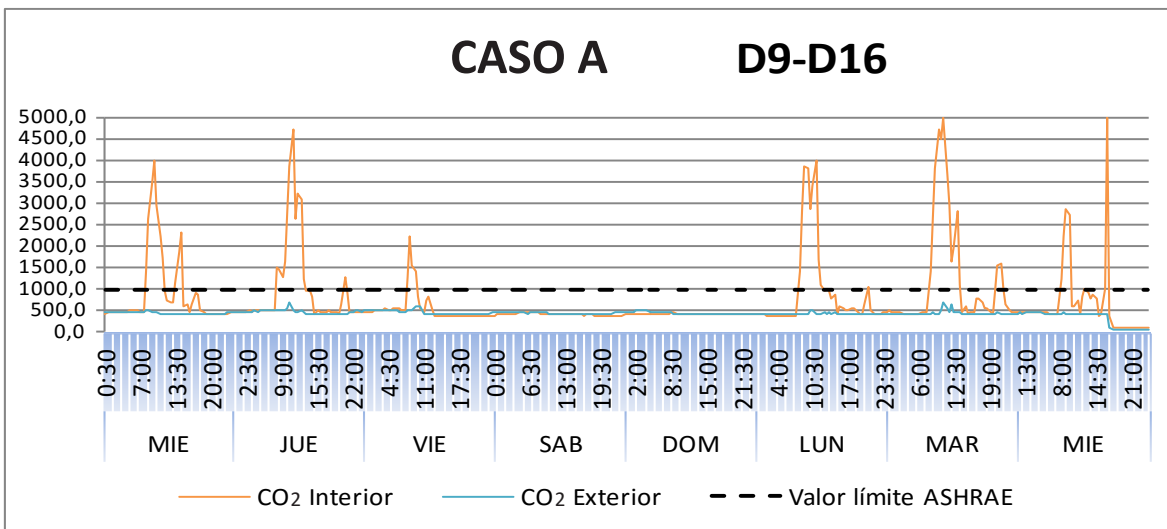


Gráfico 5.2: Comportamiento del CO2 en el Caso A durante los días 9 a 16.



Durante todo el período de medición, las condiciones del aire exterior se mantuvieron estables, en torno a los 500ppm, lo cual se considera normal. Sin embargo, las concentraciones al interior del aula tuvieron alzas por sobre lo recomendado en todos los días. Se aprecia que este comportamiento se acentúa en las primeras horas de la mañana, decreciendo en las últimas horas de ocupación. También se aprecia como una constante, que cada noche las concentraciones de CO2 interior se equiparan con las exteriores, lo cual permite indicar que cada mañana el aula del Caso A encuentra el inicio de la actividad escolar con aire muy limpio.



A continuación se presenta el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el Caso B, que es una edificación que contempla proyecto de ventilación (inyección y extracción) y que se calefacciona de manera pasiva. Es importante precisar que en el Caso B, se trata de un aula en que los usuarios están instruidos a no abrir las ventanas para resguardar las condiciones de hermeticidad en la envolvente.

Los gráficos 5.3 y 5.4, que grafican todos los días de medición, revelan que hay un período diario en que se exceden los 1.000ppm recomendados por la ASHRAE. También se puede apreciar que cada día, durante el período nocturno, las concentraciones interiores se equiparan a las exteriores. La misma situación ocurre durante los fines de semana.

Asimismo, se puede apreciar que, en términos generales, el alza en las concentraciones de dióxido de carbono se produce rápidamente en el primer tiempo de ocupación de la sala. Estos niveles, a medida que avanzan las horas, experimentan bajas y alzas, predominando las bajas, lo cual evidenciaría el trabajo del sistema del sistema de ventilación.

Gráfico 5.3: Comportamiento del CO2 en el Caso B durante los días 1 a 8.

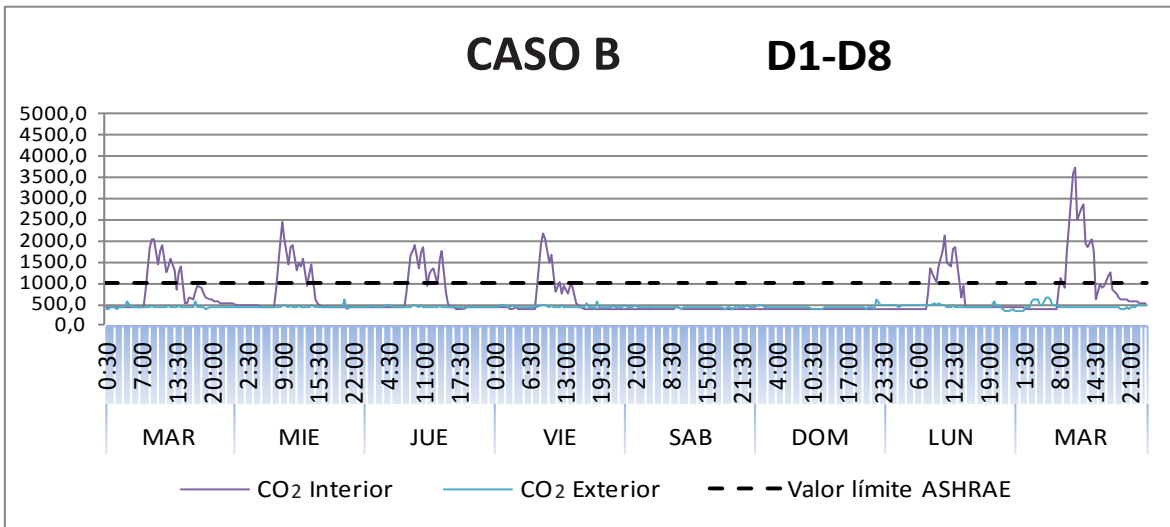
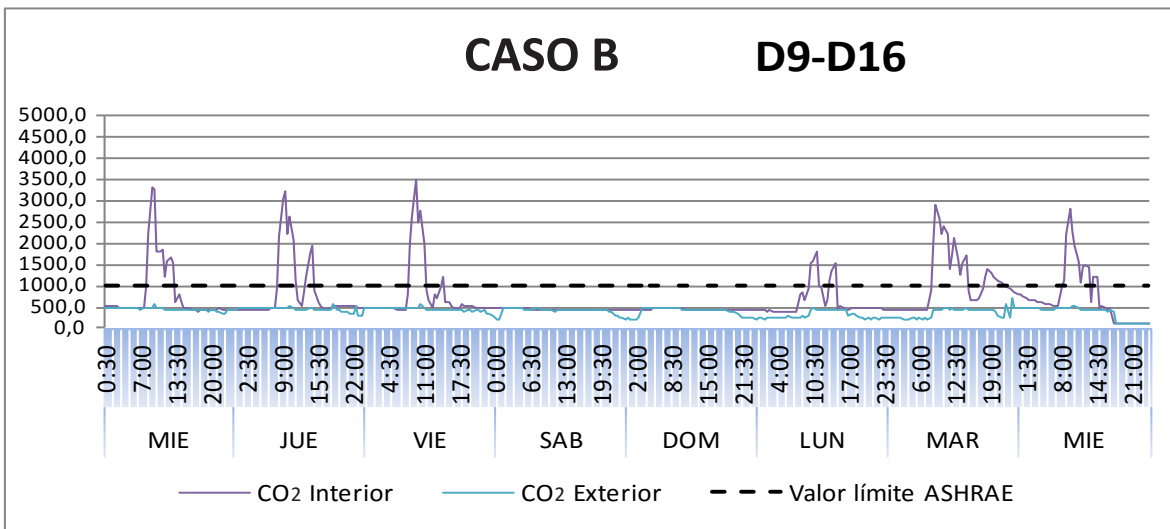
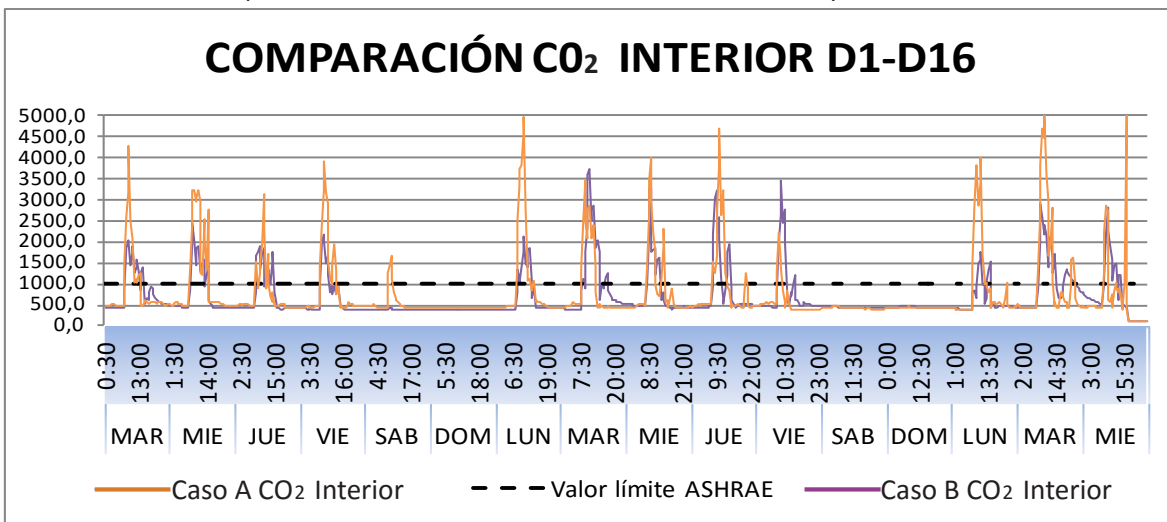


Gráfico 5.4: Comportamiento del CO2 en el Caso B durante los días 9 a 16.



A continuación, en los gráficos 5.5, 5.6 y 5.7 se superponen los respectivos resultados con el comportamiento del dióxido de carbono en los dos casos de estudio para obtener una visión comparativa de ellos.

Gráfico 5.5: Comparación de las concentraciones del CO<sub>2</sub> en el Casos A y B durante los días 1 a 16.



A lo largo de todo el período de medición se puede observar que el Caso A presenta concentraciones de CO<sub>2</sub> marcadamente superiores al Caso B. Esta condición se agudiza en ciertas horas de la mañana y hay cuatro días en que se superan incluso los 4000PPM.

Al observar en mayor detalle, parcelando en períodos de ocho días, se aprecian los comportamientos diarios. En ello se constata que, con excepción de dos días, siempre el Caso A excede al Caso B en concentraciones de CO<sub>2</sub>. En ambos casos, el comportamiento se caracteriza por tener altos y bajos de manera recurrente, lo cual da cuenta de situaciones puntuales en que el aire se contamina o se limpia. En ambos casos, también, el aire interior se equipara con el aire exterior en los momentos en que no está siendo utilizada el aula. Esta situación ocurre durante las tardes y las noches, lo que queda reflejado en los gráficos siguientes.

Gráfico 5.6: Comparación de las concentraciones del CO<sub>2</sub> en el Casos A y B durante los días 1 a 8.

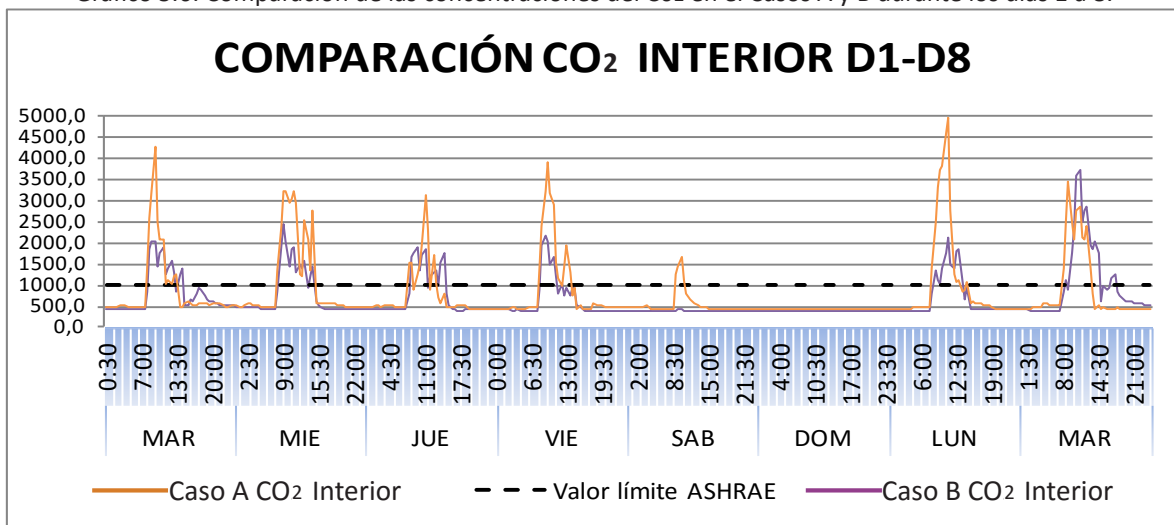
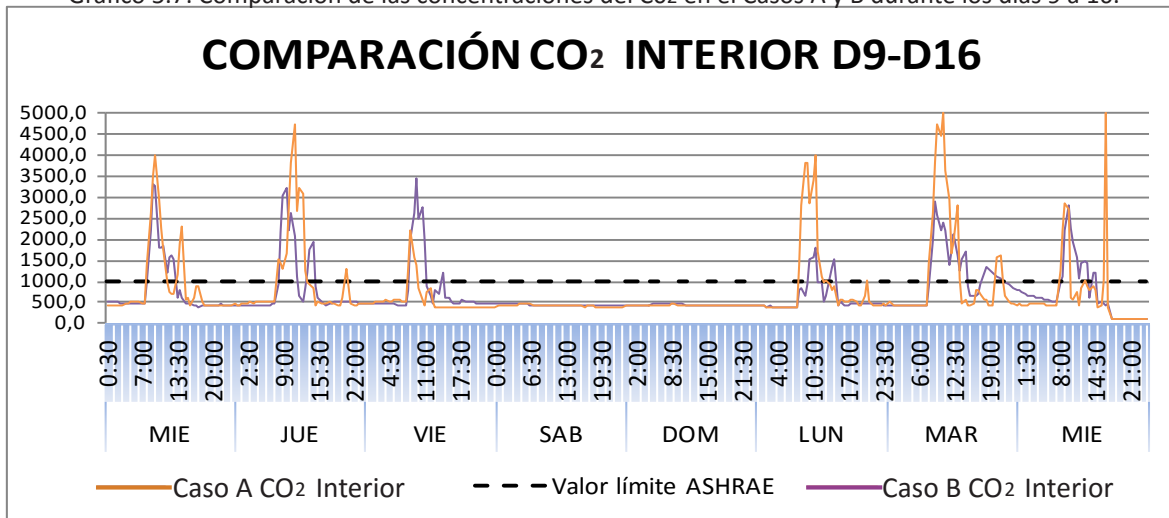


Gráfico 5.7: Comparación de las concentraciones del CO<sub>2</sub> en el Casos A y B durante los días 9 a 16.



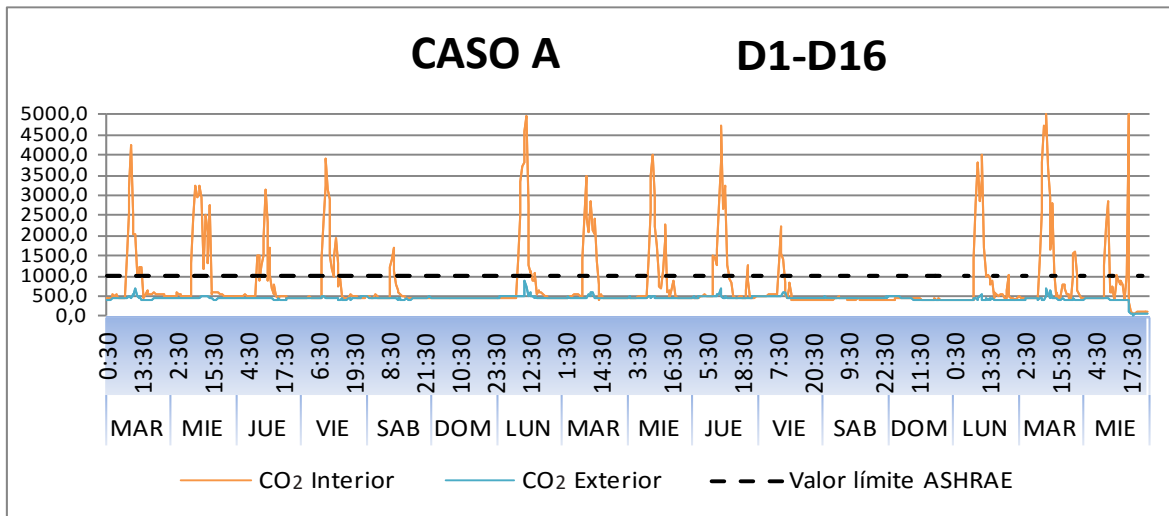
Mediciones de CO<sub>2</sub>, Temperatura (T°) y Humedad Relativa (HR) durante los días 1 a 16

Es un antecedente importante conocer el comportamiento de las tres variables medidas en el ambiente interior comparándolas con el ambiente exterior. En el caso del CO<sub>2</sub>, éste permite visualizar cómo es la calidad del aire que ingresa a través del sistema de ventilación. En el caso de la temperatura, éste es de interés por cuanto refleja cómo es el acondicionamiento térmico interior cuando las temperaturas externas bajan. Y en el caso de la Humedad Relativa, ello es un antecedente que permitirá visualizar si este parámetro está incidiendo sobre la percepción del ambiente térmico.

En primer lugar, se presentará el Caso A, desglosado en tres gráficos con los respectivos parámetros: CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa.

El gráfico 5.8 muestra, como se describió en el subcapítulo anterior, que las concentraciones de CO<sub>2</sub> se alcanzan considerablemente durante los períodos de ocupación, mientras que en los tiempos de desuso, éstas se equiparan a la concentración exterior.

Gráfico 5.8: Comportamiento de las concentraciones del CO<sub>2</sub> interior y exterior en el Caso A durante los días 1 a 16.



Durante el período medido, se observa que las temperaturas exteriores sufren oscilaciones de hasta 20°C entre el día y la noche, mientras que en el ambiente interior, esta oscilación comprende rangos en torno a los 9°C. Se observa, también, que la temperatura interior sigue en su comportamiento a la temperatura exterior, mostrando una oscilación abrupta que se puede asimilar a la carencia de aislación térmica en la construcción (Ver gráfico 5.9).

La humedad relativa, en cambio, es consistentemente más estable en el ambiente interior que en el exterior, según se muestra en el gráfico 5.10.

Gráfico 5.9: Comportamiento de la Temperatura interior y exterior en el Caso A durante los días 1 a 16.

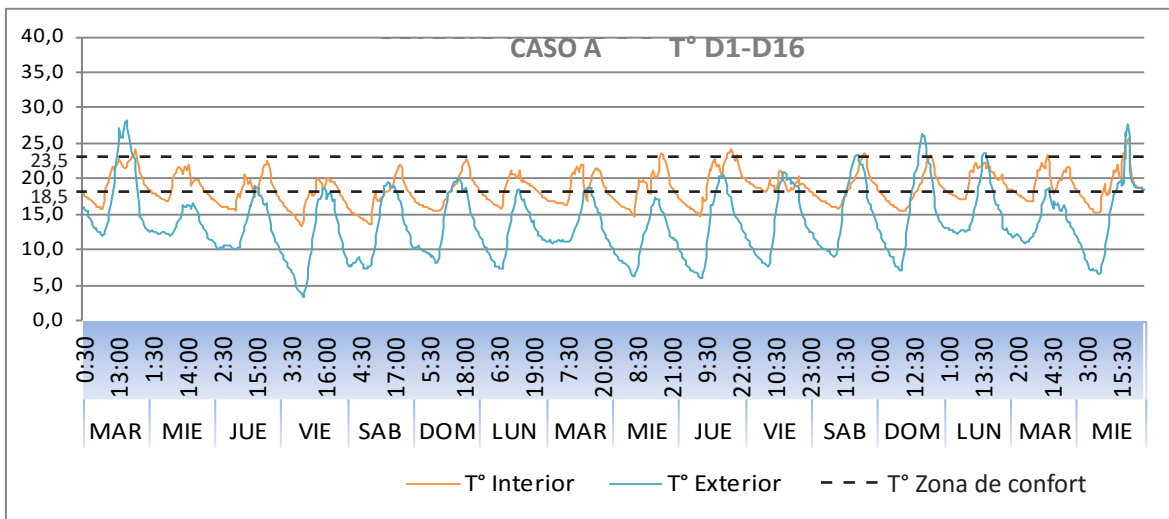
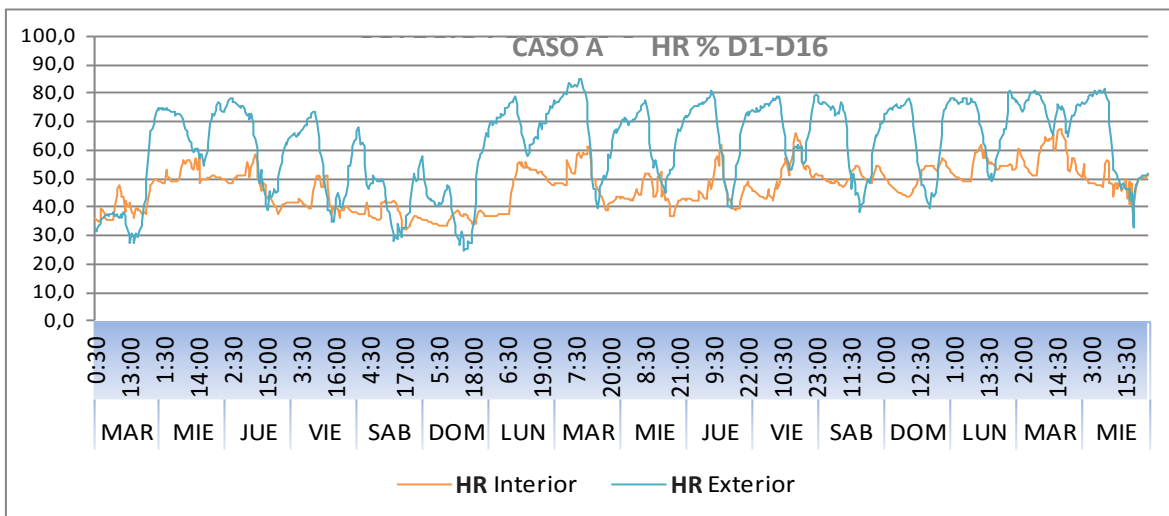


Gráfico 5.10: Comportamiento de la Humedad Relativa interior y exterior en el Caso A durante los días 1 a 16.



En segundo lugar, se presenta el Caso B, desglosado en tres gráficos con los respectivos parámetros monitorizados.

Si bien, al igual que en el Caso A, las concentraciones de CO<sub>2</sub> exceden diariamente los 1000PPM recomendados por la ASHRAE, sus niveles más altos esporádicamente superan los 2500PPM, tal como se observa en el gráfico 5.11. Se aprecia que el sistema de ventilación opera regularmente por cuanto, manteniéndose las ventanas cerradas, las concentraciones de CO<sub>2</sub> van mostrando bajas durante los períodos de uso y desuso de la sala.

Gráfico 5.11: Comportamiento de las concentraciones del CO<sub>2</sub> interior y exterior en el Caso B durante los días 1 a 16.

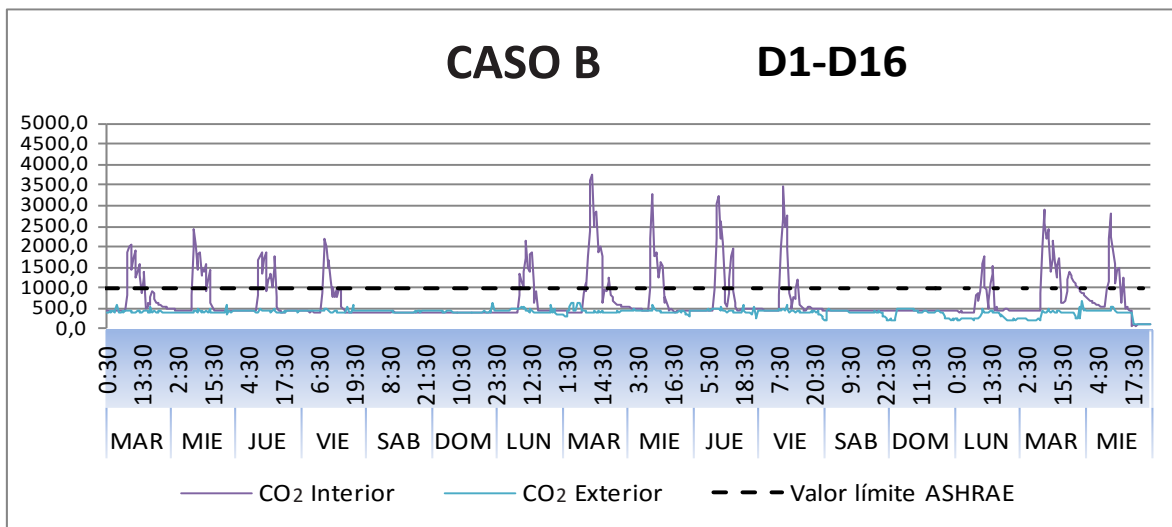


Gráfico 5.12: Comportamiento de la Temperatura interior y exterior en el Caso B durante los días 1 a 16.

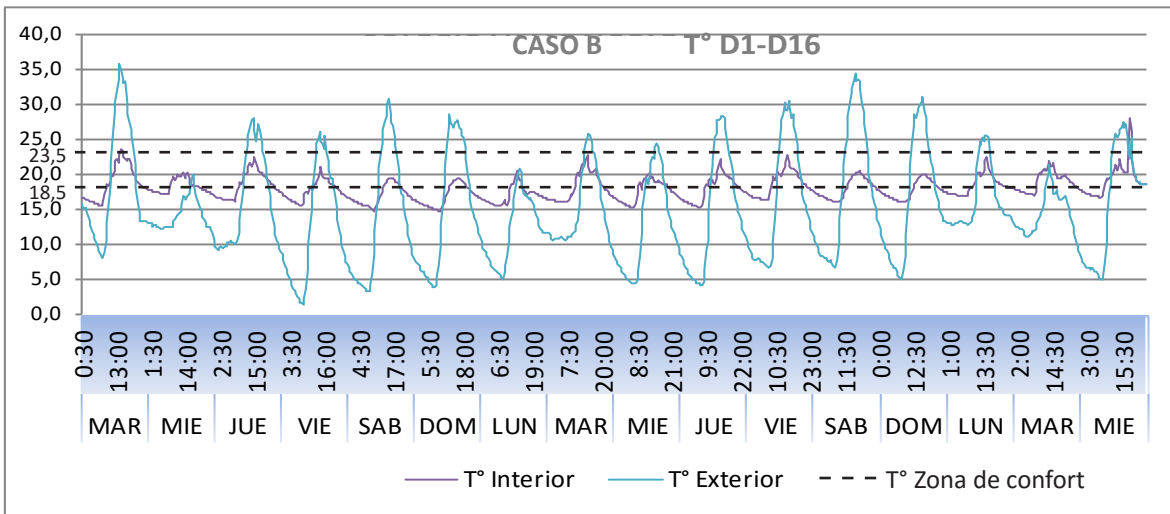
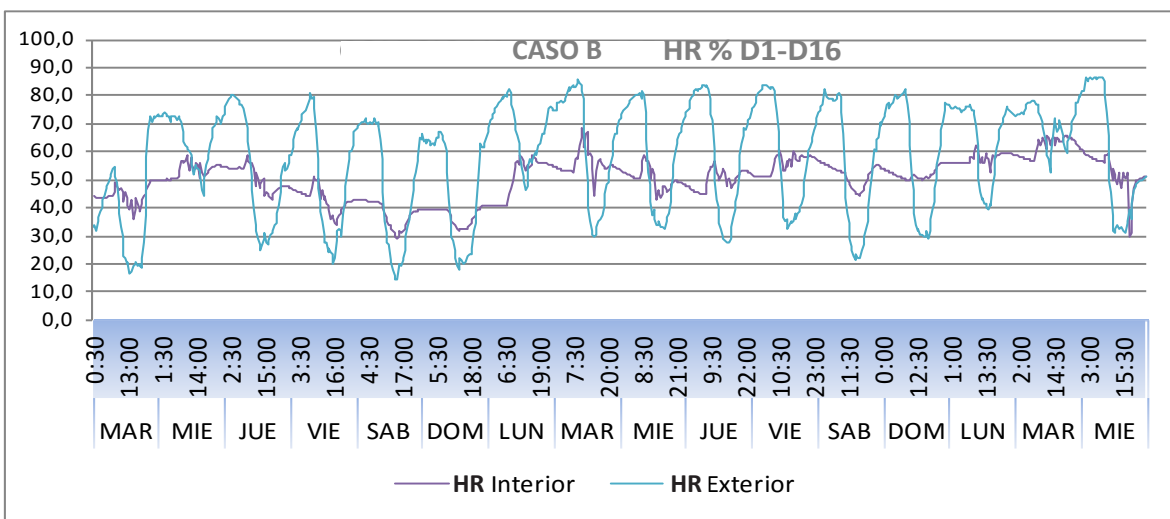


Gráfico 5.13: Comportamiento de la Humedad Relativa interior y exterior en el Caso A durante los días 1 a 16.



El gráfico 5.12 describe el comportamiento de la temperatura interior y exterior. En él se observa que la oscilación térmica exterior alcanza los 27°C, mientras que oscilación térmica interior alcanza los 6°C. Ello se debería al buen nivel de aislación térmica contemplado. En esta edificación, a su vez, se aprecia que el descenso de las temperaturas durante la tarde es pausado (menos abrupto que en el caso A) lo cual se explicaría por la presencia de mayor masa térmica (hormigón) expuesta hacia la cara interior del aula.

La humedad relativa, según se muestra en el gráfico 5.13, se mueve predominantemente en el rango de 45% a 55%, mostrando menor oscilación que el caso A.

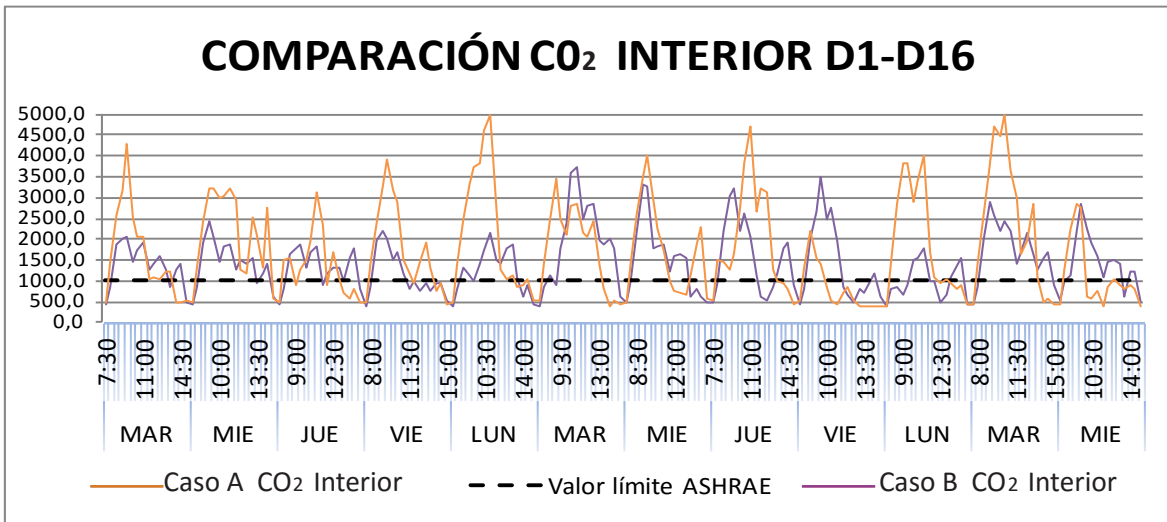


Comparación del comportamiento del CO<sub>2</sub> durante los períodos de uso del aula.

En los gráficos presentados previamente (5.1 a 5.13) se mostraron los resultados obtenidos de manera continua a través de todo el período de monitorización. Uno de los aspectos que se confirmó, es que durante el tiempo en que las aulas no estaban en uso (tardes, noches, fines de semana) los niveles de CO<sub>2</sub> interiores se equipararon a los exteriores. Es decir, el aire interior mermó sus niveles de CO<sub>2</sub> hasta niveles de entre 450 y 500PPM. Esto ocurrió de igual manera en ambos casos de estudio, demostrando que ese período no presenta problemas.

En consecuencia, será de interés observar qué ocurre durante el período de “muestra”, definido por los horarios de uso. (ver Tabla 5.1 “Muestra para Análisis”). Este período abarca únicamente de Lunes a Viernes, de 7:30 a 15hrs.

Gráfico 5.14: Comparación de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los Casos A y B durante los horarios de ocupación entre los días 1 y 16.



El gráfico 5.14 presenta la comparación de los dos casos durante los horarios de uso. Se puede apreciar que el Caso A tiene mayor recurrencia en cuanto a mostrar las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> cada día. Los gráficos 5.15 y 5.16 presentan estos resultados de manera ampliada, en tramos de 8 días cada uno.

Gráfico 5.15: Comparación de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los Casos A y B durante los horarios de ocupación entre los días 1 y 8.

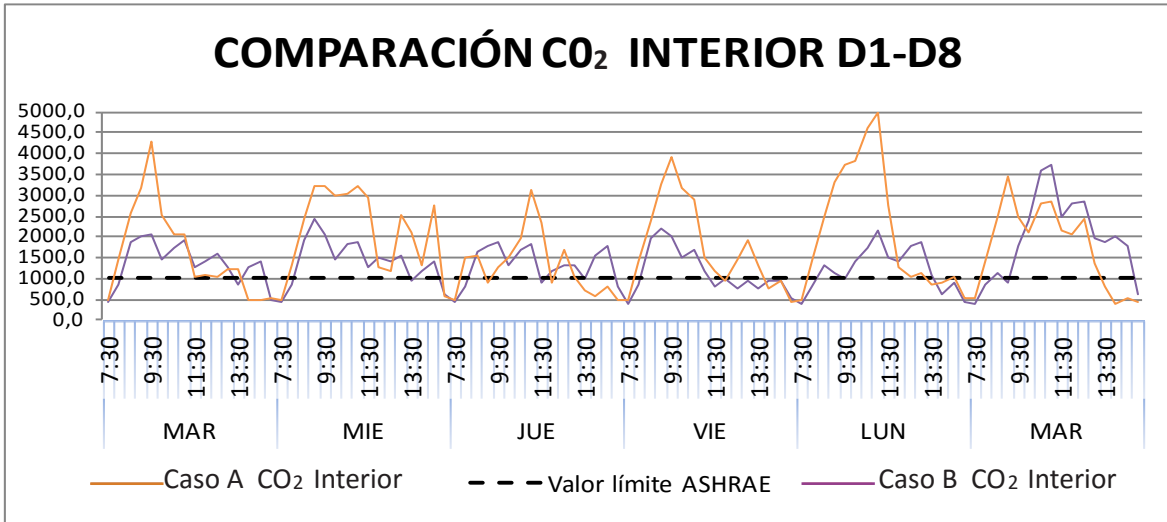
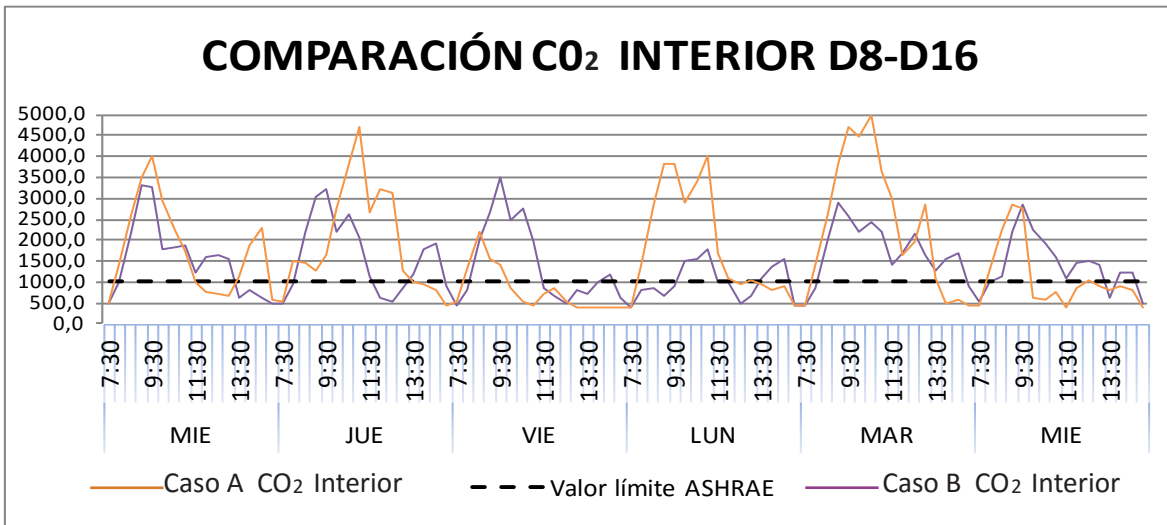


Gráfico 5.16: Comparación de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los Casos A y B durante los horarios de ocupación entre los días 9 y 16.



Los gráficos 5.15 y 5.16 permiten observar los siguientes comportamientos:

- En los doce días monitorizados, ambos casos inician y finalizan la jornada con bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>, equiparables a las concentraciones exteriores.
- De los doce días monitorizados, el Caso A presentó el valor más alto del día en 10 oportunidades.
- En el Caso A, el alza y disminución de las concentraciones, se presenta de manera continua. El Caso B, en cambio, presenta alzas y disminuciones discontinuas, lo cual se explica en la acción del sistema de ventilación mecanizado.

- Entre los dos casos, los registros más altos en las concentraciones de CO<sub>2</sub> se observaron durante las primeras horas de la mañana, lo cual se aprecia en las tablas 5.1 y 5.2

Tabla 5.1: Horarios en que se produce el registro más alto de CO<sub>2</sub> en los respectivos casos.

DÍA	CASO A	CASO B
1 MAR	9:30	9:30
2 MIE	9:30	9:00
3 JUE	11:00	9:30
4 VIE	9:30	9:00
7 LUN	11:00	11:00
8 MAR	9:00	11:00
9 MIE	9:30	9:00
10 JUE	11:00	9:30
11 VIE	8:30	9:30
14 LUN	11:00	11:00
15 MAR	10:30	9:00
16 MIE	9:00	9:30

Tabla 5.2: Estadística con número de veces en que el registro más alto de CO<sub>2</sub> se repite en un mismo horario.

HORARIO	N° de Veces Caso A	N° de Veces Caso B	N° de veces Total
8:30	1	0	1
9:00	2	4	6
9:30	4	5	9
10:30	1	0	1
11:00	4	3	7

Esta estadística (Tablas 5.1 y 5.2) permite observar que en ambos casos se producen los registros más altos a las 9:30hrs. (4 y 5 veces respectivamente). Se produce una diferencia en cuanto en el Caso A también se producen 4 repeticiones del registro más alto a las 11:00hrs, mientras que en el caso B se producen 4 repeticiones a las 9:00hrs. O sea, en el caso A se acentúa el registro más alto en las primeras horas de ocupación, mientras que en el Caso B éste puede ser en las primeras horas

o bien a media mañana. En ninguno de los dos casos se producen los registros más altos después de la media mañana.

También se observa que en el Caso A, se produce un patrón de repetición, en que el horario de las 11hrs. ocurre los días jueves y lunes.

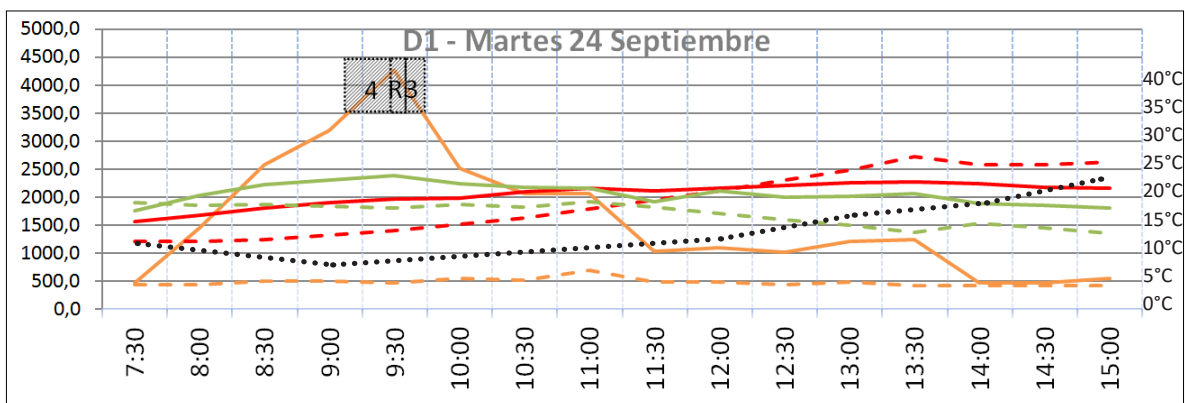
Eventos específicos en que se superaron los 3500PPM

Como se observó en los gráficos anteriores, los resultados son variables y hay pocos patrones de repetición en el comportamiento del CO<sub>2</sub>. Sin embargo, se producen algunos eventos aislados que llaman la atención cuando las concentraciones se alcanzan muy por sobre los rangos aceptables.

En este caso se presentarán los eventos en que las concentraciones superan los 3500PPM, lo cual supone un mal ambiente para el estudio y el aprendizaje. Conjuntamente, se marca la actividad que se estaba realizando en el aula cuando se llegó a estos niveles de CO<sub>2</sub>.

Esta situación ocurrió de manera dispar entre los dos casos, presentándose siete eventos en el Caso A y un evento en el Caso B. Ello muestra que en el Caso A se produce una mayor recurrencia a que los niveles lleguen a valores muy altos de contaminación interior, tal como se refleja en los gráficos 5.17 a 5.24, en los que además se indica la actividad que se estaba realizando en el aula en ese momento.

Gráfico 5.17: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.



- CO<sub>2</sub> Interior    - - - CO<sub>2</sub> Exterior    — T° Interior    ..... T° según DGAC
  - - - T° Exterior    — RH Interior    - - - RH Exterior
- 1: Educación Física    2: Religión    3: Lenguaje    4: Ciencias Sociales    5: Inglés    6: Matemáticas
- 7: Música    8: Consejo de curso    9: Ciencia    10: Arte    11: Tecnología    R: Recreo

Gráfico 5.18: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.

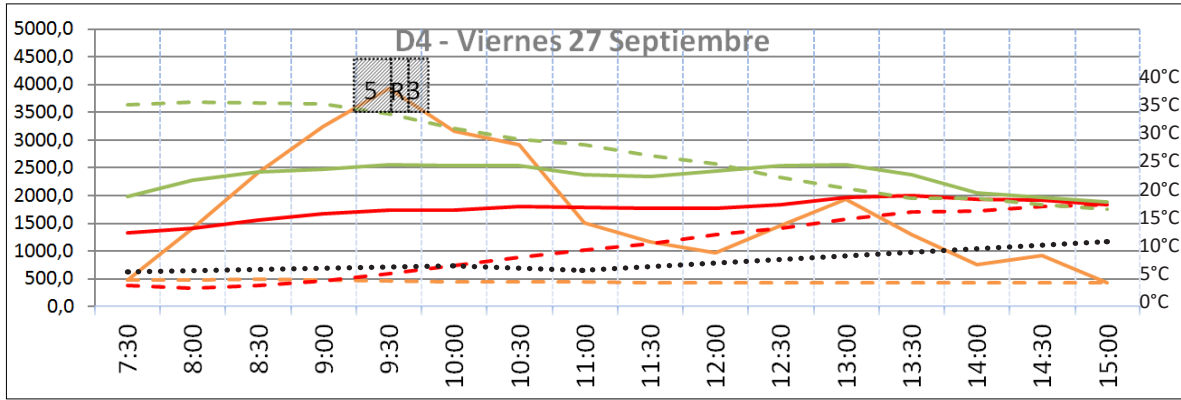


Gráfico 5.19: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.

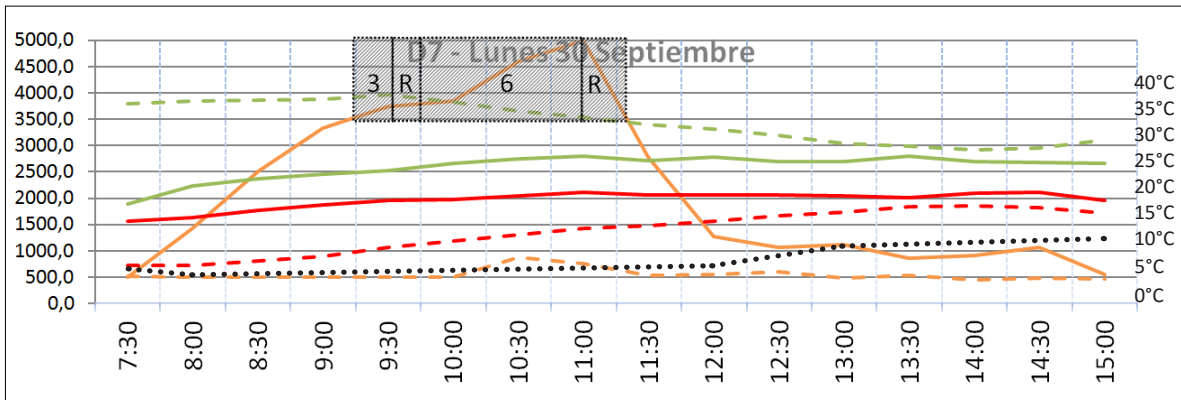
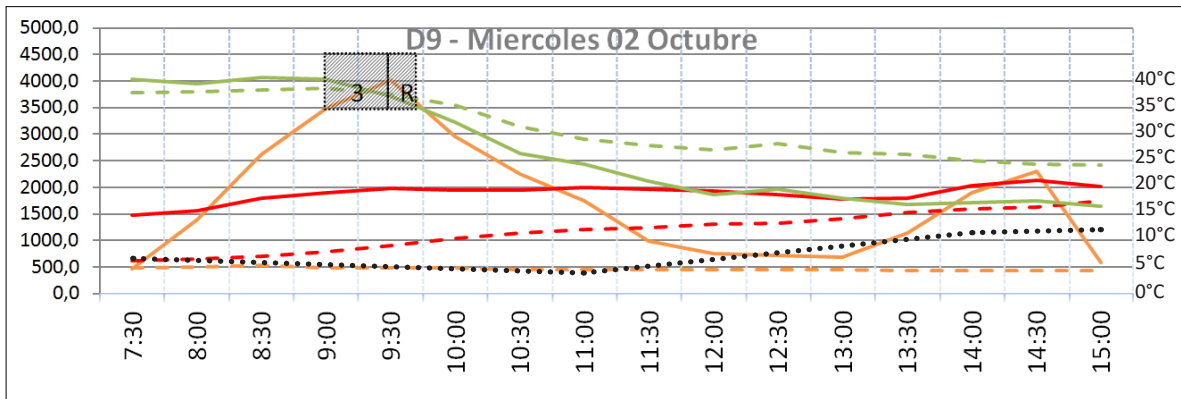


Gráfico 5.20: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.



— CO2 Interior    - - - CO2 Exterior    — T° Interior    ..... T° según DGAC  
- - - T° Exterior    — RH Interior    - - - RH Exterior

- 1: Educación Física    2: Religión    3: Lenguaje    4: Ciencias Sociales    5: Inglés    6: Matemáticas  
 7: Música    8: Consejo de curso    9: Ciencia    10: Arte    11: Tecnología    R: Recreo

Gráfico 5.21: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.

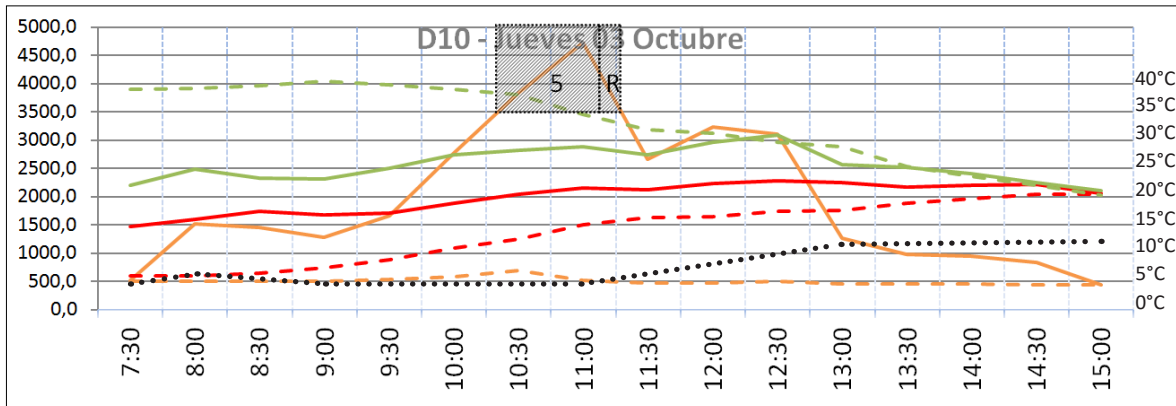


Gráfico 5.22: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.

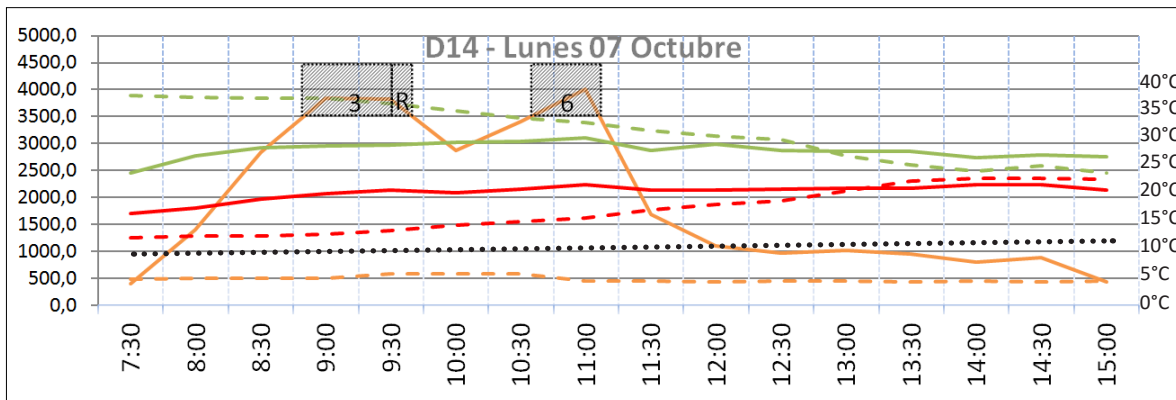
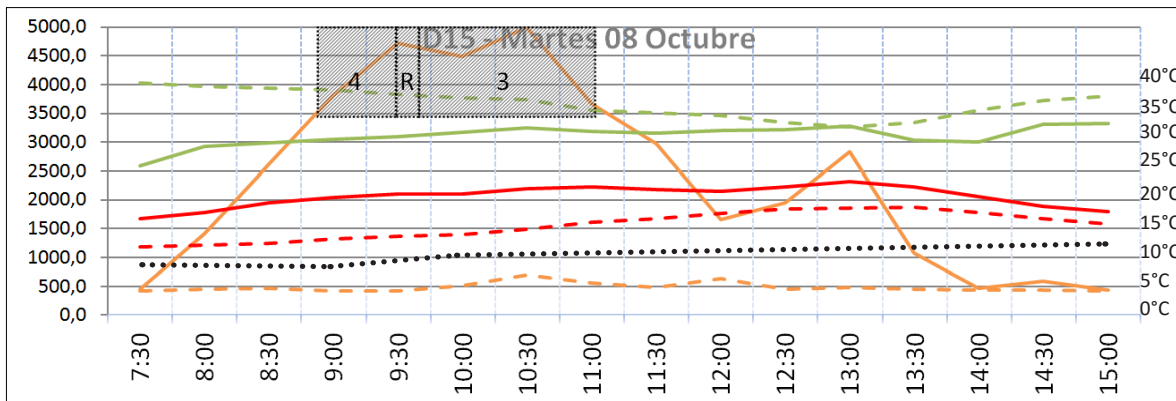


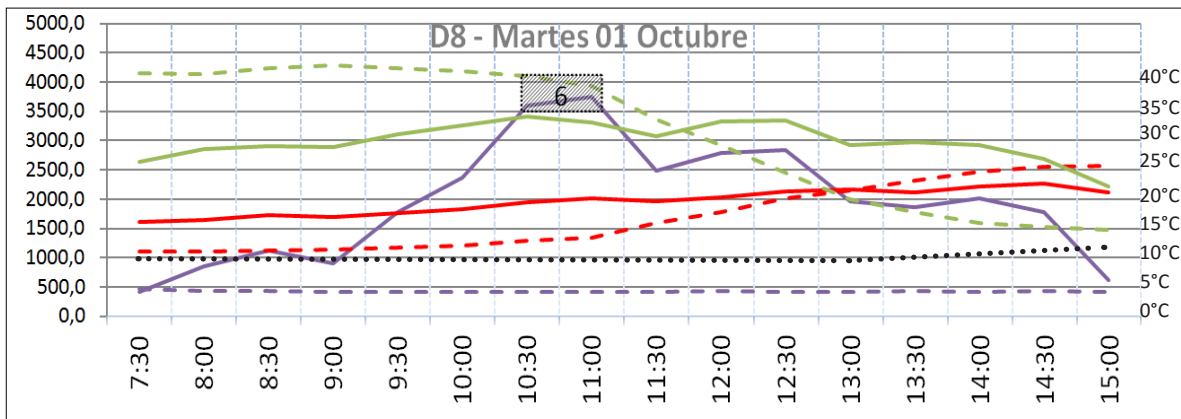
Gráfico 5.23: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso A.



— CO2 Interior    - - - CO2 Exterior    — T° Interior    ..... T° según DGAC  
- - - T° Exterior    — RH Interior    - - - RH Exterior

- 1: Educación Física    2: Religión    3: Lenguaje    4: Ciencias Sociales    5: Inglés    6: Matemáticas  
 7: Música    8: Consejo de curso    9: Ciencia    10: Arte    11: Tecnología    R: Recreo

Gráfico 5.24: Concentraciones sobre 3500PPM en el Caso B.



— CO2 Interior    - - - CO2 Exterior    — T° Interior    ..... T° según DGAC  
- - - T° Exterior    — RH Interior    - - - RH Exterior

- 1: Educación Física    2: Religión    3: Lenguaje    4: Ciencias Sociales    5: Inglés    6: Matemáticas  
 7: Música    8: Consejo de curso    9: Ciencia    10: Arte    11: Tecnología    R: Recreo

En los gráficos desde el 5.17 al 5.24 se confirma que los períodos de mayor nivel de CO<sub>2</sub> ocurren durante las mañanas y se concentran en las primeras horas.

Se distingue como dato singular el hecho que en el Caso A, 6 de los 7 eventos ocurran en la asignatura de Lenguaje. Se pudiera plantear que, al ser alumnos de primero básico, es recurrente solicitar el ejercicio de verbalización y, por lo tanto, generar mayor exhalación de CO<sub>2</sub>.

## 5.2 Correlaciones entre Temperatura y Concentraciones de CO<sub>2</sub>

### Correlaciones

Una de las interrogantes que se ha planteado en el estudio, es cómo se relacionan la calidad del aire interior y la temperatura en los respectivos casos. El objetivo de este análisis es descubrir si existen correlaciones entre ambos parámetros de medición.

Los gráficos 5.25, 5.26 y 5.27 muestran, para cada caso, cómo es este comportamiento. En ellos aparecen los datos registrados durante el período de ocupación de las aulas y se indican cantidad y porcentaje para los diferentes segmentos de temperatura. Se considera relevante precisar el número total de mediciones y cuántas de ellas satisfacen el umbral de los 1000 PPM y el confort térmico, lo cual está resumido en la tabla 5.3 Se presenta, además, la zona de confort térmico, para poder observar qué ocurre cuando se está, particularmente, por debajo de ella. Asimismo, este análisis permitirá observar qué temperaturas existían cuando el CO<sub>2</sub> se ubicó en los diferentes rangos.

Tabla 5.3: Número de datos registrados durante el período de ocupación.

	CASO A	CASO B
Total Datos registrados en el período de ocupación	192	192
Total Datos dentro de la zona de Confort Térmico (*) y bajo 1000PPM	42	39

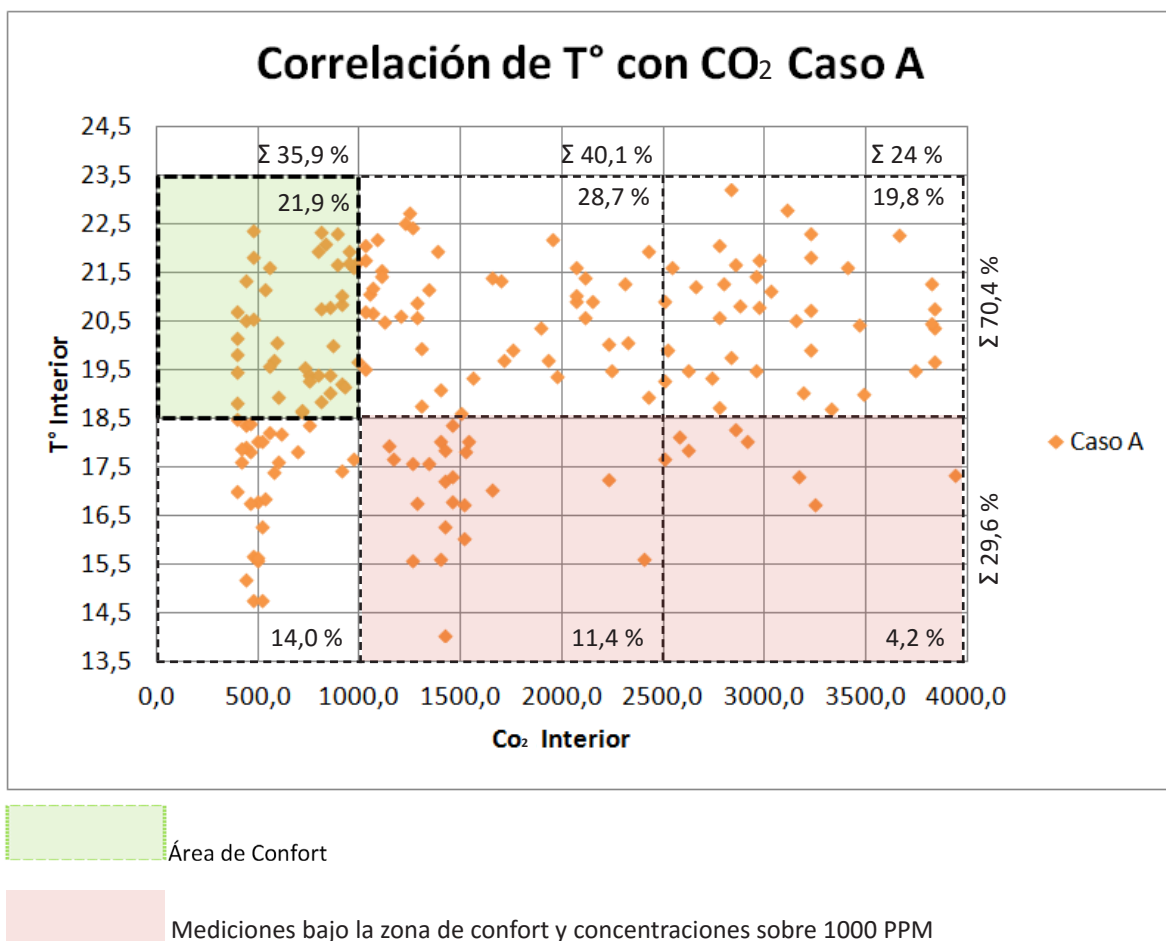
(\*) La zona de confort térmico se calculó entre las temperaturas de 18,5 a 23,5°C.



En el gráfico 5.25, se presenta la situación del Caso A. De él se puede desprender que solamente en un 21,9% de las mediciones realizadas en período de ocupación ocurrieron con condiciones óptimas de temperatura y concentraciones de CO<sub>2</sub>. Al observar el número de mediciones que ocurren sobre los 1000PPM, se tiene que ello representa el 64% de los casos. Dentro de ellos, se han parcelado las mediciones con propósito de observar en qué condiciones de temperatura se producían las concentraciones de CO<sub>2</sub> por sobre 2500PPM: ello ocurrió en 46 mediciones, lo cual representa el 24% del total.

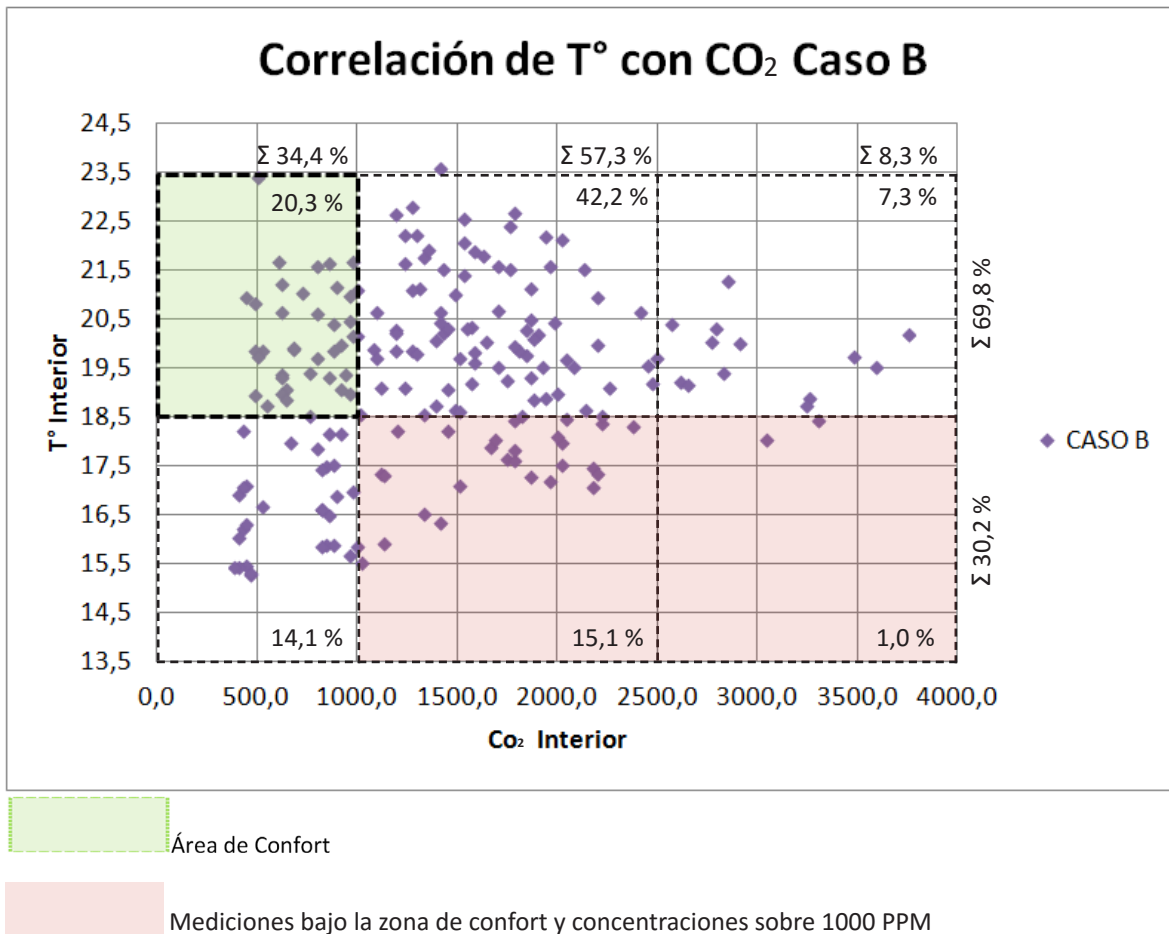
Si se toman sólo las mediciones que ocurren bajo la zona de confort térmico, ellas representan un 29,7% mientras que, aquellas que ocurren bajo la zona de confort térmico y superan los 1000PPM representan un 15,6% del total de mediciones.

Gráfico 5.25: Correlación de T° con CO<sub>2</sub> en el Caso A



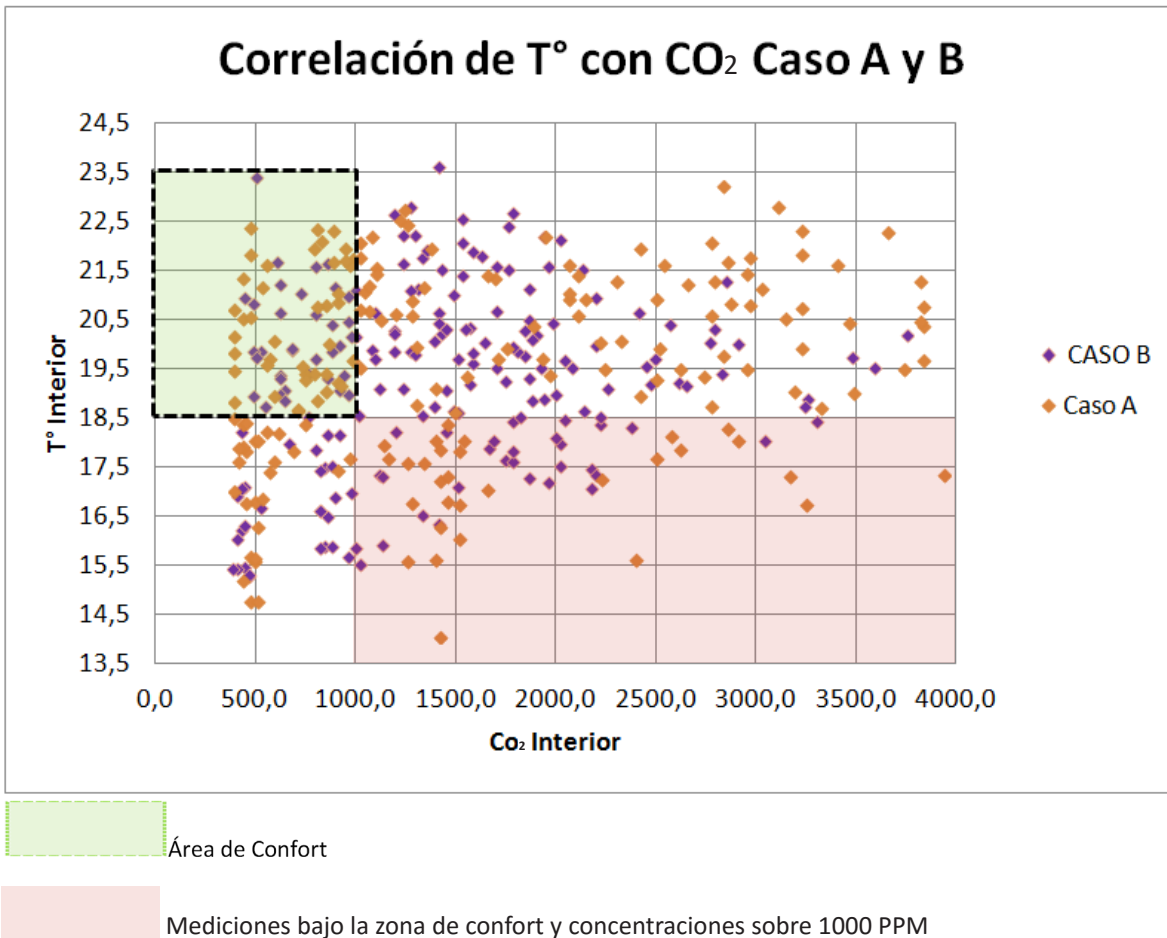
El Caso B, en cambio, sólo presenta un 8,3% de mediciones sobre los 2500PPM. Ello corresponde a 16 mediciones, de las cuales sólo 2 ocurrieron bajo la zona de confort térmico. El total de mediciones que ocurre bajo la zona de confort térmico representa un 30,2%. la distribución de estos valores se representa en el gráfico 5.26.

Gráfico 5.26: Correlación de T° con CO<sub>2</sub> en el Caso B



Al comparar la distribución de los puntos de correlación de ambos casos (gráfico 5.27), se observa que en ambos casos, la mayor parte de las mediciones que superan los 1000PPM ocurre dentro de la zona de confort térmico. Sin embargo, en el Caso A, se produce una dispersión que alcanza sobre 3500PPM, mientras que en el Caso B, los registros se agrupan principalmente bajo los 2500PPM.

Gráfico 5.27: Correlación de T° con CO<sub>2</sub> en los Casos A y B



### 5.3 Comparación de Valores Promedio

El presente análisis consiste en la comparación de los valores promedio obtenidos en las mediciones, lo cual permite observar ciertas tendencias que se producen en los respectivos casos.

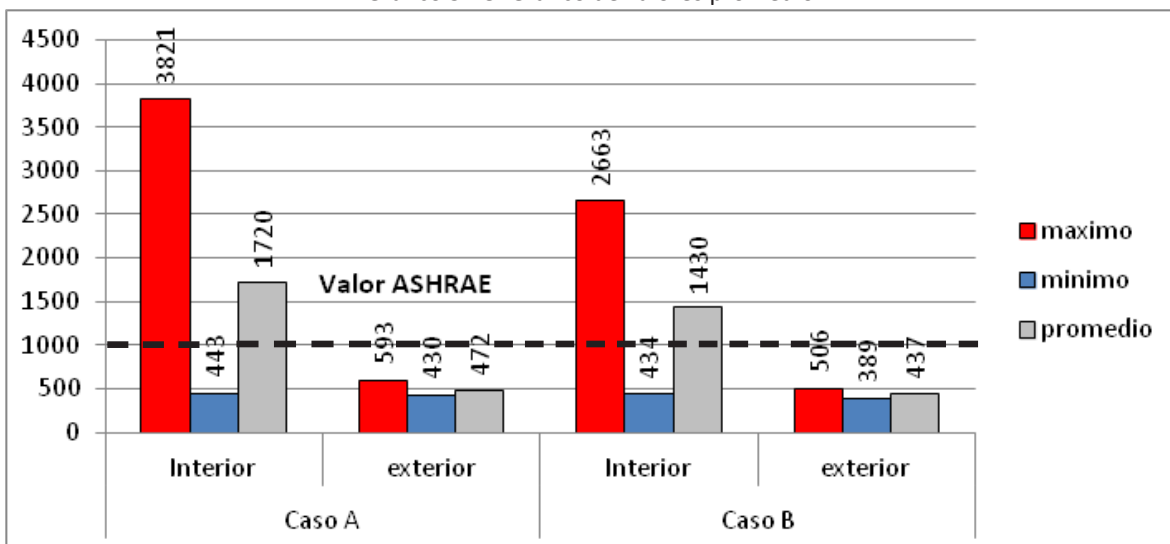
Se observa, por ejemplo, que las condiciones exteriores del aire fueron en promedio mejores en el entorno del Caso B que del Caso A. O sea, había un aire con menores concentraciones de CO<sub>2</sub> en el ingreso (437PPM v/s 472PPM). Luego, se observa que el Caso A registró un promedio de valores máximos consistentemente más alto que el Caso B: lo supera en 1158PPM).

Los valores promedio mínimos muestran, por su parte, que en el Caso A se produce una nivelación con la calidad del aire exterior, mientras que en el Caso B, los niveles interiores decrecen considerablemente, pero se mantienen 45PPM por sobre la condición exterior. Ello podría deberse al mayor estándar de hermeticidad de esta edificación.

Tabla 5.4: Resumen de valores promedio

TABLA RESUMEN				
	Caso A		Caso B	
	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Máximo	3821	593	2663	506
Mínimo	443	430	434	389
Promedio	1720	472	1430	437

Gráfico 5.28: Gráfico de valores promedio



Las tablas 5.5 y 5.6, y los gráficos 5.29 y 5.30, muestran los valores promedio de las temperaturas y humedad relativa, tanto interiores como exteriores.

Uno de los aspectos que se visualiza es que en el entorno del Caso B las temperaturas mostraron una mayor oscilación promedio entre máximas y mínimas que en el Caso A (18°C en el Caso B v/s 11°C en el Caso A). No obstante lo anterior, el ambiente interior del Caso B experimentó la misma oscilación térmica que el Caso A, lo cual estaría explicado por su mejor estándar de aislación térmica y sistema de ventilación operativo.

En el caso de la Humedad Relativa, ésta arrojó resultados similares para ambos casos, manteniéndose dentro de rangos esperables para interiores: 44% como mínimo, arrojado por el Caso A, y 59% como máximo, arrojado por el Caso B.

Tabla 5.5: Resumen de valores promedio de temperatura (°C)

	Caso A		Caso B	
	T° int.	T° ext.	T° int.	T° ext.
Máximo	22	20	22	26
Mínimo	16	9	16	8
Promedio	20	14	19	17

Gráfico 5.29: Gráfico resumen de valores promedio de temperatura (°C)

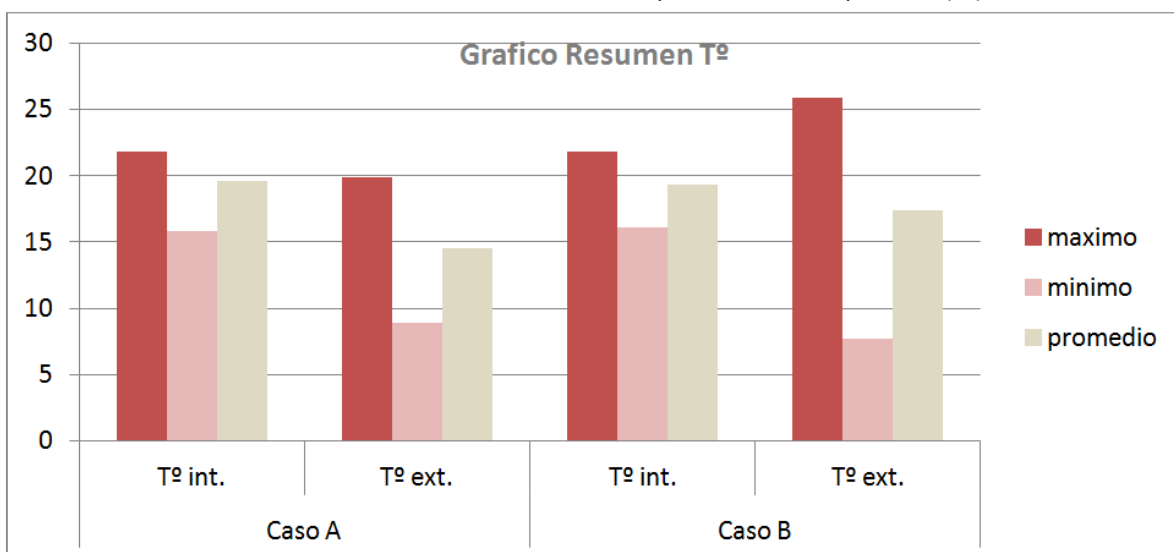
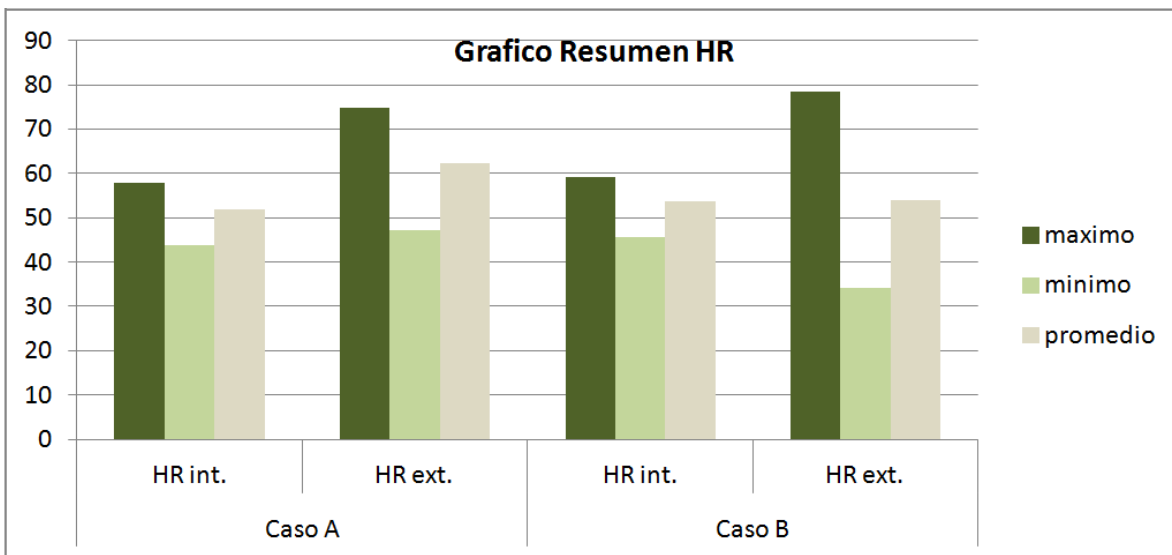


Tabla 5.6: Resumen de valores promedio de temperatura (HR)

<b>TABLA RESUMEN HR</b>				
	<b>Caso A</b>		<b>Caso B</b>	
	HR int.	HR ext.	HR int.	HR ext.
Máximo	58	75	59	79
Mínimo	44	47	46	34
Promedio	52	62	54	54

Gráfico 5.30: Gráfico resumen de valores promedio de temperatura (HR)



## 5.4 Análisis de Frecuencias

Los datos obtenidos de la monitorización realizada, permiten visualizar que la distribución de las concentraciones de CO<sub>2</sub> es diferente para los dos casos, lo cual se expresará a través de los siguientes gráficos y tabla.

En ellas se puede observar que los registros en los rangos bajo 1000PPM y entre 1000-1500PPM son iguales en ambos casos, con una representación del 57% del total de las mediciones. Esta distribución se ve reflejada en la tabla 5.7 y los gráficos 5.31 y 5.32.

Sin embargo, a partir del siguiente rango, se exhiben importantes diferencias, las que se acentúan en la medida que aumenta el parámetro de medición. Así, se puede observar que en el rango 1500-2500 el Caso A agrupa un 16% de las mediciones, mientras que el Caso B concentra un 35%. Consecuentemente, en los dos rangos superiores, de 2500-3500PPM y sobre 3500PPM, el Caso A concentra una presencia considerablemente mayor (ver Gráfico 5.31). Ello indica que la calidad del aire interior en el Caso A se torna muy deficiente en determinados períodos. Si bien el Caso B también exhibe registros en esos rangos, su ocurrencia es baja.

Tabla 5.7: Frecuencia de mediciones según rangos de CO<sub>2</sub>

Análisis en periodo de clases	Caso A		Caso B	
	Cantidad	%	Cantidad	%
< 1000	71	37%	69	36%
1000-1500	38	20%	40	21%
1500-2500	31	16%	68	35%
2500-3500	35	18%	13	7%
>3500	17	9%	2	1%
Total mediciones	192	100%	192	100%

Gráfico 5.31: Representación porcentual de frecuencias de mediciones según rangos de CO<sub>2</sub>

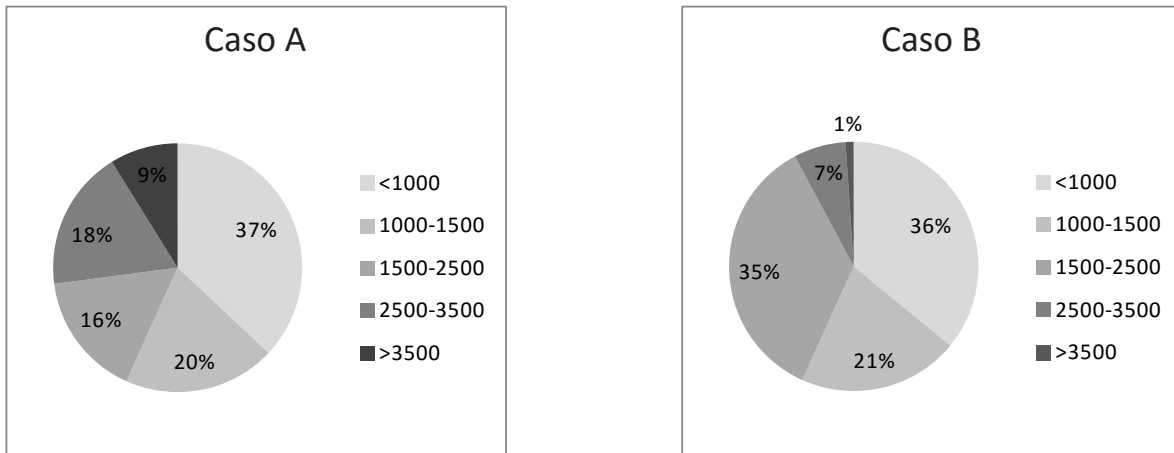
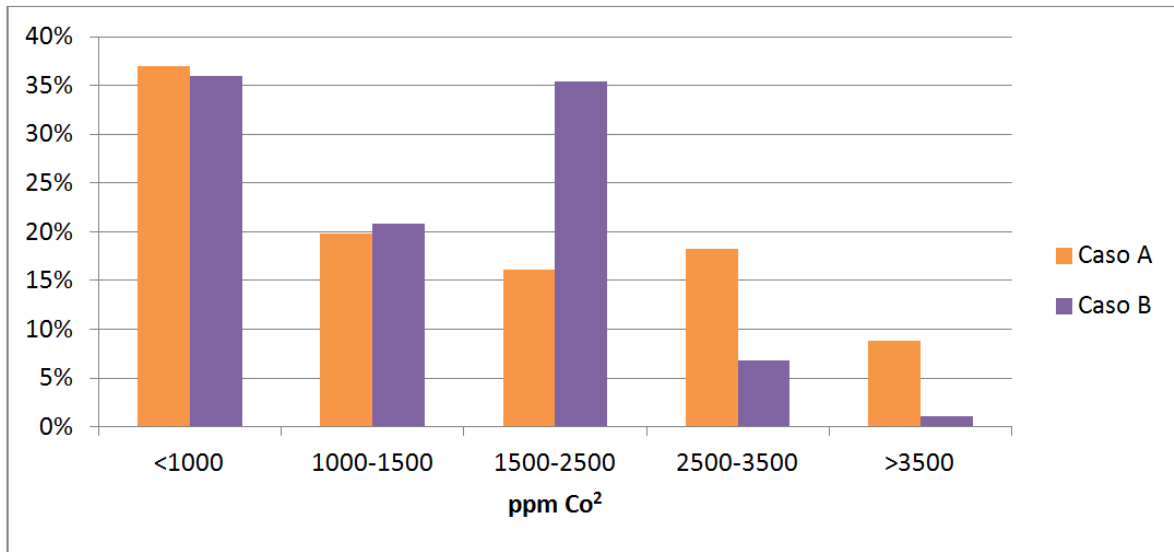


Gráfico 5.32: Comparación de frecuencias entre los dos casos.





## 5.5 Evaluación de la Calidad del Aire

En atención al comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> (subcapítulo 6.4) como reflejo de la calidad del aire interior y la ventilación en los casos de estudio monitorizados, se realizará la evaluación utilizando como indicadores los siguientes parámetros:

- Método 1: categorización de calidad del aire interior en función del nivel de dióxido de carbono permitido en un recinto que define el estándar europeo UNE-EN 15251:2008 (CITEC-UBB, 2011)
- Método 2: calificación de la calidad global del aire de una zona o recintos de un edificio en función del umbral 1000ppm que define el estándar ASHRAE 62-2989 y una clasificación de calidad propia, que considera seis niveles de calidad en función del tiempo en que el nivel de concentración de CO<sub>2</sub> se mantiene bajo el umbral de 1000ppm. (CITEC-UBB, 2011)

El método 1, basado en la normativa europea, clasifica la calidad el aire interior desde IDA 1 (óptima/high IAQ) hasta IDA 4(Baja/Low IAQ), que se centra en estudiar los niveles de CO<sub>2</sub> netos producidos por fuentes internas dentro del recinto en estudio. Este sería el caso de las aulas escolares, donde la fuente contaminante son los mismos alumnos mediante su respiración. El método consiste en determinar la diferencia entre el CO<sub>2</sub> del aire interior y exterior, ubicándolos de acuerdo a rangos que permitan su categorización. Tal como lo expresa la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Clasificación de la calidad del aire interior (IDA, Indoor Air) en función de las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Fuente: Citec UBB, 2011. Basado en: UNE-EN 15251:2008

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>	<b>Nivel de CO<sub>2</sub> superior al nivel del aire exterior (ppm)</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>1</b>	Óptima	350	Hospitales, laboratorios, guarderías, etc.
<b>2</b>	Buena	500	Aulas, oficinas, residencias, etc.
<b>3</b>	Media	800	Edificios Comerciales, cines, restoranes
<b>4</b>	Baja	1200	No se debe aplicar nunca

Para el Caso A, la representación porcentual por categorías (ver Tabla 5.9) muestra una predominancia de baja calidad del aire interior, la cual representa prácticamente la mitad de la totalidad del tiempo de ocupación. De acuerdo con esta metodología de categorización, el ambiente durante ese período sería inaceptable en todos los casos.

Tabla 5.9: Categorías del Aire Interior en el Caso A de acuerdo con UNE-EN 15252:2008 durante el tiempo de ocupación.

Porcentaje de tiempo (%)	Categoría Calidad de Aire Interior Caso A			
	IDA 1 (óptimo)	IDA 2 (bueno)	IDA 3 (medio)	IDA 4 (bajo)
	29%	11%	15%	45%

En el Caso B, los resultados resultan ser igualmente adversos de acuerdo con este método de calificación, mostrando incluso un nivel inferior al Caso A en la categoría IDA 1 (ver tabla 5.10).

Tabla 5.10: Categorías del Aire Interior en el Caso B de acuerdo con UNE-EN 15252:2008 durante el tiempo de ocupación.

Porcentaje de tiempo (%)	Categoría Calidad de Aire Interior Caso B			
	IDA 1 (óptimo)	IDA 2 (bueno)	IDA 3 (medio)	IDA 4 (bajo)
	21%	15%	18%	46%

Esta categorización ha sido ocupada tomando la totalidad de la muestra, que comprende doce días en horario de ocupación, esto es desde 7:30hrs hasta 15:00hrs. (Capítulo 4: Planificación e Implementación de la Monitorización). En consecuencia, los porcentajes son reflejo de un comportamiento promedio a través de todo el período muestreado.

Los gráficos 5.33, 5.34, 5.35, 5.36 desglosan estas categorías día a día, comparando lo que ocurre en los respectivos casos. Ello permite observar que los comportamientos no son constantes, sino por el contrario, hay días en que se acentúan consistentemente algunas categorías por sobre otras, tanto en un caso como en el otro. Esta variabilidad queda oculta en los valores promediados que representan los porcentajes, o sea que, al utilizarse cuatro niveles para categorizar, no permite visualizar la dispersión de los datos. Si se toma en cuenta lo presentado en el Subcapítulo 5.4 (Análisis de Frecuencias), resulta particularmente importante observar lo que ocurre en el nivel más bajo, puesto que allí se alcanzan niveles críticos de contaminación en el Caso A.

Gráfico 5.33: Representación porcentual de la Categoría IDA 1 en los respectivos Casos A y B a través del tiempo de ocupación.

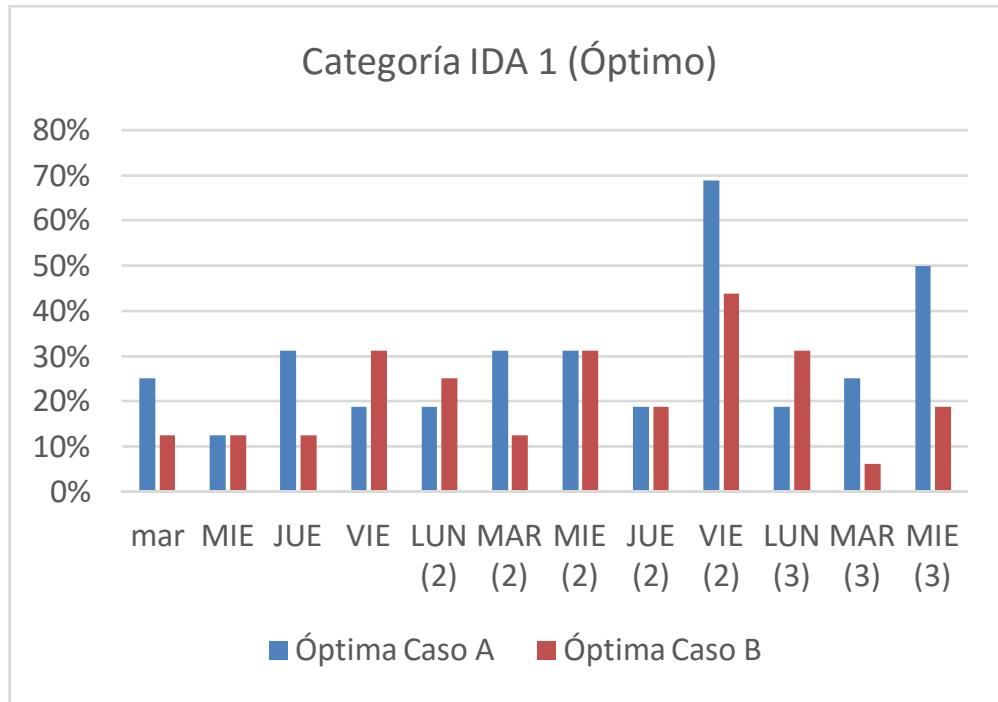


Gráfico 5.34: Representación porcentual de la Categoría IDA 2 en los respectivos Casos A y B a través del tiempo de ocupación.

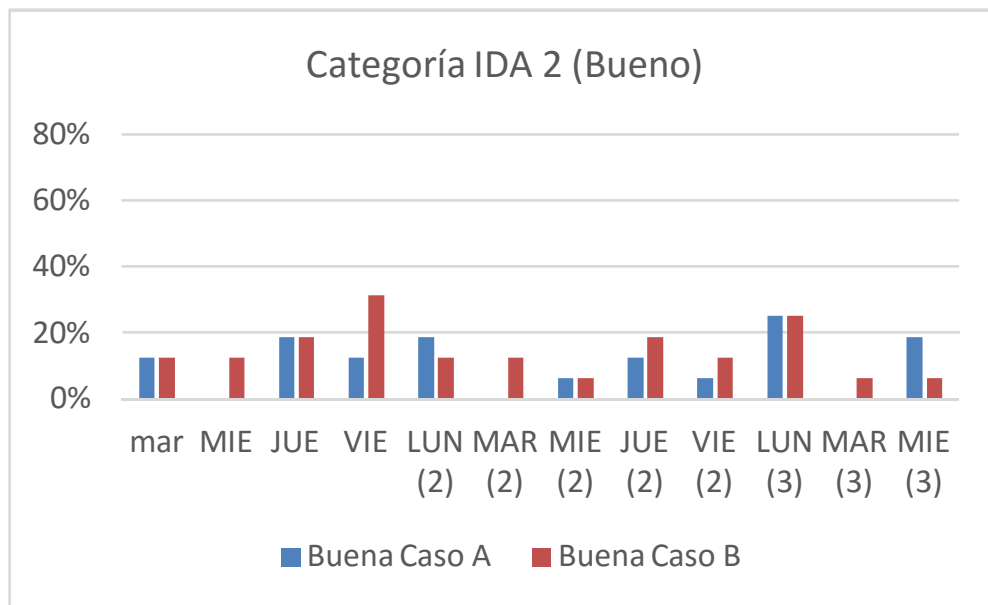


Gráfico 5.35: Representación porcentual de la Categoría IDA 3 en los respectivos Casos A y B a través del tiempo de ocupación.

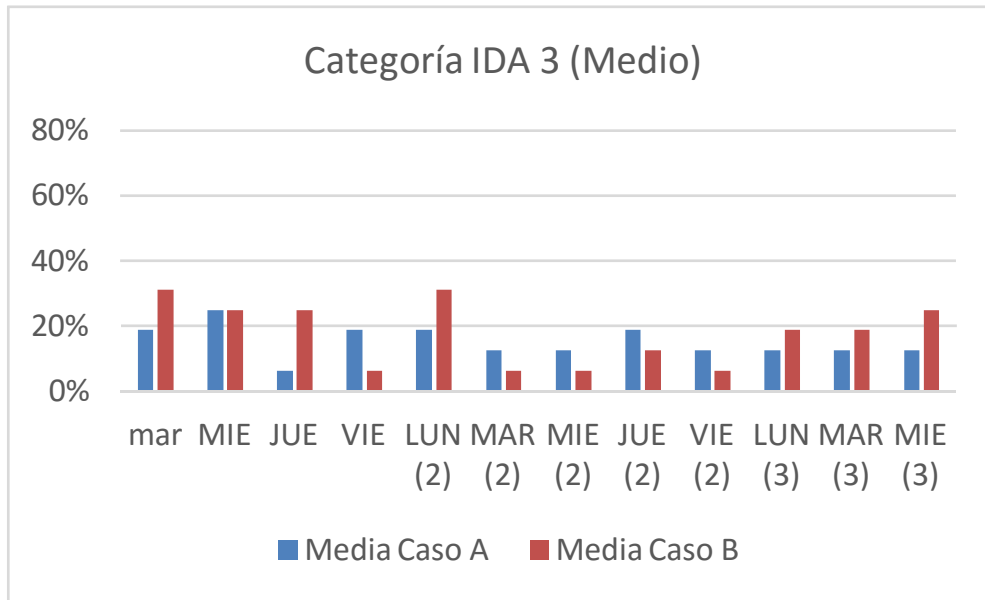
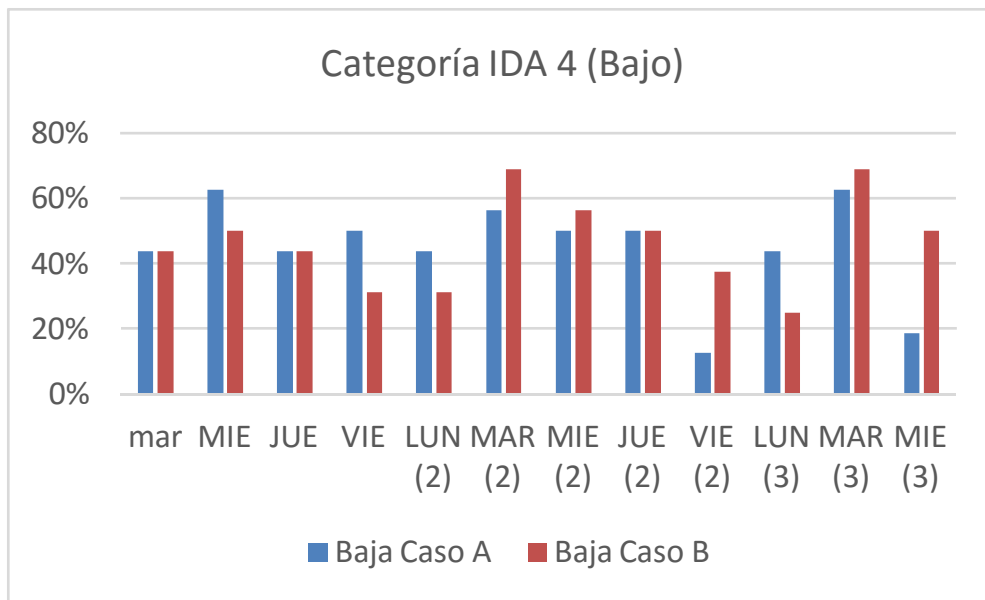


Gráfico 5.36: Representación porcentual de la Categoría IDA 4 en los respectivos Casos A y B a través del tiempo de ocupación.



El método 2, señalado al comienzo de este Subcapítulo, utiliza un sistema tipo “benchmarking”, que categoriza el desempeño cotejándolo con un valor de referencia (bueno, malo, aceptable), para situaciones similares. Así, se establecen seis categorías de la A a la G”, el que calificará el confort respiratorio. Este se define como “que el edificio disponga de medios para que sus recintos se puedan ventilar adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificio, de forma que se aporte un caudal suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado. Exigencia que se mide en función del porcentaje del tiempo de ocupación del local con concentraciones de CO<sub>2</sub> bajo el umbral 1000ppm.” Adicionalmente, el método asume un nivel aceptable por sobre un 60%. (Bobadilla, 2012). Ello queda expuesto en la tabla 5.11.

Tabla 5.11: Clasificación de la calidad del aire en función del porcentaje de tiempo de ocupación con concentraciones por debajo de los 1000ppm. CITEC UBB.

Porcentaje de tiempo de ocupación bajo nivel 1000ppm (%)	Clase	Descripción
>95	A	Excelente
90 – 95	B	Muy buena
80 – 90	C	Buena
70 – 80	D	Moderadamente Buena
60 – 70	E	Base
30 – 60	F	Mala
< 30	G	Muy Mala

En el caso A, la calificación del confort respiratorio se grafica en la Figura 5.1. El tiempo de ocupación en que las concentraciones se ubicaron bajo los 1000ppm, alcanzó solamente el 37%. De acuerdo con este sistema de calificación, la calidad del aire interior sería “mala”.

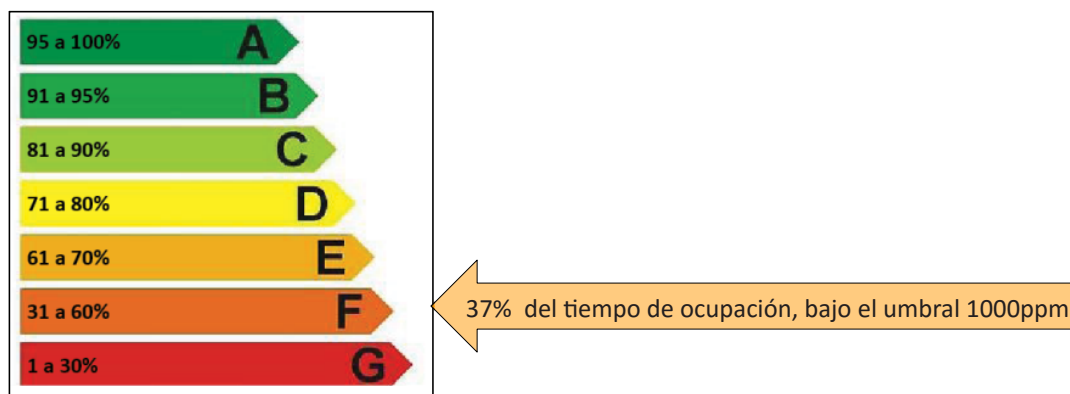


Figura 5.1: Indicador de desempeño de la Calidad del Aire Interior en el Caso A.

En el caso B, la calificación del confort respiratorio se grafica en la Figura 5.2. El tiempo de ocupación en que las concentraciones se ubicaron bajo los 1000ppm, alcanzó el 36%. De acuerdo con este sistema de calificación, la calidad del aire interior es “mala”.

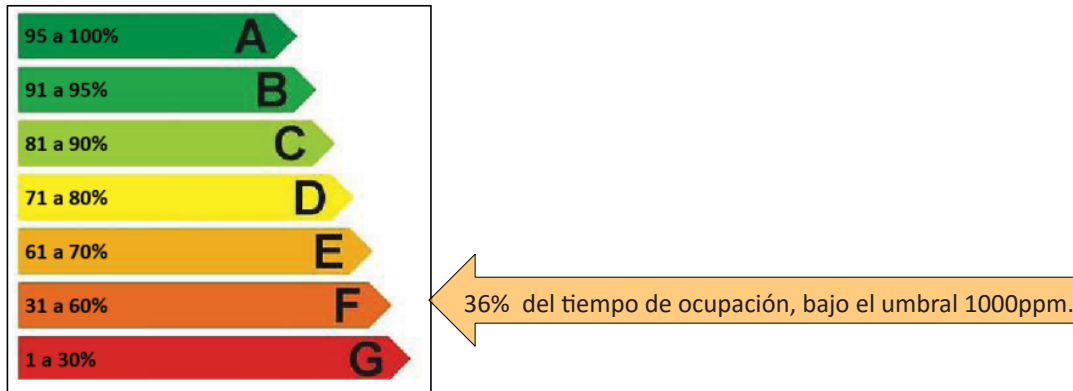


Figura 5.2: Indicador de desempeño de la Calidad del Aire Interior en el Caso B.

En ambos casos, y según ambos métodos de evaluación, la calificación en el período muestreado resultó inadecuada. Con el primer método de calificación, los resultados se concentran en el ítem “malas”. Este resultado se reitera con el segundo método, en que ambos casos quedan en categoría F, equivalente a “mala”.

Para ambos casos, la evaluación indica que las estrategias para ventilar son insuficientes, mostrando que, al evaluarse mediante el método europeo UNE-EN 15251 2008, no se consigue superar el 30% de resultados óptimos. El diagnóstico es aún más crítico al exponer los resultados “malos”, no aplicables nunca, puesto que representan en el Caso A un 46% y en el Caso B un 47%.

Si bien los resultados son insatisfactorios a la luz de estos dos métodos de evaluación, el diagnóstico se amplía al analizar las frecuencias y desglosar en rangos más específicos las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Dicha información ha sido previamente expuesta en el Subcapítulo 5.4 Análisis de Frecuencias.

## 6.0 Conclusiones

### Reflexión sobre los resultados de la tesis

- Los estándares de Calidad del Aire Interior en las aulas monitorizadas exhibieron resultados que, de acuerdo con los métodos explicados en el Subcapítulo 5.5 “Evaluación de la Calidad del Aire” resultaron insatisfactorios. Ambos casos obtuvieron calificaciones muy parecidas a pesar de tener estrategias diferentes para abordar el mismo problema. Sería importante destacar que calificaciones iguales responden a comportamientos parcialmente iguales, debido a que las categorías de evaluación son producto de valores promediados o de valores positivos por sobre ciertos umbrales, lo cual no permite apreciar las particularidades del caso.

Así, en el Caso A, que no posee estrategias de eficiencia energética, se produce un 24% de las mediciones en rangos que superan los 2500ppm. En cambio, en el caso B, que sí posee estrategias de eficiencia energética incluyendo un sistema de ventilación mecanizado, solamente un 8,3% de las mediciones se ubica en ese rango. Esta estadística permite afirmar que en el caso con ventilación mecanizada, los resultados son mejores y se evitan escenarios en exceso desfavorables, no obstante la calificación para ambos casos pueda ser semejante. Conjuntamente, se debe señalar que en el Caso B existe una diferencia en la ejecución respecto de lo que el proyecto indica. Ésta consiste en la ubicación de la inyección de aire respecto de la extracción, dado que se encuentran bastante más próximas entre sí que lo que el proyecto indica. Este factor implicaría que en un hemisferio de la sala se produce un “fondo de saco”, lo cual produce merma en el resultado previsto.

- La elección de un sistema de ventilación apropiado a los estándares de confortabilidad térmica y respiratoria de los ocupantes, cuenta entre sus complejidades el factor de variabilidad en el desempeño producto del cambio permanente en los escenarios de acción. Ello, como se ha mostrado en el capítulo “Resultados” de la presente investigación, se manifiesta en desempeños dispares durante la jornada diaria de ocupación y también entre una jornada y otra. En consecuencia, las garantías de que el sistema funcione adecuadamente sin perder el equilibrio entre el confort térmico, respiratorio y la eficiencia energética es complejo de lograr. En tal sentido, un camino a explorar sería desarrollar una estrategia mixta que, primeramente, aproveche la capacidad natural del edificio para ventilarse y que, complementariamente, utilice recursos mecánicos cuando se

superen determinados umbrales de contaminación. La activación de los sistemas mecanizados requeriría de una monitorización continua y capacidad de respuesta tanto de equipos como de usuarios. Esto se condice con lo planteado en el “Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones” (CITEC UBB, 2014), que indica que el tipo de ventilación será en relación con el tipo de edificio y todas las variables asociadas a la construcción y operación del proyecto.

- El sistema de ventilación debiera poseer un mecanismo de respuesta frente a escenarios específicos. Esta conclusión se desprende de la evaluación del caso con sistema de ventilación mecanizado donde, teóricamente, hay capacidad instalada para que los escenarios de alta contaminación sean revertidos. La ocurrencia de estos escenarios será difícil de prever, sin embargo, a la luz de la estadística presentada en el Subcapítulo 5.1 “Resultados de la Monitorización”, la mayor recurrencia de horario del “evento de contaminación máxima” ocurrió, tanto en el Caso A como en el B, a las 9:30AM. Conjuntamente, al revisarse qué ocurría en las aulas escolares cuando las concentraciones de CO<sub>2</sub> superaron los 3500ppm, se reveló que en 6 de los 7 eventos del Caso A, ello correspondía a la clase de Lenguaje. Presumiblemente, el hecho de que una clase de Lenguaje para niños de primero básico incluya lectura en voz alta y verbalización grupal o individual de palabras, sería la respuesta a que haya mayor exhalación de aire viciado por parte de los mismos ocupantes. Estos patrones de comportamiento podrían ser abordados como detonantes de escenarios críticos y obtener respuesta a través de los dispositivos de ventilación (activados por sensores) para diluir o renovar el aire.

- Una de las interrogantes planteadas a través de los objetivos específicos, fue establecer si se producían correlaciones entre los niveles de contaminación, o confort respiratorio, y el confort térmico. Al respecto, el Subcapítulo 5.2 “Correlaciones entre Temperatura y Concentraciones de CO<sub>2</sub>” muestra que el mayor porcentaje de mediciones en que se excede el umbral de los 1000ppm, ocurre dentro del rango de confort térmico. Así, en el Caso A, ello representa un 48,5% de los casos versus un 15,6% que ocurre por debajo del rango de confort térmico. En el Caso B, en cambio hay 65,6% de los casos excediendo el umbral de los 1000ppm y dentro del rango de confort térmico versus un 16,1% en que ello ocurre por debajo del confort térmico. Esto permite confirmar que habiendo en ambos Casos una estrategia de calefacción (activa o pasiva) ello no impedirá que los niveles de contaminación puedan alzarse indebidamente.



- En una mirada integral, la estrategia de ventilación asociada a la eficiencia energética y el confort térmico, requieren de un sistema de precalentamiento del aire entrante. Ello podría lograrse de diversas formas pertinentes según el escenario que se enfrente. Los casos de estudio del marco teórico contemplaron: uso de muros trombe, geotermia y/o la recuperación del calor contenido en el aire saliente mediante un intercambiador de calor.

### **Contribución al conocimiento actual**

Los precedentes de estudio sobre Calidad del Aire Interior en aulas escolares del sur de Chile que se encuentran publicados dan cuenta que, tanto construcciones antiguas como contemporáneas, con y sin proyectos de ventilación en su fase de diseño, no alcanzan a satisfacer plenamente los estándares estipulados en normativas internacionales. Si se tiene en cuenta que la totalidad de estos casos, y se incluyen los dos casos de estudio de la presente investigación, respetan la normativa vigente en Chile, entonces se puede concluir que hay aspectos por mejorar dentro del espectro normativo, diseño, ejecución y uso. En tal sentido la presente tesis, junto con ampliar el rango de casos de estudio conocidos y su metodología de análisis, establece que en el caso en que no existen proyectos de ventilación, la contaminación interior por CO<sub>2</sub> podrá alzarse con facilidad por sobre los 3500ppm. Ello supone un escenario crítico que, de acuerdo con los estudios presentados en el subcapítulo 2.2, impactaría ineludiblemente sobre las habilidades cognitivas de los estudiantes. Para el caso en que existía un proyecto de ventilación (Caso B) se concluye que éste también requiere ser mejorado puesto que si bien no llega a los escenarios críticos del caso A, cerca del 50% de las mediciones se mueven entre los 1000ppm y los 2500ppm, lo cual lo hace insatisfactorio. El estado del arte, por lo tanto, sugiere que se deba revisar las fases de diseño, construcción y puesta en marcha de los sistemas de ventilación.

### **Identificación de potenciales trabajos futuros.**

La evaluación de dos casos que son reflejo de procesos de diseño diferentes conlleva al análisis que, para cada caso, se debe contemplar la observación del proceso constructivo y de comportamiento de usuarios en su contexto. En tal sentido, una evaluación con el edificio en uso, en particular cuando ésta arroja resultados insatisfactorios, acusa que ha habido etapas del proceso con alguna deficiencia.

Considerando esta reflexión, así como las conclusiones previamente expuestas, se proponen las siguientes líneas investigativas en orden a profundizar el conocimiento en el área de Calidad del Aire Interior:

- Diagnósticos de la fase de construcción de edificaciones con eficiencia energética, realizando un seguimiento de obra con inspección acuciosa, de modo de identificar problemas típicos de ejecución que pudieran mermar la capacidad de trabajo del sistema de ventilación. Por ejemplo, sellos y desniveles en los ductos. Asimismo, realizar un diagnóstico general respecto de cómo se verifica mediante pruebas de terreno la operatividad del sistema. Este diagnóstico podría arrojar como producto las brechas existentes entre proyecto y realidad.

- Metodologías de evaluación post ocupacional tendientes a levantar patrones de comportamiento con el fin de retroalimentar aspectos normativos o bien, de propiciar una nueva cultura del “habitar en un edificio con estrategias de eficiencia energética”.

- Desarrollo de sensores de aviso oportuno de niveles de contaminación para control del usuario respecto del sistema de ventilación.

- Sistemas de ventilación adaptables, híbrido natural-mecánico, para equilibrar calidad del aire con eficiencia, confort térmico y ahorro energético.

- En una investigación ampliada e interdisciplinaria, sería de interés conocer el impacto de los niveles de contaminación sobre las habilidades necesarias para un buen desempeño académico en aulas escolares en Chile.

- Evaluar infiltraciones de la envolvente en edificaciones educacionales, con el propósito de medir su incidencia sobre la ventilación del recinto interior.

## 7. Glosario

A continuación se entrega un glosario con las principales definiciones relacionadas con la temática de ventilación, que han sido incluidas en el “Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones”(2014), elaborado por CITEC UBB.

“Calidad Aceptable del aire: Aire ambiental que no contiene concentraciones perjudiciales para la salud humana de contaminantes y que es considerada aceptable para el 80% de los ocupantes (ASHRAE 62.1-2010)

Cambio de aire por hora: se refiere al volumen de aire que entra o sale de un edificio o espacio habitable en una hora, dividido por el volumen del edificio o espacio habitable.

Control prestacional o de desempeños: control del conjunto de características cualitativas y cuantitativas de una edificación o parte de ella, identificadas y medidas objetivamente, que contribuyen a determinar su aptitud para responder a las distintas funciones para las que ha sido diseñada.

Envolvente: superficie de un edificio que se encuentra en contacto con el exterior, incluye elementos opacos y translucidos.

Exfiltración: flujo de aire a través de grietas u otras aberturas no intencionales en la envolvente desde el interior del edificio hacia el exterior, impulsadas por diferencias de presión naturales y/o artificiales.

Hermeticidad al aire: característica física de la envolvente que describe su capacidad para oponerse a las infiltraciones. Está relacionada con la materialidad de la envolvente y la calidad de la ejecución.

Infiltración de aire: ingreso de aire a un recinto en forma indeseada a través de grietas, intersticios propios de los elementos que conforman la envolvente, causado por presiones de viento o diferencias en la densidad del aire interior y exterior. Normalmente se asocia a pérdidas de energía al intercambia aire acondicionado por aire exterior.

**Intercambio de aire:** se refiere al cambio de aire que se produce cuando el aire al interior de un edificio es remplazado por aire proveniente del exterior. Se puede clasificar en forma general según su origen en ventilación o infiltración.

**Permeabilidad al aire:** se refiere a la capacidad de un componente de la envolvente de un edificio para permitir el paso de aire a través de él al estar expuesto a un diferencial de presión.

**Presurización:** aumento en forma artificial y constante de la presión de aire en un recinto o edificio.

**Temperatura Exterior:** temperatura del aire al exterior de un edificio.

**Temperatura Interior:** temperatura del aire al interior de un edificio.

**Ventilación Mecánica:** también conocida como forzada, es el movimiento de aire hacia o desde el edificio usando ventiladores, rejillas de inyección o extracción.

**Ventilación Natural:** introducción de aire proveniente del exterior de un edificio en forma voluntaria a través de ventanas, puertas, celosías y otras fenestraciones en la envolvente, aprovechando los motores de viento existentes en el lugar. El movimiento de aire se produce por la acción del viento y/o por la existencia de un gradiente de temperatura.

**Ventilación:** intercambio de aire entre el exterior e interior de un edificio en forma voluntaria.”  
(Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones(2014), CITEC UBB.)

## 8. Bibliografía

- 1.- Agencia Chilena de Eficiencia Energética (2012). Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos.
- 2.- ARMIJO, G. WHITMAN, CH. (2009) Informe Final Evaluación Post-Ocupaciones (EPO) de Escuelas Públicas en 5 Zonas Climático Habitacionales de Chile.
- 3.- BERKELEY LAB. (2012) "Elevated Indoor Carbon Dioxide Impairs Decision-Making Performance" <http://newscenter.lbl.gov/wp-content/uploads/sites/2/2012/10/CO2-Figure2.png>
- 4.- BOBADILLA, A. (2012) "Propuesta de método de calificación energética y ambiental de edificios públicos en Chile". PLEA Lima.
- 5.- CITEC UBB (2012). Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos. Proyecto Innova Chile Cód. 09CN14-5706 "Evaluación de Estrategias de Diseño Constructivo y de Estándares de Calidad Ambiental y Uso Eficiente de Energía en Edificaciones Publicas, Mediante Monitorización de Edificios Construidos".
- 6.- CITEC UBB, DECON UC (2014) Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones.
- 7.- CITEC UBB, DECON UC DIRECCIÓN DE ARQUITECTURA MOP CHILE (2013) Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios.
- 8.- CITEC UBB (2011) Informe de Resultados Monitorización Edificio Escuela e Internado Rucamanke, Comuna de Curarrehue, IX Región de la Araucanía. Proyecto Innova Chile N°09CN14-5706.
- 9.- D'ALENCON, R. (2008). Acondicionamientos, arquitectura y técnica. Santiago. Ediciones ARQ.
- 10.- DECON UC (2012). Manual de Gestión de la Energía en Edificios Públicos
- 11.- DECON UC, CITEC UB, IDIEM, DICTUC (2013) Protocolos para las mediciones y el levantamiento de información.
- 12.- DEL CAMPO, V. MENDIVIL, A. (2006) Calidad del Aire Interior en los Centros de Educación Infantil del País Vasco
- 13.- INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España. Guía de Buenas Prácticas NTP 742 "Ventilación General de Edificios".
- 14.- LIDAMENT, M (1996). A Guide to Energy Efficient Ventilation. Air Infiltration and Ventilation Centre. Universidad de Warwick. Gran Bretaña.

- 15.- MOLINA, C. VEAS, L.OSSIO, F. (2012) Case Study: Environmental Quality in Classrooms of South of Chile. Carbon dioxide concentration levels and satisfaction polls. PLEA
- 16.- Norma Española UNE-EN 13779. Comité Técnico AEN/CTN100. Ventilación de los edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos.
- 17.- Norma Chilena 1079 Of. 77 , INN. Arquitectura y Construcción. Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.
- 18.- SIMONI, M. ANNESSI-MAESANO, I. (2010) "School Air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children".
- 19.- TREBILCOCK, M. BOBADILLA, A. Y OTROS (2012) "Environmental Performance of Schools in Areas of Cultural Sensitivity". PLEA Lima.

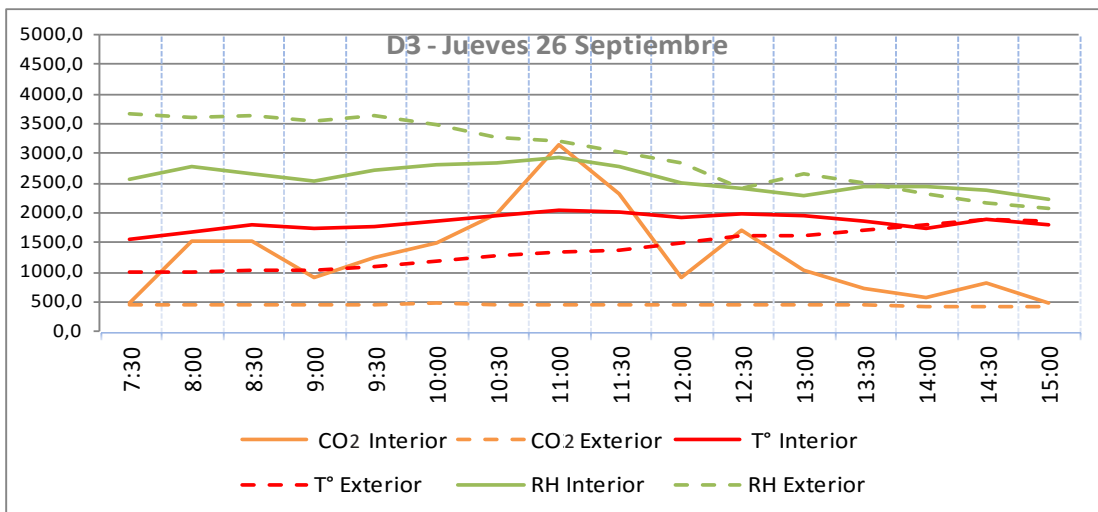
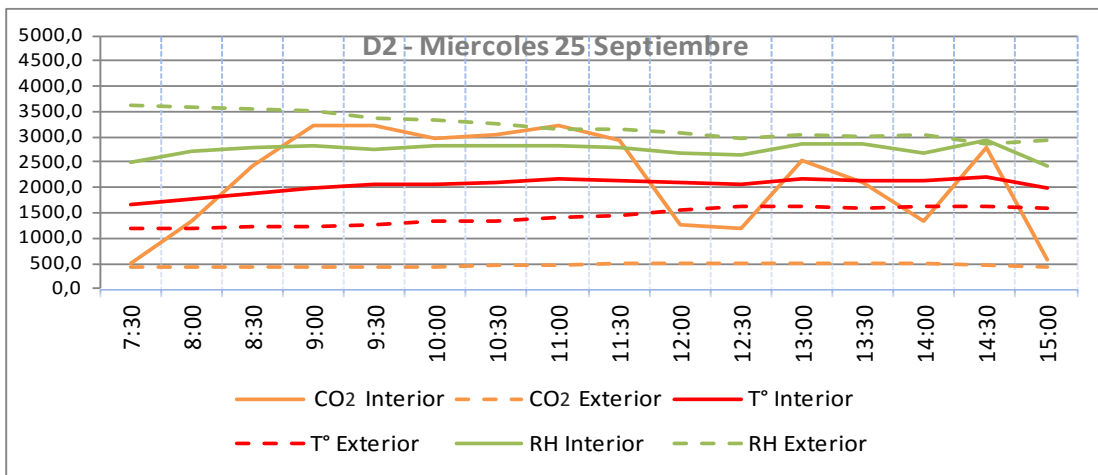
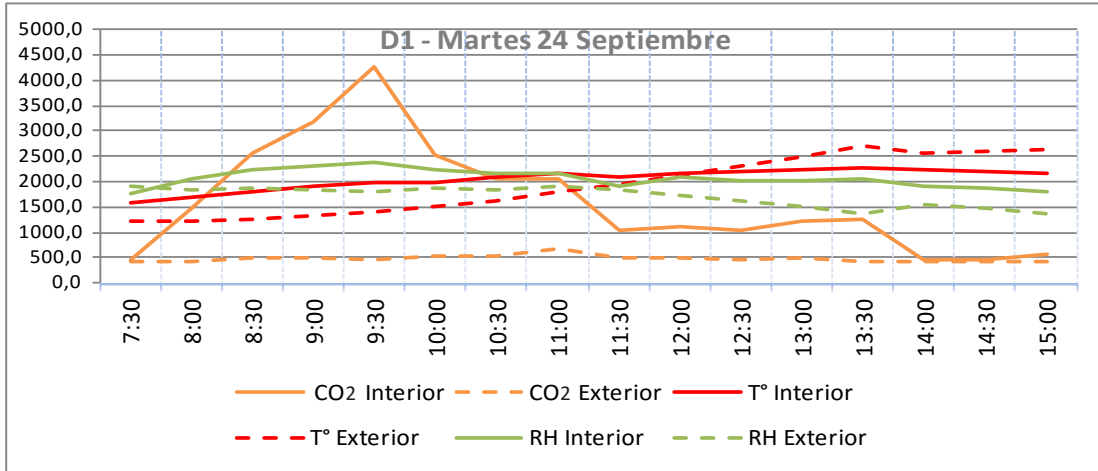


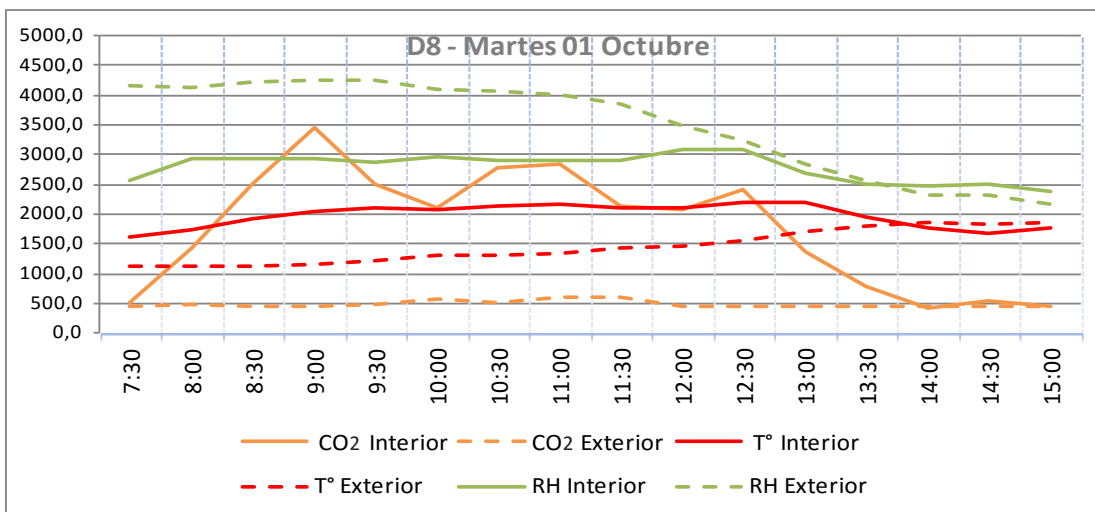
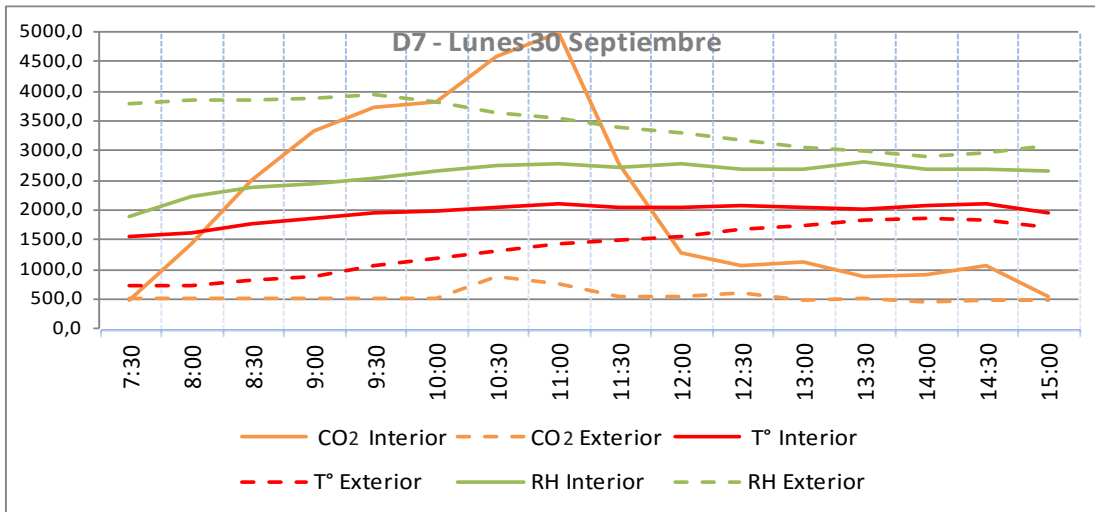
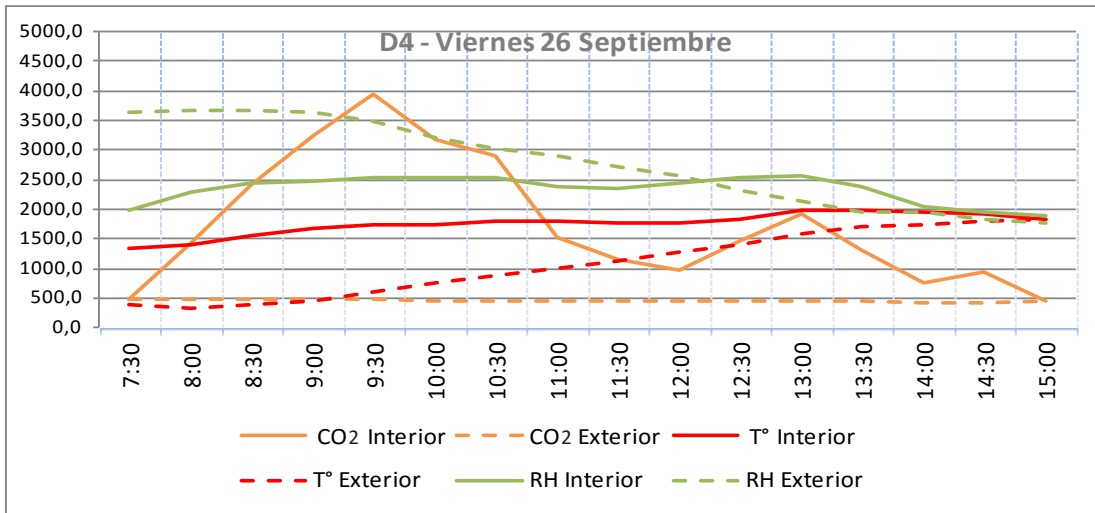


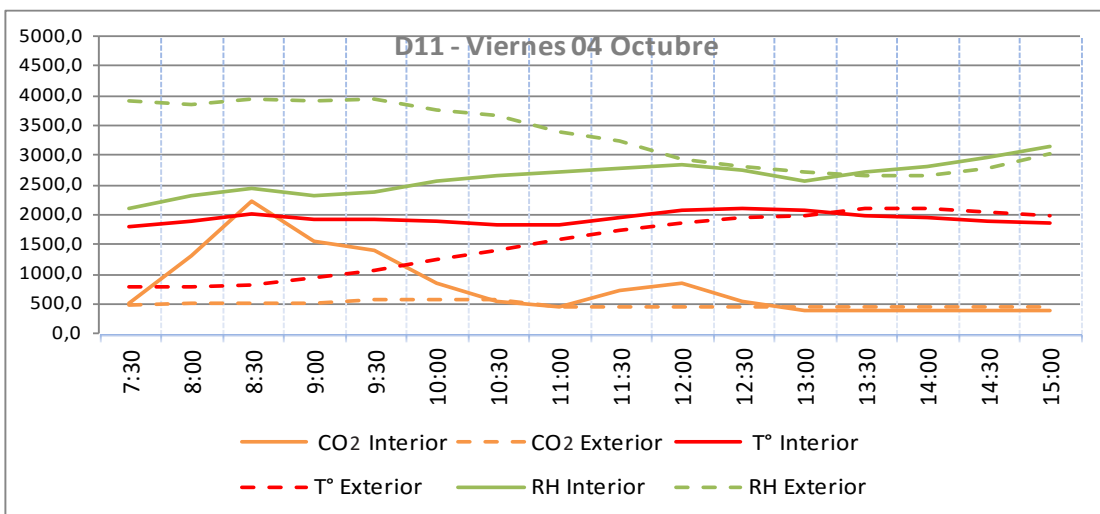
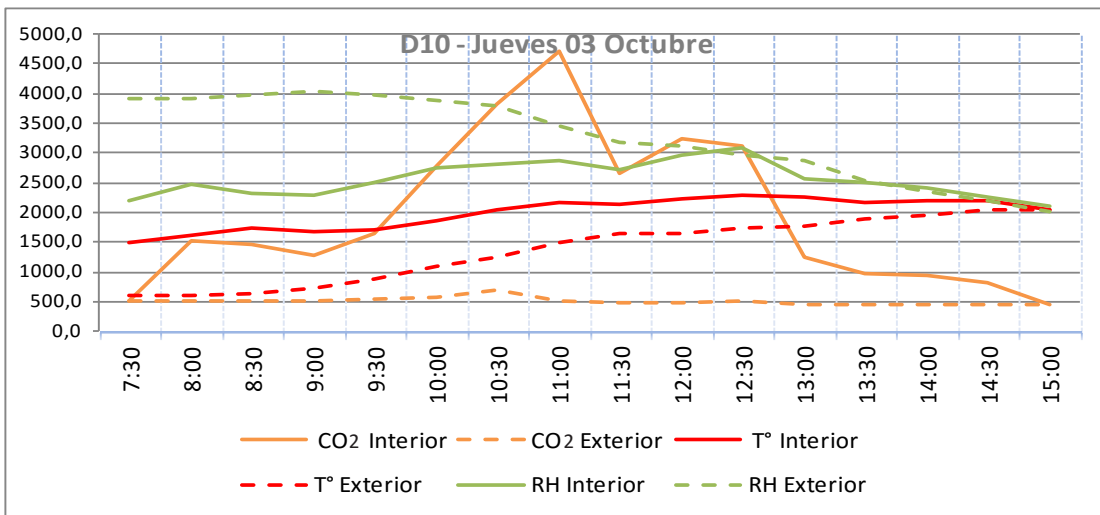
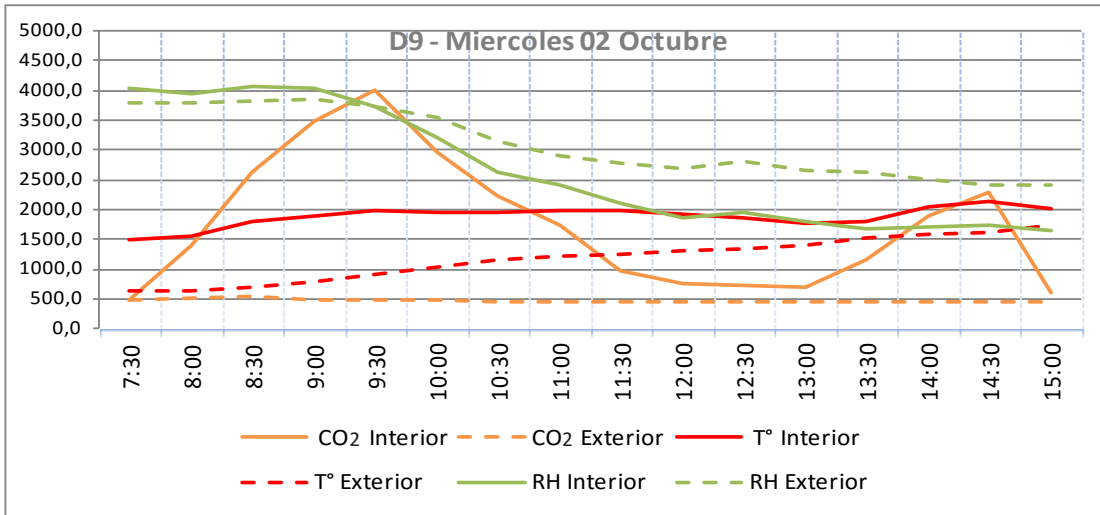


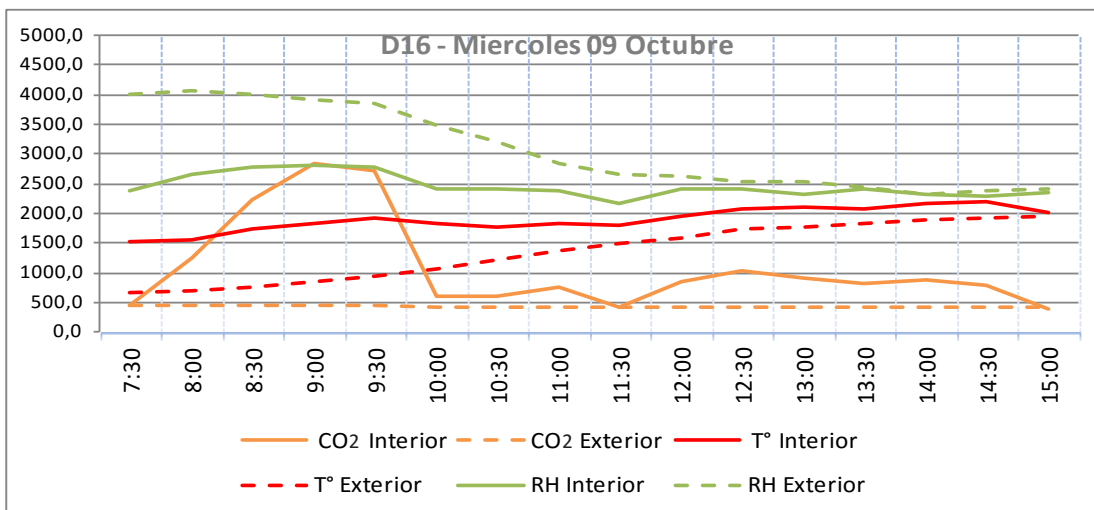
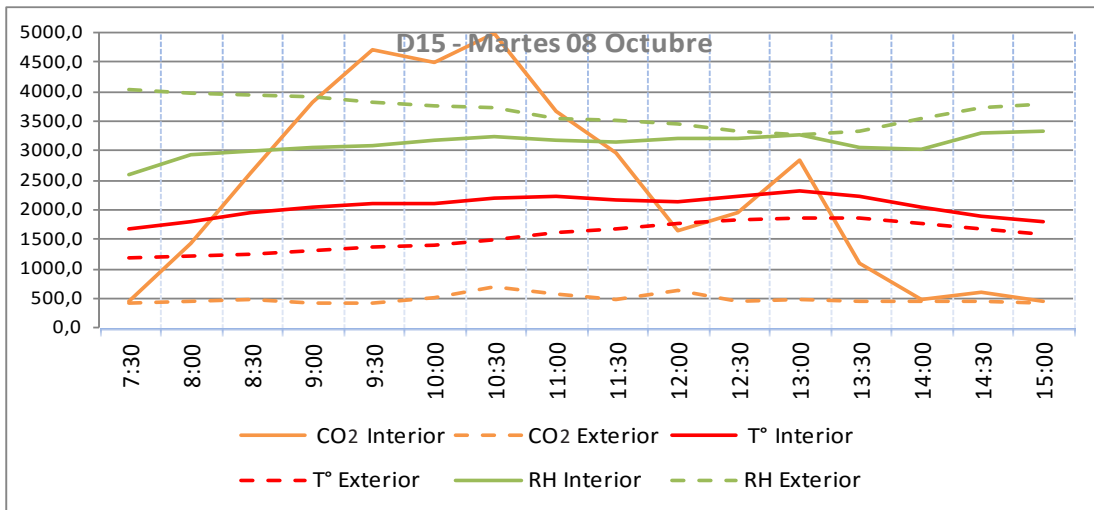
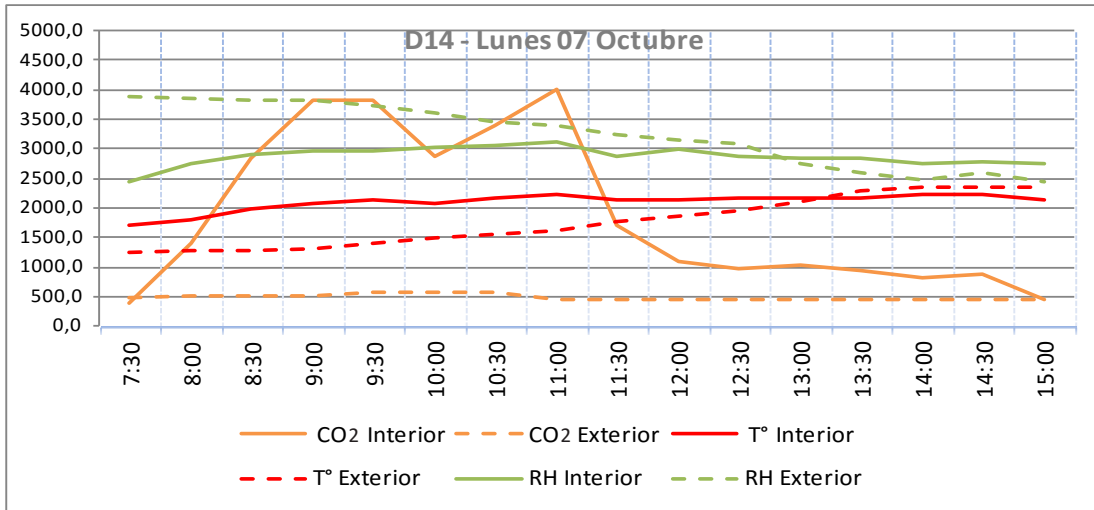


Anexo 2: Gráficos de mediciones interiores y exteriores en el Caso A, desde el día 1 al día 16









Anexo 2: Gráficos de mediciones interiores y exteriores en el Caso B, desde el día 1 al día 16

