



Serie Proyectos de Investigación e Innovación

Superintendencia de Seguridad Social
Santiago - Chile

INFORME FINAL

Evaluación cuantitativa de calidad de aire interior (IAQ) en cabinas de conductores de buses interurbanos, para tres estratos de recorridos: corto, medio y largo

Santiago Mansilla
2018





SUPERINTENDENCIA DE SEGURIDAD SOCIAL

SUPERINTENDENCE OF SOCIAL SECURITY

La serie Proyectos de Investigación e Innovación corresponde a una línea de publicaciones de la Superintendencia de Seguridad Social, que tiene por objetivo divulgar los trabajos de investigación e innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades del Trabajo financiados por los recursos del Seguro Social de la Ley 16.744.

Los trabajos aquí publicados son los informes finales y están disponibles para su conocimiento y uso. Los contenidos, análisis y conclusiones expresados son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente la opinión de la Superintendencia de Seguridad Social.

Si requiere de mayor información, sobre el estudio o proyecto escriba a: investigaciones@suseso.cl.

Si desea conocer otras publicaciones, artículos de investigación y proyectos de la Superintendencia de Seguridad Social, visite nuestro sitio web: www.suseso.cl.

The Research and Innovation Projects series corresponds to a line of publications of the Superintendence of Social Security, which aims to disseminate the research and innovation work in the Prevention of Occupational Accidents and Illnesses financed by the resources of Law Insurance 16,744.

The papers published here are the final reports and are available for your knowledge and use. The content, analysis and conclusions are solely the responsibility of the author (s), and do not necessarily reflect the opinion of the Superintendence of Social Security.

For further information, please write to: investigaciones@suseso.cl.

For other publications, research papers and projects of the Superintendence of Social Security, please visit our website: www.suseso.cl.

Superintendencia de Seguridad Social
Huérfanos 1376
Santiago, Chile.

Mutual de Seguridad
Cámara Chilena de la Construcción.



GSE Salud Consultores Ltda.



***Evaluación cuantitativa de calidad de aire interior (IAQ) en
cabinas de conductores de buses interurbanos.***

Informe final

Autores

Ing. Santiago Mansilla Pérez
Dr. Eloy Mansilla Lucero
Dr. Patricia Lillo Zurita
Klgo. Gabriel Mansilla Lucero

Febrero de 2018

Agradecimientos

El presente trabajo contó con el decidido apoyo de Mutual de Seguridad de la Cámara Chilena de la Construcción, entidad que financió el proyecto en el marco del concurso de proyectos de investigación e innovación convocado por la Superintendencia de Seguridad Social el año 2016. En particular, vaya nuestro agradecimiento a la Gerencia de Gestión del Conocimiento de Mutual de Seguridad, quien supervisó el desarrollo del proyecto prestando la colaboración administrativa y realizando indicaciones técnicas para la mejor formulación de este.

Agradecemos especialmente a la empresa Tur Bus, quien facilitó las instalaciones y vehículos para realizar el trabajo de campo durante los meses que se hicieron las mediciones en cabinas. En especial al Sr. Gerente General, al Gerente Corporativo de Seguridad y Salud Ocupacional, a las Gerencias Centro, Norte y Sur, al equipo de vigilancia de salud en la empresa y a las decenas de conductores de buses interurbanos que tuvieron excelente disposición durante el desarrollo de las actividades de medición in situ.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento a las Kinesiólogas Srtas. Judith Caro Ávila y Gabriela Vargas González, colaboradoras del equipo de investigación, quienes ejecutaron el trabajo de campo haciendo las mediciones en los 94 viajes realizados a distintas partes del país. Sin su esfuerzo, dedicación y profesionalismo no habríamos contado con una base de datos sólida y precisa, correlacionada con los eventos resumidos en las bitácoras de viaje.

Resumen.

Antecedentes: Algunos estudios evidencian que un nivel alto de dióxido de carbono puede causar aumento de la fatiga y somnolencia y disminuir la velocidad de reacción en seres humanos. Esto cobra relevancia en algunas actividades como la conducción de vehículos de pasajeros donde podría asociarse a accidentes de tráfico. Por otra parte, está demostrado que en las cabinas de vehículos que no se ventilan adecuadamente se acumula CO₂ durante el viaje.

Objetivo: verificar si las condiciones ambientales en cabinas de buses de transporte interurbano se deterioran con los tiempos de viaje y cantidad de pasajeros.

Métodos. Durante el verano de 2016 e invierno de 2017, se midieron niveles de CO₂, CO, Temperatura y Humedad Relativa en cabinas de 94 buses, durante viajes largos, medios y cortos. Los registros instrumentales se correlacionaron con datos de número de pasajeros, tiempos de viaje y eventos como paso por túneles y zonas congestionadas.

Resultados: Las concentraciones medias globales de CO₂ fueron moderadamente altas sin variaciones significativas entre invierno y verano, sin embargo, al desagregar en viajes cortos medios y largos se observan diferencias verano-invierno. Las correlaciones entre el número de pasajeros transportados y concentraciones promedios de CO₂, así como tiempo de conducción y nivel de CO₂, no resultaron significativas, mientras que los promedios de CO₂ en túneles y en zonas congestionadas, resultaron significativamente más altos que en carretera normal en 15% y 32%, respectivamente (significancia asintótica 0,000 en prueba de Wilcoxon para ambas comparaciones).

Conclusiones: La cantidad de pasajeros transportados y el tiempo de conducción no son factores determinantes para elevar de manera importante los niveles de CO₂ en cabinas de conductores. Resulta más importante manejar bien la ventilación y controlar los eventos de mayor incidencia en variaciones de CO₂ en cabina para mejorar la calidad de aire interior.

Palabras claves: buses, dióxido de carbono, aire interior, ventilación, somnolencia, accidentes de tráfico.

Índice de contenidos

1. Introducción	1
Antecedentes y propósito de la investigación	1
Definición del Problema de investigación.....	2
Objetivos	3
Hipótesis.....	3
Justificación	3
2. Fundamentos teóricos sobre efectos de CO ₂	4
3. Materiales y Método.....	6
3.1. Metodología	6
3.2. Población de estudio y muestra.....	6
3.3. Cobertura y temporalidad del estudio.....	8
3.4. Recolección y auditoría de calidad de datos instrumentales.....	10
Equipos de medición utilizados.....	10
Calibración.....	11
Inter-comparación de equipos instrumentales.....	12
Interpretación del análisis de inter-comparación	16
3.5. Bitácoras de viajes para correlacionar eventos	17
4. Resultados	17
4.1. Niveles Background CO ₂	17
4.2. Análisis de Parámetros de Índice de Calidad de Aire Interior (IAQ) en período invernal y estival. 18	
4.3. Correlación entre número de pasajeros y concentración de CO ₂	22
4.4. Comparación entre concentraciones en cabina de conductores y salón de pasajeros. ...	26
4.5. Correlaciones entre tiempo de viaje y concentración de CO ₂	28
4.6. Factores externos incidentes en la concentración de CO ₂	29
4.7. Porcentaje del tiempo de viajes en que las concentraciones de CO ₂ se mantuvieron por sobre 1000 ppm y sobre 2500 ppm.	34
4.8. Otros hallazgos observados	36
5. Conclusiones.....	38
5.1 Conclusiones generales respecto a las preguntas de investigación e hipótesis formuladas..	38
5.2. Factores externos.....	39
5.3. Otros hallazgos	39
6. Recomendaciones	40

Bibliografía	41
Anexos	43

1. Introducción

Antecedentes y propósito de la investigación

Los accidentes del tránsito con víctimas fatales y graves representan en Chile un problema grave de salud pública dada la cantidad de eventos que se producen cada año. Según datos de la Comisión Nacional de Seguridad del Tránsito, CONASET, en el año 2016 se produjeron 1.675 víctimas fatales en accidentes de tránsito en zonas urbanas, suburbanas y rurales lo que representa una tasa de 9,21 fallecidos por cada 100.000 habitantes el mismo año. Por otra parte, la Superintendencia de Seguridad Social informa que ese mismo año, del total de accidentes del trabajo con resultado de muerte, un 49% de los casos estuvieron vinculados a vehículos motorizados de los cuales el 87% corresponde a accidente de tránsito en vías públicas.

Cuando los accidentes involucran a vehículos de gran magnitud, suelen producirse consecuencias catastróficas en tanto el número de víctimas que se registran, como la gravedad de las lesiones producidas. En carreteras, los vehículos de gran tamaño corresponden principalmente a camiones de transporte de carga y buses de pasajeros. Según cifras de registro en CONASET, el año 2014 hubo un total de 642 accidentes de buses y taxi buses de servicio interurbano e internacional, provocando 22 fallecidos y 89 accidentados graves¹. En consecuencia, adoptar medidas preventivas para evitar accidentes en carreteras es, sin dudas, un imperativo actual, no solo para prevenir accidentes laborales, sino también los accidentes que afectan al público en general o a otros trabajadores ajenos a la conducción del vehículo.

Los conductores de buses interurbanos están regulados bajo normas del trabajo y del transporte, con exigencias estrictas que son generalmente cumplidas. Sin embargo, los ambientes de trabajo en que se desempeñan los conductores de vehículos de traslado de pasajeros en general están poco estudiados desde el punto de vista de la calidad ambiental del puesto de trabajo, debido a inexistencia de regulaciones específicas o desconocimiento de parámetros que pudieran afectar la conducción. En Chile, según el registro de noviembre de 2017 de la Subsecretaría de Transportes², hay 5277 buses de transporte público interurbano en el total de regiones del país, lo que da cuenta de una población trabajadora de importancia dedicada a la conducción de este tipo de vehículos.

En Chile existen normas para muchos contaminantes químicos en los lugares de trabajo, definidas como máximos permisibles de concentraciones que pueden dar una seguridad razonable de que los trabajadores y trabajadoras no se enfermarán, sin embargo, no hay normas de calidad del aire interior que se relacionen con el confort para el desarrollo del

¹ Datos de CONASET que considera fallecidos dentro de las 24 horas de ocurrido el accidente.

² FUENTE: Registro Nacional de Servicios de Transporte de Pasajeros - Subsecretaría de Transportes. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile

trabajo. Las normas de higiene ocupacional están orientadas esencialmente a la prevención de enfermedades por exposición a uno o más agentes químicos, físicos o biológicos³, pero no hay estándares intermedios para bajos niveles de exposición. Puede resultar significativo para la prevención de accidentes en carreteras, verificar las condiciones de calidad de aire interior en las cabinas de autobuses, ya que hay investigaciones que muestran que, en estos estados intermedios, puede disminuir el nivel de alerta y afectar algunas capacidades neurosensoriales (Usha Satish et al, 2012). En especial se debe verificar si en el interior de las cabinas se cumplen las recomendaciones de organismos internacionales especializados en materias de calidad de aire interior.

El presente estudio se enmarca en el desarrollo de proyectos de investigación e innovación en salud y seguridad en el trabajo que organiza la Superintendencia de Seguridad Social cada año convocando a investigadores. Dichos estudios son financiados por los organismos administradores de la Ley con fondos dedicados a innovación e investigación en la materia. En el concurso del año 2016, este proyecto fue seleccionado y se ejecutó por 18 meses entre 2016 y 2017.

El alcance del estudio es la verificación de las condiciones de calidad del aire interior (IAQ) en las cabinas de buses de transporte público interurbano de pasajeros con el fin de tener información científica que permita adoptar medidas preventivas en caso necesario y, por otra parte, desarrollar futuras investigaciones sobre la influencia de calidad del aire en la fatiga de conductores. Se evalúan los parámetros: concentración de CO₂ (ppm), Concentración de CO (ppm), temperatura ambiental (°C) y humedad relativa (%HR)

Disponer de una data significativa sobre parámetros de calidad de aire interior representa un importante punto de partida para evaluar las condiciones en que los conductores desempeñan su labor desde la perspectiva del ambiente de trabajo.

Definición del Problema de investigación

En Chile no se dispone de datos sobre calidad del aire interior en las cabinas de conductores de transporte interurbano de pasajeros, por tanto, se desconoce las reales condiciones del ambiente en que los conductores realizan su labor de transporte de pasajeros y en consecuencia no se dispone de medidas de control sobre un parámetro desconocido.

Preguntas de Investigación

¿Cuánto incide el tiempo de conducción y la cantidad de pasajeros en el deterioro de la calidad de aire interior en las cabinas de buses interurbanos?

³ Ver DS 594 de 1999 del Ministerio de Salud

¿Están los conductores de buses interurbanos expuestos a concentraciones elevadas de CO₂ por sobre las recomendaciones internacionales para calidad de aire interior?

Objetivos

Objetivo general

Verificar si las condiciones del ambiente de trabajo en buses de transporte interurbano de pasajeros se deterioran con los tiempos de viaje y cantidad de pasajeros y si tales condiciones cumplen con recomendaciones internacionales para IAQ.

Objetivos específicos.

1. Medir parámetros de IAQ: CO₂, CO, Humedad y Temperatura, en interior de las cabinas de conductores de buses interurbanos en tres modalidades de viajes y comparar con recomendaciones internacionales.
2. Correlacionar las concentraciones de gases medidos, con tiempo de viaje, considerando distintos tipos de buses y cantidad de pasajeros.
3. Examinar la variación de los parámetros con cambios en la ventilación natural o mecánica en el interior del bus.

Hipótesis

Hipótesis nula Ho:

La concentración de CO₂ en el interior de las cabinas de buses interurbanos no tiene relación con el tiempo de conducción ni el número de pasajeros.

Hipótesis alternativa H1:

La concentración de CO₂ en el interior de las cabinas de buses interurbanos aumenta con el tiempo de viaje y la cantidad de pasajeros

Justificación

Estudios previos han relacionado niveles moderadamente elevados de CO₂ en el aire respirable con somnolencia y la posible afectación en la toma de decisiones y concentración, lo que podría ser muy significativo en la prevención de accidentes de carreteras. Esta investigación puede ser la base para futuras investigaciones sobre la relación entre exposición a CO₂ en concentraciones que están bajo el nivel de toxicidad con la pérdida temporal de habilidades para el desarrollo de un trabajo con exigencias mentales.

Por otra parte, los resultados de evaluación de aire interior sirven para dar recomendaciones a la empresa sobre operación de ventilación en cabina del conductor o conductora, en los viajes en buses interurbanos según tipo de viajes.

Identificar los factores más relevantes que inciden en los niveles de CO₂ y deterioro de calidad del aire interior de los buses permite adoptar medidas de gestión con el fin de

mejorar los ambientes de trabajo en que se desempeñan los conductores de buses interurbanos la mayor parte de su tiempo laboral.

2. Fundamentos teóricos sobre efectos de CO₂

La concentración de CO₂ en el aire de espacios cerrados ocupados por personas, suele ser bastante más elevada que en el ambiente exterior debido a la exhalación respiratoria de las mismas personas que lo ocupan. Esto depende de varios factores, principalmente de la densidad de ocupantes, del tipo de ventilación que el espacio cerrado tenga y de la calidad del aire exterior, entre otros. Los valores típicos de concentración de CO₂ en aire limpio son de 300 a 400 ppm mientras que en áreas urbanas del orden de 500 ppm.

No obstante el incremento de concentración que se produce por la exhalación de las personas en ambientes cerrados, difícilmente alcanzaría el límite permisible para ambiente laboral en ocho horas de trabajo (4.375 ppm de CO₂, Ministerio de Salud Chile, DS 594 de 1999) por esta sola causa. Efectos directos inmediatos en salud se han reportado a concentraciones bastante más altas, mayores que 20.000 ppm (Liptet et al 1994).

Para algunas actividades que requieren altos niveles de concentración y alerta, tales como la conducción de un autobús en carretera, resulta importante evaluar la calidad del aire interior ya que algunos estudios muestran que la exposición a CO₂ de concentraciones moderadamente altas, no tóxicas (por debajo de los 5000 ppm) podrían afectar el estado de alerta e influir en el estado de somnolencia.

Se ha establecido como recomendación para un ambiente interior confortable que el valor de concentración de CO₂ no supere el rango 1000 a 1200 ppm sin ser considerado este valor como una indicación normativa sino más bien como guía para espacios cerrados confortables. Las concentraciones típicas en ambientes cerrados cuyos ocupantes no reportan molestias fluctúan entre los valores del rango antes mencionado⁴.

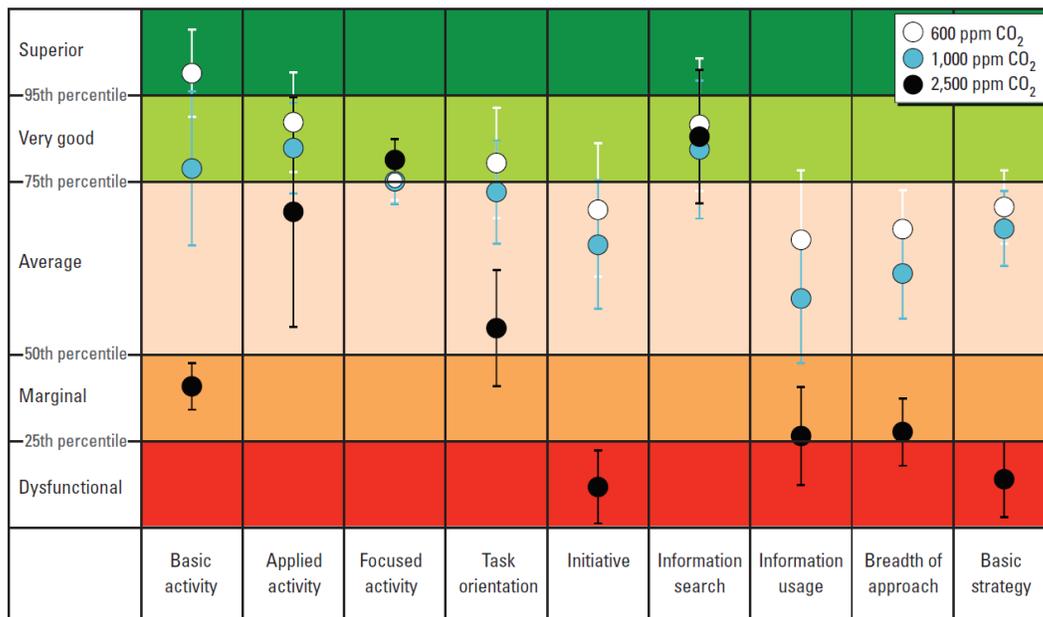
En lugares cerrados, las concentraciones de CO₂ suelen superar los 1000 ppm y en ocasiones llegar hasta 3000 ppm, lo que es un índice de mala ventilación.

Investigadores del Departamento de Psiquiatría y Ciencias del Comportamiento de la Universidad de Nueva York y del Departamento de Energía del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley de la Universidad de California (Berkeley Lab.), sometieron a estudio de respuesta en toma de decisiones, a 22 individuos que estaban en lugares de atmósfera

⁴ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE, TC-04.03-FAQ-35.

controlada con niveles de CO₂ entre 600 y 2500⁵ ppm. (Usha Satish et al, 2012) De un total de nueve escalas de rendimiento de toma de decisiones, los sujetos mostraron reducciones significativas en seis de ellas para niveles de 1.000 partes por millón (ppm) y grandes reducciones en siete de las escalas a 2.500 ppm. Las disminuciones más dramáticas en el rendimiento, en las que los sujetos fueron clasificados como "disfuncional", se observaron en la capacidad de iniciativa y pensamiento estratégico. Ver figura siguiente:

Figura 1. Impacto del CO₂ en la toma de decisiones humanas



Fuente: tomado de Estudios de Usha Satish et al 2012: *Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance.*,

Por otra parte, varios investigadores han demostrado que ocurre una elevación significativa de concentraciones de CO₂ en el interior de buses cerrados, especialmente en viajes largos. (Chiu C-F et al 2015)

Algunos estudios muestran que la exposición a CO₂ de concentraciones no tóxicas, podrían afectar el estado de alerta e influir en el estado de somnolencia, (Dai-hua Tsai et al, 2012) por tanto, es relevante saber si los conductores de buses interurbanos podrían estar conduciendo en condiciones no óptimas desde la perspectiva del confort del ambiente de

⁵ Usha Satish,¹ Mark J. Mendell,² Krishnamurthy Shekhar,¹ Toshifumi Hotchi,² Douglas Sullivan,² Siegfried Streufert,¹ and William J. Fisk², *Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance*, Environmental Health Perspectives, volume 120 | number 12 | December 2012.

trabajo. Los factores que pueden ser influyentes en la somnolencia deben ser eliminados o estrictamente controlados en trabajadores cuya seguridad en gran parte depende del grado de alerta en la ejecución de las tareas.

3. Materiales y Método

3.1. Metodología

Tipo de diseño metodológico: Se realizó un estudio de tipo cohorte transversal.

La empresa que aceptó participar de este estudio dando las facilidades para realizar las mediciones en cabinas de buses, dispone de una flota de 1200 buses de pasajeros interurbanos, distribuidos en 4 marcas tipo. El total de conductores en promedio anual en la empresa es de 3720 entre hombres y mujeres, considerando empresa principal y afiliadas.

Se describe a continuación la población en estudio, método de muestreo, recolección de registros instrumentales, auditoría de datos y recolección de datos complementarios para la investigación.

3.2. Población de estudio y muestra

Población en estudio: Buses de transporte público de pasajeros que viajan a distintas zonas del país pertenecientes a una empresa de cobertura nacional e internacional.

Marco muestral: La selección de la muestra desde la población en estudio, se hizo mediante un muestreo proporcional por cuotas, de dos etapas:

- Selección proporcional de conglomerados de viajes: cortos (hasta 2 hr.), medianos (hasta 4 hr.) y largos (más de 4 hr.)
- Selección de los buses y trabajadores accesibles en los tres conglomerados definidos.

No se pudo hacer elección aleatoria de la muestra por las características de operación de la empresa, optándose por muestreo por conveniencia.

Tamaño de muestra.

Acorde al objetivo principal del estudio y para responder la pregunta de investigación, se determinó el tamaño de muestra mínima que cumpliera con criterios estadísticos de buena significancia para correlacionar variables. El valor mínimo de muestra resultó igual a 15 buses lo que fue aplicado al conglomerado definido como “Largo” que representaba la menor proporción de viajes.

Acorde a la proporcionalidad, el número total de viajes a evaluar resultó igual a 92 distribuidos de la siguiente forma:

Tabla 1. Planificación de número de viajes a medir

Tipo de Viaje	Total de viajes a evaluar
Cortos (< 2hr.)	57
Medios (2 a 4 hr.)	20
Largos (> 4 hr)	15
Totales	92

Dado que se trata de un muestreo por accesibilidad, se optó por disponer de un tamaño de muestra grande con el fin de dar mayor fortaleza a la descripción del fenómeno en la muestra analizada.

Cada uno de los muestreos (que denominaremos campañas) contiene un número considerable de registros de los parámetros de IAQ, ya que se midió a intervalos máximos de 1 minuto.

Todo el tratamiento estadístico se hizo utilizando el software SPSS v22 y Excel 2017.

Caracterización de conductores que participaron del estudio.

Para caracterizar la muestra de conductores que participaron del estudio se sacaron datos de la encuesta aplicada. Cabe destacar el alto grado de consentimiento que hubo para responder las preguntas formuladas (98,6% de consentimiento).

No se consideran en el análisis de la población participante, los casos repetidos (conductores que estuvieron en más de un viaje.)

Los conductores encuestados en total fueron 72 (71 hombres y 1 mujer).

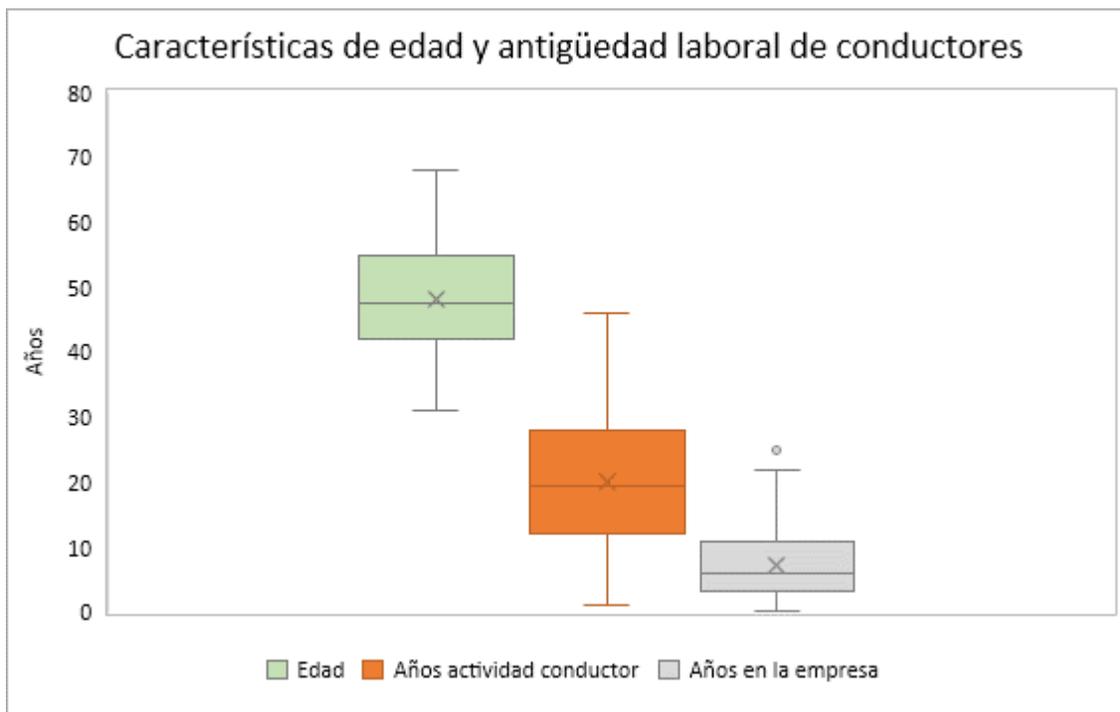
Se muestran a continuación los datos de distribución de Edad y Años laborales como conductor y años de trabajo en la empresa.

Tabla 2. Descripción de edad, años de experiencia y antigüedad en la empresa de los conductores que participaron en el estudio.

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo (años)	Máximo (años)	Media (años)	Desviación estándar
Edad	72	31	68	48,32	8,521
Años actividad conductor	72	1	46	19,95	11,089
Años en la empresa	72	0	25	7,21	5,642

La distribución de edades resultó equilibrada con una media de 48,3 años (IC 95%: 46,3-50,3) y una mediana de 47,5 años, correspondiendo a una distribución que se acerca a la normal. (significancia 0,197 en prueba de Kolmogorov-Smirnov)

Figura 2. Distribución de edades y años en el oficio de conductor y antigüedad en la empresa:



Los conductores participantes son experimentados en la conducción de este tipo de buses con un promedio de casi 20 años de conducción y 7,1 años en la empresa actual.

Uno de los criterios de inclusión que contemplaba el diseño era el tener al menos un año de experiencia en conducción de buses interurbanos.

3.3. Cobertura y temporalidad del estudio

El trabajo de campo del estudio fue ejecutado entre octubre de 2016 y septiembre de 2017 en dos períodos denominados como verano e invierno.

La cobertura espacial alcanza a 8 Regiones de Chile con viajes a 20 ciudades.

Tabla 3. cobertura de mediciones en cabinas de buses interurbanos.

Regiones	Ciudades
Antofagasta	Calama
	Antofagasta
Atacama	Chañaral
	Copiapó
	Vallenar
Coquimbo	La Serena
	Los Vilos
Valparaíso	Valparaíso
	Viña del Mar
	San Antonio
	El Tabo
	Quillota
	Quilpué
	La Laguna
	Papudo
Región Metropolitana	Santiago
O'Higgins	Rancagua
Maule	Curicó
Bío Bío	Concepción
	Talcahuano



Tabla 4. Número de viajes (campañas) realizados

Tipo de Viaje	Campañas válidas Verano	Campañas válidas Invierno	Totales Ejecutados	Programados
Cortos (< 2hr.)	33	25	58	57
Medios (2 a 4 hr.)	9	12	21	20
Largos (> 4 hr)	12	3	15	15
Totales	54	40	94	92

Tabla 5. Antecedentes de registro de datos

Toma de Muestra	
Período Verano	13 Oct 2016 al 13 Abr 2017
Período Invierno	08 Agosto a 13 Sept 2017
Distancia total recorrida en todas las campañas	17.398,2 km
Tiempo total muestreo continuo	260 hr.
Nº de Registros almacenados	33.378

3.4. Recolección y auditoría de calidad de datos instrumentales.

Equipos de medición utilizados

Las mediciones instrumentales se realizaron con Equipos: KIMO AQ200P (SN 14111472, Made in France) y EXTECH modelo Easy View 80 (SN 150608088, Made in Taiwan), que registraron niveles de CO₂ (ppm), Temperatura (°C) y Humedad Relativa (%HR).

Ambos equipos cuentan con sensores infrarrojos no dispersivo (NDIR) para detectar concentraciones de CO₂ en el aire.

El equipo KIMO cuenta con una sonda de medición de CO₂ (0 a 5000 ppm), Humedad Relativa (5 a 95%) y Temperatura (5 a 50°C) y otra sonda de medición de CO (0 a 1000 ppm) y Temperatura.

El Equipo EXTEC cuenta con sensor detector de CO₂ de doble longitud de onda con sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) con un rango de detección 0-6000 ppm y resolución de 1 ppm y precisión de +/- 3% o +/- 50 ppm. Además, dispone de sonda para detección de humedad relativa en el rango 10 a 95 %HR con resolución de 0,1 %HR y Temperatura en el rango -20 a 60°C con resolución de 0,1 °C y precisión +/-0,5 °C.

El registro de datos es acumulado en Datalogger en ambos equipos, los que se descargan a computador posterior a la campaña de medición.

Las sondas fueron ubicadas en lugar fijo de la cabina no muy cerca de ventanas o puertas para evitar situaciones peak de concentraciones cerca de zona respiratoria en la cabina.

En viajes cortos se midió a intervalos de 30 s o menores dado que la respuesta de medición no es instantánea y al medir en intervalos más largos se podía perder el registro de algunos eventos como paso por túneles o aperturas de puertas y ventanas.

Calibración

El equipo KIMO (utilizado en la mayoría de las mediciones), contaba con certificado de calibración de origen emitido por el fabricante KIMO Instruments France.

Dada la intensidad de uso del equipo y con el fin de asegurar calidad de las mediciones, se realizó otra calibración en origen a mitad de período. (7 de junio de 2016).

Los puntos de calibración fueron realizados con botellas estándar de 350, 1700 y 4500 ppm de CO₂

Calibración CO₂

Condiciones ambientales de calibración: Temperatura ambiente: 21,3 °C 5HR: 70,0 %, Presión atmosférica 1015 hPa

Tolerancias aplicadas +/- 50 ppm de 0 a 1650 ppm, 3% de 1651 a 5000 ppm

Nº	Valor referencia (ppm)	Valor medido por el equipo (ppm)	Valor equipo menos valor referencia (ppm)	Incertidumbre
1	350,2	382	31,800	1,245
2	1702,2	1665	-37,00	5,387
3	4495,1	4436	-59,10	9,436

Las incertidumbres son expandidas con un coeficiente k=2

Control de temperatura

Valor referencia (°C)	Valor equipo (°C)
21,3	21,4

Calibración %HR

Condiciones ambientales de calibración: Temperatura ambiente: 20,5 °C, %HR: 73,1 %, Presión atmosférica 1012 hPa

Tolerancias aplicadas: +/- 2,68% HR de 5 a 95%HR

N	V referencia %HR	V Ref. convertido (%HR)	V Equipo %HR	V equipo menos V ref. %HR	Incertidumbre
1	61,3	61,300	60,0	-1,300	1,202

Las incertidumbres son expandidas con un coeficiente k=2

Control de temperatura

Valor referencia (°C)	Valor equipo (°C)
23,43	23,3

Inter-comparación de equipos instrumentales

Para la inter-comparación de mediciones de los equipos, se consideró el Equipo KIMO como patrón secundario y se realizaron mediciones ambientales en distintas condiciones de CO₂, HR y Temperatura., midiendo en paralelo con ambos equipos (KIMO y EXTECH) por períodos no inferiores a una hora de medición a intervalos cortos (máximo 60 segundos).

La data fue procesada con técnicas de correlación para verificar comparabilidad.

Se utilizaron gráficos de Bland Altman para verificar si las diferencias de valores graficadas en función de los promedios de las mediciones, se distribuía dentro de límites superior e inferior determinados por [Promedio de diferencias +/- 1,96 SD], lo que nos permite visualizar gráficamente el grado de concordancia entre las mediciones. Además, se revisaron los gráficos de dispersión para verificar si las mediciones se distribuían en torno a una línea recta.

Por otra parte, para tener mayor certeza de la concordancia entre las mediciones realizadas por ambos equipos, se aplicó el test de correlación intra clase para los conjuntos de datos obtenidos en paralelo en un día de verano y otro de invierno.

Para validar la aplicación del test ICC se realizó prueba de distribución normal de las diferencias de las mediciones que mostraban ambos equipos obteniéndose un resultado que avala la normalidad.

Pruebas de normalidad período invierno

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Dif. CO ₂ K-E	,076	121	,080	,985	121	,215

a. Corrección de significación de Lilliefors

Se muestran a continuación resultados obtenidos en mediciones realizadas en verano de 2016 (25 de noviembre de 2016) e invierno de 2017 (1 agosto 2017).

Figura 3. Mediciones de CO₂ en ambiente cerrado con ventilación, realizadas con equipo KIMO y EXTECH en paralelo en un día de verano (T^o promedio 24,1 °C Rango 24,0-24,3 °C y 42 %HR)

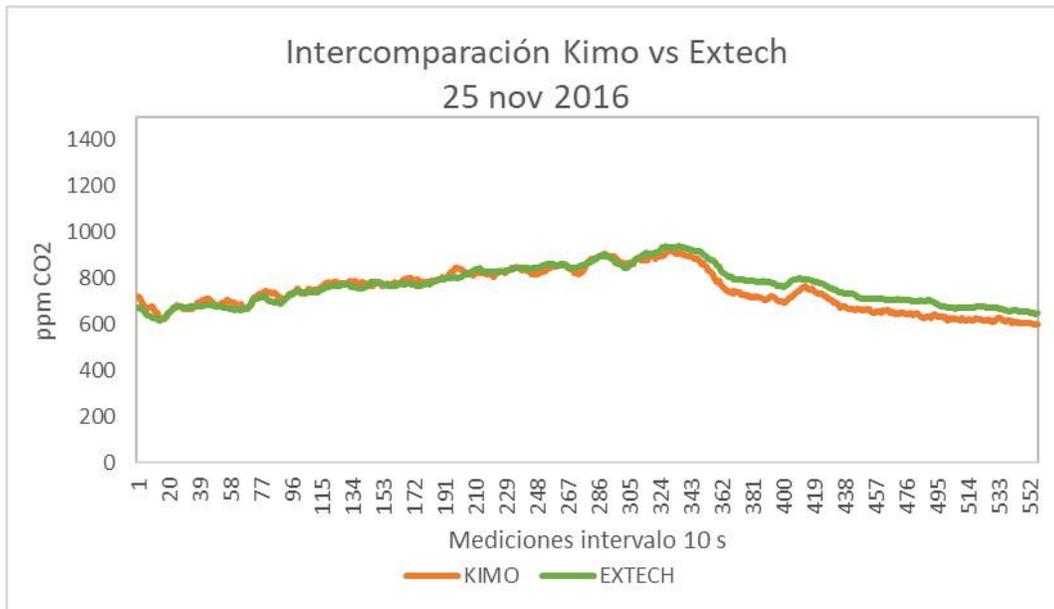


Figura 4. Mediciones de CO₂ en ambiente cerrado con ventilación, realizadas en invierno de 2017 con equipo KIMO y EXTECH en paralelo. (Tº promedio 17,4 °C, Rango 17,2 a 17,6 °C y 54,3%HR).

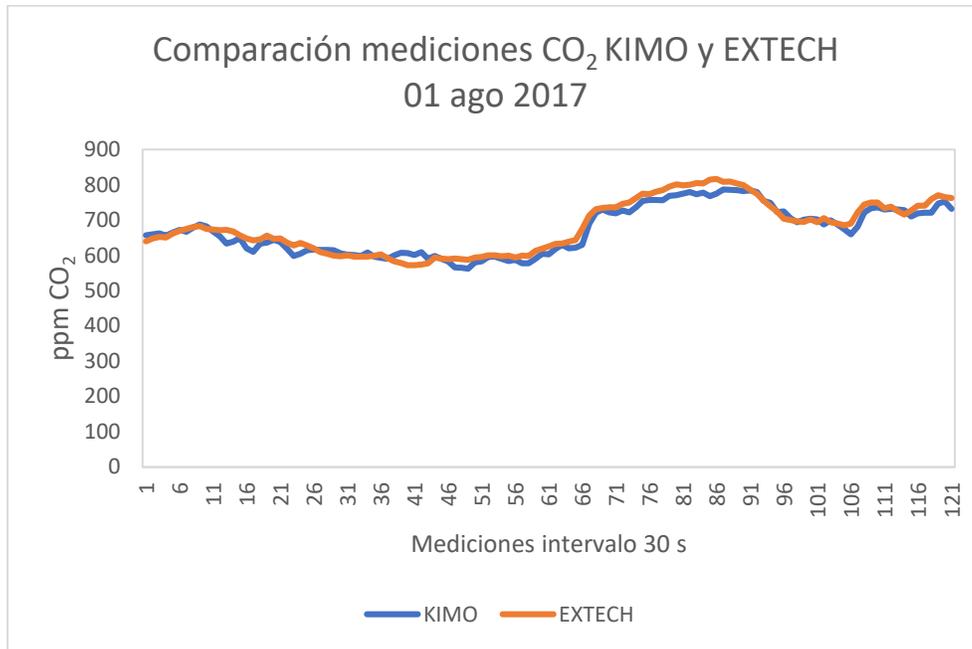


Figura 5. Gráfico de Bland Altman Mediciones de CO₂ KIMO y EXTECH en paralelo verano 2016

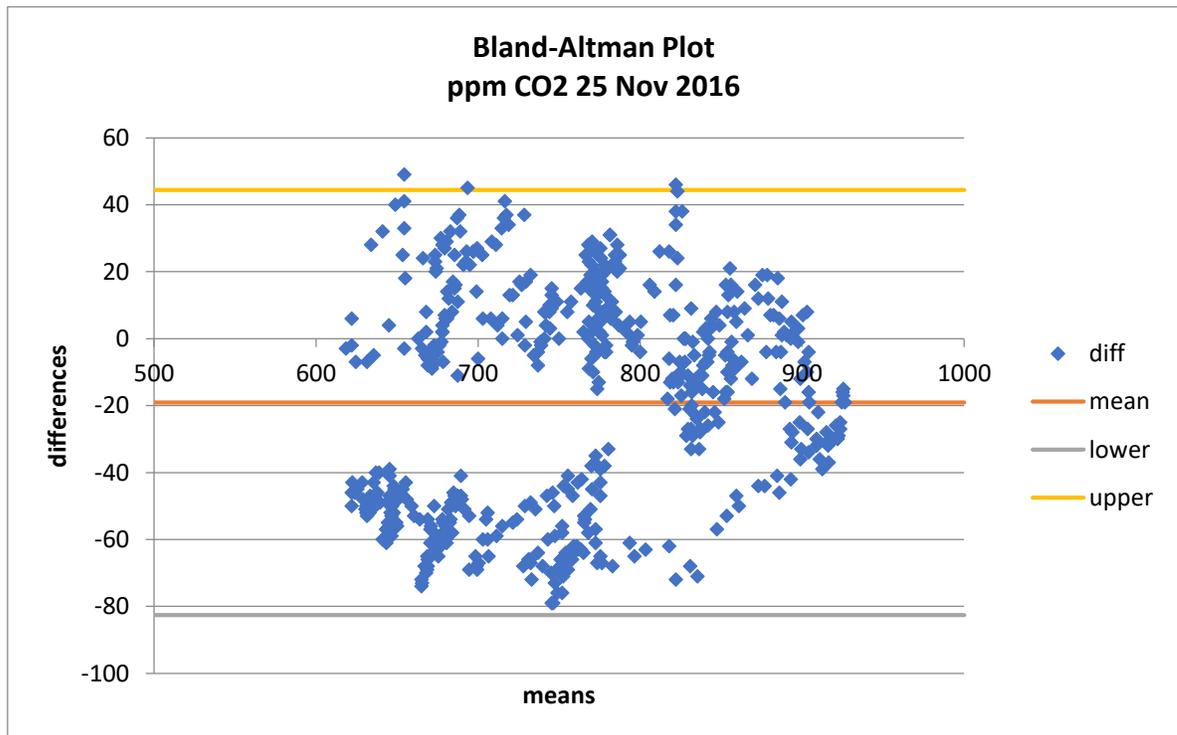


Figura 6. Gráfico de Bland Altman Mediciones de CO₂ KIMO y EXTECH en paralelo invierno 2017

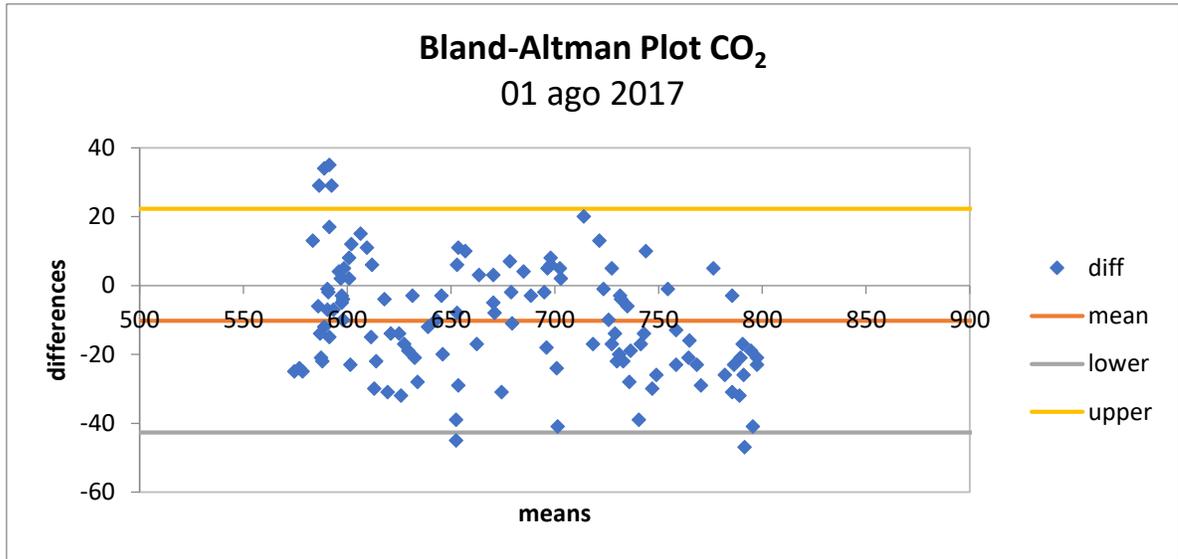


Figura 7. Dispersión de mediciones de concentración realizadas por Kimo vs Extech verano 2016

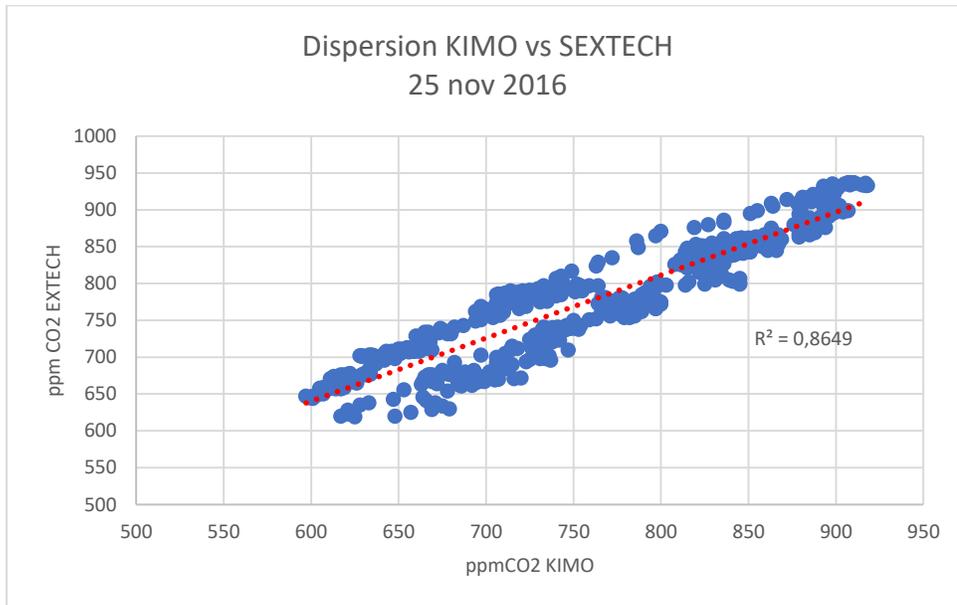


Figura 8 Dispersión de mediciones Kimo vs Extech invierno 2016

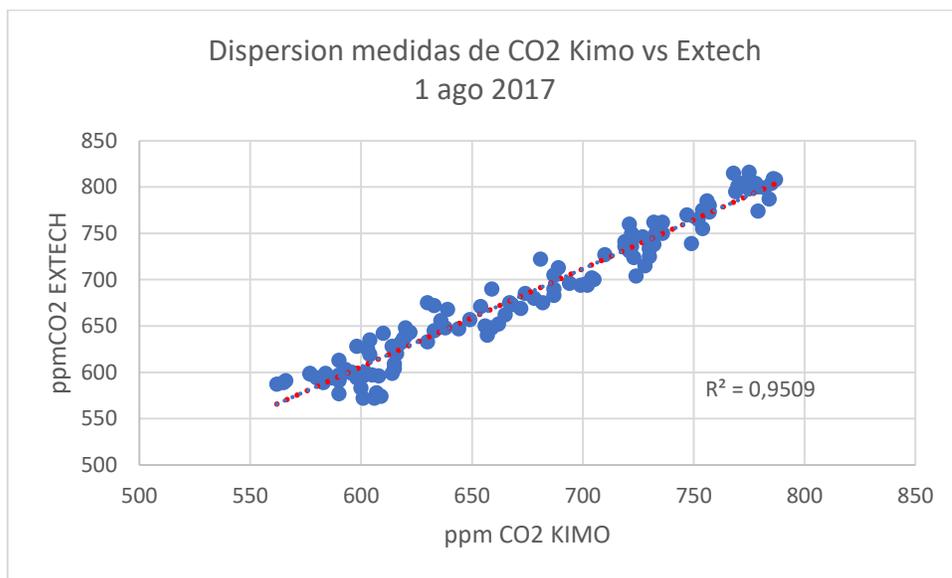


Tabla 6. Análisis de correlación intraclass para las mediciones obtenidas en equipo KIMO vs Equipo EXTECH en un día de verano y otro de invierno.

Intraclass Correlation KIMO vs EXTECH 25 nov 2016		Intraclass Correlation KIMO vs EXTECH 01 Ago 2017	
ICC Case	2	ICC Case	2
ICC Type	1	ICC Type	1
Alpha	0,05	Alpha	0,05
ICC	0,9046	ICC	0,9626
lower	0,7940	lower	0,9043
upper	0,9463	upper	0,9812

Interpretación del análisis de inter-comparación

En las gráficas de variación de CO₂ a través del tiempo (Gráficas XXX y XYY) ,las curvas de ambos equipos son prácticamente coincidentes.

Se puede observar que las gráficas de Bland Altman (Gráficas xxx, y BBBB) para los dos días de medición (verano 2016 e invierno 2017) presentan prácticamente todos los puntos dentro de los límites aceptables de una buena concordancia.

Las gráficas de dispersión de medidas entre los dos equipos muestran que los puntos se distribuyen en torno a una línea recta con $R^2 = 0,8649$ y $R^2 = 0,9509$ para un día de Verano y otro de invierno respectivamente.

El test de correlación intra clase (ICC) entrega valores de 0,9046 y 0,9626 para mediciones realizadas el 25 nov 2016 y 1 ago 2017, respectivamente, lo que se considera una concordancia excelente⁶.

En conclusión, todos las gráficas y test estadísticos aplicados a mediciones de inter-comparación de valores de CO₂ que entregan los dos equipos cuando se mide en una misma condición, son plenamente concordantes entre sí.

3.5. Bitácoras de viajes para correlacionar eventos

Con el fin de poder interpretar con certeza los datos registrados por los equipos en el proceso de análisis de información, se confeccionó una ficha de terreno que contiene datos del viaje, bus, equipo de medición. Además cuenta con una bitácora de viaje en que se iban registrando eventos que pudieran alterar las concentraciones de CO₂, CO, HR o Temperatura.

Se anotaron eventos tales como, apertura de ventanas y puertas, encendido de aire acondicionado, ingreso de pasajeros, paso por túneles, tránsito en zonas congestionadas, entre otros. Cada evento era registrado con hora de inicio y término. (Ver Anexo 1).

Por otra parte, se realizó una encuesta de respuesta voluntaria a cada conductor para caracterizar a los trabajadores participantes del estudio. (Ver anexo 1)

4. Resultados

4.1. Niveles Background CO₂

Con el fin de tener una referencia de niveles de CO₂ de aire limpio se midió concentración en distintas fechas por 1 hora a intervalos de 15 segundos al medio día en zonas urbanas y zonas no urbanas (Rural y costa).

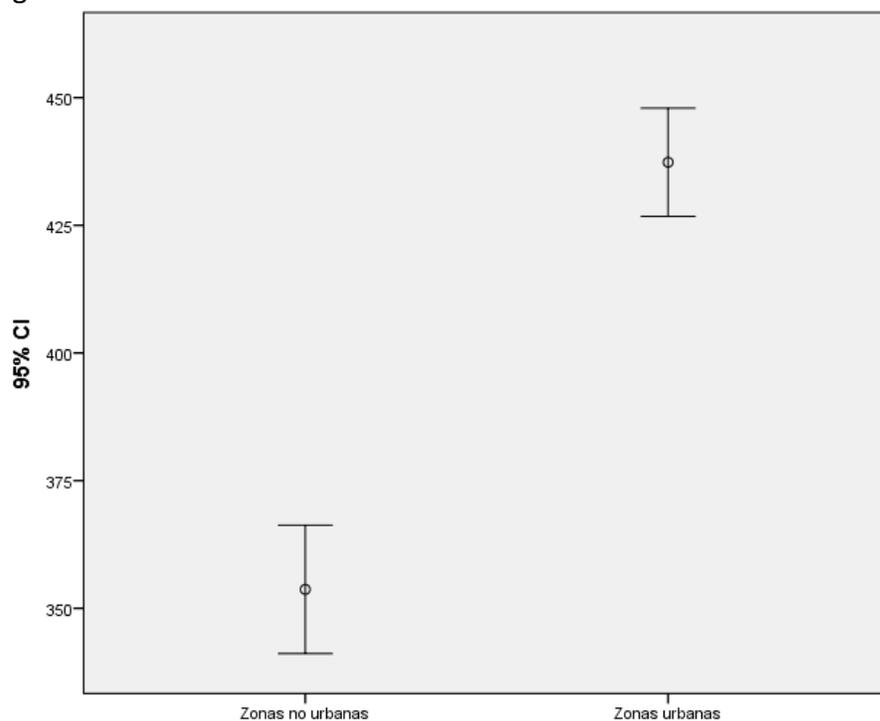
Los valores promedios obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

⁶ Terry K. Koo, PhD , Mae Y. Li, BPS *A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research* Journal of Chiropractic Medicine (2016) 15, 155–163.

Tabla 7. Concentraciones de CO2 en aire limpio

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Zonas no urbanas	20	306	391	353,70	26,882
Zonas urbanas	30	406	513	454,77	31,950

Figura 9. Gráfico de barras de error concentraciones medias de CO2 en aire limpio



Los promedios de nivel background resultaron de 353 ppm en zonas no urbanas y 455 en zonas urbanas de baja congestión vehicular. Se define baja congestión vehicular las zonas en que aplicaciones de mapas de teléfonos móvil marcan en verde en tiempos prolongados y durante todo el período de medición.

4.2. Análisis de Parámetros de Índice de Calidad de Aire Interior (IAQ) en período invernal y estival.

Se presentan a continuación los resultados de promedios de los parámetros en el conjunto de viajes (94) y por separado (viajes cortos, medios y largos) y por período verano e invierno.

Se determinaron los promedios de concentraciones de cada uno de los viajes (campañas) del conjunto de mediciones tomadas a intervalos regulares.

Tabla 8.: Cuadro de valores de los rangos y medias de los promedios de cada parámetro obtenidos en el conjunto de 94 viajes de ambos períodos, verano e invierno.

Estadísticos descriptivos globales					
Parámetro	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Tiempo Minutos.	94	76	642	165,76	116,075
Km Recorridos	94	46,0	806,0	185,087	149,5017
Nº Pasajeros transportados	92	12	60	33,95	11,958
Promedio CO	94	,0000	,3764	,017314	,0523712
Promedio CO2	94	486	2621	1073,37	378,889
Prom %HR	94	28,9	67,5	48,556	9,0689
Prom T °C	94	14,4	30,1	21,990	3,2675

Tabla 9. rangos y medias de los promedios de cada parámetro obtenidos en el conjunto de 54 viajes realizados en período de verano.

Estadísticos descriptivos Verano					
Parámetro	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Tiempo Minutos.	54	76	642	188,63	142,165
Km Recorridos	54	86,6	806,0	216,120	183,8567
Nº Pasajeros transportados	53	12	60	33,53	11,345
Promedio CO	54	,0000	,2690	,017944	,0455691
Promedio CO2	54	486	2621	1070,62	403,435
Prom %HR	54	28,9	66,1	45,759	9,3688
Prom T °C	54	17,7	30,1	23,658	2,7952

Tabla 10. Rangos y medias de los promedios de cada parámetro obtenidos en el conjunto de 40 viajes realizados en período de invierno.

Estadísticos descriptivos Invierno					
Parámetro	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Tiempo Minutos.	40	80	340	134,88	54,411
Km Recorridos	40	46,0	314,5	143,193	65,0117
Nº Pasajeros transportados	39	13	60	34,51	12,874
Promedio CO	40	,0000	,3764	,016463	,0609683
Promedio CO2	40	608	1862	1077,07	348,019
Prom %HR	40	36,6	67,5	52,332	7,1685
Prom T °C	40	14,4	25,1	19,739	2,4062

Como se observa en los dos últimos cuadros (Tabla 9 y 10) no hay diferencias significativas en las medias de los parámetros CO, CO₂, T° y %HR entre invierno y verano. Sin embargo, al desagregar en viajes cortos, medios y largos, si se observan diferencias entre invierno y verano como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 10. Distribución de concentraciones promedios de CO₂ en conjuntos de viajes cortos, medios y largos realizados en período estival.

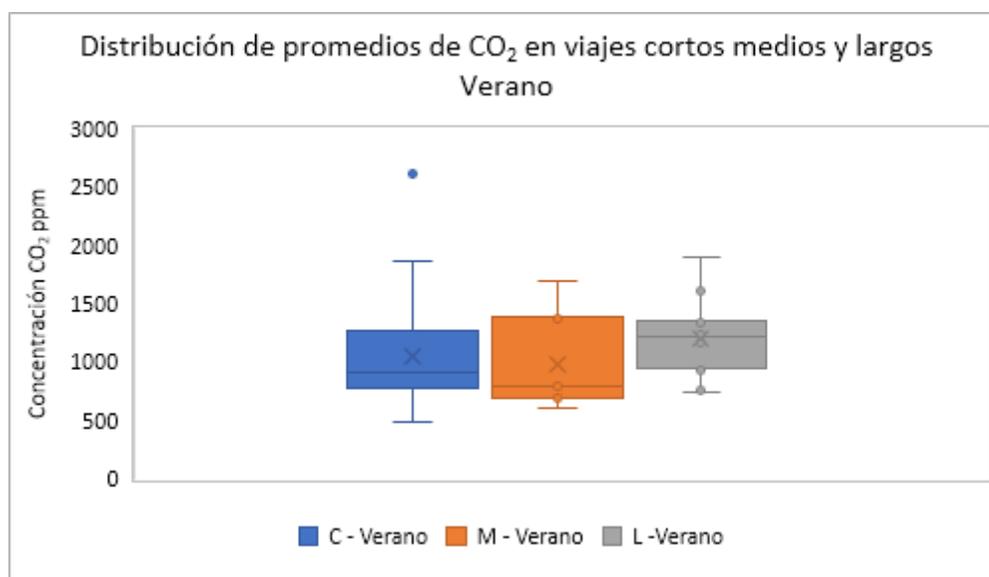


Figura 11. Distribución de concentraciones promedio de CO₂ en conjuntos de viajes cortos, medios y largos realizados en período invernal.

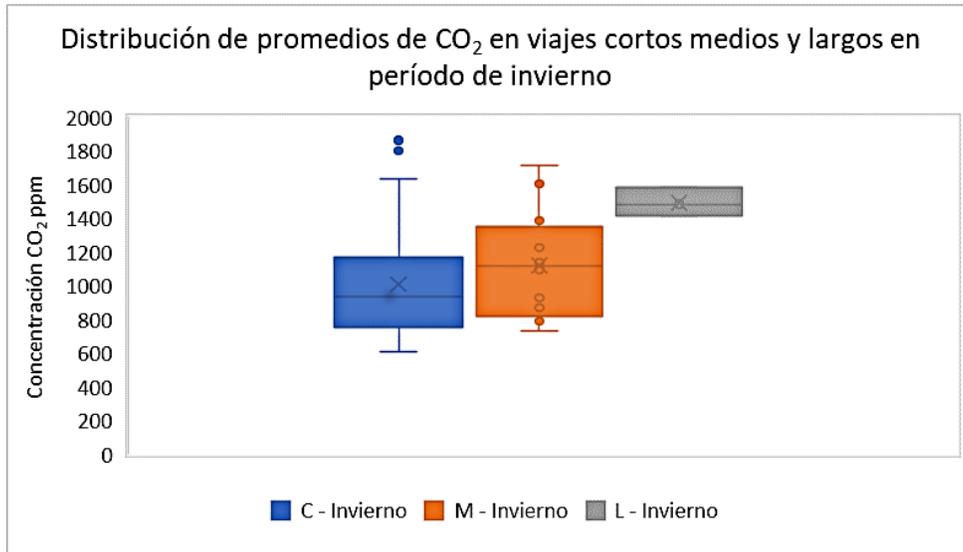
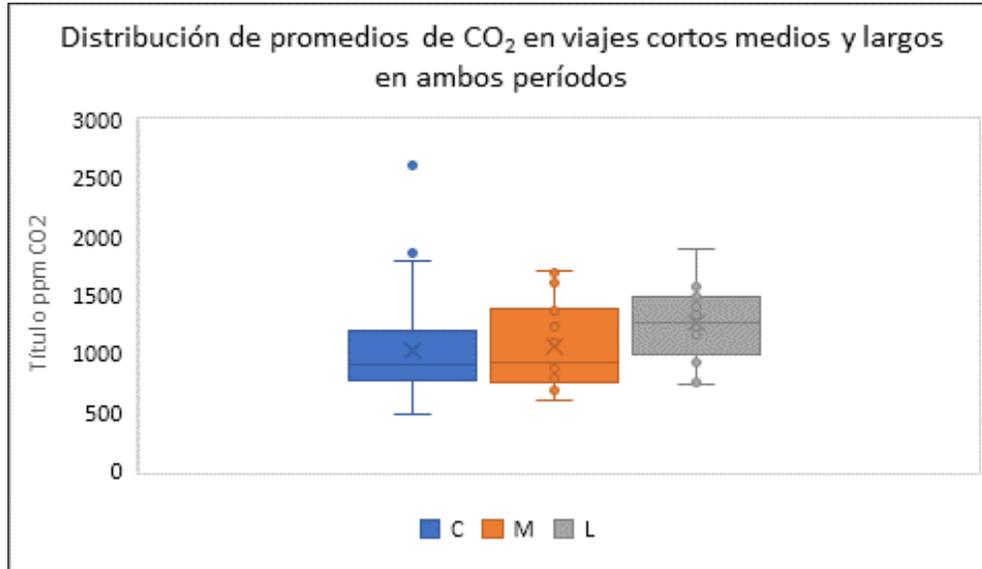


Figura 12. Distribución de concentraciones promedio de CO₂ en conjuntos de viajes cortos, medios y largos realizados en ambos períodos.



Como se observa en la figura 11 las Concentraciones de CO₂ en viajes largos en período invernal es significativamente más alta que en viajes cortos.

4.3. Correlación entre número de pasajeros y concentración de CO₂

Para responder a la pregunta de investigación y afirmar o rechazar la hipótesis nula se tomaron los datos de número de pasajeros transportados para correlacionar con las concentraciones promedios de CO₂ en los viajes.

Se aplicaron test de normalidad con el fin de decidir qué estadístico utilizar para verificar correlaciones entre número de pasajeros transportados y concentraciones medias de CO₂.

Los resultados de las pruebas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Pruebas de normalidad para Número de pasajeros y concentraciones medias de CO₂

	Tipo viaje (C_M_L)	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk.		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Nº Pasajeros transportados	C	,085	57	,200*	,978	57	,398
	L	,190	15	,151	,935	15	,319
	M	,164	20	,165	,918	20	,091
Promedio CO ₂	C	,197	57	,000	,846	57	,000
	L	,118	15	,200*	,973	15	,906
	M	,182	20	,080	,893	20	,030

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors.

Dado que la muestra es de 57 en viajes cortos y menores que 50 en viajes largos y medios, se analiza la prueba de Shapiro-Wilk. Se observa que la distribución de número de pasajeros transportados en los tres factores (C-L-M) presentan valores $p > 0,05$ por tanto se puede deducir que siguen una distribución normal, mientras que las concentraciones de CO₂ no siguen un patrón normal en dos de los factores (viajes cortos y medios).

Por esta razón se analizará la correlación utilizando estadístico no paramétrico Rho de Spearman

Tabla 12. Estudio de correlación cantidad de pasajeros y concentraciones de CO₂ para viajes cortos

			Correlaciones viajes cortos (C)	
			Nº Pasajeros transportados	Promedio CO2
Rho de Spearman	Nº Pasajeros transportados	Coeficiente de correlación	1,000	,378**
		Sig. (bilateral)	.	,004
		N	57	57
	Promedio CO2	Coeficiente de correlación	,378**	1,000
		Sig. (bilateral)	,004	.
		N	57	58

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Tabla 13. Estudio de correlación Cantidad de pasajeros y concentraciones de CO₂ para viajes medios

			Correlaciones Viajes medios (M)	
			Nº Pasajeros transportados	Promedio CO2
Rho de Spearman	Nº Pasajeros transportados	Coeficiente de correlación	1,000	,584**
		Sig. (bilateral)	.	,007
		N	20	20
	Promedio CO2	Coeficiente de correlación	,584**	1,000
		Sig. (bilateral)	,007	.
		N	20	21

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Tabla 14. Estudio de correlación Cantidad de pasajeros y concentraciones de CO₂ para viajes largos

Correlaciones viajes largos (L)

			Nº Pasajeros transportados	Promedio CO2
Rho de Spearman	Nº Pasajeros transportados	Coeficiente de correlación	1,000	-,005
		Sig. (bilateral)	.	,985
		N	15	15
	Promedio CO2	Coeficiente de correlación	-,005	1,000
		Sig. (bilateral)	,985	.
		N	15	15

El análisis de correlación entre número de pasajeros transportados y concentraciones medias de CO₂ muestra valores $p < 0,05$ que indican una correlación significativa entre el Nº de pasajeros y la concentración de CO₂ (viajes cortos y medios) sin embargo, los coeficientes de correlación son bajos o incluso negativos.

Para viajes largos el valor de significancia resultó 0,99 por tanto no existe un nivel aceptable de probabilidad para la correlación.

Se muestran a continuación los gráficos de dispersión de promedios de CO₂ versus el número de pasajeros transportados:

Figura 13. Gráfico de dispersión ppm CO2 en función de N° pasajeros transportados, viajes cortos

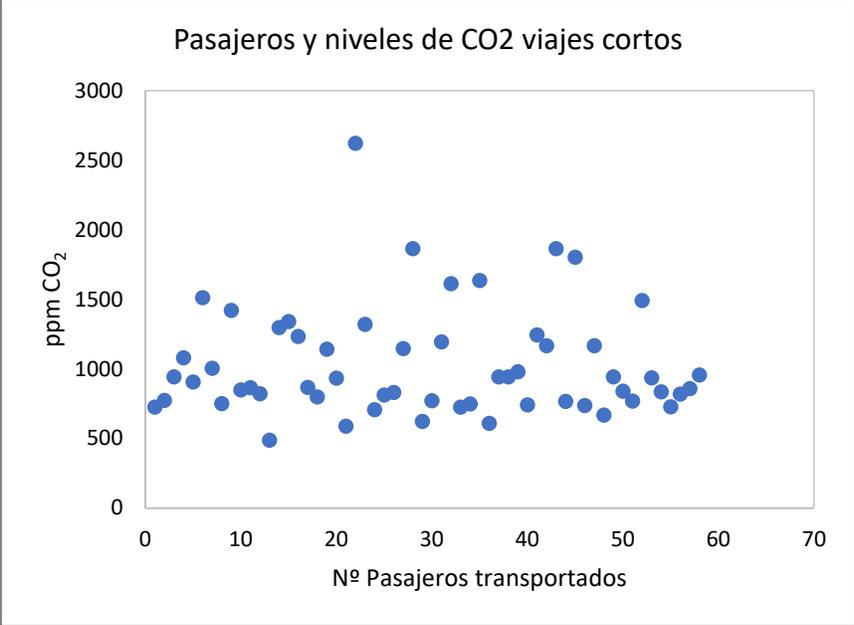


Figura 14. Gráfico de dispersión ppm CO2 en función de N° pasajeros transportados, viajes medios

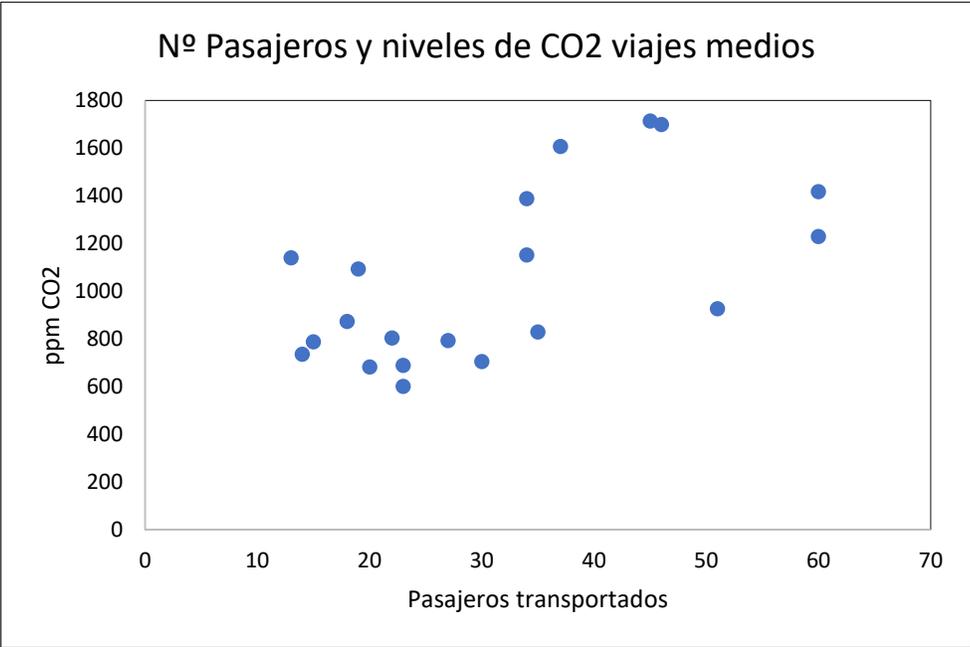
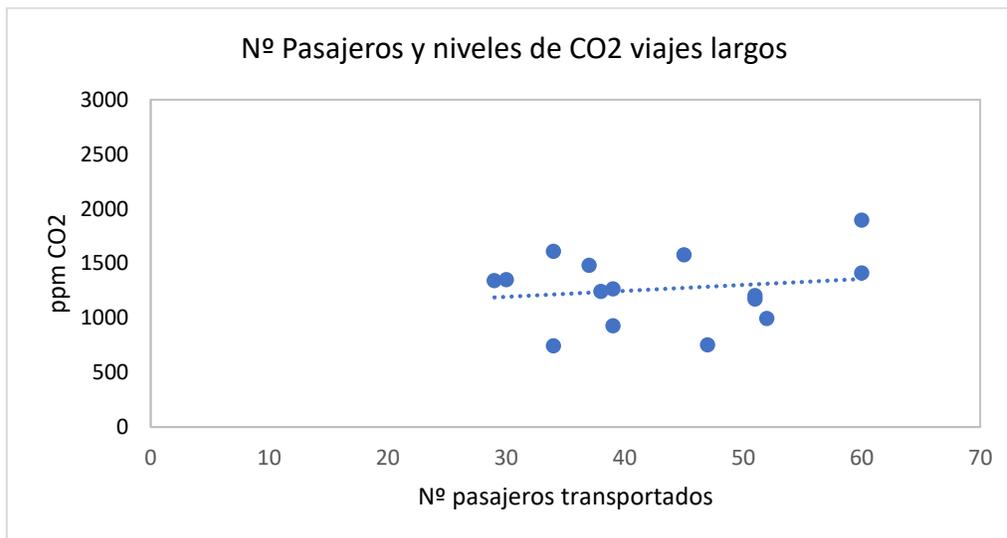


Figura 15. Gráfico de dispersión ppm CO2 en función de N° pasajeros transportados, viajes largos



No resulta significativa la correlación entre número de pasajeros y niveles de concentración de CO2. Es decir, el número de pasajeros transportados no es un factor muy incidente en la contaminación de las cabinas de conductores, probablemente porque dichos espacios están segregados del salón de pasajeros y porque hay otros factores de mayor incidencia.

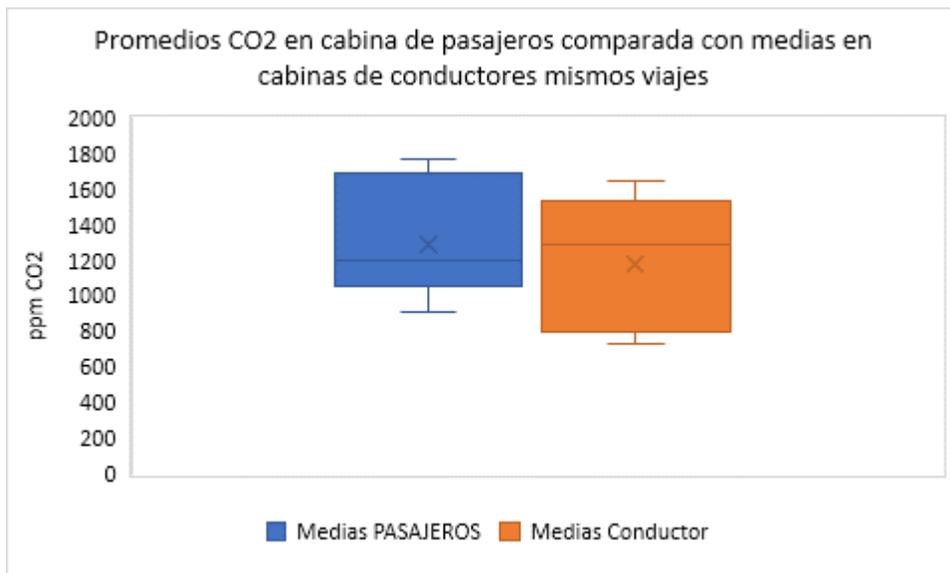
4.4. Comparación entre concentraciones en cabina de conductores y salón de pasajeros.

Con el fin de estudiar la influencia en las concentraciones de CO2 en la cabina del conductor, que podrían tener los pasajeros en el interior del bus mientras transcurre el viaje se hicieron mediciones con dos equipos en paralelo en 10 viajes.

Tabla 15. Promedios de CO2 en cabina y salón de pasajeros

Campaña	N registros	Medias CO ₂ PASAJEROS	Medias CO ₂ Conductor	N Pasajeros
A	307	1178	1642	34
B	205	1226	817	35
C	95	1731	1546	39
D	301	1215	817	34
E	62	1085	725	47
F	211	1016	734	42
G	256	1764	1328	60
H	229	1059	1346	34
I	125	904	1252	34
J	257	1668	1521	45

Figura 16. Distribución de los promedios de CO₂ medidos paralelamente en Cabina de conductor y Salón de Pasajeros



Análisis de diferencias de concentraciones en Cabina de conductor y Salón de pasajeros. Mediante prueba de Wilcoxon de los rangos con signo.

Tabla 16. Resultado de test Wilcoxon para comparación de promedios de CO₂ en cabina de conductor y salón de pasajeros

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Medias Conductor - Medias PASAJEROS	Rangos negativos	7 ^a	5,14	36,00
	Rangos positivos	3 ^b	6,33	19,00
	Empates	0 ^c		
	Total	10		

a. Medias Conductor < Medias PASAJEROS

b. Medias Conductor > Medias PASAJEROS

c. Medias Conductor = Medias PASAJEROS

Estadísticos de prueba^a	
	Medias Conductor - Medias PASAJEROS
Z	-,866 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,386

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo

b. Se basa en rangos positivos.

Se concluye que no hay diferencias significativas en que la cabina de pasajeros tenga mayores concentraciones que la cabina del conductor o viceversa.

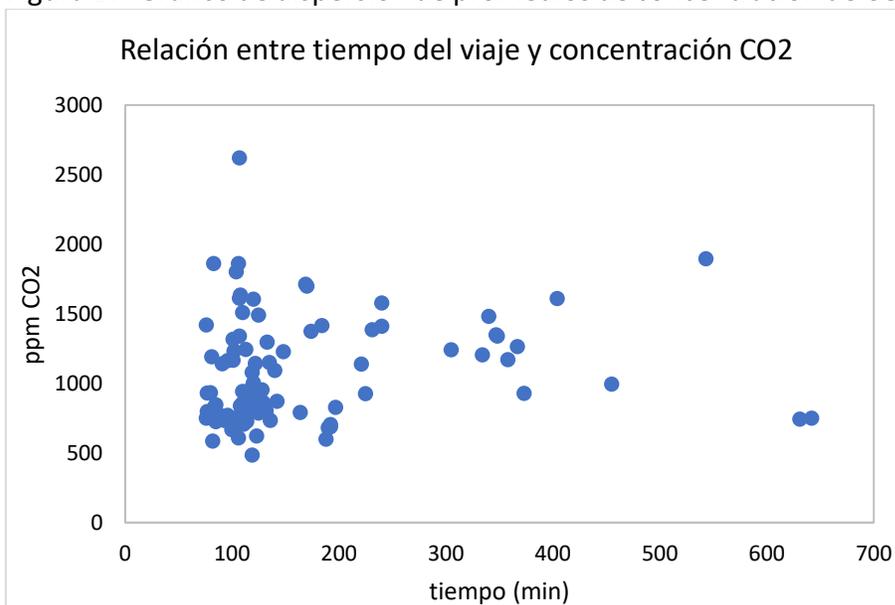
4.5. Correlaciones entre tiempo de viaje y concentración de CO₂

Al analizar la correlación entre los tiempos de viaje y las concentraciones promedios de CO₂ en cada uno de ellos mediante el estadístico Rho de Spearman se deduce que tal correlación no es significativa ($p > 0,05$) dado que hay gran dispersión en los datos.

Tabla 17. Análisis de correlación de Spearman de tiempos de viajes con concentraciones promedios de CO₂

Correlaciones entre tiempo y concentración CO ₂ (total de viajes)			Tiempo Minutos.	Promedio CO2
Rho de Spearman	Tiempo Minutos.	Coeficiente de correlación	1,000	,172
		Sig. (bilateral)	.	,097
		N	94	94
	Promedio CO2	Coeficiente de correlación	,172	1,000
		Sig. (bilateral)	,097	.
		N	94	94

Figura 17. Gráfico de dispersión de promedios de concentración de CO₂ vs tiempos de viajes



4.6. Factores externos incidentes en la concentración de CO₂

Se estudió la posible incidencia de factores especiales externos que podrían condicionar la concentración de CO₂ al interior de las cabinas de conductores. Se consideraron dos factores: paso por túneles y circulación por calles y caminos con alta congestión vehicular debido a que es conocido que los vehículos con motor a combustión interna emiten gases con altas concentraciones de CO₂.

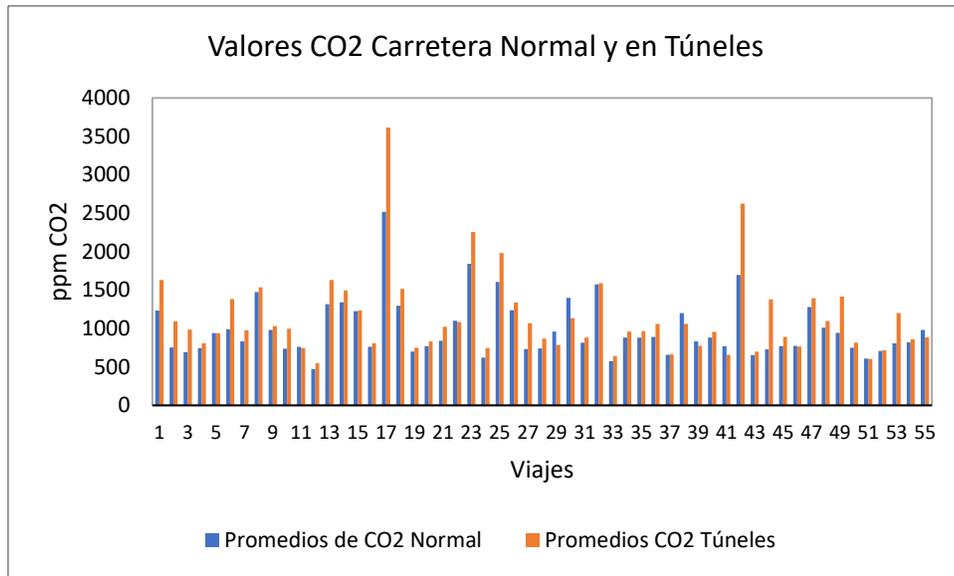
Los valores promedio de túneles y de zonas de congestión vehicular, se compararon con promedios de zonas que denominamos “carretera normal”⁷.

Se extrajeron muestras pareadas de los viajes donde se pasaba por al menos un túnel con trayecto de 1 minuto o más y se comparó con los promedios de carretera “normal”.

Por otra parte, se separaron los períodos de congestión vehicular y se comparó con los promedios de carretera normal.

a) Comparación de concentraciones de CO₂ al pasar por túneles versus carretera normal

Figura 18. promedios de CO₂ en túneles y en carretera normal



⁷ Para efectos de este estudio denominamos carretera “normal” a una condición de viaje no afectada por túneles o por congestión vehicular.

Figura 19. Distribución de las concentraciones de CO₂

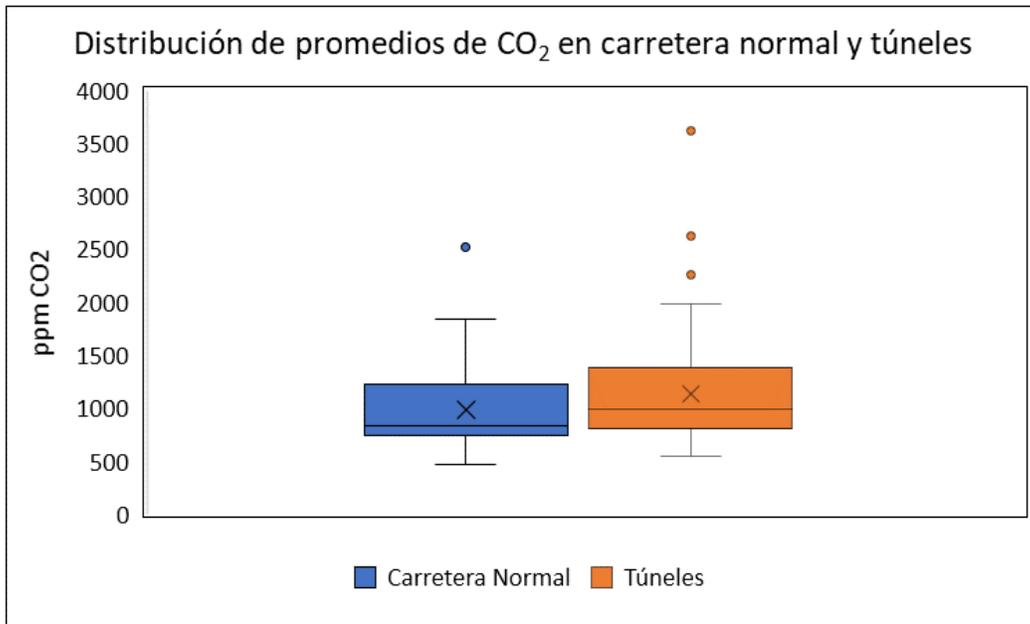


Tabla 18. Valores de medias y rangos de concentraciones promedios en zonas de Carretera Normal y Túneles.

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Carretera Normal	55	470	2515	982,53	371,683
Túneles	55	547	3613	1133,07	532,632
N válido (por lista)	55				

La media obtenida de los promedios de CO₂ en túneles resultó un 15% más alta que en carretera normal.

Para saber si las diferencias de concentraciones obtenidas en túneles y carretera normal eran significativas, se analizó la muestra utilizando la prueba de Wilcoxon de los rangos con signo, dado que se trata de una distribución no normal de muestras pareadas.

Tabla 19. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo para la comparación de diferencias de niveles de CO2 en Túneles y en Carretera

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Túneles - Carretera Normal	Rangos negativos	11 ^a	18,91	208,00
	Rangos positivos	44 ^b	30,27	1332,00
	Empates	0 ^c		
	Total	55		

a. Túneles < Carretera Normal

b. Túneles > Carretera Normal

c. Túneles = Carretera Normal

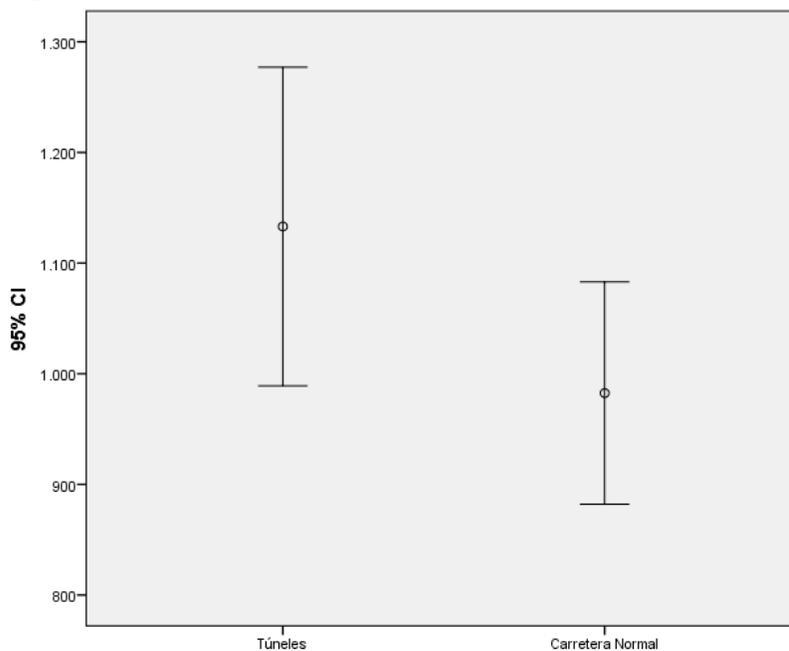
Estadísticos de prueba^a

	Túneles - Carretera Normal
Z	-4,709 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo

b. Se basa en rangos negativos.

Figura 20. Gráfico de barras de intervalos de error concentración túneles vs. Concentración CO₂ en carretera normal



De acuerdo con la significancia obtenida ($p < 0,05$) se rechaza la hipótesis de que la mediana de las diferencias entre Carretera Normal y Túneles es igual a 0 por tanto se puede concluir

que hay una diferencia significativa de concentraciones en túneles mayor que en carretera normal.

b) Comparación de concentraciones de CO₂ en zonas congestionadas versus carretera normal.

Figura 21. Comparación de los Valores promedios de CO₂ en carretera normal y en zonas congestionadas.

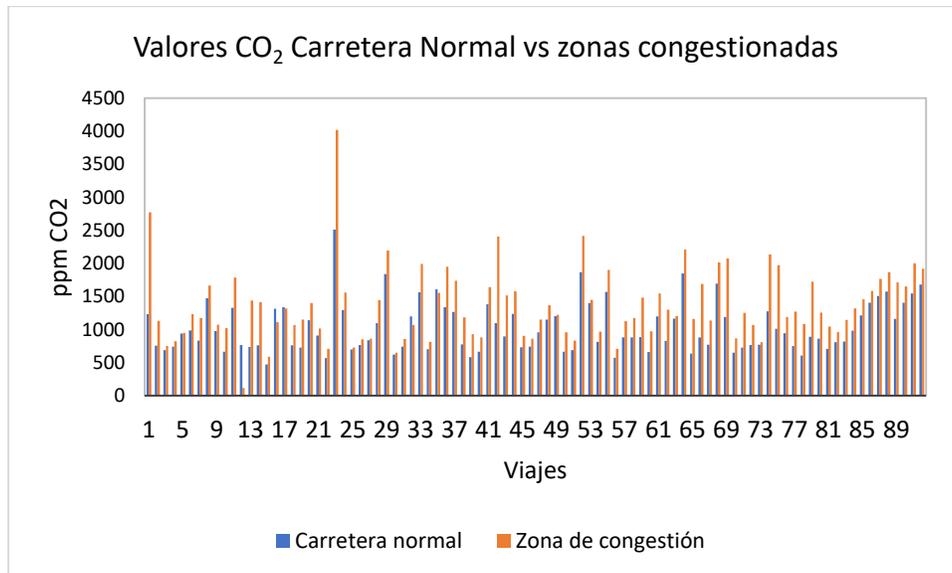


Figura 22. Diagrama de cajas comparación de concentraciones de CO₂ en carretera normal y en zonas congestionadas.

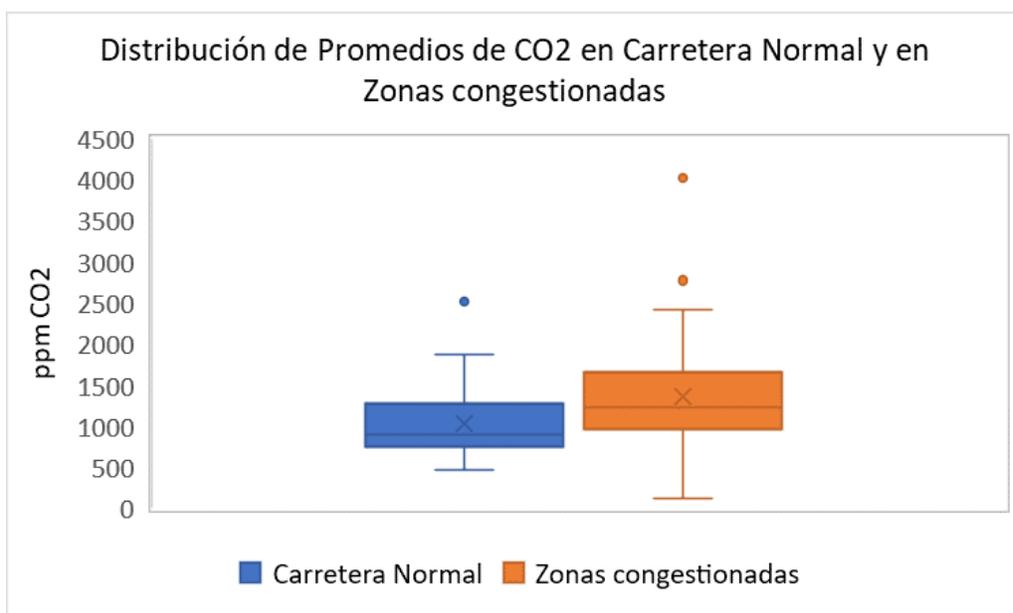


Tabla 20. Valores de medias y rangos de concentraciones promedios en zonas de Carretera Normal y zonas congestionadas.

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Congestión	92	114	4020	1358,93	549,835
Normal	92	470	2515	1030,40	375,500
N válido (por lista)	92				

La media obtenida de los promedios de CO₂ en zonas congestionadas resultó un 32% más alta que en carretera normal.

Al igual que en el caso anterior analizado, para saber si las diferencias de concentraciones obtenidas en zonas de congestión vehicular y carretera normal eran significativas, se analizó la muestra utilizando la prueba de Wilcoxon de los rangos con signo, dado que se trata de una distribución no normal de muestras pareadas.

Tabla 21. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo para la comparación de diferencias de niveles de CO₂ en zonas congestionadas y en Carretera.

Rangos				
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Normal - Congestión	Rangos negativos	87 ^a	47,51	4133,00
	Rangos positivos	5 ^b	29,00	145,00
	Empates	0 ^c		
	Total	92		

a. Normal < Congestión

b. Normal > Congestión

c. Normal = Congestión

Estadísticos de prueba^a

	Normal - Congestión
Z	-7,764 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo

b. Se basa en rangos positivos.

De acuerdo con la significancia obtenida ($p < 0,05$) la mediana de las diferencias entre Carretera Normal y zonas congestionadas es diferente de 0. Se concluye que hay una diferencia significativa de concentraciones en zonas congestionadas mayores que en carretera normal.

4.7. Porcentaje del tiempo de viajes en que las concentraciones de CO₂ se mantuvieron por sobre 1000 ppm y sobre 2500 ppm.

Además de las concentraciones promedios de los viajes es importante conocer que tiempo las concentraciones se han mantenido elevadas.

Se eligieron dos puntos de corte:

- concentraciones mayores que 1000 ppm CO₂ donde podrían presentarse alguna disminución del rendimiento mental, tales como: iniciativa, uso de información
- concentración mayores de 2500 ppm de CO₂ en que los individuos presentan francas pérdidas de iniciativa, usos de información y pensamiento estratégico.

Algunos estudios de efectos cognitivos producidos por CO₂ se han realizado en individuos con exposiciones controladas. Para concentraciones entre 1400 a 3000 ppm por períodos de 2,5 a 8 hr. Se ha encontrado que hay deterioro significativo de la función cognitiva, incluida la fatiga, el dolor de cabeza y alteración visual (Kajtar, L et al 2014).

Se muestran a continuación el número de viajes en que el CO₂ estuvo, a concentraciones mayores que 1000 y mayores que 2500 ppm, en un porcentaje dado de tiempo.

Tabla 22. Número de viajes y porcentajes de tiempo del viaje en que las concentraciones estuvieron por sobre los 1000 ppm para viajes cortos, medios y largos.

% del Tiempo de viaje en que se mantuvo concentración mayor que 1000 ppm	Nº de viajes Cortos	Nº de viajes Medios	Nº de viajes Largos
0-19%	22	5	1
20 - 39%	11	6	4
40 - 59%	9	2	0
60 - 79%	5	0	5
80 - 100%	11	8	5

Tabla 23. Número de viajes y porcentajes de tiempo del viaje en que las concentraciones estuvieron por sobre los 2500 ppm para viajes cortos, medios y largos.

% del Tiempo de viaje en que se mantuvo concentración mayor que 2500 ppm	Nº de viajes Cortos	Nº de viajes Medios	Nº de viajes Largos
0-19%	56	21	15
20 - 39%	1	0	0
40 - 59%	1	0	0
60 - 79%	0	0	0
80 - 100%	0	0	0

Se puede observar en la Tabla 22 que de los 58 viajes cortos realizados, 25 de ellos mantuvieron concentraciones superiores a 1000 ppm por más del 40% del viaje (por sobre 40 minutos aproximadamente). Uno de ellos tuvo concentraciones por sobre 2500 ppm durante 46,5% del tiempo de viaje.

De los viajes medios (duración 2 a 4 horas), de un total de 21 realizados, 10 viajes mantuvieron concentraciones por sobre 1000 ppm por más del 40 % del tiempo, correspondiente a períodos de más de 60 minutos.

En viajes largos, de los 15 realizados, 10 de ellos tuvieron concentraciones por sobre los 1000 ppm de CO₂ durante más del 60% del tiempo (correspondiente a más de 4 horas).

Al desagregar los datos según el período de medición (invierno y verano) y calcular los promedios de tiempos en que las concentraciones se mantuvieron por sobre 1000 y 2500 ppm de CO₂, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 24. Promedio de tiempo en que las concentraciones se mantuvieron por sobre 1000 y 2500 ppm de CO₂ según periodo de medición y tipo de viaje.

Período	C > 1000	C > 2500	M > 1000	M > 2500	L > 1000	L > 2500
Invierno	40,77%	1,88%	56,17%	0,35%	88,18%	4,19%
Verano	38,70%	1,81%	35,31%	1,60%	58,19%	2,07%

Los promedios de tiempo en que las concentraciones se mantuvieron en niveles superiores a 1000 ppm CO₂ resultaron mayores en período de invierno que en verano.

Respecto a los promedios de tiempos en que las concentraciones estuvieron por sobre 2500 ppm CO₂, se observa que para viajes cortos y largos resultaron mayores en invierno que verano, pero para viajes de duración media, tal relación se invierte.

Cabe hacer notar que las observaciones señaladas en los párrafos anteriores no dan cuenta de una conclusión estadísticamente significativa debido a que el diseño del estudio tenía fines distintos.

4.8. Otros hallazgos observados

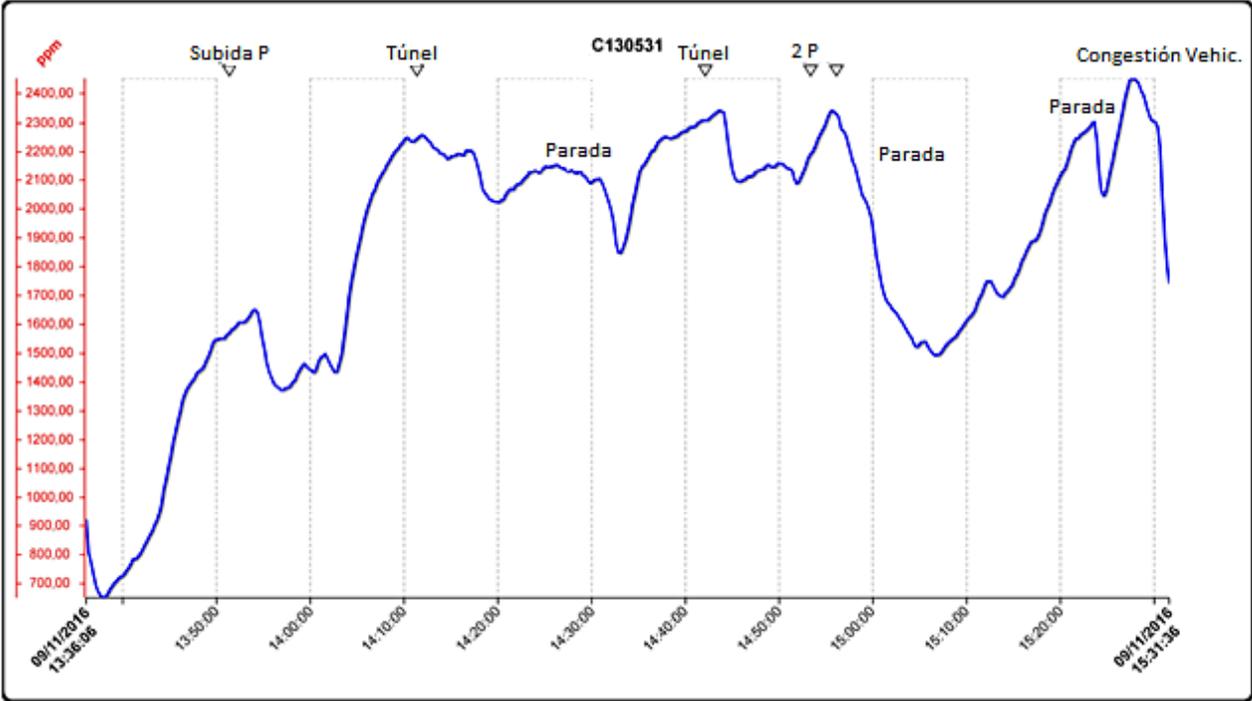
Al observar la evolución de las concentraciones de CO₂ en el transcurso de un viaje, se manifestaron valores peak en zonas de congestión vehicular y túneles como factores externos al vehículo, tal como se ha demostrado en punto 4.6. Además, se evidenciaron alzas de concentración cuando había presencia de otras personas en cabina (fiscalizadores, ayudantes, otros).

Otro factor que provocaba aumento de concentraciones (aunque por períodos cortos) eran los momentos de subida de pasajeros en terminales intermedios.

En las paradas, ante la apertura de puertas, se notaron disminuciones evidentes.

Se muestra a continuación la variación de CO₂ medida en cabina en uno de los viajes.

Figura 23. Evolución de concentraciones de CO₂ (ppm) a lo largo de un viaje Corto (Santiago–Viña del Mar) realizado el 9 de noviembre de 2016 entre 13:36 y 15:31.



5. Conclusiones

5.1 Conclusiones generales respecto a las preguntas de investigación e hipótesis formuladas.

1. Conclusiones sobre la pregunta ¿Están los conductores de buses interurbanos expuestos a concentraciones elevadas de CO₂ por sobre las recomendaciones internacionales para calidad de aire interior?
 - a. La concentración promedio obtenida del total de mediciones alcanzó un valor de conjunto de 1073 ppm lo que representa un valor aceptable en espacios cerrados en el rango recomendado (1000 a 1200 ppm CO₂).
 - b. A pesar de que el promedio global está dentro del valor recomendable, hubo 31 viajes (33%) cuyos promedios superaron 1200 ppm, fluctuando entre 1206 y 2621 ppm. Los viajes que superaron 1200 ppm de CO₂ se distribuyen en una proporción significativamente equivalente a la proporción del total de viajes (12 de invierno y 19 de verano).
2. ¿Cuánto incide el tiempo de conducción y la cantidad de pasajeros en el deterioro de la calidad de aire interior en las cabinas de buses interurbanos?
 - a. No se encontró correlación estadísticamente significativa entre el número de pasajeros transportados y los niveles de CO₂ alcanzados como promedio en cada viaje. Por tanto, el número de pasajeros transportados no resultó ser un factor muy incidente en la contaminación de las cabinas de conductores en ningún tipo de viaje corto, medio o largo de este tipo de buses de cabina segregada.
 - b. No se encontró una correlación estadísticamente significativa entre el tiempo de conducción y las concentraciones promedios de CO₂.
 - c. Las variaciones de CO₂ experimentadas deben explicarse a través de otros factores incidentes.
 - d. No se encontraron evidencias estadísticamente significativas de que las concentraciones en salón de pasajeros sean mayores que en cabina de conductor o viceversa.
3. Relación de temperatura y humedad relativa con las recomendaciones internacionales.

Conclusiones respecto a temperaturas.

- a. Las temperaturas promedio del conjunto de viajes de verano e invierno estuvieron en los rangos de ambientes interiores recomendables (20 y 24 °C en invierno y verano respectivamente).
- b. No obstante ello, los promedios inferiores y superiores exceden los rangos recomendables (19 a 27 °C)⁸. Es decir, hubo viajes en que el promedio de temperatura en el interior de cabina fue más bajo de lo recomendable (6,4 % resultaron menor que 19°C) y otros cuyo promedio fue mayor que el límite superior recomendable (6,4 % resultaron mayor que 27°C).

Conclusiones respecto a Humedad Relativa

- a. La humedad relativa tanto en invierno como en verano están dentro del rango recomendable (30 a 60%).
- b. En invierno el % HR resultó algo más alto que en verano, concordante con las condiciones climáticas.
- c. No hay diferencias significativas entre los promedios de humedad relativa en los viajes hacia la zona norte o hacia zona sur en el interior de las cabinas.

5.2. Factores externos

Paso por túneles

- a. Las concentraciones de CO₂ en la cabina de conductores es mayor en un 15 % al promedio de concentraciones cuando se circula por carretera normal.
- b. Hay diferencias con significancia estadística entre las concentraciones de CO₂ medidas en los pasos por túneles, respecto a las concentraciones de CO₂ medidas en carretera normal.

Paso por zonas con congestión vehicular

- a. Las concentraciones promedios de CO₂ en cabina de los conductores se hicieron un 32% más alta que en carretera normal.
- b. Hay significancia estadística en las diferencias de concentraciones de CO₂ medidas en las cabinas de conductores en momentos de circulación por zonas congestionadas, respecto al promedio de carretera normal.

5.3. Otros hallazgos

- a. En las paradas, ante la apertura de puertas y ventanas en las cabinas de conductores, se notaron disminuciones evidentes de las concentraciones de CO₂.
- b. Un 48% de los viajes mantuvo concentraciones por sobre los 1000 ppm de CO₂ durante 40% del tiempo de viaje o más.

⁸ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE TC-02.01-FAQ-92.

- c. Se evidenciaron alzas de concentración cuando había presencia de otras personas en cabina (fiscalizadores, ayudantes, otros). Particularmente si la presencia de otras personas en cabina de conductor es prolongada sin ventilación del exterior las concentraciones se elevaron considerablemente.
- d. La comparación de promedios de CO₂ entre buses que tenían la cabina del conductor aislada del salón de pasajeros y aquellos que no la tenían segregada, no muestra una diferencia significativa. Es decir, el hecho de que la cabina del conductor esté aislada del salón de pasajeros no sería un factor determinante en los niveles de CO₂ en cabina de conductor.

6. Recomendaciones

- a. Dada la evidencia de tener concentraciones moderadamente elevadas de CO₂ en cabinas de conductores y el conocimiento de que esta situación puede tener efectos en capacidades cognitivas y de manejo que los puedan afectar, se recomienda adoptar medidas de ventilación frecuente en la cabina de los buses interurbanos.
- b. En la conducción por túneles se recomienda cerrar los ingresos de aire exterior ya sea a través del sistema de ventilación forzada o ventilación a través de ventanilla. Una vez terminado el paso por el túnel, debe abrirse la toma de aire exterior.
- c. Evitar el ingreso de aire exterior en zonas de alta congestión vehicular.
- d. Instalar dispositivos que monitoreen la concentración de CO₂ en el interior de las cabinas que alerten al conductor sobre mala calidad del aire interior.
- e. Instruir a los conductores sobre la necesidad de ventilar la cabina por períodos regulares en zonas de carretera sin gran congestión vehicular, ya sea por medios naturales o por ventilación forzada. Especialmente cuando viajan otras personas en la cabina.
- f. No mantener los sistemas de recirculación sin toma de aire exterior por períodos prolongados. La literatura internacional reporta que, utilizando el sistema de recirculación de aire, la concentración de CO₂ se eleva considerablemente⁹.
- g. Se sugiere que las autoridades del transporte recomienden a los conductores de vehículos mediante avisos a la entrada de túneles, que tengan la precaución de cerrar las ventanas y poner los sistemas de ventilación en modo de recirculación de aire durante el paso por el túnel.

⁹ Grady, ML 2013, 'On-Road Air Quality and the Effect of Partial Recirculation on In-Cabin Air Quality for Vehicles', Mechanical Engineering, University of California.

<http://www.engr.ucr.edu/~heejung/publications/2013-CO2-exp.pdf>

Bibliografía

BA Edimansyah, BN Rusli, L Naing, BA Azwan and BD Aziah, "Indoor air quality in an automotive assembly plant in Selangor, Malaysia" Southeast Asian J Trop Med Public Health, Vol 40 no. 1 January 2009

Chiu C-F, Chen M-H, Chang F-H (2015) "Carbon Dioxide Concentrations and Temperatures within Tour Buses under Real-Time Traffic Conditions". PLoS ONE 10(4): e0125117. doi:10.1371

Cronyn, P., Watkins, S., Alexander D. "Chronic Exposure to Moderately Elevated CO₂ during Long-Duration Space Flight" NASA Center for AeroSpace Information , NASA/TP-2012-2127358.

Dai-Hua Tsai , Jia-Shiang Lin, Chang-Chuan Chan, "Office Workers' Sick Building Syndrome and Indoor Carbon Dioxide Concentrations", Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 9:5, 345-351, May 2012.

Elliott T. Gall, Toby Cheung, Irvan Luhung , Stefano Schiavon ,William W. Nazaroff. "Real-time monitoring of personal exposures to carbon dioxide", Building and Environment 104 (2016) 59e67.

Grady, M., Jung, H., Kim, Y., Park, J. et al., "Vehicle Cabin Air Quality with Fractional Air Recirculation," SAE Technical Paper 2013-01-1494, 2013. <http://www.engr.ucr.edu/~heejung/publications/2013-CO2-exp.pdf>.

Grady, ML 2013, 'On-Road Air Quality and the Effect of Partial Recirculation on In-Cabin Air Quality for Vehicles', Mechanical Engineering, University of California.

Jung, H 2013, 'Modeling CO₂ Concentrations in Vehicle Cabin', SAE International. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2013-01-1497/>

Kajtar, L & Herczeg, L 2012, 'Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work', *Q. J. Hung. Meteorol. Serv*, vol. 116, pp. 145-169. Korea Automobile testing & research Institute, KATRI "Proposal for Vehicle Indoor Air Quality (VIAQ)" Informal document GRPE-69-28. Presentation in 69th GRPE, 05 - 06 June 2014.

Lipsett MJ, Shusterman DJ, Beard RR. 1994. "Inorganic compounds of carbon, nitrogen, and oxygen. In: Patty's Industrial Hygiene and Toxicology" (Clayton GD, Clayton FD, eds). New York:John Wiley & Sons, 4523–4554.

Ministerio de Salud Chile, DS 594 de 1999 "Reglamento sobre Condiciones sanitarias y Ambientales Básicas de los Lugares de Trabajo".

Mohd Firdaus O and Juliana J, “*Exposure to Indoor Air Pollutants (PM 10 , CO 2 And CO) and Respiratory Health Effects among Long Distance Express Bus Drivers*”, Health and the Environment Journal, 2014, Vol 5 No 3.

NIOSH. “*Criteria for a Recommended Standard Occupational Exposure to Carbon Dioxide*” (Pub. No. 76-194). Cincinnati, OH: NIOSH (DHHS), 1975.

Nor Faeiza M, Juliana J, Chua PH, “*Retrofitting and purposed-built buildings: indoor air quality and sick building syndrome among private higher learning institution students in Kuala Lumpur and Selangor*”, Malaysian Journal of Public Health Medicine 2016, Special Volume 2: 106-112.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA) Permissible Exposure Limits / OSHA US Department Of Labor “*Permissible Exposure Limits-Annotated Table Z-1*” <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html>.

RMS/17/CO2R001, “*Review of In-Cabin Carbon Dioxide Levels*”, Australia, 8 septiembere de 2017.

http://www.chiefscientist.nsw.gov.au/data/assets/pdf_file/0007/124936/Review-of-In-Cabin-CO2-Exposure-and-Risk-Issues-8-September-2017.pdf.

Terry K. Koo, PhD, Mae Y. Li, BPS “*A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research*”, Journal of Chiropractic Medicine (2016) 15, 155–163.

Usha Satish, Mark J. Mendell, Krishnamurthy Shekhar, Toshifumi Hotchi, Douglas Sullivan, Siegfried Streufert, and William J. Fisk, “*Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance*”, Environmental Health Perspectives, volume 120 | number 12 | December 2012.

Xiaojing Zhang, Pawel Wargocki, and Zhiwei Lian, “*Physiological Responses during Exposure to Carbon Dioxide and Bioeffluents at Levels Typically Occurring Indoors*”, INDOOR AIR · FEBRUARY 2016, International Journal of Indoor Environment and Health.

Anexos

Anexo 1: Ficha de registro de datos de campo complementarios

Evaluación cuantitativa de calidad de aire interior (IAQ) en cabinas de conductores de buses interurbanos

FICHA DE TERRENO

Persona a cargo del monitoreo

Nombre	RUT	Firma

Identificación del viaje

Fecha del viaje		COD campaña	
Nombre del conductor			
RUT Conductor		TEL	
Contactos operativos	Nombre, teléfono, e-mail		
	Salida	Llegada	
Nombre Localidades			
Región			
Latitud			
Longitud			
Altura geográfica (msnm)			
Horario			
Ruta			

Identificación del bus y pasajeros

Tipo de Bus	Marca	Modelo	Año fabricación	Número de bus
Cantidad de pasajeros	Total de pasajeros transportados	Cantidad de pasajeros que descendieron en terminal		
Tipo de cabina	Separada pasajeros		No separada pasajeros	

Equipo de monitoreo

Equipo medición IAQ (Marcar según corresponda)	Marca	Modelo	Nº de Serie	Año fabricación	Sondas
	KIMO	AQ200P	14111472	2014	SCO2TH SCOT
	Extech	EA80	150608088	2016	CO2, TH
Responsable equipo					

Medición previa de parámetros al aire libre (Chequeo equipo)

Fecha Registro	
Hora del registro	
Concentración anhídrido carbónico (CO ₂) ppm	
Concentración monóxido de carbono (CO) ppm	
Humedad relativa (%) media	
Temperatura (°C) media	
Lugar, Altura(msnm), Presión (hPa)	

BITÁCORA DE VIAJE

Ver tabla de códigos al final de la tabla

Nombre y COD del evento	Hora inicio Evento	Descripción/razón	Hora término Evento
Observaciones generales del viaje			

Evento	COD
Inicio del Viaje	E1
Puerta exterior abierta	E2
Puerta interior abierta	E3
Ventanilla conductor-abierta	E4
Escotilla pasajeros abierta	E5
Paso zona Urbana (Baja congestión, Media congestión alta congestión (BC, MC, AC) Según Google Maps.	E6 (E6-BC, E6-MC, E6-AC)
Paso por Túnel	E7
Paso zona industrial vapores visibles	E8
AC funcionando (aire acondicionado)	E9
Otras personas viajando en cabina (indicar Nº)	E10
Término del viaje	E11
Otros eventos	E12

Anexo 2 Encuesta a conductores

Evaluación cuantitativa de calidad de aire interior (IAQ) en cabinas de conductores de buses interurbanos,

Encuesta conductor de respuesta voluntaria

COD CAMPAÑA		
Fecha y lugar Inicio/ destino		

NOMBRE CONDUCTOR	
Fecha de Nacimiento	
Años en la Actividad de conductor	
Años en la empresa	

Hábito Fumar	SI		NO	
Consumo comidas ricas en grasas y azúcares	SI		NO	
Consumo bebidas carbonatadas	SI		NO	
Peso actual				
Talla				
¿Practica alguna actividad física?	SI	NO	En caso afirmativo: ¿Cuánta veces por semana realiza?	
¿Cúantos minutos de actividad física realiza por cada sesión?	Menos de 30 min	30 a 40 min	Más de 40 min	

Viajes Habituales	C		M		L	
Regiones habituales de desplazamiento						
Número promedio de viajes a la semana						
Otros datos de la conducción habitual (Ventana abierta/cerrada, Uso AC, paradas habituales y otros comentarios del conductor que puedan influir en IAQ).						