



UNIVERSIDAD DEL TURABO
Escuela de Ciencias y Tecnología
Programa Graduado en Ciencias Ambientales

PROGRAMA GRADUADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

17 de octubre de 2008
Fecha de Defensa

Recomendamos que la tesis de Jaime Flores De Jesús
titulada

**DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO
EN SALONES DE ESCUELAS ELEMENTALES DEL DISTRITO ESCOLAR DE
CAGUAS II**

sea aceptada como requisito parcial para el grado de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
CON ESPECIALIDAD EN ANALISIS AMBIENTAL
(OPCIÓN EN QUÍMICA)**

Teresa Lipsett, PhD
Asesora de Investigación

Agustín Ríos PhD
Miembro

Pedro A. Modesto, MEM
Miembro

Ángel Rivera Collazo, PhD
Decano

Fred C. Schaffner Gibbs, PhD
Decano Asociado, Estudios Graduados
e Investigación

UNIVERSIDAD DEL TURABO

DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE
CARBONO EN SALONES DE ESCUELAS ELEMENTALES
DEL DISTRITO ESCOLAR DE CAGUAS II

Por

Jaime Flores de Jesús
B.S., Química Industrial, Universidad de Puerto Rico - Humacao

TESIS

Escuela de Ciencias y Tecnología
Universidad del Turabo
Requisito parcial para el grado de
Maestría en Ciencias Ambientales
Especialidad en Análisis Ambiental
Con Opción en Química

Gurabo, Puerto Rico

diciembre, 2008

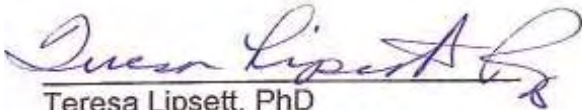
UNIVERSIDAD DEL TURABO

Una tesis sometida como requisito parcial para el grado de
Maestría en Ciencias Ambientales

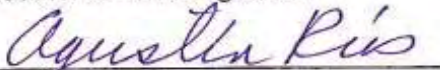
Determinación de las concentraciones de dióxido de carbono en salones de
escuelas elementales del distrito escolar de Caguas II

Jaime Flores de Jesús, REM, CEA

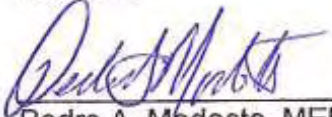
Aprobado:



Teresa Lipsett, PhD
Asesora de Investigación



Agustín Ríos
Miembro



Pedro A. Modesto, MEM
Miembro

© Copyright 2008
Jaime Flores de Jesús. Todo los Derechos Reservados.

Dedicatoria

A Dios que indudablemente me ha permitido llegar hasta este punto.
A mis padres y abuelos, por su apoyo constante y generoso. Por haberme educado y enseñado el valor del trabajo y humildad, soportar mis errores, por sus consejos y sabiduría, además de cultivar ese sabio don de la responsabilidad.

Lo que hoy es utópico mañana es real; mundos posibles.
La utopía es lo que ha conducido a que seamos posibles.

Jerome Bruner

Agradecimientos

Durante el transcurso de esta investigación muchos sin lugar a duda fueron colaboradores de alguna forma u otra. Dar gracias me es complicado; debido a como hallar las palabras exactas que encierren mis más sinceros agradecimientos hacia todos aquellos entes que hicieron posible la realización de este trabajo.

De manera que de forma especial, agradezco a Dios por la oportunidad que me ha brindado de aprender, mejorar y crecer en diversos aspectos junto a personas especiales para mí. También debo agradecer a la orientación, sugerencias y estímulo brindados durante la formación de este trabajo a la Dra. Teresa Lipsett, además de su tolerancia y por permitirme colaborar en su grupo de trabajo. Al Dr. Agustín Ríos por su gran ayuda, generosidad e inmejorable disposición durante su escaso tiempo disponible en la mentoría y asesoría en este estudio. Debo expresar mi más sinceras gratitudes y reconocimiento al Prof. Pedro Modesto P.E. por compartir su tiempo, sabiduría y peculiar sentido del humor.

A mis padres, amigos y compañeros que particularmente se interesaron y tomaron partida de este trabajo. Así que sin ánimo de olvidar a nadie, a todas aquellas personas que de alguna forma en particular han intervenido en el estudio; gracias por formar parte de lo realizado y por haber logrado que todo tuviera un buen final.

Tabla de Contenido

	página
Lista de Tablas.....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Apéndice.....	ix
Abstract.....	x
Resumen.....	xi
Capítulo Uno. Introducción.....	1
Fundamentos del Problema.....	1
Calidad del Ambiente Interior y Calidad de Aire Interior.....	3
Origen de los Contaminantes del Aire Interior.....	6
Planteamiento del Problema.....	10
Justificación del Estudio.....	12
Preguntas de Investigación.....	14
Hipótesis.....	14
Capítulo Dos. Revisión de Literatura.....	16
Historia de la Calidad de Aire Interior.....	16
La Situación Actual.....	17
Reglamentaciones Federales.....	24
Capítulo Tres. Metodología.....	28
Localización y Colindancias Municipales de Caguas.....	28
Metodología.....	29

	página
Calibración del Instrumento.....	32
Datos Meteorológicos.....	33
Capítulo Cuatro. Resultados.....	34
Capítulo Cinco. Discusión.....	47
Conclusión.....	50
Literatura Citada.....	54

Lista de Tablas

		página
Tabla 4.01	Datos de la densidad poblacional en los salones.....	35
Tabla 4.02	Concentraciones promedios de CO ₂ y los medidas de ventilación por personas (Q _p) en la primera fase.....	36
Tabla 4.03	Resumen de los resultados obtenidos de CO ₂ en la escuela E-001.....	37
Tabla 4.04	Resumen de los resultados obtenidos de CO ₂ en la Escuela E-002.....	38
Tabla 4.05	Resumen de los resultados obtenidos de CO ₂ en la Escuela E-003.....	40
Tabla 4.06	Resumen de los resultados obtenidos de CO ₂ en la Escuela E-004.....	41
Tabla 4.07	Promedio de las concentraciones de CO ₂ y las medidas de ventilación por persona (Q _p) en el salón de clase de la escuela E-002.....	43
Tabla 4.08	Resumen de las concentraciones de CO ₂ por día en el interior del salón E-002.....	44
Tabla 4.09	Resumen de las Concentraciones de CO ₂ por día en el exterior del salón E-002.....	45

Lista de Figuras

		página
Figura 4.01	Variabilidad de las concentraciones de CO ₂ escuela E-001.....	37
Figura 4.02	Variabilidad de las concentraciones de CO ₂ escuela E-002.....	39
Figura 4.03	Variabilidad de las concentraciones de CO ₂ escuela E-003.....	40
Figura 4.04	Variabilidad de las concentraciones de CO ₂ escuela E-004.....	42
Figura 4.05	Distribución de las concentraciones de CO ₂ durante el horario escolar.....	46

Lista de Apéndices

	página
Apéndice Uno.	Nomenclatura..... 65
Apéndice Dos.	Razón de generación de dióxido de carbono y consumo de oxígeno..... 67
Apéndice Tres.	Gráficos de la variabilidad de las temperaturas y % rh en los salones de clase.....68
Apéndice Cuatro.	Resumen de las condiciones de temperatura y % rh en los salones de clase por escuelas..... 71
Apéndice Cinco.	Datos climatológicos.....74
Apéndice Seis.	Mínimos de de ventilación por área estimados por ASHRAE/ANSI Standard 62.....79
Apéndice Siete.	Cálculo para determinar la razón de ventilación por persona (Q_p) en los salones de clase.....80

Abstract

Jaime Flores de Jesús (Master of Environmental Science)

Determination of Carbon Dioxide concentration in Elementary Schools
Classrooms of Caguas II Scholar District

Abstract of a Master Degree at the Universidad del Turabo.

Thesis supervised by Teresa Lipsett Ruiz, PhD

No. of pages in text 94

A number of approaches exist to evaluate building ventilation and indoor air quality. In several situations, the measurements and analysis of indoor carbon dioxide concentrations can be a practical measurement for the understanding of indoor air quality and ventilation.

In this research are compared indoor carbon dioxide concentration detected in different schools of Caguas II Scholar District. The measurements of indoor air samples were taken in first grade classrooms, where two of them were equipped with air conditioning systems. The results showed that 75% of the classrooms in the schools studied have CO₂ levels less than the maximum ASHRAE guidelines recommended of 1000 ppm. One of the classrooms that had air conditioning exceeds the parameter of 1000 ppm of carbon dioxide concentration and had an average of 2426 ppm. This high concentration is indicative of a low ventilation rate, which resulted in 2.48 L/sec per person.

Resumen

Jaime Flores de Jesús (Maestro en Ciencias Ambientales)

Determinación De Las Concentraciones De Dióxido De Carbono En Salones
De Escuelas Elementales Del Distrito Escolar de Caguas II

Resumen de una tesis de Maestría de la Universidad del Turabo.

Tesis supervisada por Teresa Lipsett Ruiz, PhD

Num. de páginas en el texto 94

Existen un sin número de perspectivas para evaluar la ventilación y calidad de aire interior en los edificios. Uno de los enfoques comúnmente utilizados con este fin son las medidas de las concentraciones de dióxido de carbono, las cuales pueden ser de gran utilidad para entender y determinar la calidad de aire interior y ventilación.

En esta tesis se comparan las concentraciones de dióxido de carbono en diferentes escuelas del Distrito Escolar de Caguas II. Las observaciones de calidad de aire interior fueron tomadas en los salones de primer grado de cada escuela, donde se encontró que dos de los salones estaban equipados con unidades individuales de aire acondicionado. Los parámetros de calidad de aire basados en las concentraciones de dióxido de carbono encontrado en el 75% de los salones donde se realizó el estudio, están dentro de los niveles recomendados por ASHRAE (1000 ppm). Una de

las escuelas que está equipada con aire acondicionado excede las concentraciones de dióxido de carbono, 2426 ppm, lo cual es indicativo de la baja razón de ventilación por persona encontrada en el interior del salón que fue de 2.48 L/seg por persona. Aunque la prueba estadística para estas observaciones no confirma que hayan diferencias significativas para los salones que se encuentran en la zona urbana o rural, con aire o sin aire, es importante notar la gran diferencia en las concentraciones de dióxido de carbono y la razón de ventilación que se puede encontrar en los salones de clase en los cuales se está instalando unidades de aire sin el debido equipo de ventilación.

Capítulo Uno

Introducción

Fundamentos del Problema

La contaminación ambiental, implica la presencia en el ambiente de cualquier agente físico (ruido, radiación), químico (compuestos orgánicos e inorgánicos) y/o biológico (microorganismos) o bien de una combinación de estos agentes. Estos agentes físicos, químicos y biológicos pueden ser nocivos para la salud, seguridad y/o para el bienestar de la población (Magas 2007, Peavy 1985). La presencia de uno o más de estos agentes en el ambiente podrían ser perjudiciales para la vida vegetal y animal. También, los mismos podrían impedir el uso normal de las propiedades, lugares de recreación y deleite de los mismos. La contaminación puede surgir a partir de ciertas manifestaciones telúricas (fuentes naturales; erosión) o bien debido a diferentes procesos antropogénicos (procesos humanos; quema de combustibles fósiles, disposición inadecuada de desperdicios) conforme a las actividades de la vida cotidiana (Peavy 1985).

Entre los problemas de la contaminación ambiental se encuentra la contaminación atmosférica o contaminación del aire. La contaminación atmosférica se manifiesta cuando se alteran las concentraciones naturales de los gases y/o material particulado (PM_x) en la atmósfera (Peavy 1985, Wark 1998). Este tipo de contaminación es uno dinámico en el cual las condiciones físicas y químicas afectan la acumulación de los

contaminantes en la atmósfera. Las condiciones físicas y químicas están en constantes fluctuaciones debido a diversos factores meteorológicos (presión atmosférica, temperatura, humedad, entre otros) y fotoquímicos (fotólisis de moléculas y formación de radicales libres) en la atmósfera (Mitchell 2007). Es preciso tener presente que la contaminación atmosférica producida en un área determinada no permanece exclusivamente en la zona en la que fue producida. La contaminación atmosférica puede ser desplazada incluso a kilómetros de distancia de su lugar de origen por los movimientos de las masas de aire y la composición atmosférica del lugar (Wark 1998).

La contaminación atmosférica no es un fenómeno reciente, es un fenómeno que ha coexistido con los estilos de vida del ser humano (Sundell 2004). Sin embargo en los últimos años, ha sido el tema de mayor inquietud para muchas ciudades del mundo, puesto que se ha asociado la exposición al aire contaminado con diversos efectos a la salud humana (cáncer, problemas del sistema respiratorio, daño al sistema nervioso, entre otros) (Fontanella 2007, Qi 2007, Mathieu 2002). Para la sociedad actual es algo más que alarmante, es un problema público. Este problema le incumbe no solamente a quienes emiten el contaminante, si no también a todo aquel que sufre los resultados de las emisiones de los contaminantes (Wark 1998). Se conoce que en las grandes ciudades, en especial aquellas que están en desarrollo, se está incrementando la

contaminación del aire poniendo en peligro principalmente la salud de sus habitantes (Qi 2007).

Una serie de severos episodios de contaminación de aire ocurridos en Europa y Norte América antes de 1960 llamó la atención de la comunidad científica y reguladoras acerca de los efectos adversos a la salud de los seres humanos. Diversos estudios epidemiológicos se han realizado durante este periodo de tiempo, encontrando que bajos niveles de ciertos contaminantes del aire pueden causar efectos adversos a la salud de las personas y del medio ambiente. Personas con condiciones preexistentes de alguna condición del sistema respiratorio y pulmonar o incluso el asma, son más susceptibles a los efectos adversos de la contaminación atmosférica (Magas 2007).

Calidad del Ambiente Interior y Calidad de Aire Interior

El estudio de los contaminantes presentes en el aire se ha convertido en un movimiento cada vez más sistemático (Godwin 2007, Blondeau 2005). Estos estudios de contaminantes atmosféricos procuran contrastar los estándares de emisión de contaminantes nacionales e internacionales aplicados para asegurar que la calidad del aire exterior cumpla con los estándares vigentes. Los estudios ambientales procuran además, informar a las autoridades pertinentes si se ha excedido de los valores de límite de umbral para algún contaminante y también evalúan el peligro de estos contaminantes a la salud de las personas (Blondeau 2005). Kepleis (2001), señala que las personas pasan más del 90% del tiempo en el

interior de estructuras. En estas se incluyen casas, áreas de trabajo, escuelas y espacios públicos como lo son restaurantes y centros comerciales, entre otros. Por esta razón el ser humano está más expuesto a la contaminación en el interior que en el exterior (Wu 2007, Jacobs 2007, Blondeau 2005, Sundell 2004). A consecuencia, condiciones del tracto respiratorio tales como alergias y en especial el asma, tienden a ser asociados particularmente con exposiciones a contaminantes comúnmente encontrados más en ambientes internos que en ambientes externos (Wu 2007).

La Calidad del Ambiente Interior (IEQ, por sus siglas en inglés) se utiliza para describir los problemas que ocurren en edificios no industriales los cuales incluyen oficinas, centros comerciales, escuelas, entre otros. (Jacobs 2007, NIOSH 1997). Los estudios sobre IEQ están enfocados en la interacción de una variedad de factores los cuales pueden afectar la percepción, salud, productividad y comodidad de las personas en el ambiente interior (NIBS 2005, DOE 2000). Estos factores son la temperatura, iluminación no adecuada, humedad, diseño interior y demás componentes que se integran en el interior incluyendo la calidad del aire (NIBS 2005, Berlin 2001, EPA 1991). En ambientes interiores la concentración de los contaminantes tiende a ser mayor, con frecuencia puede llegar ha ser mucho más alta que 10 veces la concentración encontrada en ambientes exteriores (Levin 2006, Vargas 2005, Guardino 2003).

La calidad del aire interior (CAI) es un factor determinante para la salud y el bienestar de las personas (WHO 2000). Se puede entender por calidad de aire interior, como la cuantificación de las variables que afectan y describen las características y propiedades del aire en el ambiente interior (NIOSH 1997, EPA 1991). Para el uso práctico, las autoridades internacionales han propuesto varias definiciones de CAI. La Sociedad Americana de Ingenieros de Refrigeración, Calefacción y Aires Acondicionados (ASHRAE, por sus siglas en inglés) (ASHRAE 1989), define como CAI aceptable “al aire en el cual no se encuentran contaminantes en concentraciones perjudiciales... y al aire en el cual una mayoría considerable ($\geq 80\%$) de las personas expuestas no expresen inconformidad...”. A su vez ASHRAE define contaminantes como todos los constituyentes no deseados en el aire que pueden reducir la aceptabilidad del aire y pudieran ser perjudiciales para las personas. Estos contaminantes incluyen gases, microorganismos, humos u otros materiales particulados. Los factores perjudiciales incluyen: toxicidad, potenciales agentes alergénicos e infecciosos, irritantes, condiciones termales extremas, y olores objetables.

Otras organizaciones que ponen en manifiesto y consideran relevante la percepción y salud humana en su definición de Calidad de Aire son la Nordic Committee on Building Regulations (NKB) y World Health Organization (WHO). Indican además que la calidad de aire interior es

satisfactoria cuando la mayoría de las personas entren a un ambiente interior y encuentran el aire como aceptable o bueno.

Origen de los Contaminantes del Aire Interior

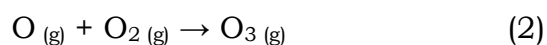
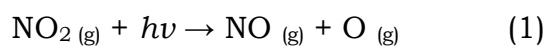
Los contaminantes de aire interior se pueden dividir en dos categorías: los agentes microbiológicos y los agentes químicos. Los agentes microbiológicos también llamados bio-aerosoles, constituyen la mayor parte de todos los contaminantes de aire interior. Estos incluyen todas las bacterias, hongos, virus, ácaros de polvo y productos metabólicos. Los hongos generalmente se encuentran en áreas húmedas. Los hongos reducen la calidad del aire interior gracias a la diseminación de esporas, colonias fragmentadas y sus productos metabólicos (compuestos orgánicos volátiles microbianos, MVOC por sus siglas en inglés) (Mitchell 2007, Daisey 2003, Liccardi 2001).

En los edificios con problemas de humedad generalmente se encuentra una variedad de moho (*mold*), entre los cuales se incluye el *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium* y la *Alternaria*. Estos hongos saprofiticos, requieren que se cumplan ciertas condiciones apropiadas para su crecimiento y diseminación. El diámetro de las esporas de los mohos varía de 2 – 10 μm , aunque en la mayoría su diámetro es $<5 \mu\text{m}$ (Mitchell 2007). La exposición a las esporas de estos potenciales productores de micotoxinas y glucanos, causan múltiples reacciones alérgicas, especialmente a los sujetos más sensibles.

El problema de humedad está asociado al crecimiento y sensibilidad a organismos como la *Legionella* (Mitchell 2007, Richardson 2005, Guardino 2003). Se reconoce que los sistemas de humidificación tienen el potencial de desarrollar una multitud de organismos capaces de causar respuestas inflamatorias graves del sistema respiratorio (Mitchell 2007, Daisey 2003, Guardino 2003, Liccardi 2001). También existe una asociación directa entre la baja humedad relativa ($\leq 30\%$ rh) o aire seco y la salud. Este aire seco generalmente causa resequedad en la piel, irritaciones en los ojos y fatiga.

Al igual que los bio-aerosoles, las sustancias químicas son de gran interés en el estudio de calidad de aire interior. Entre estas sustancias químicas se encuentran los denominados grupos de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y semi-volátiles (SVOC), pesticidas y algunos compuestos químicos producidos durante los procesos de combustión. Estudios epidemiológicos y estudios de exposición han producido importante información sobre los efectos a la salud humana (problemas respiratorios, cáncer, susceptibilidad a problemas del sistema nervioso, entre otros) que conlleva la exposición a los contaminantes diseminados en el aire (Mitchell 2007, Daisey 2003, Mathieu-Nolf 2002, Nicolai 2002).

El ozono (O_3), producido por una reacción fotoquímica del dióxido nítrico, es reconocido como un potencial irritante del sistema respiratorio.



El estar en contacto con éste puede causar manifestaciones persistentes como tos, dolor al inspirar, inflamación de las vías respiratorias e incrementar la permeabilidad bronquial. Estudios realizados con niños de edad escolar, muestran que un incremento en las concentraciones de ozono también incrementa la predisposición a sufrir un ataque de asma (Mathiew-Nolf 2002, Nicolai 2002).

Como parte del componente de la contaminación del aire suele encontrarse un conjunto de distintos contaminantes los cuales suelen ser emitidos por una fuente en común como los óxidos de azufre (SO_2 y SO), óxidos de nitrógeno (NO , N_2O , N_2O_4 , NO_2), aerosoles ácidos, material particulado respirable y óxidos de carbono (CO_2 y CO). La toxicidad del material particulado (PM_x , por sus siglas en inglés) depende de su composición química y del tamaño de la partícula, ya que esto determinará donde se depositarán en el sistema respiratorio. Los estudios epidemiológicos están proporcionando constantemente, evidencia de los efectos adversos a la salud de los óxidos de nitrógeno, carbono y azufre; los cuales contribuyen además, a la formación de aerosoles ácidos en la atmósfera (Mitchell 2007, Guardino 2003, Mathiew-Nolf 2002, Nicolai 2002).

El CO_2 es un gas incoloro e inodoro, clasificado como un gas asfixiante ya que al ser 1.5 veces más denso que el aire tiende a desplazar el oxígeno contenido en el aire del lugar. Normalmente el CO_2 en la atmósfera se encuentra en concentraciones de 300 ppm a 700 ppm. Las

emisiones de dióxido de carbono representan alrededor de 80% de todas las emisiones de gas con efecto de invernadero en los Estados Unidos (EPA, 2003). Las fuentes de emisión de dióxido de carbono incluyen la quema de combustibles fósiles, la producción de electricidad, los vehículos de transporte, la fabricación de cemento o de cal, la quema de desechos y las llamaradas producidas por el gas natural. (EPA 2003, NIH 2007, OSHA 1990).

En ambientes interiores la principal fuente de CO₂ son los ocupantes ya que este es el producto metabólico de las personas al respirar. La inhalación a este gas produce efectos fisiológicos en el sistema nervioso central, sistema respiratorio y sistema cardiovascular. Los síntomas asociados al sistema nervioso central (SNC) presentados a exposiciones de concentraciones bajas de CO₂ suelen ser: somnolencia, fatiga, narcosis y depresión del SNC. Con la exposición a altas concentraciones de CO₂ (30%) los efectos producidos en el SNC son convulsiones y coma. Los síntomas más comunes presentados en el sistema respiratorio por la exposición a CO₂ consisten en respiración corta, acidosis y disnea (falta de aire) (NIH 2007, NIOSH 1997_a, OSHA 1990). Los efectos cardiovasculares se presentan generalmente como alta presión, vasodilatación y aumento en el ritmo cardíaco. La vasodilatación cerebral y periférica generalmente comienza con síntomas de sudoración y dolor de cabeza. Los signos y síntomas asociados a la exposición de bajas concentraciones de CO₂ son

repentinos y reversibles, los cuales aparecen segundos después de la exposición (OSHA 1990).

Planteamiento del problema

Las escuelas proveen a los niños un importante ambiente interior después que el hogar. Los estudiantes pasan un promedio de 8 horas por día en la escuela. Muchos otros estudiantes podrían pasar hasta 10 horas por día en la escuela. El tiempo que un estudiante pasará en la escuela va a depender de las diferentes actividades a la que el estudiante se envuelva como: escuela abierta y/o secciones de tutorías que se brindan luego del periodo escolar. Esta razón hace que la CAI encontrada en las escuelas pueda tener un impacto substancial en la salud de los niños (Zhang 2006).

Es común encontrar en las aulas escolares una alta densidad poblacional, limpieza inadecuada y pobre mantenimiento (Smedje 1997). A pesar de la alta población encontrada en las escuelas es rara la vez que se realiza una evaluación sistemática de CAI, salud y bienestar, que demuestre las deficiencias significativas que puedan o estén degradando la CAI en los diferentes salones de clase y otros edificios en las escuelas (comedores, bibliotecas, auditorios y/o salones de juego). La pobre CAI está relacionada con el incremento de alergias, las cuales afectan particularmente a niños y jóvenes (Smedje 1997). Como resultado, el interés científico pediátrico en salud ambiental ha enfocado su atención en estimar la importancia de la contaminación del aire como un factor

significativo de enfermedades respiratorias como episodios de alergias incluyendo el asma. (Magas 2007).

Las concentraciones de CO₂ encontrada en la mayoría de los ambientes interiores son ligeramente más altas que en el ambiente exterior, por lo que no es considerado un factor que pueda afectar directamente la salud humana. Sin embargo, esta diferencia en concentraciones entre el ambiente interior y el ambiente exterior es utilizado como indicador de la razón ventilación por personas y de contaminantes generados por las personas en particular los bioefluentes (Erdmann 2004, Daisey 2003, Persily 1997, Persily 1996).

En estudios realizados por Erdmann (2004), Apte (2000) y Seppänen (2004 y 1999), se presenta una fuerte correlación entre las altas concentraciones de CO₂ y la prevalencia del Síndrome de Edificios Enfermos (SBS, por sus siglas en inglés). OSHA y NIOSH recomiendan que el valor medio de exposición (TWA, por sus siglas en inglés) para el CO₂ al que debe estar expuesto un empleado en su lugar de trabajo sea de <5000 ppm en un turno de 8 horas. Por otro lado ASHRAE, recomienda en sus guías que las concentraciones de CO₂ deben ser menores a 1000 ppm, para asegurar una buena ventilación del ambiente interior y asegurar la salud y el bienestar de las personas presentes.

Un asunto complejo son los efectos de la ventilación en la CAI y la salud de las personas. Se conoce que la ventilación es necesaria para la remoción de los contaminantes generados en el interior o para diluir las

concentraciones de los contaminantes a niveles aceptables. La razón de ventilación en las escuelas escasas veces ha sido estudiada, aunque a menudo éste parámetro es relacionado con diversos síntomas y condiciones de salud (Daisey 2004, Seppänen 2004). La inadecuada ventilación y hacinamiento en las viviendas y complejos públicos contribuyó a la propagación de epidemias como la de tuberculosis hace un siglo en los Estados Unidos y actualmente continúa siendo un problema significativo en las ciudades en vías de desarrollo, causando la muerte de 1.6 millones de personas para el 2005 (Jacobs 2007, WHO 2008). También, estudios realizados han mostrado evidencia significativa que relacionan la baja razón de ventilación con el la reducción en la asistencia y desempeño de las personas en el área de trabajo (Wargocki 2002) y de los estudiantes (Shaughnessy 2006). La Oficina General de Auditoria de los Estados Unidos estimó, que una (1) de cada (5) cinco escuelas de la Nación Americana tiene problemas significativos de CAI (General Accounting Office 1996).

Justificación del estudio

La Sociedad Americana de Ingenieros de Refrigeración, Calefacción y Aires Acondicionados, recomienda que el mínimo de ventilación para una oficina ocupada sea de 10 L/seg. por persona, lo que correspondería a tener aproximadamente una concentración máxima de 870 ppm de CO₂ en el ambiente interior. Los síntomas asociados a la exposición de altas concentraciones de CO₂, incluyen pero no se limitan a dolor de cabeza,

fatiga, dificultad al respirar, síntomas e irritabilidad del tracto respiratorio y de los ojos, entre otros (Erdmann 2004, Seppänen 2004).

El dióxido de carbono (CO_2) a menudo es utilizado como un indicador en la evaluación de la capacidad de ventilación de los salones de clase (Erdmann 2004). Concentraciones que sobrepasen los 1,000 ppm ó una diferencia de 700 ppm en comparación al ambiente externo, generalmente se considera indicativo de una ventilación inadecuada en el lugar causando problemas de calidad del aire (Daisey 2004, Corsi 2002, Lee 1999).

Los niños representan la sub-población más grande y susceptible a los efectos adversos de la contaminación del aire más que los adultos (AAP 2004; Mathieu 2002). La Academia Americana de Pediatría (2004), indicó que la contaminación del aire afecta además de la salud, los indicadores de salud y el ausentismo en las escuelas. Los niños residentes en comunidades con altos niveles de contaminación, muestran una disminución significativa en la función de los pulmones durante su desarrollo. Los estudios realizados actualmente demuestran una relación directa entre la mortalidad y las admisiones en los hospitales a causa de ataques de asma y demás problemas del sistema respiratorio provocados por el incremento en los niveles de contaminación en el ambiente (Magas 2007, Qi 2007, Lee 2006, Masjedi 2003, Chef 1999).

Preguntas de Investigación

1. ¿Están los niños de las escuelas públicas de la Región Educativa de Caguas II, expuestos a concentraciones de dióxido de carbono en el interior del salón de clases que excedan los límites recomendados por ASHRAE?
2. ¿Los niños de escuelas urbanas están más expuestos a altas concentraciones de dióxido de carbono que los que estudian en escuelas rurales?
3. ¿Habrá diferencias en las concentraciones de dióxido de carbono en aquellos salones con sistemas de acondicionador de aire versus los salones que no tienen sistemas de acondicionador de aire?
4. ¿Habrá alguna diferencia en la ventilación, entre los salones con sistemas de ventilación natural y aquellos con sistemas de acondicionador de aire?
5. ¿Existirán fluctuaciones en la concentración de dióxido de carbono durante el periodo lectivo?

Hipótesis

Las concentraciones de dióxido de carbono exceden los límites recomendados por ASHRAE, lo que influye en la mala calidad de aire en los salones de clase de las escuelas del Distrito Escolar de Caguas II. Por el contrario, si las concentraciones de dióxido de carbono no exceden las

concentraciones recomendadas por ASHRAE, los salones de clase no tienen problemas de calidad de aire interior.

Capítulo Dos

Revisión de Literatura

Historia de la Calidad de Aire Interior

A través de la historia, el hombre conoce que la contaminación del aire puede ser perjudicial para la salud. Sundell (2004), destaca datos precedentes al actual estudio de la calidad del aire en interiores. Se puede apreciar la trascendencia del concepto de aire malo y aire bueno. El aire malo se asoció con la dispersión de enfermedades y con la experiencia de la sensación desagradable que experimentaban las personas en cuartos con una deficiencia en la ventilación. Según Sundell (2004), Lavoisier en 1781, realizó varios estudios de especial importancia, ya que nos ayudó a entender el metabolismo humano e incluye en estos la asociación cuantitativa entre el consumo de oxígeno y la emisión de CO₂. A partir de estos estudios se comenzó a utilizar las concentraciones de CO₂ como una medida para estipular si el aire encontrado en un ambiente interior es fresco o viejo (usado). Este aire viejo o malo, causado por la mala ventilación de los lugares cerrados era considerado el responsable de la diseminación de enfermedades y epidemias, especialmente en aquellos lugares cerrados y/o con hacinamiento poblacional. John Griscom, en New York asoció los problemas de ventilación especialmente en los hospitales de la ciudad con la epidemia que sufrió la ciudad de tuberculosis a principios del siglo XIX.

En Sundell (2004), también se hace referencia a los trabajos de Pettenkofer (1858), el cual indicó que el aire con concentraciones que sobrepasen los 1000 ppm de CO₂ no es adecuado para respirar en ambientes interiores. También sugiere que en un espacio interior donde las personas permanecerán un largo periodo de tiempo las concentraciones de CO₂ no debieran exceder los 700 ppm. Paralelamente con los estudios de Pettenkofer, Elías Heyman, realizó varios estudios en escuelas con diferentes sistemas de ventilación y en el cual se midió la concentración de CO₂. En estos estudios encontró que además de la pobre ventilación y de las altas concentraciones de CO₂ y humedad, las personas presentaban síntomas los cuales hoy en día se utilizan para referirse a los SBS.

La Situación Actual

El aire en muchas partes del mundo está lejos de ser limpio. La EPA, en su reporte de estatus y tendencias indicó que la calidad de aire ha aumentado en muchos lugares y se ha deteriorado en otros a causa del incesante desarrollo industrial y urbano (Pénard 2007; AAP 2004; EPA 2003; Masjedi 2003). La contaminación del aire está significativamente asociada con el incremento en padecimientos y morbilidad de enfermedades del sistema respiratorio (Lee 2006, AAP 2004, Kim 2002, Chew 1999).

El Comité para la Reducción Estratégica de Riesgos Relativos de la EPA en dos estudios comparativos de riesgo conducidos en 1987 y en 1990, analizaron extensamente el riesgo relativo que acarrear los

problemas ambientales a la salud y bienestar de las personas. La EPA, en estos dos estudios, catalogó la contaminación del aire interior como uno (1) de los cinco (5) riesgos potenciales ambientales para la salud pública. En 1997, la Comisión Presidencial y del Congreso para el Análisis de Riesgo y Manejo de Riesgo, en sus estudios mostraron que la contaminación del aire interior puede representar un riesgo ambiental substancial el cual pone en riesgo la salud humana.

Un reducido número de estudios se han conducido en relación a CAI y la salud de las personas. La mayoría de estos estudios de exposición en ambientes interiores y sus efectos en la salud se han generado en ciudades desarrolladas principalmente en el norte de Europa y América (Sundell 2004). Existe una evidencia bastante fuerte respecto al vínculo entre CAI, el cáncer del pulmón, alergias, reacciones de hipersensitividad, Sensitividad Química Múltiple (MCS, por sus siglas en inglés) y las infecciones del tracto respiratorio (Pénard 2005, Sundell 2004, EPA 2003). Las alergias incluyendo el asma, los Síntomas Asociados al Edificio (BRI, por sus siglas en inglés) y los Síntomas de Edificio Enfermo que han tenido un gran incremento mundialmente y son las condiciones que más fuertemente se han asociado con las exposiciones a contaminantes encontrados en el aire interior (Seppänen 2004, Sundell 2004).

A pesar de los esfuerzos realizados en comunicar los hallazgos encontrados por la EPA y otras entidades públicas y privadas, que efectúan investigaciones sobre problemas del ambiente interior, muchas

personas y empresarios ignoran los riesgos significativos a la salud producidos por la contaminación en el interior (EPA 2001).

Uno de los principales problemas identificados en los edificios por muchos investigadores está relacionado a la pobre calidad de aire interior, al tener una ventilación no adecuada (Shaughnessy 2006). El factor primario que perturba el transporte y las concentraciones de los contaminantes introducidos y/o generados en el interior es la ventilación. La relación entre la ventilación y la salud, escasamente se ha estudiado (Mitchell 2007, Sundell 2004, Apte 2000). La evidencia científica indica que una razón de ventilación baja o inadecuada en cualquier edificio comercial o institucional, incrementa el riesgo de SBS, ausentismo, disminución en la productividad, entre otras asociaciones relacionadas a la salud (Seppänen 2006, Seppänen 2004, Sundell 2004).

Al mismo tiempo que las personas generan CO_2 , también producen un sinnúmero de biofluentes que producen olor. Al igual que el CO_2 , la razón de generación de los biofluentes depende principalmente de la actividad física que se esté realizando y las concentraciones de ambos en un espacio presentan la misma dependencia en el número de ocupantes y de la razón de ventilación del lugar (Erdmann 2004, Daisey 2003). En estudios experimentales realizados con personas en cuartos y espacios ocupados, se evaluó la aceptabilidad del aire en términos de olores. Los investigadores relacionaron la razón de ventilación y la concentración de CO_2 con la percepción de olores y desarrollaron recomendaciones para

estándares de ventilación (Persily 1997, Persily 1996). En estos estudios se concluyó que alrededor de 7.15 L/seg por persona, de ventilación del aire exterior puede controlar los olores de manera que el 80% de las personas no adaptadas al lugar, pueden encontrar niveles aceptables de olor en el lugar. El estudio realizado en 1994 por Sundell, sugiere que el riesgo de SBS disminuye con el aumento en la razón de ventilación por persona.

La ventilación es el método por el cual se remueven o diluyen los contaminantes que tienen el potencial de ocasionar daños a la salud humana y la intrusión de aire fresco en un espacio ocupado. Los estudios realizados asocian la ventilación con la salud, comodidad y productividad concluyendo además que la ventilación es un medio efectivo para proteger las personas de la contaminación interior (Kovesi 2007, Daisey 2003, Murphy 2002, Apte 2000, Seppänen 1999, Persily 1997, Persily 1996). La ventilación adecuada de un lugar se puede evaluar directa e indirectamente. Cuando es medida directamente se utilizan las medidas de la razón de intercambio de aire por ocupantes para calcular la ventilación existente por personas. Cuando se mide indirectamente se observan las concentraciones de CO₂, las cuales son función del número de ocupantes y la cantidad del flujo de aire disponible en el edificio (Kovesi 2007).

Para estimar la razón de ventilación o el intercambio de aire con el exterior se utilizan varios modelos. Estos modelos asumen que una

persona sana y con dieta normal, generará una cantidad de dióxido de carbono constante (G), (ver Apéndice Dos) y da como resultante la ecuación (1).

$$Q_o = \frac{1.0 \times 10^6 (G)}{C_{in} - C_{out}} \quad (1)$$

Donde

Q_o = la razón de ventilación en el espacio ocupado en L/seg por persona;

G = razón de CO_2 generado en el espacio L/seg por persona (Apéndice Dos);

C_{in} = concentraciones de dióxido de carbono medido en el interior en ppm;

C_{out} = concentraciones de dióxido de carbono medidos en el exterior en ppm.

La ecuación (2) es similar y también es utilizada para representar la razón de ventilación por persona donde $G = G_p$, la razón de generación de CO_2 en el espacio ocupado por persona, L/seg por persona (Apéndice Dos) y $Q_o = Q_p$, es la ventilación en la razón de ventilación por persona en la zona ocupada.

$$Q_p = \frac{1.0 \times 10^6 (G_p)}{C_{in} - C_{out}} \quad (2)$$

Utilizar las concentraciones de dióxido de carbono como indicador de ventilación es válido en aquellos espacios donde existen suficientes ocupantes para servir como fuente apreciable de dióxido de carbono y/o permanecen un tiempo considerable en el espacio interior a observarse la

calidad del aire interior (Godwin 2007, Shaughnessy 2006, del Campo 2005, Dougan 2004, Murphy 2002, Persily 1997 y 1996).

Bornehag et al (2005), realizaron un estudio en hogares suecos en donde pudieron relacionar la pobre ventilación con el incremento en la prevalencia de asma y síntomas de alergias en los niños (3-8 años). También encontraron que la deficiencia en ventilación ayuda a incrementar el riesgo de humedad, humedad del aire, reacciones químicas del aire interior y el factor de irritación del tracto respiratorio. En Estonia y Polonia, Koiv (2007) y Sowa (2002), respectivamente, analizaron y compararon la calidad de aire interior en los salones de clase. Koiv, en su estudio utilizó nueve escuelas dentro de las cuales solamente dos poseían ventilación mecánica. En Polonia, Sowa por su parte utilizó 28 salones de las 24 escuelas que visitó para el estudio, donde la mayoría tiene ventilación natural. En ambos estudios se utilizaron las concentraciones interiores de CO₂ para estimar la razón de ventilación y encontraron condiciones insatisfactorias en la ventilación de los salones y los edificios utilizados como escuelas. En Michigan, Bodwin y Batterman (2007), examinaron los parámetros de calidad de aire y ventilación de nueve de las 29 escuelas existentes en Michigan donde todas las escuelas tienen ventilación mecánica (sistemas de extracción y recirculación de aire) y solamente dos salones están provistas con aire acondicionado. En este estudio el 17% de las escuelas tenían una ventilación inadecuada aun cuando todas tienen ventilación mecánica en los salones de clase.

Existen además, estudios como los de Seppänen et al. (1999), Apte et al. (2000), Erdman y Apte (2004), donde se relacionan positivamente las concentraciones de CO₂ con síntomas como: dolores de cabeza, fatiga, síntomas nasales y visuales y problemas en el tracto respiratorio en diferentes edificios de Estados Unidos de América.

Al igual que los estudios realizados en Polonia y Estonia, se han efectuado otros estudios en escuelas de Hong Kong. Lee y Chang (1999), estudiaron la calidad de aire interior en un salón de cinco escuelas seleccionadas, de las cuales algunas tenían aires acondicionados, otras ventilación natural y/o abanicos. En éste estudio se encontró que los salones de clase que están provistos por unidades de aire acondicionado tienen niveles de CO₂ que en la mayoría de las ocasiones exceden en promedio las 1000 ppm en comparación con los salones con abanicos y/o ventilación natural lo que implica que la ventilación es inadecuada (Lee, 1999). En Texas USA, Corsi et al. (2002), observaron y estudiaron las concentraciones de CO₂ en 115 salones de escuelas elementales. En estos salones encontraron un sinnúmero de deficiencias en los sistemas de ventilación, observándose concentraciones promedio de CO₂ que exceden las 1000 ppm dentro de los salones de clase.

En estudios realizados en Korea, Kim et al. (2002), encontraron una relación significativa de las concentraciones de CO₂ interior y los ataques de sibilancia o pitillo (wheezing) en los niños. Kovesi et al. (2007) en otro estudio similar efectuado en la comunidad de la cultura Inuit en Canada,

encontraron que los jóvenes de esta cultura poseen una gran incidencia de afecciones del tracto respiratorio bajo. En un análisis univariable realizado por estos investigadores se determinó que las afecciones del tracto respiratorio bajo están significativamente asociadas con los niveles de la media de CO₂ (1358 ppm) y el máximo de CO₂ (2327 ppm), humedad relativa y espacios ocupados. Estos hallazgos sugieren que las concentraciones de CO₂ en los ambientes interiores pueden ser un buen indicador de las concentraciones de otros contaminantes del aire interior. También puede ser utilizado como un factor de residencia de los mismos, ya que las concentraciones de CO₂ están estrechamente correlacionadas con la ventilación (Kim 2002).

Reglamentaciones Federales

Los primeros intentos por controlar la contaminación del aire en los Estados Unidos de América, fueron propiciados durante la revolución industrial. Ciudades como Cincinnati y Chicago fueron las pioneras en aprobar una legislación de aire limpio en el 1881. Subsiguientemente, otras ciudades fueron aplicando sus propias políticas de aire limpio. En los comienzos del 1900, se establece la Oficina de Minas de los Estados Unidos (USBM, por sus siglas en inglés), debido a un sinnúmero de catástrofes ocurridas, la cual además, creó la Oficina de Contaminación del Aire para controlar las emisiones de humo. El problema de la calidad de aire despertó la preocupación y la conciencia pública cuando en el 1940

se produjeron unos serios incidentes de niebla en las ciudades de Los Ángeles y Donora (NIOSH 2001, Fleming 1999).

Estos eventos inician el interés de controlar la contaminación del aire y brindar una mejor calidad de vida a las personas, creándose la denominada Ley de Control de Contaminación de Aire de 1955, la cual estimuló investigaciones federales sobre los efectos de la contaminación del aire. La primera enmienda sobre la Ley de 1955 fue en 1960 con el fin de ver el efecto de las emisiones de los vehículos en la salud. La Ley de Aire Limpio de 1963 relevó la Ley de Control de Contaminación de Aire. Esta nueva ley involucra a las agencias locales y estatales en el desarrollo de programas para promover el control de la contaminación del aire. En 1965 se establece la llamada la Ley Para el Control de Contaminación de Aire por Vehículos de Motor. La Ley de Aire Limpio, según enmendada en 1970, ha proporcionado el marco principal para proteger a las personas y al medio ambiente de los efectos dañinos de la contaminación del aire. Entre otras cosas para ese propósito, desarrolló los estándares de calidad de aire nacional (NAAQS, por sus siglas en inglés), estándares para el desempeño de nuevas fuentes de emisión y los estándares de emisión para contaminantes de aire peligrosos. Como resultado, al enmendar la Ley de Aire Limpio en 1990, el Congreso de Estados Unidos le ordenó a la EPA usar un enfoque basado en la tecnología y en el desempeño para reducir en forma considerable las emisiones de sustancias tóxicas en el aire de las

fuentes principales de contaminación del aire (EPA 2003, NIOSH 2001, Fleming 1999, López 1999).

Conociendo que el aire está compuesto por varios elementos y los mismos difieren sustancialmente de lugar en lugar, el número de problemas a la salud causados por la contaminación del aire interior varía también (Andersen 2002). Existen pocas reglamentaciones relacionadas a calidad de aire interior ya que provienen de una gran variedad de fuentes, los problemas varían de edificio en edificio. Muchos de los síntomas causados por la contaminación del aire interior, no son fáciles de especificar y ocurren a bajas concentraciones del contaminante, lo que dificulta su cuantificación y en adición haciendo difícil determinar el contaminante y la concentración a la cual debería ser regulado (Andersen 2002).

ASHRAE continuamente realiza estudios sobre la contaminación de ambientes interiores y a tales propósitos han desarrollado estándares para mantener una calidad del ambiente interior adecuado y promover la salud y bienestar de sus ocupantes. Los dos estándares más importantes que impactan directamente la CAI son: ASHRAE 62 y ASHRAE 55.

ASHRAE 62, es la guía denominada Ventilación para Calidad de Aire Aceptable. En esta se han propuesto una serie de prácticas y la implementación de tecnologías que ayudan a prevenir el crecimiento de organismos, prevenir y remover contaminantes, además de mantener una humedad relativa de entre 30 % – 60 %. Recomienda además un máximo

de ocupantes por área que para las escuelas elementales es de 25 a 35 estudiantes por cada 100m² (Apéndice Seis) (ASHRAE 2003). La razón de ventilación recomendada para oficinas es de ≥ 8.0 L/seg por persona y concentraciones de CO₂ recomendadas son < 1000 ppm, que debe tener el ambiente interior para asegurar la aceptabilidad para la mayoría de las personas que entren al lugar ($> 80\%$).

En ASHRAE 55, se describen las condiciones de temperatura para ambientes ocupados por humanos. En este estándar se intenta que entre el 80% - 90%, de los ocupantes de un edificio encuentre satisfactorio las condiciones de CAI. Las condiciones mencionadas en el estándar ASHRAE 55 incluyen: temperatura, humedad, actividad y movimiento de aire entre otras cosas.

La EPA ha tratado el asunto, publicando una serie de guías voluntarias, en las cuales proveen recomendaciones para desarrollar, mantener y promover una buena calidad de aire interior (EPA 1991, EPA 2001). Además ha desarrollado un programa que provee a las escuelas una serie de herramientas que los ayudarán a identificar y corregir problemas de calidad de aire interior (EPA 2001).

Capítulo Tres

Metodología

Localización y Colindancias Municipales de Caguas

El pueblo de Caguas se localiza en el valle centro-oriental de Puerto Rico, a poco menos de 20 millas de la capital, San Juan. El valle del Turabo se encuentra ubicado en el extremo oriental de la Cordillera Central y al mismo tiempo rodeado por las Sierras de Cayey y Luquillo. A pesar de encontrarse a una elevación de 820 pies de altura sobre el nivel del mar, su ubicación geográfica le permite tener además, elevaciones de 2,887 pies en el Cerro Lucero, en el barrio San Salvador, 1210 pies en Altos de la Mesa y 886 pies en Altos de San Luis, en Bairoa. Tiene una vasta superficie territorial que abarca un área de 58.6 millas² (Servicio de Extensión Agrícola 2005).

Los datos poblacionales del pasado censo del año 2000 muestran que el municipio de Caguas contiene una población ascendente a 140,502 personas, lo que implica que su densidad poblacional se encuentra en alrededor de 2,394.6 personas/millas² (US Census Bureau 2000). En un principio, en el valle del Turabo predominaba la actividad agrícola. Actualmente, Caguas ha sido el producto de una serie de cambios y urbanismo que han marchado acorde con el desarrollo económico e industrial plasmado en la historia de la ciudad de Caguas. Para el censo del 2000 Caguas era el quinto Municipio con mayor población y donde más

del 95.1 % de la población residía en la zona urbana. El municipio de Caguas según los datos del Estudio Continuo de Salud para los Municipios de Puerto Rico (2003), es uno de los municipios con mayor prevalencia de problemas respiratorios en personas de 0 a 17 años (Ramos 2003). Entre los problemas respiratorios con mayor incidencia para esta población se encuentra el asma, la rinitis alérgica y la sinusitis.

Metodología

El Departamento de Educación divide el municipio de Caguas en dos Distritos: el Distrito de Caguas I y el Distrito de Caguas II. Las escuelas rurales y urbanas del distrito de Caguas I y Caguas II, en su mayoría se asemejan en condiciones y características dentro y fuera del plantel escolar. Con el programado Minitab se seleccionó aleatoriamente al Distrito de Caguas II, como el Distrito a ser investigado. Este distrito escolar administra un total de 11 escuelas elementales. Luego se seleccionó aleatoriamente las escuelas que participaron en el estudio y se mantuvo presente establecer una muestra representativa ($\geq 30\%$) de las escuelas del Distrito de Caguas II que participaron del estudio. De las 11 escuelas elementales del Distrito de Caguas II se utilizaron 4 de estas escuelas, lo que representa el 36% del total de las escuelas elementales de este distrito. De estas cuatro (4) escuelas dos (2) se encuentran en la zona rural lo que representa un 40% del total de las escuelas de la zona rural; y las otras 2 representan el 33% del total de las escuelas que se encuentran en la zona urbana.

Para realizar este estudio preliminar de las concentraciones de CO₂, el primer grado se seleccionó aleatoriamente con el mismo programado Minitab. Al obtener el nivel escolar se verificó la cantidad de salones que componen dicho nivel escolar para determinar una muestra representativa de los salones de primer grado de cada escuela donde se realizó el estudio. Los salones donde se observaron los parámetros de calidad de aire interior, están todos localizados en el primer nivel de la escuela.

La actividad de muestreo en el ambiente interior y exterior de los salones de clase, se realizó utilizando un instrumento portátil de medición directa (Q-TRAK IAQ Monitors). El Q-TRAK es y ha sido ampliamente utilizado para tomar medidas de las concentraciones de CO₂, CO, % rh y temperatura, en estructuras industriales y no industriales (Kovesi 2007, Shaughnessy 2006, Corsi 2002, Ramachandran 2002, Apte 2000, Lee 1999).

Para tomar las medidas de CO₂, el instrumento utiliza un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR, por sus siglas en inglés). Este sensor le provee un rango de trabajo de 0ppm a 5000 ppm y una precisión de $\pm 3\%$ a 25°C y una resolución de 1 ppm. Para tomar las medidas de CO, se utiliza un sensor del tipo electroquímico para obtener un rango de trabajo de 0 ppm a 500 ppm, una precisión de $\pm 3\%$ y una resolución de 1 ppm. Las medidas de temperatura son registradas por el instrumento con un termistor el cual registra cambios de temperatura en un rango de 32°F a 122°F con una exactitud de $\pm 1.0^\circ\text{F}$ y una resolución 0.1°F. En las

medidas del % humedad relativa el rango de trabajo es de 5 a 95% rh, la resolución para estas medidas es de 0.1% rh, utilizando como sensor un capacitor de capa fina.

El instrumento fue colocado aproximadamente a una altura de 0.8m a 1.2m sobre el suelo y localizado en un área del salón donde no tuviera impacto directo de la respiración de los estudiantes ni del personal presente en el salón de clase y/o la escuela. En todos los salones el área utilizada para colocar el instrumento fue en la parte posterior del salón. El instrumento además, fue programado para realizar un ensayo continuo analizando una muestra de aire cada 15 minutos durante el tiempo lectivo que es de 8 horas. En total se tomó un promedio de 32 lecturas por día en cada una de las 4 escuelas. Estas lecturas de la primera parte del estudio se realizaron entre los meses de febrero y marzo.

Luego de realizar el muestreo de aire en los respectivos salones de primer grado (uno por escuela) de las escuelas participantes, se determinó según los resultados obtenidos el salón que manifestó mayor problemática en la calidad de aire interior. Para determinar el salón con problemas de calidad de aire se utilizó el promedio de las concentraciones de CO₂ y ventilación por persona (Q_p). Esta segunda parte del estudio se realizó entre los meses de agosto y septiembre. En esta escuela y en el salón de clase que se utilizó, se tomó nuevamente muestras de aire por un periodo de 5 días durante el tiempo lectivo de 8 horas (32 lecturas diarias, 160 lecturas durante la semana) en el interior del salón de clase.

La razón de ventilación (Q_p), en los salones de clase fue calculada utilizando la ecuación (2). Esta ecuación utiliza la razón de CO_2 generado en el espacio L/seg (Apéndice Dos) y los promedios de las concentraciones de dióxido de carbono del interior y exterior del salón de clases.

Para propósitos de este estudio a diferencia de otros investigadores que utilizan la concentración de 350 ppm como promedio de dióxido de carbono en el exterior; se realizó un muestreo donde se calculó la concentración promedio de CO_2 en el ambiente exterior del salón.

Calibración del Equipo

La calibración del equipo según las recomendaciones del manufacturero debe realizarse mensualmente. Para verificar y asegurar el buen funcionamiento del equipo este se verificó tomando las medidas de las concentraciones de dióxido de carbono en un ambiente “no contaminado” y usando los gases de calibración provistos. Para calibrar el sensor de CO_2 del Q-Trak se utilizó un blanco, el manufacturero recomienda que se utilice nitrógeno o aire puro el cual debe contener <10 ppm de CO_2 . Como gas de referencia “span gas” se utilizaron gases con concentraciones conocidas de CO_2 y CO. Las concentraciones de los gases CO_2 y CO provistas eran de 1000 ppm y 35 ppm respectivamente. El Instrumento fue calibrado antes de comenzar a realizar las observaciones en las respectivas escuelas. Para asegurar el buen funcionamiento del equipo el mismo se revisaba con el gas de referencia previo al uso diario.

Datos Meteorológicos

La interpretación de las observaciones hechas para cuantificar la contaminación del aire requiere que se obtenga información sobre las características atmosféricas del lugar. Con tal propósito se utilizan comúnmente datos referentes a condiciones meteorológicas y climatológicas. Para la primera fase del estudio los datos meteorológicos fueron obtenidos del “Meteorological Assimilation Data Ingest System” (MADIS) (NOAA 2007_a, NOAA 2007_b).

Para la segunda fase del estudio, en conjunto con el muestreo de aire exterior se tomaron las condiciones meteorológicas en la escuela. Para tomar las lecturas meteorológicas se utilizó una estación meteorológica portátil (Kestrel 4500 NV). Con esta estación meteorológica se tomó la presión barométrica, temperatura, % rh y velocidad de viento.

Capítulo Cuatro

Resultados

Los resultados para las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) interior y exterior de la primera fase del muestreo han sido resumidas en las tablas 4.03 a la 4.06 para cada una de las escuelas donde se realizó el estudio de calidad de aire interior. En la Tabla 4.08 se resumen las concentraciones de CO₂, obtenidas en la segunda fase del estudio en la escuela seleccionada. Además se muestran los gráficos del perfil de las concentraciones de dióxido de carbono y su variabilidad durante el horario normal que la escuela dedica sus servicios a los estudiantes (Gráficas 4.01 a 4.05).

En el Apéndice Tres se muestran los gráficos resultantes de las observaciones realizadas con el instrumento Q-Trak de los parámetros de temperatura y % rh. En el Apéndice Cuatro se encuentran resumidos los máximos y mínimos al igual que los promedios de temperatura y % de humedad relativa observadas en el interior y exterior de los salones. Los datos de las condiciones meteorológicas para los días en que se realizaron las observaciones de calidad de aire, están resumidas en el Apéndice Siete. Las mismas fueron tomadas de la base de datos de MADIS. En el Apéndice Cinco se resumen los datos meteorológicos de los días de muestreo de la segunda fase del estudio; en el exterior del salón de clases de la escuela E-002. En el Apéndice Cinco, podemos notar que las condiciones

meteorológicas generales durante los días en que se estudió la calidad de aire dentro y fuera de los salones de las escuelas seleccionadas no varían significativamente.

Según ASHRAE (2004) la densidad poblacional en un salón de clases en donde los estudiantes tengan las edades de 5 a 8 años debe ser de 25 estudiantes por cada 100 m². En la tabla 4.01 se puede apreciar que tres de los salones en que se midieron las concentraciones de CO₂ tienen una densidad poblacional mayor a la recomendada por ASHRAE. El exceso de densidad poblacional para el salón de la escuela E-001 fue de 8%, para el salón de la escuela E-002 fue de 40% y para el salón de la escuela E-004 fue de 48 %. El salón de la escuela E-003 está dentro de los parámetros de densidad poblacional que recomienda ASHRAE.

Tabla 4.01. Datos de la densidad poblacional en los salones.

Escuela	# Personas	Área del salón (m ²)	Densidad del salón
			(#/100m ²)
E-001	20	75	27
E-002	28	81	35
E-003	16	81	20
E-004	24	65	37

Tabla 4.02. Concentraciones promedios de CO₂ y las medidas de ventilación por persona (Q_p), en la primera fase.

Escuela	Promedio CO ₂ Interno (ppm)	Q _p (L/seg)
E-001	320	619.15
E-002	2426	2.48
E-003	334	156.40
E-004	358	125.94

La primera escuela (E-001) donde se observó la calidad de aire en función a las concentraciones de CO₂, se encuentra en la zona catalogada como rural por el Distrito de Caguas II. Esta escuela cuenta con una ventilación natural. La concentración más alta de CO₂ a la que estuvieron expuestos los estudiantes dentro del salón de clases de la E-001, fue de 409 ppm (Tabla 4.03) y el valor medio de exposición durante un turno de 8 horas (TWA) fue de 310 ppm (Tabla 4.03). Como se puede observar en la Figura 4.01, las concentraciones de CO₂, más altas registradas tanto en el exterior como en el interior del salón de clase fueron durante la mañana (8:00 AM – 10:30 AM). Luego, a lo largo del día disminuyen y se mantienen casi invariables durante el tiempo en que se realizó la actividad de muestreo en la escuela. Este salón posee una alta razón de ventilación

(Tabla 4.02) debido a que las concentraciones de CO₂ en el interior del salón no muestran una diferencia significativa respecto a las concentraciones de CO₂ encontradas en el exterior.

Tabla 4.03. Resumen de las concentraciones de CO₂ en la escuela E-001.

Escuela		CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)	CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)
		Interior	Interior	Exterior	Exterior
	Promedio	320		312	
E-001	Máximo	409	310	475	300
	Mínimo	297		293	

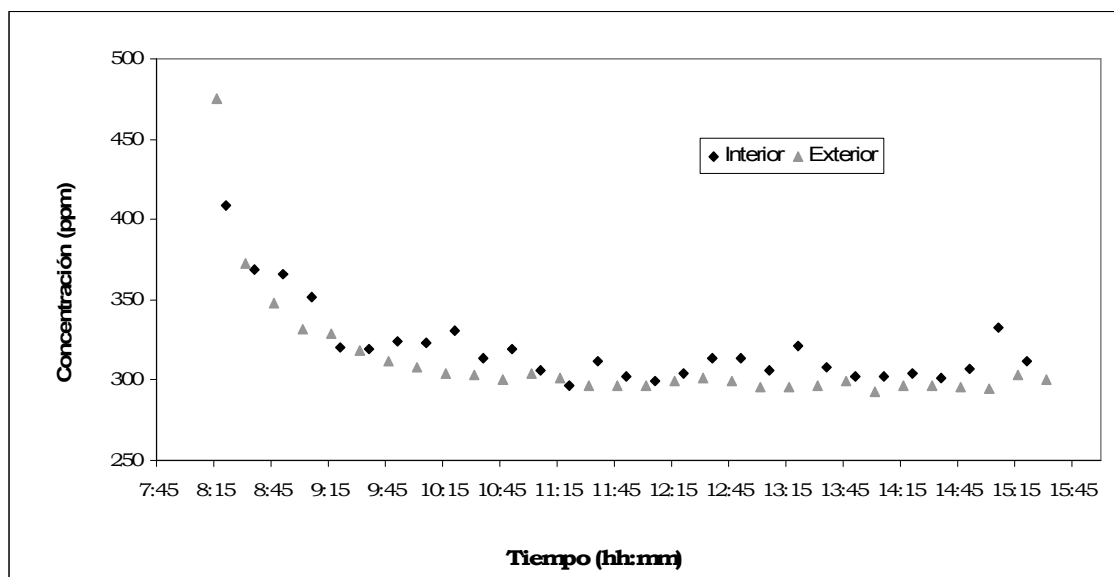


Figura 4.01. Variabilidad de las concentraciones de CO₂, E-001.

La segunda escuela (E-002), en la que se midió la concentración de CO₂, es una escuela urbana la cual está provista de una unidad de aire acondicionado individual de techo (mini splits), las puertas y ventanas estaban provistas de un sistema de aditamentos (paneles de plástico). En esta escuela se pudo observar, como se muestra en la Tabla 4.04, que el promedio de las concentraciones de CO₂ fue de 2426 ppm, el máximo de 3502 ppm y el mínimo de 1053 ppm. Estas concentraciones están en todo momento sobre los límites recomendados por ASHRAE y la EPA, para un lugar de trabajo. La razón de ventilación para este salón fue la más baja calculada para los salones muestreados (Tabla 4.02) y está por debajo de la razón de ventilación (7.5 L/seg) recomendadas por ASHRAE.

Tabla 4.04. Resumen de las concentraciones de CO₂ en la escuela E-002.

Escuela		CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)	CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)
		Interior	Interior	Exterior	Exterior
	Promedio	2426		342	
E-002	Máximo	3502	2350	421	310
	Mínimo	1053		304	

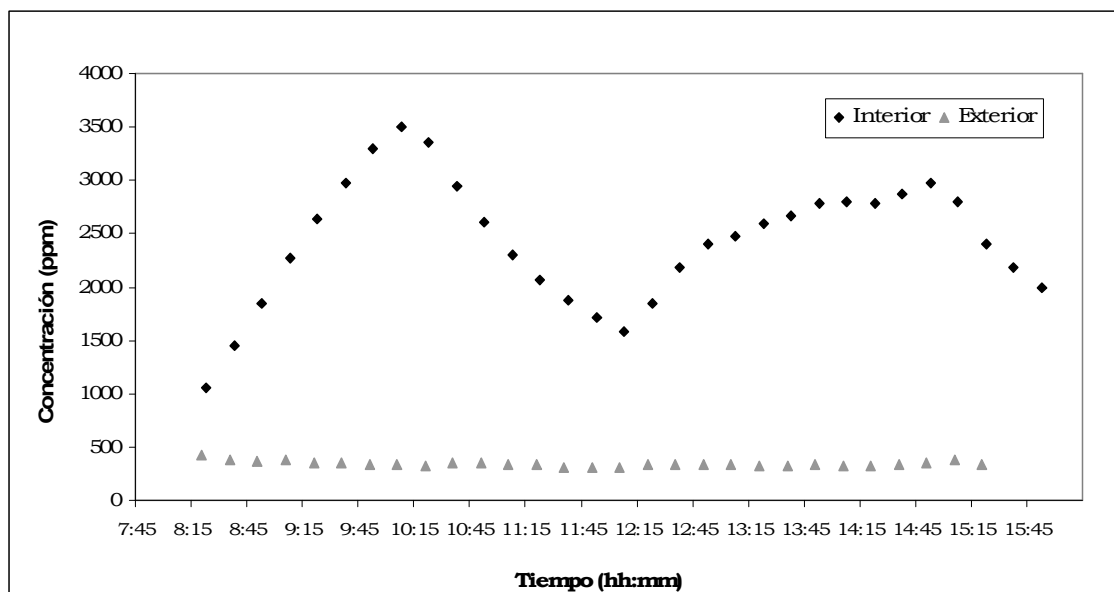


Figura 4.02. Variabilidad de las concentraciones de CO₂, E-002.

La tercera escuela (E-003) en la cual se midió la concentración de CO₂, está localizada en la zona urbana del Distrito Escolar de Caguas II. La escuela cuenta con un sistema de ventilación natural. En esta escuela se pudo observar, como se muestra en la Tabla 4.03, que la concentración promedio a la que estuvieron expuestos los estudiantes en su estancia en el salón de clase fue de 324 ppm, el máximo de CO₂ fue de 413 ppm. El máximo de las concentraciones fue registrado durante los primeros 30 minutos en que se realizaron las observaciones de calidad de aire (Tabla 4.05). El TWA, para los estudiantes presentes en el interior de este salón fue de 304 ppm (Tabla 4.05). La Figura 4.03 muestra que las concentraciones de CO₂ más altas obtenidas tanto en el exterior como en el interior del salón de clase fueron registradas durante la mañana (8:00 AM

- 10:30 AM) y se mantuvieron casi invariables durante el tiempo restante en que se realizó la actividad de muestreo en la escuela.

Tabla 4.05. Resumen de las concentraciones de CO₂ en la escuela E-003.

Escuela		CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)	CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)
		Interior	Interior	Exterior	Exterior
	Promedio	324		301	
E-003	Máximo	413	304	435	273
	Mínimo	300		244	

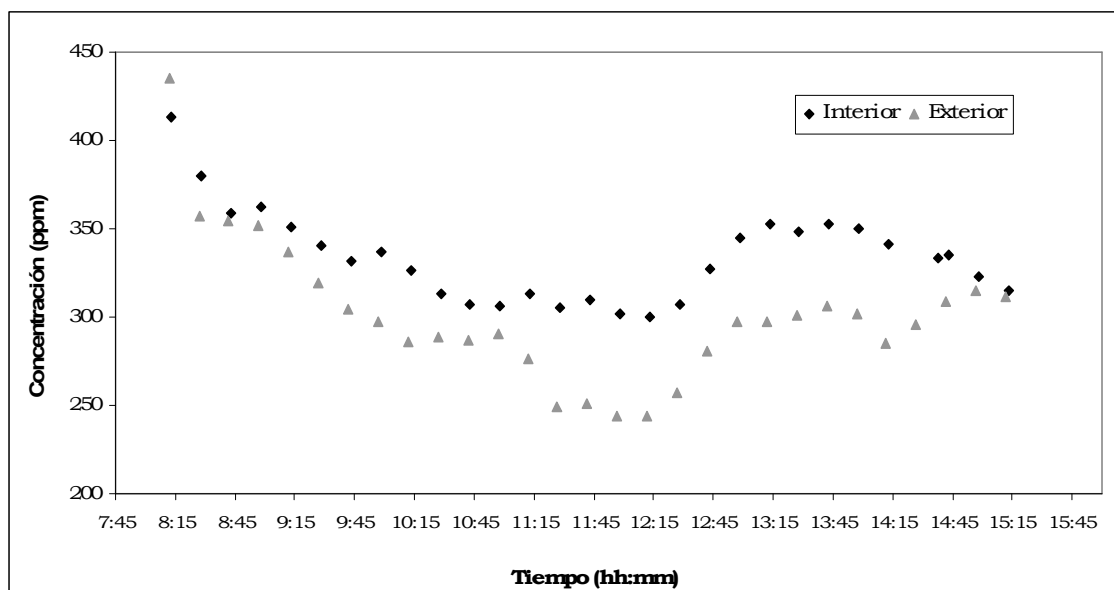


Figura 4.03. Variabilidad de las concentraciones de CO₂, E-003.

La cuarta escuela (E-004) en la cual se midió la concentración de CO₂, está catalogada como una escuela rural. El salón de clase donde se realizó la actividad de muestreo está equipado con dos unidades de aire acondicionado de ventana. A diferencia de la escuela E-002, esta escuela no contiene los aditamentos plásticos en las puertas y ventanas. La ventilación para este salón fue más alta que en el salón de la escuela E-002 (Tabla 4.02). En este salón se pudo observar, como se muestra en la Tabla 4.06 que el promedio de exposición a CO₂ en el salón de clase es de 358 ppm y registrándose un máximo de concentración de 421ppm. Al igual que en las demás escuelas las concentraciones máximas registradas de CO₂ en el interior y exterior de los salones son en la mañana, aproximadamente en el horario de 8:00 AM – 10:30 AM (Figura 4.04).

Tabla 4.06. Resumen de las concentraciones de CO₂ en la escuela E-004.

Escuela		CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)	CO ₂ (ppm)	TWA (ppm)
		Interior	Interior	Exterior	Exterior
	Promedio	358		317	
E-004	Máximo	421	336	386	288
	Mínimo	303		267	

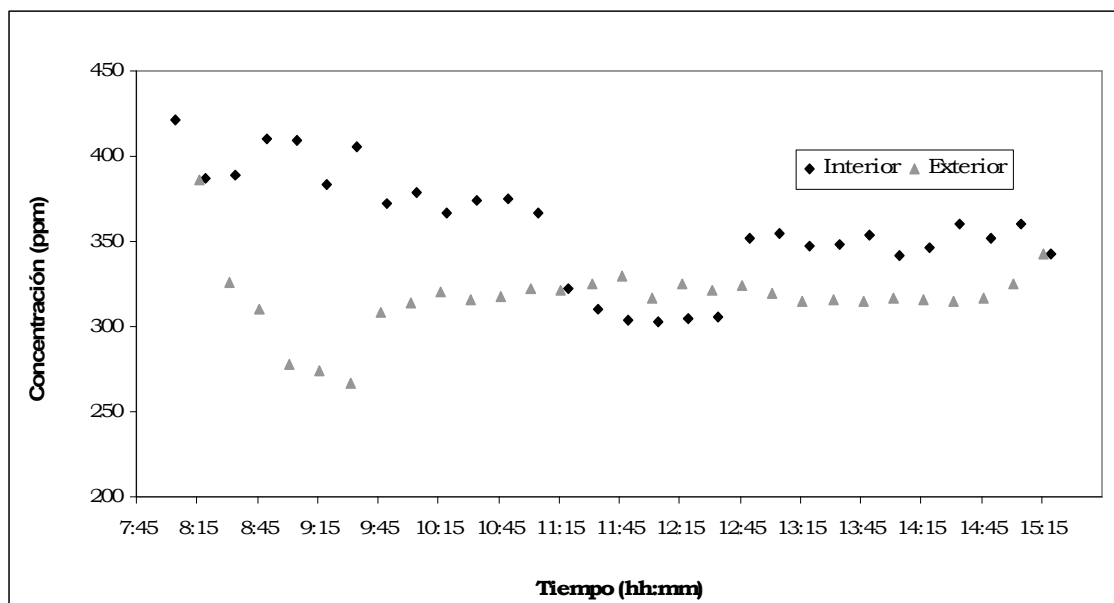


Figura 4.04. Variabilidad de las concentraciones de CO₂, E-004.

En la primera fase del estudio realizado la escuela E-002 resultó con concentraciones de CO₂ que están por encima de los 1000 ppm estipulados por ASHRAE para un espacio interior ocupado por personas. Para los muestreos subsecuentes de la segunda fase en esta escuela se utilizó el mismo salón para realizar el muestreo. El salón utilizado sigue teniendo las mismas condiciones y aditamentos que en el estudio realizado preliminarmente. En este salón se puede observar un patrón en las concentraciones de CO₂ durante los 5 días en que se realizó el muestreo con un total de 160 lecturas (Figura 4.05). En la Tabla 4.05 se puede observar que las concentraciones promedio, máximas y mínimas de CO₂ están sobre los parámetros establecidos por ASHRAE (1000ppm). Estas altas concentraciones de CO₂ encontrados en este salón expone la

insuficiencia de ventilación. La razón de ventilación encontrada en la segunda fase está resumida en la Tabla 4.08. En la Tabla 4.08 están resumidas las concentraciones de CO₂ encontradas en el exterior del salón de la escuela E-002. Las concentraciones de CO₂ encontradas en el exterior son semejantes a la encontrada en el estudio preliminar y durante los días de muestreo.

Tabla 4.07. Promedio de las concentraciones de CO₂ y las medidas de ventilación por persona (Q_p) en el salón de clase de la escuela E-002.

Día	Promedio CO ₂ Interior (ppm)	Q _p (L/seg)
1	2387	2.53
2	2339	2.59
3	2422	2.49
4	2393	2.52
5	2394	2.52

Tabla 4.08. Concentraciones de CO₂ por día en el interior del salón de la escuela E-002.

Día		CO ₂ (ppm) Interior	TWA (ppm) Interior
	Promedio	2387	
1	Máximo	3467	2241
	Mínimo	1135	
	Promedio	2339	
2	Máximo	3472	2201
	Mínimo	945	
	Promedio	2422	
3	Máximo	3478	2274
	Mínimo	1113	
	Promedio	2393	
4	Máximo	3470	2247
	Mínimo	1156	
	Promedio	2394	
5	Máximo	3474	2248
	Mínimo	1087	

Tabla 4.09. Concentraciones de dióxido de carbono por día en el exterior del salón de la escuela E-002.

Día		CO ₂ Exterior (ppm)	Promedio CO ₂ (ppm)
1	Máximo	451	
	Mínimo	306	
	Promedio	347	
2	Máximo	431	
	Mínimo	300	343
	Promedio	341	
3	Máximo	444	
	Mínimo	306	
	Promedio	341	

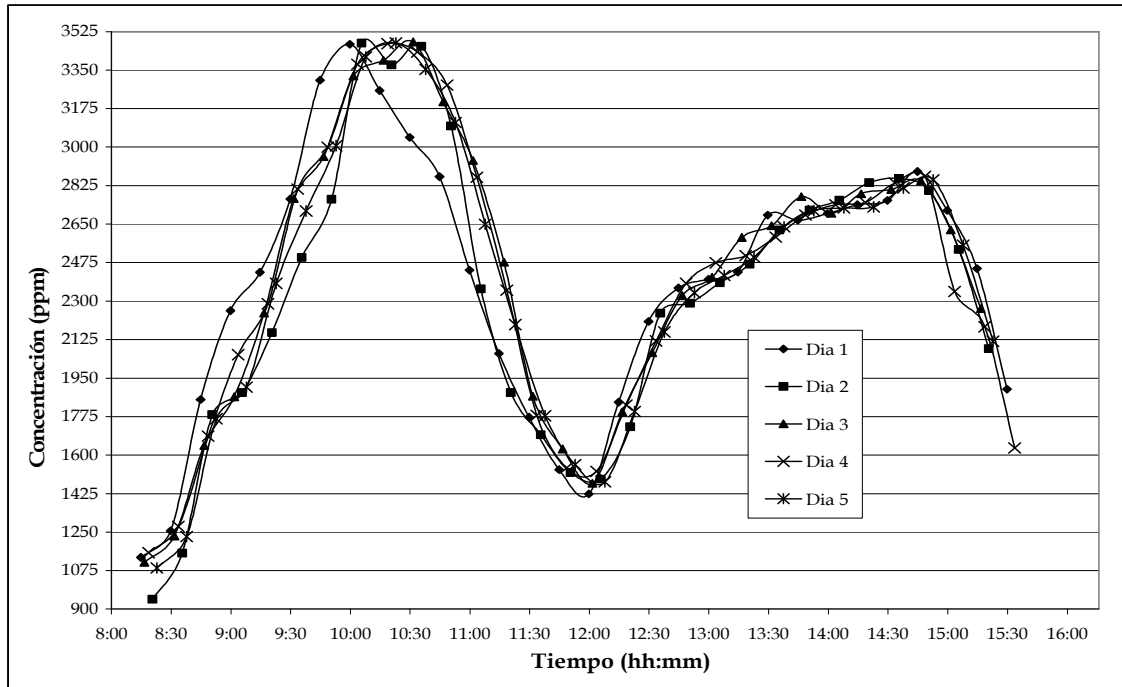


Figura 4.05. Distribución de las concentraciones de CO₂ durante el horario escolar en la escuela E-002.

Capítulo Cinco

Discusión

En las escuelas del Distrito Escolar de Caguas II utilizadas para realizar el estudio, a pesar de estar ubicadas en distintas zonas (urbana y rural), las concentraciones de CO₂ exterior no sobrepasan en promedio las concentraciones consideradas como normales en el ambiente exterior, las cuales varían en un rango de 300 - 450 ppm. Los niveles de CO₂ más altos registrados durante el periodo de observación en las escuelas fueron en la mañana, como se puede observar en las Figuras 4.01 a 4.04, para las respectivas escuelas. Al igual que en los datos registrados del exterior, en el interior las concentraciones de CO₂ más altas registradas durante las observaciones en la escuela son en las horas de la mañana.

Dos de las escuelas (E-002 y E-004) donde se realizó el estudio tienen en las facilidades del salón de primer grado unidades individuales de acondicionadores de aire individuales. El salón de la escuela E-002, tiene un acondicionador de aire “minisplit”, además está provista de un sistema de aislante en las puertas y ventanas. En éste salón se registraron concentraciones de CO₂ las cuales están por encima de los 1000 ppm de CO₂ recomendados por ASHRAE, para prevenir y asegurar el confort, la salud y una buena razón de ventilación en los ambientes interiores que está ocupada por personas.

Para el salón de primer grado de la escuela E-002, la razón de ventilación el día de muestreo fue de 2.48 L/seg por persona. Este parámetro se encuentra muy por debajo de los recomendados por ASHRAE. Además, este salón se encuentra entre los salones con mayor densidad poblacional por metro cuadrado (Tabla 4.01).

El salón utilizado para el estudio de la escuela E-004, tiene dos unidades de acondicionadores de aire de ventana, pero éste salón no tiene aditamentos plásticos en las puertas y ventanas como el salón de la escuela E-002, que impidan el intercambio de aire interior con el aire exterior. Como se puede apreciar en la Tabla 4.02, existe una gran diferencia en los promedios de las concentraciones de CO₂ en la escuelas E-002 y E-004 (2426 ppm y 358 ppm respectivamente) y en la razón de ventilación por personas Q_p , (2.48 L/seg por persona y 125.94 L/seg por persona, respectivamente) en estos salones.

La densidad poblacional encontrada en los salones de las escuelas: E-001, E-002 y E-004 exceden la densidad poblacional recomendada para un salón de clases (Tabla 4.01). La densidad poblacional recomendada por ASHRAE es de 25 estudiantes/100m². En el salón de la escuela E-002, se puede apreciar la contribución a las concentraciones de CO₂ interior por parte de los estudiantes y personal presente el día de muestreo (Tabla 4.04).

En los salones de clase de primer grado de las escuelas E-001 y E-003, los cuales tienen ventilación natural, los parámetros de la razón de

ventilación están sobre los estándares recomendados por ASHRAE (Tabla 4.02). Para estos dos salones los resultados de las concentraciones de CO₂ en el interior no difieren significativamente de las concentraciones encontradas en el exterior de los salones. En el salón de la escuela E-001 existe una alta densidad poblacional (Tabla 4.01), la cual no causó una diferencia importante entre las concentraciones de CO₂ interior y exterior (Tabla 4.03).

Para comparar estadísticamente las concentraciones de CO₂ se utilizaron pruebas no-paramétricas: Mann-Whitney y Kruskal-Wallis (Acuña 2002). Los resultados para estas pruebas sugieren que no existe evidencia estadística significativa para asociar directamente las concentraciones de CO₂, con las zonas (urbana o rural) en que se encuentran los salones. También se estableció una comparación entre las escuelas que tienen unidades de acondicionador de aire con las escuelas que contienen un sistema de ventilación natural. No se encontró evidencia estadística significativa que asocie la instalación de aires acondicionados con problemas de calidad de aire interior y con concentraciones altas de CO₂. Ciertamente se puede observar un problema de altas concentraciones de CO₂ en el salón de la escuela E-002. Este problema de altas concentraciones de CO₂ que pudiera ocasionar diferentes problemas vinculados a la calidad de aire, está relacionado a la restricción de la ventilación del lugar.

Durante la segunda etapa del estudio las concentraciones de CO₂ en el salón de la escuela E-002 en todo momento sobrepasaron los 1000 ppm. Estos resultados sostienen la teoría de posibles problemas en la calidad de aire interior en el salón, sobre todo cuando la ventilación es mecánica o depende de sistemas de acondicionadores de aire (Seppänen 2004). Este salón de clase posee un sistema de acondicionador de aire (minisplit), además, de poseer aditamentos para las puertas y ventanas las cuales están contribuyendo a una ventilación inadecuada del salón de clases (Figura 4.05, Tabla 4.07).

Conclusión

En este estudio se puede apreciar que los salones que están provistos con una unidad de aire acondicionado tienden a tener promedio más alto en las concentraciones de CO₂, que los salones provistos por ventilación natural (Tabla 4.02). Se observó también que la razón de ventilación más baja está registrada en el salón de clase de la escuela E-002 que un sistema de acondicionador de aire y además, tiene un sistema de aditamento en las puertas y ventanas. Estas observaciones sugieren que estos aditamentos impiden el intercambio o dispersión del CO₂ y de otros contaminantes (bioefluentes) producidos por los estudiantes dentro del salón de clase durante el periodo lectivo. En este salón además se calculó la densidad poblacional y mostró que excede los estándares de ASHRAE. Los resultados obtenidos de las escuelas E-001 y E003, para las concentraciones de dióxido de carbono, sugieren que los salones de clase

con sistemas de ventilación natural tienen concentraciones bajas de CO₂ y una razón de intercambio de aire (ventilación) con el exterior más alto que en las escuelas E-002 y E-004. La razón de intercambio de aire en los salones E-001 y E003 cumple con los estándares de ASHRAE.

Los salones de clase de primer grado de las escuelas donde se realizaron los estudios, presentan un perfil de ambiente interior que cumple con los estándares recomendados por ASRHAE. La única excepción fue la escuela E-002 que no cumplió con los parámetros de calidad de aire interior para las concentraciones de CO₂.

Las razones para una buena o mala ventilación y calidad del ambiente interior van a variar considerablemente de escuela en escuela y de salón en salón. Los resultados obtenidos en el salón de la escuela E-002, sugieren que muchos de los salones en los cuales se ha instalado una unidad de acondicionador de aire y paneles plásticos, podrían estar teniendo problemas de calidad de aire interior lo cual puede ocasionar diferentes efectos en los ocupantes que en nuestro caso son estudiantes y maestros.

Muchos de estos sistemas de aire acondicionado se instalan en los salones de clase con el propósito de “mejorar” las condiciones de temperatura en el ambiente interior, evitar la intrusión de contaminantes provenientes del exterior y reducir ruidos del exterior. La instalación de estas unidades de acondicionadores de aire se hizo sin realizar un análisis completo de los equipos necesarios para realmente asegurar y mejorar la

calidad del ambiente interior, ignorando las consecuencias que podría conllevar su uso. De estos resultados podemos interpretar que la instalación de acondicionadores de aire en edificaciones debe ir acompañado de un buen sistema de intercambio de aire del interior con el exterior para asegurar y mantener una ventilación adecuada que cumpla con los estándares de ASHRAE. De esta forma vemos que las medidas e interpretaciones de las concentraciones CO₂ en el ambiente interior nos pueden proveer información de cómo es la calidad del aire interior del edificio y de su adecuada o inadecuada ventilación.

Limitaciones

La ubicación del instrumento dentro del salón de clases fue una limitación ya que por petición del Departamento de Educación se colocó en la parte posterior del salón. El Departamento de Educación, también limitó al no permitir la indagación a problemas de salud y confort (basados en encuestas) a los niños, esta información debía ser limitada y adaptada a información que pudiera ser provista por la escuela o custodios legales del niño. Esta información podría ser necesaria e imprescindible para realizar estudios donde se relacionen las medidas de exposición a contaminantes con diferentes síntomas.

Recomendaciones

Sería favorable para futuros trabajos investigativos realizar un censo para encontrar escuelas con salones de igual condición al de la escuela E-002, en el cual se observen los aditamentos plásticos en puertas y

ventanas. En la medida que sea posible conseguir al menos dos instrumentos, de esta forma se podría ubicar en diferentes áreas del salón, de modo de conocer la distribución o dispersión de los gases en el salón. En futuras investigaciones se debe utilizar salones con acondicionadores de aire y ventilación natural donde no se excedan las proporciones de estudiantes por salón. También se pueden estudiar salones de escuelas del Distrito I, para así construir un mapa de la distribución de las concentraciones de CO₂ en los salones de las escuelas de las regiones educativas de Caguas.

Literatura Citada

- [AAP] American Academy of Pediatrics. 2004. Ambient air pollution: Health hazards to Children. *Pediatrics*. 114: 1699-1707.
- Acuña-Fernández E. (2002). *Análisis Estadístico de Datos Utilizando Minitab*. Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez, Departamento de Matemáticas. Wiley Custom Services. Segunda Edición.
- Andersen G, 2002. Environmental Health Series, National Conference of State Legislatures. Indoor Air Quality. <http://www.ncsl.org/programs/enviro/health/iaqser.htm>.
- Apte MG, Fisk WJ, Daisey JM. 2000. Association between indoor CO₂ concentration and Sick Building Symptoms in U.S. office building: An analysis of the 1994-1996 BASE Study Data. *Indoor Air*. 10: 246-257.
- ASHRAE/ANSI. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers/American National Standards Institute. 2003. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE Standards Committee, Addendum n to ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. <http://ashrae.org>.

- Berlin G. 2001. Humidity control: IAQ and you. *Engineered Systems*. 18 (1).
- Blondeau P, Lordache V, Poupard O, Genin D, Allard F. 2005. Relationship between outdoor and indoor air in eight French schools. *Indoor Air*. 15: 2-12.
- Bornehag CG, Sundell J, Hagerhed L, Sigsgaard T. 2005. Association between ventilation rates in 390 Swedish homes and allergic symptoms in children. *Indoor Air*. 15: 275-280.
- Chew FT, Goh DYT, Ooi BC, Saharom Hui JKS, Lee BW. 1999. Association of ambient air pollution levels with acute asthma exacerbation among children in Singapore. *Allergy*. 54: 320-329.
- Commission on Risk Assessment and Risk Management. 1997. Report on Commission on Risk Assessment and Risk Management Symposium on a Public Health Approach to Environmental Health Risk Management, Washington, DC.
- Corsi RL, Torres VM, Sanders M, Kinney KA. 2002. Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools: Result of the Tesias Study. *Indoor Air*. 74-79.
- Daisey JM, Angell WJ, Apte MG. 2003. Indoor Air Quality ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air*. 13: 53-64.

- Del Campo-Diaz V, Mendivil-Martinez A. 2005. Calidad de aire en los centros de educación infantil del país Vasco. 2nd Mediterranean Congress of Climatization. February 2005. Madrid, Spain. http://www.inive.org/Ibase_Search/airbase-search-formulairebibinf-climamed2005-001.asp.
- [DOE] Department of Energy. 2000. International Performance Measurement & Verification Protocol: Concepts and Practices for Improved Indoor Environmental Quality. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department Of Energy.
- Dougan DS. 2004. CO₂ Based demand controlled ventilation: Do the risks outweigh the rewards?. Ebtron Inc. www.ebtron.com.
- [EPA] Environmental Protection Agency. 1987. Unfinished Business: A comparative assessment of environmental problems.
- [EPA] Environmental Protection Agency. 1990. Reducing risk: setting priorities and strategies for environmental protection. EPA Science Advisory Board.
- [EPA] Environmental Protection Agency. 1991. Building Air Quality: A guide for building owners and facility managers, Office of atmospheric and indoor air programs: Indoor Air Division.
- [EPA] Environmental Protection Agency. 2001. Healthy Buildings, Healthy People: A Vision for the 21st Century. Indoor Air Quality. <http://www.epa.gov/iaq>.

[EPA] Environmental Protection Agency. 2003. Latest findings on national air quality. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring and Analysis Division. <http://www.epa.gov/air/airtrends>.

Erdmann CA, Apte MG. 2004. Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset. *Indoor Air*. 14(8): 127-134.

Fleming JR and Knorr BR. 1999. History of the Clean Air Act: a guide to clean air legislation past and present. American Meteorology Society at Colby College. <http://www.ametsoc.org/sloan/cleanair/index>

Fontanella L, Ippoliti L, Valentini P. 2007. Environmental pollution analysis by dynamic structural equation models. *Environmetric*. 18: 265- 283.

[GAO] General Accounting Office. 1996. School Facilities: America's Schools Report Differing Conditions. GAO/HEHS-96-103. Washington, D.C. http://www.access.gpo.gov/su_docs/aces/aces160.shtml.

Godwin C, Batterman S. 2007). Indoor Air Quality in Michigan Schools, *Indoor Air*. 17: 109-121.

Guardino Sola X. 2003. Calidad del Aire Interior. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. 2 (44).

Jacobs DE, Kelly T, Sobolewski J. 2007. Linking Public Health, Housing, and Indoor Environmental Policy: Successes and Challenges at Local

- and Federal Agencies in the United States. *Environ Health Perspect.* 115(6):976–982.
- Kim CS, Lim YW, Yang JY, Hong CS, Shin DC. 2002. Effect of indoor CO₂ Concentration on Wheezing Attacks in Children. *Indoor Air.* 492–497.
- Koiv Teet-Andrus. 2007. Indoor Climate and ventilation in Tallin school buildings. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.* 13(1): 17-25.
- Kovesi K, Gilbert NL, Stocco C, Fugler D, Dales RE, Guay M, Miller JD. 2007. Indoor air quality and the risk of lower respiratory tract infections in young Canadian Inuit children. *Canadian Medical Association Journal (CMAJ).* 177 (2): 155 – 160.
- Lee SC, Chang M. 1999. Indoor Air Quality Investigations at Five Classrooms. *Indoor Air.* 9: 134-138.
- Lee SL, Wong HS, Lau YL. 2006. Association between air pollution and asthma admission among children in Hong Kong. *Clin Exp Allergy.* 36: 1138-1146.
- LeMone P. 2006. Globe Data Now on MADIS: Chief Scientist Message. The Globe Programs. March, 2007. www.globe.gov
- Levin H. 2006. Indoor Environmental Quality, Building Research & Information. 34(5): 433–436.
- Liccardi G, Custovic A, Cazzola M, Russo M, D'amato M, D'amato G. 2001. Avoidance of allergens and air pollutants in respiratory allergy. *Allergy.* 56: 705-722.

- Lopez-Feliciano D. 1999. El ambiente y las leyes de Puerto Rico: Lo que todos queremos saber. Publicaciones Paraíso. Rincón, Puerto Rico,
- Magas OK, Gunter JT, Regens JL, 2007, Ambient air pollution and daily pediatric hospitalizations for asthma, *Env Sci Pollut Res*, 14 (1): 19-23.
- Masjedi M, Jamaati H, Dokouhaki P, Ahmadzadeh Z, Taheri S, Bigdeli M, Izadi S, Rostamian A, Aagin K, Ghavami S, 2003, The effects of air pollution on acute respiratory conditions, *Respirology*, 8: 213-230.
- Mathieu-Nolf M. 2002. Poison in the air: A cause of chronic disease in children. *Clinical Toxicology*. 40 (4): 483-491.
- Mitchell CS, Zhang J, Sigsgaard T, Jantunen M, Liroy PJ, Samson R, Karol MH. 2007. Current state of the science: health effects and indoor environmental quality. *Environmental Health Perspectives*. 115(6): 958-964.
- Murphy J. 2002. A breath of fresh air? Using CO₂ for demand controlled ventilation. *Engineers Newsletter*. 31(3).
- [NIBS] National Institute of Building Science. 2005. Indoor Environmental Quality: A project of the National Institute of Building Sciences (NIBS) with funding support from The Architectural and Transportation Barriers Compliance Board. <http://ieq.nibs.org>.
- Nicolai T. 2002. Pollution environment factors and childhood respiratory allergic disease. *Toxicology*. 181-182: 317-321.

- [NIH] National Institute of Health. 2007. Dióxido de Carbono. U.S. National Library of Medicine, Department of Health & Human Services. Bethesda, MD.
- [NIOSH]. National Institute for Occupational Safety and Health. 1997_a. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Carbon Dioxide. NIOSH Criteria Documents. Publication No. 76-194
- [NIOSH]. National Institute for Occupational Safety and Health. 1997_b. Indoor Environmental Quality (IEQ). NIOSH Facts. www.cdc.gov/niosh.ieqfs.
- [NIOSH]. National Institute for Occupational Safety and Health. 2001. History of the mining program. NIOSH Mining Safety and Health Research. <http://www.cdc.gov/niosh/mining/>.
- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration. 2007_a. Meteorological Assimilation Data Ingest System (MADIS). U.S. Department of Commerce, NOAA Earth System Research Laboratory Global Systems Division (ESRL/GSD). March, 2007_b. <http://madis.noaa.gov>.
- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration. 2007. The mission of ESRL's Global Systems Division (GSD). U.S. Department of Commerce, NOAA Earth System Research Laboratory Global Systems Division (ESRL/GSD). March, 2007. <http://www.fsl.noaa.gov>.

- [OSHA] Occupational Safety and Health Administration. 1990. Carbon Dioxide in Workplace Atmospheres: Inorganic Method #172. U.S. Department of Labor Occupational Safety & Health Administration. October, 2006. www.osha.gov.
- Peavy HS, Rowe RR, Tchobanoglous G. 1985. Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill. 1-8, 417-448.
- Pénard C, Charpin D, Raheison C, Kopferschmitt C, Caillaud D, Lavaud F. 2005. Long term exposure to background air pollution related to respiratory and allergic health in schoolchildren. *Clin Exp Allergy*. 35: 1279-1287.
- Persily AK. 1996. The relationship between indoor air quality and carbon dioxide. *Indoor Air*. 2:961-966.
- Persily AK. 1997. Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide, ASHRAE Transactions. Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology. 103(2): 1-12.
- Qi J, Yang L, Wang W. 2007. Environmental Degradation and Health Risk in Beijing, China. *Archives of Environmental & occupational health*. 62 (1): 33-37.
- Ramachandran G, Adgate JL, Church TR, Jones D, Fischer G, Fredrickson A, Sexton K. 2002. Indoor air quality in two urban elementary schools: comfort parameters and microbial concentration in air and carpets. *Proceedings: Indoor Air*. 461-466.

- Ramos G. 2003. Estudio Continuo de Salud para los Municipios de Puerto Rico. Escuela Graduada de Salud Pública Departamento de Bioestadística y Epidemiología.
- Richardson G, Eick S, Jones R. 2005. How is the environment related to asthma? : Literature review. *Journal of advanced Nursing*. 52(3): 328-339.
- [SEA] Servicio de Extensión Agrícola. 2005. Mapa y perfil demográfico de Caguas. Servicio de Extensión Agrícola, Oficina local y Regional de Caguas. <http://www.uprm.edu/agricultura/sea/mapa/Caguas>.
- Shaughnessy RJ, Haveringen – Shaughnessy U, Nevalainen A, Moschandreas D. 2006. A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*. 16: 465-468.
- Smedje G, Norbäck D, Edling C. 1997. Subjective Indoor Air Quality in Schools in Relation to Exposure. *Indoor Air*. 7: 143-150.
- Seppänen OA, Fisk WJ. 2004. Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air*. 14 (7): 102-118.
- Seppänen OA, Fisk WJ, Mendell MJ. 1999. Association of ventilation rates and CO₂-concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *International Journal of Indoor Air Quality and Climate*. 9: 252-274.

- Sowa J. 2002. Air quality and ventilation rates in schools in Poland-requirements, reality and possible improvements. *Indoor Air*. 23: 68-73.
- Sundell J. 2004. On the History of Indoor Air Quality and Health. *Indoor Air*. 14: 51-58.
- Census Bureau (US). 2000. GCT-PH1: Population, Housing Units, Area, and Density. U.S Census Bureau.
- Vargas Marcos F, Gallego Pulgarín I. 2005. Calidad Ambiental Interior: Bienestar, Confort Y Salud. *Rev. Esp. Salud Pública*. 79(2): 243-251.
- Wargocki P, Sundell J, Bischof W, Brundrett G, Fanger PO, Gyntelberg F, Hanssen SO, Harrison P, Pickering A, Seppanen O, Wouters P. 2002. Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air*. 12: 113-128.
- Wark K, Warner CF, Davis WT. 1998. *Air Pollution: Its Origin and Control*. Addison-Wesley. Third Edition. ISBN 0-67399416-3.
- [WHO] World Health Organization. 2000. The Right to Healthy Indoor Air; report on a WHO Meeting. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen. European Health 21 targets 10, 13. <http://www.airimpacts.org>.
- [WHO] World Health Organization. 2004. Tuberculosis Fact Sheet. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/en>.

Wu F, Takaro TK. 2007. Childhood asthma and Environmental Interventions, *Environmental Health perspectives*, 115 (6): 971-975.

Zhang G, Spickett J, Rumchev K, Lee AH, Stick S. 2006. Indoor air quality in a “low allergen” school and three standard primary schools in western Australia. *Indoor Air*. 16 (1): 74-80.

Apéndice Uno

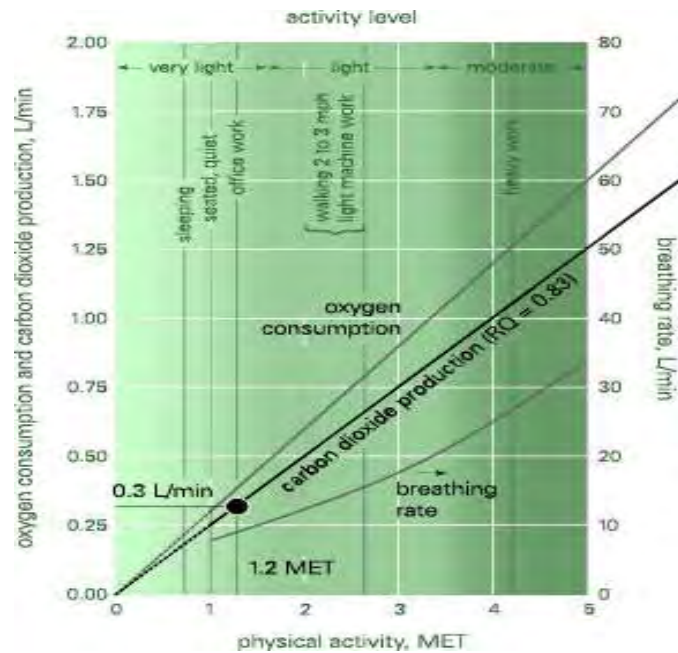
Nomenclatura

Símbolo	Significado
% rh	por ciento de humedad relativa
AAP	Academia Americana de Pediatría
ANSI	American National Standards Institute
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Refrigeración, Calefacción y Aires Acondicionados
BRI	Building related Illness (Síntomas Asociados al Edificio)
CAI	Calidad de Aire Interior
C_{in}	concentraciones de dióxido de carbono medido en el interior en ppm
C_{out}	concentraciones de dióxido de carbono medidos en el exterior en ppm.
EPA	Environmental Protection Agency
G	razón de CO ₂ generado en el espacio en pies cúbicos por minuto (cfm por sus siglas en inglés) o L/seg

IEQ	Indoor Environmental Quality (Calidad del Ambiente Interior)
MCS	Multiple Chemical Sensitivity (sensitividad química múltiple)
NAAQS	estándares de calidad de aire nacional
NDIR	Non-dispersive Infra-red (sensor del tipo infrarrojo no dispersivo utilizado por el Q-Trak)
NIBS	National Institute of Building Science
NIH	National Institute of Health
NKB	Nordic Committee on Building Regulations
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PM	Material Particulado
(Q_o) y (Q_p)	la razón de ventilación en el espacio ocupado en L/seg
SBS	Sick building Syndrome (Síntomas de Edificio Enfermo)
TWA	valor medio de exposición durante un turno de 8 horas
USBM	United State Bureau of Mines (Oficina de Minas de los Estados Unidos)
WHO	World Health Organization.

Apéndice Dos

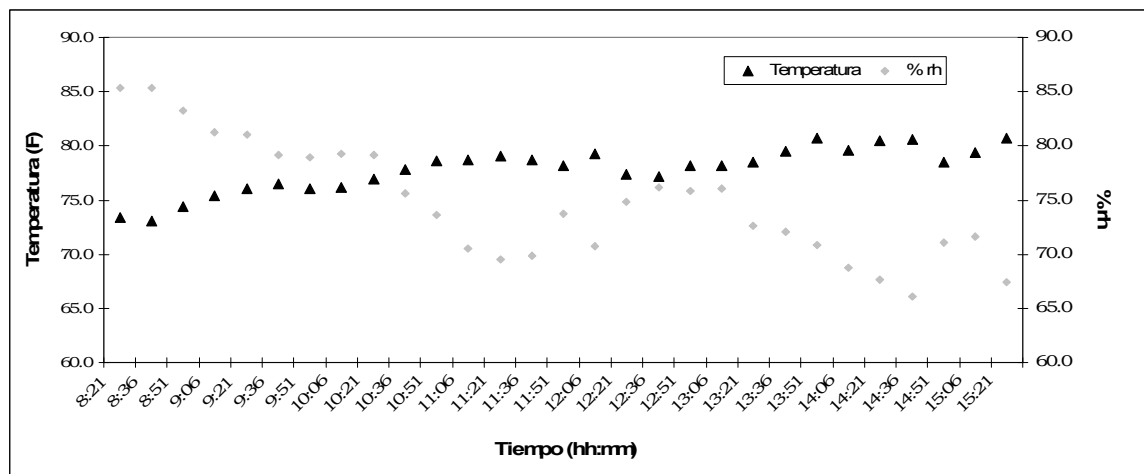
Razón de generación de dióxido de carbono y consumo de oxígeno.



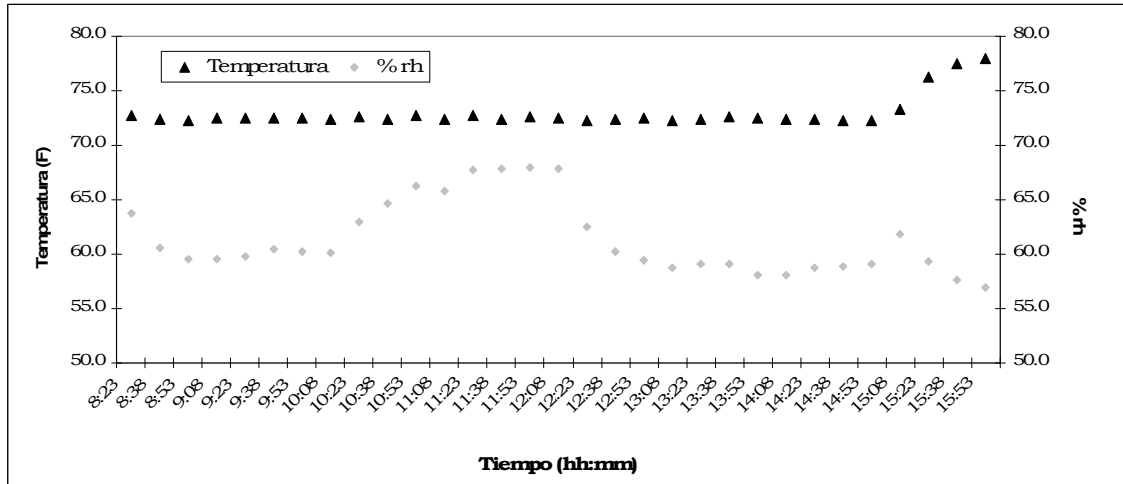
Tomado de: Murphy John. 2002. A breath of fresh air? Using CO₂ for demand controlled ventilation. Engineers Newsletter. 31(3)

Apéndice Tres

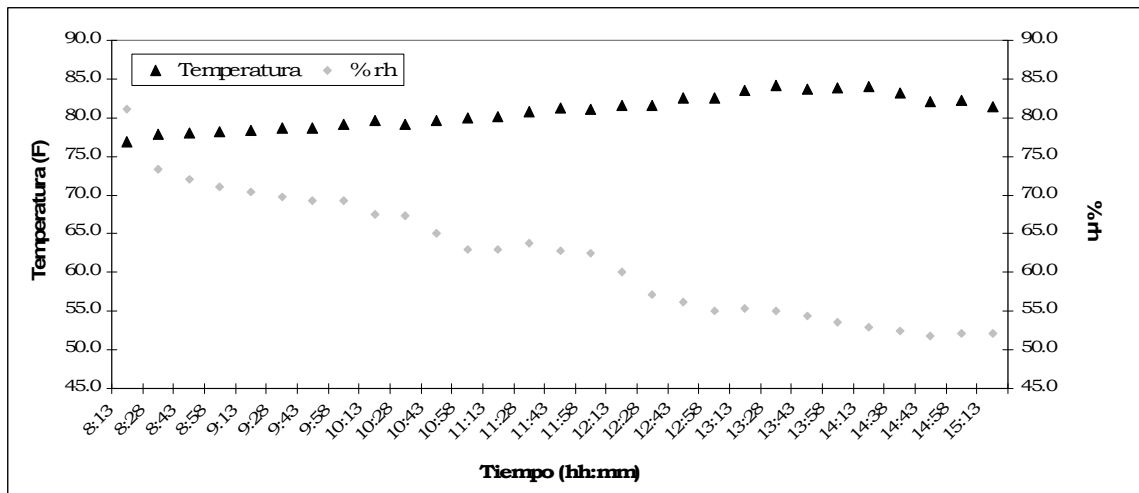
Gráficos de la variabilidad de las temperaturas y por ciento de humedad relativa (%rh) en los salones de clase durante el periodo lectivo por escuelas.



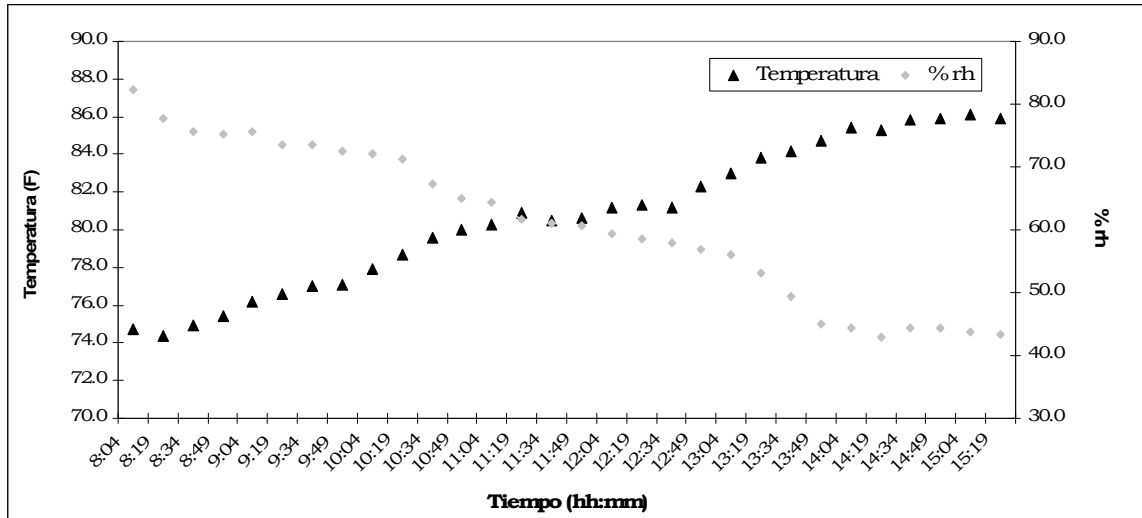
Variabilidad de las condiciones de temperatura y % rh en la escuela E-001.



Variabilidad de las condiciones de temperatura y % rh en la escuela E-002.



Variabilidad de las condiciones de temperatura y % rh en la escuela E-003.



Variabilidad de las condiciones de temperatura y % rh en la escuela E-004.

Apéndice Cuatro

Resumen de las condiciones de temperatura y % de humedad relativa observadas con el instrumento Q-Trak en los salones de clase por escuelas.

Tabla A.01. Resumen de la mediana de las temperaturas y % rh en el interior del salón de clase y en el exterior de la escuela E-001.

Escuela		Temperatura	% rh	Temperatura	% rh
		Interior (°C)	Interior	Exterior (°C)	Exterior
	Promedio	25.4	74.7	26.4	63.9
E-001	Máximo	27.1	85.3	26.8	80.8
	Mínimo	22.8	66.1	21.6	49.2

Tabla A.02. Resumen de la mediana de las temperaturas y % rh en el interior del salón de clase y en el exterior de la escuela E-002.

Escuela	Temperatura		% rh	Temperatura		% rh
	Interior (°C)		Interior	Exterior (°C)		Exterior
Promedio	22.7		61.4	27.3		62.9
E-002 Máximo	25.5		67.9	28.8		78.7
Mínimo	22.4		56.9	24.0		52.7

Tabla A.03. Resumen de la mediana de las temperaturas y % rh en el interior del salón de clase y en el exterior de la escuela E-003.

Escuela	Temperatura		% rh	Temperatura		% rh
	Interior (°C)		Interior	Exterior (°C)		Exterior
Promedio	27.1		62.1	32.1		50.8
E-003 Máximo	28.9		81.1	41.2		81.1
Mínimo	24.9		51.8	22.4		31.2

Tabla A.04. Resumen de la mediana de las temperaturas y % rh en el interior del salón de clase y en el exterior de la escuela E-004.

Escuela		Temperatura	% rh	Temperatura	% rh
		Interior (°C)	Interior	Exterior (°C)	Exterior
	Promedio	27.1	60.9	30.5	46.9
E-004	Máximo	30.1	82.3	40.3	56.6
	Mínimo	23.5	42.9	27.3	29.3

Apéndice Cinco

Datos Climatológicos

Tabla A.05. Datos climatológicos para los días de muestreo en las escuelas.

Escuela	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mmHg)	Velocidad del Viento (km/h)
Escuela 001	24.8	79	760.48	3.7
Escuela 001	24.6	71	759.46	3.3
Escuela 002	24.5	74	759.97	4.6
Escuela 002	23.6	78	759.97	4.4
Escuela 003	26.6	74	761.24	6.1
Escuela 003	26.0	66	760.48	4.1
Escuela 004	23.6	79	760.98	4.0
Escuela 004	23.1	80	762.25	2.9

Tabla A.06 Promedio de los datos climatológicos diarios para el mes de febrero.

Día	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mmHg)	Velocidad del Viento (km/h)
1	22.3	77	758.19	5.2
2	21.3	85	759.46	1.4
3	23.4	76	760.73	3.3
4	24.1	74	760.98	3.2
5	24.0	73	761.49	3.0
6	23.4	80	761.24	2.1
7	24.0	78	760.48	4.6
8	24.8	79	760.48	3.7
9	24.5	76	759.97	4.6
10	24.9	75	759.46	4.3
11	24.6	71	759.46	3.3
12	24.5	74	759.97	4.6

13	23.6	78	759.97	4.4
14	26.6	74	761.24	6.1
15	26.0	66	760.48	4.1
16	24.3	72	758.95	4.1
17	21.4	85	752.60	2.1
18	23.6	79	760.98	4.0
19	23.1	80	762.25	2.9
20	24.3	72	761.24	3.3
21	24.8	72	761.24	3.3
22	24.6	72	761.24	4.1
23	24.2	76	760.75	3.6
24	24.2	74	760.98	3.4
25	25.4	73	759.71	3.8
26	24.8	75	759.71	4.1
27	22.3	82	759.46	2.2

Tomado de: La estación meteorológica de MADIS, localizada en Caguas, Puerto Rico.

Tabla A.07. Promedio de los datos meteorológicos para cada semana del mes de febrero.

Semana	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mmHg)	Velocidad del Viento (km/h)
1	21.8	81	758.70	3.3
2	24.0	76	760.73	3.5
3	24.9	73	759.97	4.4
4	23.7	76	760.22	3.3
5	24.1	76	759.97	3.4

Estos datos fueron tomados del laboratorio meteorológico de MADIS, localizado en Caguas.

Tabla A.08. Promedio de los datos climatológicos para los días de muestreo de la segunda fase en el exterior de la escuela E-002.

Escuela E-002		Temperatura	Humedad	Presión	Velocidad del Viento
día		(°C)	(%)	(mmHg)	(km/h)
	Máximo	30.4	79.8	752.31	5.2
1	Mínimo	26.7	46.1	750.06	1.3
	Promedio	29.1	73.3	751.52	2.4
	Máximo	34.0	67.9	751.56	1.4
2	Mínimo	29.2	47.2	742.56	0.2
	Promedio	32.1	55.46	750.28	1.0
	Máximo	38.5	91.8	752.31	3.3
3	Mínimo	26.9	49.2	750.06	0.6
	Promedio	33.8	60.2	751.10	2.6

Apéndice Seis

Mínimos de la razón de ventilación por área estimados por ASHRAE/ANSI Standard 62.

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate R_p		Area Outdoor Air Rate R_A		Notes	Default Values		
	cfm/person	L/s/person	cfm/ft ²	L/s/m ²		Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)	
						#/1000 ft ² (#/100 m ²)	cfm/person	L/s/person
Correctional Facilities								
Cell	5	2.5	0.12	0.6		25	10	4.9
Day room	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5
Guard stations	5	2.5	0.06	0.3		15	9	4.5
Booking/waiting	7.5	3.8	0.06	0.3		50	9	4.4
Educational Facilities								
Daycare (through age 4)	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6
Classrooms (ages 5-8)	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4
Classrooms (age 9 plus)	10	5	0.12	0.6		35	13	6.7
Lecture classroom	7.5	3.8	0.06	0.3		65	8	4.3
Lecture hall (fixed seats)	7.5	3.8	0.06	0.3		150	8	4.0
Art classroom	10	5.0	0.18	0.9		20	19	9.5
Science laboratories	10	5.0	0.18	0.9		25	17	8.6
Wood/metal shop	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5
Computer lab	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4
Media center	10	5	0.12	0.6	A	25	15	7.4
Music/theater/dance	10	5.0	0.06	0.3		35	12	5.9
Multi-use assembly	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1
Food and Beverage Service								
Restaurant dining rooms	7.5	3.8	0.18	0.9		70	10	5.1
Cafeteria/fast food dining	7.5	3.8	0.18	0.9		100	9	4.7

Tomado de: ASHRAE/ANSI. 2003. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE Standards Committee, Addendum n to ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. <http://ashrae.org>.

Apéndice Siete

Cálculo para determinar la razón de ventilación por persona (Q_p) en los salones de clase.

$$Q_p = \frac{1.0 \times 10^6 (G_p)}{C_{in} - C_{out}}$$

Datos para el salón de la escuela E-002

$$G_p = .31 \text{ L/min.}$$

$$C_{in} = 2426 \text{ ppm (Promedio en el interior del salón)}$$

$$C_{out} = 342 \text{ ppm (Promedio en el exterior del salón)}$$

$$Q_p = \text{L/seg}$$

$$Q_p = \frac{1.0 \times 10^6 \left(.31 \frac{\text{L}}{\text{min.}} \right) \left(\frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ seg.}} \right)}{2426 \text{ ppm} - 342 \text{ ppm}}$$

$$Q_p = 2.48 \frac{\text{L}}{\text{seg.}}$$