



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO MEDIANTE EL USO DE  
SENSORES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE  
INTERIOR

AUTOR

Irina Lizbeth Caza Teran

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO MEDIANTE EL USO DE  
SENSORES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y  
Remediación.

Profesor Guía  
Ph.D. Rasa Zalakeviciute

Autora  
Irina Lizbeth Caza Teran

Año  
2018

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo, Implementación de un prototipo mediante el uso de sensores para la estimación de la calidad del aire interior a través de reuniones periódicas con la estudiante Irina Lizbeth Caza Teran, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Rasa Zalakeviciute  
Doctor of Philosophy  
C.I: 175707679-7

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Implementación de un prototipo mediante el uso de sensores para la estimación de la calidad del aire interior, de Irina Lizbeth Caza Teran, en el semestre 2018-1 dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajadores de Titulación.”

---

Yasser Alejandro González Romero  
Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental  
C.I: 070373762-7

## DECLARACIÓN DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

---

Irina Lizbeth Caza Teran

C.I: 172044365-2

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por haberme dado su apoyo constante y la confianza que han depositado en mí para lograr todas mis metas en la vida.

A mi hermana Abg. Carolina Caza por alentarme, ayudarme y apoyarme siempre.

Al Ing. Eduardo Loza por todo el apoyo y cariño que me ha brindado los últimos años de la carrera.

Al Ing. Santiago Solórzano y a la Unidad de Innovación Tecnológico por su ayuda en la realización del prototipo.

A la Dra. Rasa Zalakeviciute por su paciencia y apoyo en la realización del proyecto.

A la Secretaria de Ambiente de DMQ por la información presentada para la realización del proyecto.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Hilda Teran y Flavio Caza por apoyarme y enseñarme a no rendirme y seguir adelante por mis objetivos, ni decaer en momentos de adversidad.

## RESUMEN

En la actualidad, la contaminación atmosférica ha generado riesgos en el ambiente y la salud humana. La contaminación del aire en exteriores e interiores representa graves problemas hacia los seres humanos. En Quito, la Secretaría de Ambiente tiene nueve estaciones para el monitoreo de contaminantes criterio como  $PM_{2.5}$  (partículas con diámetro  $<2.5\mu m$ ) y CO (monóxido de carbono). Sin embargo, no se monitorea en interiores. Las concentraciones de contaminantes atmosféricos en interiores pueden llegar a ser más altas que en los exteriores. Es por esta razón que el objetivo del presente trabajo es la implementación de un prototipo para estimar la calidad del aire interior. El área de estudio fue en el parqueadero de la Universidad de Las Américas, sede Granados en Quito, Ecuador. Primeramente, se realizó el prototipo. Luego se validó el sensor SEN077 con equipos MicroDust Pro y Thermo Andersen/ FH62C14 para  $PM_{2.5}$ , sensor de monóxido de carbono MQ-7 con el equipo Thermo 48i y sensor DHT-22 de humedad relativa y temperatura con el anemómetro Airflow TA440. Se realizaron mediciones durante una semana con el prototipo. Los resultados fueron validados correlacionándolos con los equipos anteriormente dichos. Además, se realizó un conteo de tráfico, conteo de personas y movimiento de vehículos para determinar la influencia del tráfico con las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y CO del parqueadero subterráneo. Se realizó monitoreo para determinar la influencia de la humedad relativa y temperatura exterior e interior con  $PM_{2.5}$  y CO. Los resultados muestran que hay correlación entre el Thermo Andersen/ FH62C14 y SEN077 de ( $R^2=0.36$ ). Hay una fuerte correlación entre el Thermo 48i y sensor MQ-7 de ( $R^2=0.77$ ). Así mismo, hay una fuerte correlación ( $R^2=0.89$ ) de la temperatura y una correlación de ( $R^2=0.46$ ) de la humedad relativa con el equipo Airflow TA440 y sensor DHT22. Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y CO influyen con los días de la semana y el número de vehículos que ingresan al parqueadero. En conclusión, el equipo de estudio funciona y es una opción económica, suficientemente viable para realizar mediciones de contaminación interior.



## ABSTRACT

Nowadays, air pollution has generated risks in environment and health. Indoor air pollution represents serious problems for humans, causing millions of deaths every year. In Quito, the Secretariat of Environment has nine stations for the monitoring criteria pollutants such as PM<sub>2.5</sub> (particles with diameter < 2.5 µm) and CO (carbon monoxide). However, Quito does not have an indoor monitoring network. Indoor pollutant concentrations can be higher than outdoors. It is for this reason that the objective of this work is the implementation of a prototype to estimate the quality of indoor air. The study was performed in a garage of the Granados campus of the Universidad de Las Americas in Quito, Ecuador. First, the prototype was made and then the sensor PM<sub>2.5</sub> SEN077, MQ-7 carbon monoxide sensor and DHT-22 sensor were validated with MicroDust Pro and Thermo Andersen / FH62C14 for PM<sub>2.5</sub>, Thermo 48i for CO and Airflow Anemometer TA440 for relative humidity and ambient temperature. Measurements were made during a week with the prototype. The results of the sensor used in this study were validated by correlating them with the previously mentioned equipment. In addition, the counting of traffic, people and vehicle movement were carried out to determine the influence of traffic with the PM<sub>2.5</sub> and CO concentrations of the underground garage. Monitoring was made to determine the influence of relative humidity, external and internal temperature on PM<sub>2.5</sub> and CO. The results show that there is a median correlation between the Thermo Anderson FH62C14 and SEN077 of ( $R^2=0.36$ ). There is a strong correlation between the Thermo 48i and MQ-7 of ( $R^2=0.77$ ). Likewise, the prototype sensors showed a good correlation with the ambient temperature ( $R^2 = 0.89$ ) and relative humidity ( $R^2 = 0.46$ ) if compared to the measurements of Airflow TA440 and DTH22 sensor. The concentrations of PM<sub>2.5</sub> and CO depend on the number of vehicles that enter the parking space which depends on the days of the week. In conclusion, the proposed sensor prototype is an economic and viable option for indoor pollution monitoring.

# ÍNDICE

1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3. Alcance .....	6
1.4. Justificación .....	6
2. CAPITULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
2.2. Características del parqueadero subterráneo.....	6
2.3. Calidad del aire interior .....	7
2.4. Contaminación atmosférica .....	8
2.5. Emisión de gases vehiculares.....	9
2.6. Material particulado PM <sub>2.5</sub> .....	11
2.7. Técnicas de medición PM <sub>2.5</sub> .....	12
2.8. Monóxido de carbono (CO).....	13
2.9. Técnicas de medición de CO .....	14
3. CAPITULO III. METODOLOGIA .....	15
3.1. Instrumentos .....	15
3.1.1. Descripción del sensor de humedad relativa y temperatura ambiental (DTH-22) .....	15
3.1.2. Descripción del Anemómetro <i>Airflow</i> TA440 .....	16
3.1.3. Descripción del Instrumento para material particulado (PM <sub>2.5</sub> ) ( <i>Thermo Andersen/ FH62C14</i> ) .....	17
3.1.4. Descripción del sensor para material particulado (PM <sub>2.5</sub> ) (SEN077).....	18

3.1.5. Descripción del Instrumento para material particulado (PM <sub>2.5</sub> ) <i>MicroDust Pro</i> .....	19
3.1.6. Descripción del Instrumento para monóxido de carbono ( <i>Thermo /48C/ 48i</i> ) .....	20
3.1.7. Descripción del sensor de monóxido de carbono (MQ-7) .....	21
3.2. Validación de los Instrumentos .....	22
3.2.1. Descripción del área de estudio.....	22
3.2.2. Descripción de la estación Belisario .....	24
3.2.3. Realización del Prototipo .....	25
3.2.4. Medición en la estación Belisario de PM <sub>2.5</sub> y monóxido de carbono.....	26
3.2.4.1. Calibración del <i>MicroDustPro</i> .....	27
3.2.4.2. Meteorología.....	28
3.2.4.3. Flujo de tráfico y conteo de vehículos.....	29
3.2.5. Flujo de tráfico y conteo de personas.....	29
3.3. Mediciones en el parqueadero subterráneo y flujo de tráfico.....	29
3.4. Software para el análisis.....	29
<b>4. CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>30</b>
4.1. Validación de resultados.....	30
4.1.1. Correlación de Material Particulado (PM <sub>2.5</sub> ) .....	31
4.1.2. Correlación del Monóxido de carbono (CO).....	37
4.1.3. Validación de Humedad relativa y temperatura ambiental.....	39
4.1.4. Resultados del monitoreo en el parqueadero subterráneo de las concentraciones PM <sub>2.5</sub> .....	40
4.1.5. Resultados del monitoreo de CO en el parqueadero subterráneo.....	44
4.1.6. Comparación entre el ambiente exterior y el parqueadero subterráneo.....	49
4.1.7. Correlación entre PM <sub>2.5</sub> y variables meteorológicas .....	53
4.1.8. Correlación entre CO y variables meteorológicas .....	55

4.1.9. Flujo de tráfico y personas .....	57
4.2. Velocidad del viento .....	60
4.3. Niveles de exposición.....	61
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1 Conclusiones.....	62
5.2 Recomendaciones.....	61
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sensor DTH22. Humedad relativa y temperatura ambiental. ....	16
Figura 2. Equipo Airflow TA440.....	17
Figura 3. Cámara de partículas de Thermo Andersen .....	18
Figura 4. Sensor de Material particulado SEN077. ....	19
Figura 5. Sonda de muestreo de MicroDust Pro. ....	20
Figura 6. Equipo Thermo 48i (Thermo Scientific, 2014).....	21
Figura 7. Sensor de Monóxido de carbono MQ7 .....	22
Figura 8. Mapa de la Universidad de Las Américas.....	23
Figura 9. Plano del primer nivel del parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas.....	24
Figura 10. Estación Belisario de la Secretaria de Ambiente DMQ, monitoreo con el prototipo y MicroDust Pro. ....	24
Figura 11. Componentes del Prototipo que se colocara en el garaje. ....	25
Figura 12. Prototipo con su respectiva estructura. ....	26
Figura 13. Estación Belisario.....	27
Figura 14. Diagrama para la calibración del Equipo MicroDust Pro.....	27
Figura 15. Distancia entre Universidad de Las Américas y la estación Belisario .....	31
Figura 16. Concentraciones de PM <sub>2.5</sub> con los Instrumentos Thermo Andersen, MicroDust Pro y Sensor SEN077.....	32
Figura 17. Presentación gráfica de las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> del equipo FH62C14 frente al equipo MicroDust Pro de la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indican los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.....	33
Figura 18. Presentación gráfica de las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> corregidas con la Ecuación 1.....	34
Figura 19. Presentación gráfica de PM <sub>2.5</sub> del equipo FH62C14 frente al sensor SEN077 en la Estación Belisario del día 20 de	

octubre del 2017. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.....	35
Figura 20. Presentación gráfica de las concentraciones de $PM_{2.5}$ corregidas con la Ecuación 2. ....	35
Figura 21. Presentación gráfica de $PM_{2.5}$ del equipo MicroDust Pro frente al equipo SEN077 en la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.....	36
Figura 22. Presentación gráfica de las concentraciones de $PM_{2.5}$ corregidas con la Ecuación 3.....	37
Figura 23. Presentación gráfica de las concentraciones de CO en la estación Belisario. ....	38
Figura 24. Presentación gráfica de $PM_{2.5}$ del equipo Thermo 48C/E8i frente al Sensor MQ-7 en la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la Ecuación. ....	38
Figura 25. Presentación gráfica de las concentraciones de $PM_{2.5}$ corregidas con la Ecuación 4.....	39
Figura 26. Presentación gráfica del equipo Airflow TA440 frente al sensor DTH22 en la Estación Belisario del día 15 de noviembre del 2017.....	40
Figura 27. Presentación gráfica del promedio horario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ .....	42
Figura 28. Presentación gráfica las concentraciones de $PM_{2.5}$ comparado con la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA) y la organización Mundial de La Salud (OMS). ....	43
Figura 29. Presentación gráfica de la concentración de $PM_{2.5}$ y el número total vehículos durante los 6 días de medición. ....	44
Figura 30. Presentación gráfica del total de vehículos y el promedio horario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ . Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.....	44

Figura 31. Presentación gráfica de la concentración de CO durante los 5 días de medición.....	46
Figura 32. Presentación gráfica del monóxido de carbono comparando con la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA) .....	47
Figura 33. Presentación gráfica de la concentración de CO y el número total vehículos durante los 6 días de medición. ....	48
Figura 34. Presentación grafica del movimiento de vehículos y el promedio horario de las concentraciones de CO. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.....	49
Figura 35. Presentación gráfica de la humedad relativa de la estación Belisario durante los días de medición.....	50
Figura 36. Presentación gráfica de Humedad relativa de la estación Belisario y del parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas.....	51
Figura 37. Presentación gráfica de la temperatura ambiental de la estación Belisario durante los días de medición. ....	52
Figura 38. Presentación gráfica de la temperatura ambiental del exterior y del parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas.....	53
Figura 39. Presentación gráfica de las concentraciones de $PM_{2.5}$ .....	54
Figura 40. Presentación gráfica de las concentraciones de $PM_{2.5}$ .....	55
Figura 41. Presentación gráfica de las concentraciones de CO .....	56
Figura 42. Presentación gráfica de las concentraciones de CO ( $mg/m^3$ ).....	56
Figura 43. Presentación gráfica de la concentración de $PM_{2.5}$ , con respecto al número de personas de Universidad de Las Américas, sede Granados .....	58
Figura 44. Presentación gráfica de la concentración de CO, con respecto al número de personas de Universidad de Las Américas, sede Granados.....	58

Figura 45. Presentación gráfica de la concentración de $PM_{2.5}$ , con respecto al número de vehículos de la Universidad de Las Americas, sede Granados. ....	59
Figura 46. Presentación gráfica de las concentraciones de CO, con respecto al número de vehículos de la Universidad de Las Américas, sede Granados. ....	60
Figura 47. Plano del Parqueadero de la Universidad de Las Américas. Indicando la velocidad del viento y las concentraciones de $PM_{2.5}$ y CO .....	61



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedios horarios de las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas. ....	41
Tabla 2. Promedio horario de las concentraciones de CO en el parqueadero subterráneo de la Universidad de las Américas durante el 15 de noviembre al 20 de noviembre de 2017. ....	45
Tabla 3. Exposición de PM <sub>2.5</sub> del personal que trabaja en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas, sede Granados. ....	63
Tabla 4. Tiempo de exposición de PM <sub>2.5</sub> parqueadero subterráneo. ....	63

## 1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La Organización Mundial de la Salud estima que a nivel mundial, cada año, siete millones de personas mueren debido a la contaminación atmosférica existente en interiores y exteriores (World Health Organization [WHO], 2014). Cabe señalar que la mayor parte del tiempo, hasta el 90%, los seres humanos dedican sus actividades diarias dentro de las diferentes estructuras que engloban el desarrollo personal y social (Tran, Dang y Chung, 2016); (Vukovic et al., 2013). Es por esta razón que los niveles de contaminación aumentan en interiores, sin embargo, es menester determinar que los espacios exteriores también sufren detrimento, aunque sea en menor proporción (Jafta, Barregard, Jeena y Naidoo, 2017). Un ejemplo concreto, respecto de la afectación causada por la contaminación dentro de los espacios interiores, es el hecho de que cuatro millones de personas mueren anualmente a causa del uso madera, biomasa y carbón para cocinar (WHO, 2014); (Cheng et al., 2017). La afectación que producen las fuentes de emisiones de contaminantes atmosféricos pueden llegar a ser irreversibles para la salud del ser humano. Por eso es importante concientizar su uso para poder salvaguardar el principal bien jurídico protegido - la vida (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Ahora bien, la investigación y realización del proyecto se centra en el estudio de la contaminación que se produce en interiores, en virtud de que diversos estudios señalan que la calidad del aire interior dentro de edificios, garajes, entre otros es peor que la calidad de aire en exteriores. Es posible verificar ésta afirmación estableciendo lo dicho por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), no es suficiente permitir que el aire exterior entre a las edificaciones, las concentraciones de los contaminantes no se reducen (Vargas y Gallego, 2005); (Cheng et al., 2017). Así como también en áreas altamente urbanizadas e industriales la falta de aire acondicionado y altos niveles de humedad aumentan las concentraciones de contaminantes en el interior. Además, el crecimiento poblacional ha generado un aumento masivo de vehículos, así como también los parqueaderos subterráneos conducen a una mala calidad del aire. Ya que tienen

un menor contacto con el aire y por ende los contaminantes se acumulan fácilmente, produciendo un riesgo para la salud del usuario (Li y Xiang, 2013). De tal manera que la OMS se ha propuesto fortalecer la capacidad de enfrentar estos problemas mediante la organización de talleres y la elaboración de herramientas que permitan diseñar y aplicar políticas ambientales que mitiguen sus efectos (World Health Organization [WHO], 2014).

Una vez que se ha especificado de manera general el tema, es indispensable investigar todos aquellos contaminantes que intervienen y afectan a la salud, tomando en cuenta que los grupos vulnerables – niños, adultos mayores y personas con capacidades especiales – son los más afectados (Gallego et al., 2012, p.72).

Los contaminantes criterio o criteria, son los contaminantes presentes en concentraciones elevadas. Uno de los contaminantes criterio es el monóxido de carbono (CO) que es un gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico, y es el producto de toda la combustión. En Ecuador, Quito año 2011, el 62% de emisiones de CO eran del transporte, debido al uso combustibles fósiles (Secretaría de Ambiente, 2014). Así mismo, en Quito año 2016, las emisiones de CO son provenientes de tráfico vehicular (Secretaría de Ambiente, 2017). También, se verificó que si la exposición a CO de ocho horas es mayor a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  puede causar hipoxia e incluso llegar a la muerte del ser humano (WHO, 2016); (Yadav, Sahu, Beig, Tripathi y Jaaffrey, 2017); (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2015).

En cuanto a la contaminación por material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$  – partículas con diámetro menor a 2.5 micrómetros), que aún puede venir de diferentes fuentes, la mayoría en todo el mundo se emite debido a la combustión de los vehículos (Karagulian et al., 2016). Sin embargo, es preocupante, el hecho de que los países en vías de desarrollo son los que tienen concentraciones significativas cerca de 37%  $\text{PM}_{2.5}$  por el transporte. En Ecuador, año 2016, el 20% de  $\text{PM}_{2.5}$  se ha incrementado en los sectores de Carapungo y Cotacollao. Esto se debe a

que son zonas de desarrollo inmobiliario con un alto crecimiento poblacional y por ende un incremento del transporte público (Secretaría de Ambiente, 2017). En Ecuador, el límite permisible de emitir  $PM_{2.5}$  a la atmósfera en 24 horas es de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio ambiente [TULSMA], 2017)

Las enfermedades debido a la contaminación interior han causado muertes a los seres humanos. Una de estas enfermedades es la isquemia al corazón con 40% de casos, la afección pulmonar obstructiva crónica afecto un 22%, infecciones a las vías respiratorias con 12% de casos por contaminación interior. Mientras que en el exterior hubo 11% muertes por isquemia al corazón, afección pulmonar obstructiva crónica afecto un 26% y enfermedades en las vías respiratorias con 3% de casos (Gráfico 1, Anexo); (World Health Organization [WHO], 2014); (Jafta, Barregard, Jeena y Naidoo, 2017); (Rodríguez y Desamparados, 2012). En Ecuador- Quito, hay una mayor incidencia de infecciones respiratorias en los niños (Espinoza y Molina, 2014).

Es viable estudiar aquellos contaminantes críticos o criterio, en virtud de su función de demostrar los valores máximos permitidos en los patrones de calidad del aire (Martínez, 2004, p.14). De manera que, en todos los países se desarrollan estándares de contaminantes criterio, con el fin de proteger la salud del ser humano y preservar el ambiente (Rodríguez y Desamparados, 2012).

Por añadidura, existen otros contaminantes criterio como: dióxido de sulfuro ( $SO_2$ ), que es un gas incoloro e irritante, y las principales fuentes de emisión son las industrias (Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio ambiente [TULSMA], 2017). Por lo que si una persona se expone a más de 24 horas al  $SO_2$  y llega a ser mayor de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se afectará de forma significativa su sistema respiratorio (World Health Organization [WHO], 2016). En Ecuador, según el libro VI anexo 4 del Texto Secundario Unificado de Legislación Ambiental, el límite permisible es de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas (Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio ambiente [TULSMA], 2017); (EPA, 2015); (Tham, 2016); (World Health Organization [WHO], 2016). Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), está

conformado por un grupo de gases reactivos, los cuales son: ácido nitroso y ácido nítrico. Igualmente, se demostró que, su principal fuente de emisión se debe a la quema de combustibles, en cuanto a su exposición, si ésta es mayor a una hora y la concentración llega a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{NO}_2$ , las vías respiratorias se verán irritadas (OPS, 2016); (World Health Organization [WHO], 2016). En Ecuador el límite permisible en 24 horas es de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{NO}_2$  (Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio ambiente [TULSMA], 2017). Ozono ( $\text{O}_3$ ) está compuesto por tres átomos de oxígeno, está formado por reacciones químicas y fotoquímicas entre el  $\text{NO}_2$  y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Por lo que las fuentes que resultan en  $\text{O}_3$ , son las industrias y los vehículos, por lo tanto si la exposición es mayor de ocho horas y concentración mayor de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{O}_3$ , los pulmones se verán gravemente afectados (Vuković et al., 2013); (World Health Organization [WHO], 2016). En Ecuador, el límite permisible de  $\text{O}_3$  en 8 horas es de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio ambiente [TULSMA], 2017). Finalmente, el material particulado grueso ( $\text{PM}_{10}$ ) son partículas inhalables con diámetro menor de 10 micrómetros. Si la exposición es mayor a veinte y cuatro horas y su concentración es de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  la inhalación de  $\text{PM}_{10}$  afectará a los pulmones de las personas (Cociorva y Iftene, 2017); (World Health Organization [WHO], 2016). En Ecuador el límite permisible de  $\text{PM}_{10}$  en 24 horas es de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio ambiente [TULSMA], 2017). En Ecuador se los encuentra en fuentes fijas y móviles, además que si sobrepasa la concentración de material particulado total suspendido (MTS), afectará a la disminución del crecimiento de la función pulmonar de los adultos y niños (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2015); (Rodríguez y Desamparados, 2012).

Es preocupante el hecho de que los seres humanos se encuentren infestados de un sinnúmero de contaminantes que afectan día a día su salud y calidad de vida (Vukovic et al., 2013). Como consecuencia de los visibles daños, empresas han creado equipos como Pureti, una herramienta que monitorea constantemente los compuestos orgánicos volátiles y  $\text{PM}_{2.5}$  en edificios,

guarderías, entre otros (Pureti, 2017). De la misma manera, se creó el equipo Air-O-Cell's, el cual monitorea dióxido de carbono, humedad y temperatura en edificios (Air-Care, 2017). Por otro lado, Ecuador a través de su legislación se propone brindar el monitoreo de la calidad del aire (Guayaquil, Cuenca y Quito), el mismo que se rige a través de la Norma Técnica de Calidad del Aire y la Secretaria de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), entidad encargada de su cumplimiento (Secretaría de Ambiente, 2016). Sin embargo, la Secretaria de Ambiente no monitorea contaminación interior. Por lo tanto, se fabricó un prototipo para verificar la existencia de material particulado, CO, humedad relativa y temperatura; lo cual permitirá a las autoridades llevar un control adecuado y brindar las condiciones óptimas para el desarrollo de la vida cotidiana.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

- Implementar un prototipo mediante el uso de sensores para la estimación de calidad del aire interior en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas, sede Granados

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Fabricar el prototipo en colaboración con la Unidad de Innovación Tecnológica de la Universidad de Las Américas mediante el uso de un Arduino Pro
- Validar el prototipo mediante el uso de los equipos *MicroDust Pro*, *Airflow TA440*, *Thermo / 48C / 48i Thermo Andersen/ FH62C14*
- Monitorear la calidad del aire interior en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas, sede Granados

### 1.3. Alcance

En este estudio, se desarrolló un prototipo en la Unidad de Innovación Tecnológica de la Universidad. El mismo que cuenta con sensores de calidad del aire, su programación y adquisición de datos realizado mediante el uso de un micro controlador. Se validó el prototipo con los equipos *Thermo Andersen/ FH62C14*, *ThermoAi8* de la estación Belisario de la Secretaria de Ambiente, *Airflow TA440*, *MicroDust Pro* y se realizó mediciones durante una semana en el parqueadero subterráneo de Las Universidad de Las Américas. Además, los datos obtenidos por el prototipo se indicaron en una interfaz gráfica *responsive* la misma que tendrá una base de datos para el almacenamiento de la información.

### 1.4. Justificación

En Quito, no hay datos de monitoreo de calidad del aire en interiores. Por lo que se propone la fabricación y la implementación del prototipo para monitorear la calidad de aire. Además, el prototipo propuesto será escalable, ya que podrá monitorear calidad del aire en casas, escuelas, hospitales, entre otros. También, generará datos a tiempo real de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos seleccionados. A través de la innovación tecnológica se genera conocimiento de la calidad del aire interior para la toma de decisiones acerca de la ventilación en interiores y filtros que ayuden a purificar el aire, además de generar conciencia sobre el riesgo a la salud de las personas que están expuestas.

## 2. CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.2. Características del parqueadero subterráneo

El parqueadero es un área independiente para almacenar los automóviles en el mismo lugar durante varias horas, los usuarios tienen la libertad de dejar el automóvil en ese espacio (Marc, Smielowska y Zabiegala, 2016). Sin embargo, la construcción cerrada del parqueadero, gran cantidad de vehículos y una mala ventilación del mismo puede generar problemas de contaminación, ya que el

usuario se encuentra expuesto a CO, NOx, hidrocarburos, aldehídos y material particulado al quedarse por un tiempo relativamente corto. Además, los parqueaderos subterráneos pueden llegar a ser lugares que tienen alto impacto en la calidad del aire (Spiru y Simona, 2017), esto se debe a las emisiones de los vehículos. Ya que los contaminantes que expulsa el tubo de escape es CO, hidrocarburos y material particulado. Sin embargo, se considera que el monóxido de carbono y el PM son los principales indicadores para el control de la contaminación en estacionamientos (Barría, Calvo, y Pino, 2016); (Zhao, Song, Wang, Zhao, y Zhu, 2017). Puesto que estos contaminantes causan problemas de salud al usuario o al empleador, las enfermedades se desarrollan por la exposición provocando asma, cáncer al pulmón, intoxicación entre otros.

### 2.3. Calidad del aire interior

Son ambientes que se encuentran dentro y alrededor de estructuras como edificios, viviendas y garajes (Steinemann, Wargocki y Rismanchi, 2017). De igual manera, en un ambiente interior se puede encontrar contaminantes que proceden de varias fuentes exteriores e interiores. Por lo que la calidad del aire interior depende de variables como el sistema de ventilación, el aire exterior, las fuentes de contaminantes y su magnitud (Guardino, 2012). Los contaminantes del aire interior se clasifican según su origen, los cuales proceden de combustión como el humo del tabaco, contiene una mezcla de 3000 contaminantes químicos, procedentes de la combustión y pirolisis de los componentes de la hoja de tabaco. Así como también contiene una mezcla de 3000 contaminantes químicos, procedentes de la combustión y pirolisis de los componentes de la hoja de tabaco. Otra fuente de contaminación son los materiales de construcción como la fibra de vidrio, el cual contiene radón, formaldehído y amianto (Martínez, 2004, p.40) Por lo tanto, los ambientes interiores afectan al ser humano debido a un estrés térmico, provocando problemas respiratorios, cardiovascular y asma (Spiru y Simona, 2017). Así mismo, el uso de combustibles sólidos como la madera y el carbón vegetal para cocinar y la alta exposición puede provocar



enfermedades como cáncer al pulmón (Organización Mundial de La Salud [OMS], 2016)

#### 2.4. Contaminación atmosférica

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea la superficie del planeta. Su composición y propiedades físicas son influidas debido a los procesos biológicos y geoquímicos (Pico, Gonzalez y Sanchez, 2012, p.20). La Tropósfera es la capa cercana a la superficie de la Tierra donde se desarrollan los fenómenos meteorológicos, ciclos de los seres vivos y la vida (Ubilla y Yohannessen, 2017). Las actividades antropogénicas y naturales son las causantes de la alteración en la atmósfera generando contaminación atmosférica.

Los contaminantes del aire se han clasificado como criterio y no criterio. Los contaminantes criterio o críticos son sustancias que han establecido límites de exposición basados en la salud, bienestar de las personas y el medio ambiente. Como el monóxido de carbono (CO), material particulado suspendido total (TSP), grueso (PM<sub>10</sub>) o fino (PM<sub>2.5</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxidos de sulfuro (SO<sub>2</sub>), plomo (Pb) y ozono troposférico (O<sub>3</sub>) en Ecuador (Nunes, Garcia, y Alba, 2006). Es importante recalcar la división de los contaminantes antes mencionados, ya que se fragmentan en primarios, aquellos que se emiten directamente a la atmósfera, y los secundarios, los que se forman por reacción química y física (Oyarzún, 2010). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) ha clasificado contaminantes tóxicos del aire, cuales representan una amenaza potencial en la salud y en áreas urbanas. Hay 187 contaminantes tóxicos de los cuales 30 son contaminantes peligrosos. Por ejemplo, metales pesados como mercurio y plomo, químicos volátiles como el benceno, productos derivados de la combustión como dioxina y solventes como tetracloruro de carbono y cloruro de metileno, entre otros (EPA, 2017). En Ecuador, los contaminantes no convencionales con efectos tóxicos o cancerígenos con el Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), Mercurio (Hg), Cadmio (Cd) (TULSMA, 2017).

El crecimiento económico y poblacional han sido los impulsores para el aumento de emisiones de efecto invernadero como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos nitrosos ( $\text{N}_2\text{O}$ ), clorofluorocarbonos (CFC), etc. Esto se debe al uso de combustibles fósiles, procesos industriales, prácticas agrarias intensivas, destrucción de bosques, los cuales contribuyen a incrementar el efecto invernadero (Pico, Gonzalez y Sanchez, 2012, p.30)

Efecto invernadero es un fenómeno natural de la atmósfera que sirve para mantener la temperatura en las superficies de la tierra. Por lo tanto, es la presencia de gases en la atmósfera, los cuales producen un calentamiento en la temperatura de la tierra. Cabe recalcar que los gases de la de efecto invernadero se encuentran presentes en la atmósfera como el dióxido de carbono (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC], 2014)

La presencia en el aire de sustancias contaminantes en concentraciones elevadas perturba el equilibrio ecológico, generando efectos perjudiciales a la salud y el ambiente.

## 2.5. Emisiones vehiculares

En Ecuador, año 2011, el número de vehículos matriculados fueron de 1.488.023, el siguiente año 2012 fue de 1.509.458, en el año 2013 subió a 1.717886, año 2015 aumentaron los vehículos a 1.925.368 mientras que en el año 2016 hubo un crecimiento de 6,8% subiendo a 2.056.213 de vehículos. En el DMQ, año 2016 hay 733.269 vehículos matriculados (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2015); (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2016). La calidad del aire está influenciada por las emisiones vehiculares. En el año 2011, el 98.5% del CO se originó de las fuentes móviles dividiendo en vehículos livianos con un 29%, pesados a dieses 21% y camionetas 14%, generando 79.126 toneladas. Así mismo, el 62.2% de  $\text{PM}_{2.5}$  es producida por vehículos, por lo que el 53,6% se deben a los vehículos a diésel, generando 1.337 toneladas (Secretaria de Ambiente, 2014).

Es la cantidad de contaminantes que emiten los vehículos a motor. El funcionamiento de los automóviles se debe a los hidrocarburos. Esto se debe a que la gasolina y el diésel son compuestos que contienen átomos de hidrogeno de carbono, los cuales son emitidos a la atmosfera provocando contaminación. Sin embargo, la urbanización intensiva y el desarrollo de las ciudades, han contribuido al aumento de las emisiones de tránsito (Spiru y Simona, 2017).

Cabe recalcar que hay tres tipos de emisiones de contaminantes de los vehículos: las emisiones del tubo de escape, emisiones evaporativas y emisiones de partículas por frenos y llantas. La gran mayoría de los contaminantes se emiten por el tubo de escape, ya que son cantidades considerables de monóxido de carbono debido a la combustión incompleta. Además, en el interior del motor se produce óxidos de nitrógeno cuando el nitrógeno entra en contacto con el oxígeno en alta temperatura y presión. Además, el tubo de escape libera material particulado debido a que no reaccionan las partículas de combustión (Herrera, Rodríguez y Marín, 2012)

La evaporación del combustible ocurre cuando el vehículo esta estacionado, en circulación y su magnitud depende de la presión de vapor del combustible, factores y características del vehículo. El combustible se volatiliza debido a su calor residual cuando el vehículo se encuentra apagado, así como también las fugas de vapores del tanque durante la recarga del mismo (Pico, Gonzalez y Sanchez, 2012, p.20). Las sustancias expuestas anteriormente forman smog y son capaces de dañar el hígado, causar problemas cardíacos y cáncer al ser humano. En el Ecuador, las fuentes móviles en el DMQ generan 3221384 (59,4%) de CO<sub>2</sub>, 670 (3,8%) de CH<sub>4</sub> y 240 (78,1%) de N<sub>2</sub>O (Secretaria de Ambiente, 2014). En el DMQ, año 2011, el sector energético tuvo un consumo de 58.558.8 TJ generando emisión de 4.902,2 Gg de CO<sub>2</sub> correspondiente a las fuentes móviles un 50,4%. Por lo que las emisiones de GEI por transporte terrestre son 2469.0 Gg/año de CO<sub>2</sub>, 0.5 Gg/año CH<sub>4</sub>, 0.02 Gg/año N<sub>2</sub>O, 23.5 Gg/año NOX, 194,9 CO.

## 2.6. Material particulado PM<sub>2.5</sub>

Material particulado fino o PM<sub>2.5</sub> son suspensiones relativamente estables de partículas sólidas y líquidas con diámetro menor a 2.5µm (Arciniegas, 2012). Las partículas se forman por medio de dos mecanismos: subdivisiones o rotura de fragmentos mayores de materia y la reunión de fragmentos pequeños. Se originan por una gran variedad de fuentes naturales o antrópicas. Son de tamaño, forma y composición variada (Samara y Voutsas, 2005). Además, por su formación de las partículas son primarias si se emiten directamente a la atmósfera mientras que las secundarias son emitidas a la atmósfera por reacciones químicas. Las partículas con diámetro menor a PM<sub>2.5</sub>, se encuentran suspendidas en el aire y se forman debido a reacciones químicas y procesos físicos. Contienen hollín y otros derivados de las emisiones industriales y de vehículos. Los combustibles sólidos dentro de los hogares son un riesgo para las personas, ya que se inhalan las partículas, las mismas llegan a las vías respiratorias inferiores provocando neumonía, accidentes cerebrovasculares, cardiopatía isquémica. Además, los ancianos expuestos a altos niveles de humo en interiores pueden padecer de neumonía obstructiva crónica.

Estas partículas tienen un mayor efecto en la salud, puesto que ingresan al sistema respiratorio provocando enfermedades respiratorias y cardíacas, así como también asma, bronquitis, cáncer al pulmón (Barría, Calvo y Pino, 2016). Además, las partículas menores a diez micrones de diámetro son el producto de la combustión no controlada, pueden penetrarse y alojarse en el interior de los pulmones (Arciniegas, 2012). Las personas que presentan enfermedades del corazón, obstrucción pulmonar crónica y congestiones cardíacas, al estar expuestas al contaminante tienen un riesgo mayor de muerte prematura. Los niños y ancianos con enfermedades pulmonares que estén expuestos a PM, la capacidad de su respiración va a disminuir, así como también puede experimentar síntomas de agitación (Secretaría de Ambiente, 2017)

## 2.7. Técnicas de medición PM<sub>2.5</sub>

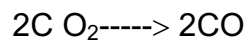
Las técnicas empleadas para la medición de contaminantes son fundamentales para inmisión y emisión. Existen dos métodos para la medición de contaminantes atmosféricos. Uno de ellos, es el método continuo, el cual se refiere a la captación y análisis del contaminante de manera automática y continua como los analizadores automáticos y sensores remotos que proporcionan los datos a tiempo real. Mientras que el método discontinuo es la captación del contaminante en el punto del muestreo para luego ser analizado en laboratorio (Patier, 2006).

El muestreo activo requiere de energía eléctrica para succionar el aire de la muestra a través de un medio físico o químico. El método automático permite llevar mediciones continuas y a tiempo real. Las muestras analizadas con este método son espectroscopia y cromatografía de gases. La lectura es automática, permite detectar valores máximos a tiempo real en situación de alerta.

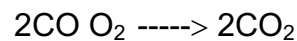
Los equipos se clasifican en analizadores automáticos, los cuales se usan para determinar la concentración de los contaminantes en el aire fundamentándose en las propiedades físicas-químicas y monitores de partículas que son aquellos que se usan para determinar la concentración de partículas suspendidas como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Los métodos que se usa para el análisis de PM<sub>2.5</sub> de los equipos son volumétricos, gravimétricos, fotométricos y espectrofotometría (Instituto Nacional de Ecología, s.f.). Uno de ellos es la espectrofotometría que se mide dependiendo de la cantidad de energía radiante absorbida por las moléculas de longitud de onda. Cada uno de los compuestos tiene un patrón de absorción distinto que da origen a un espectro para poder identificarlo. Engloban longitudes desde la ultravioleta hasta la infrarroja. El equipo que se fue utilizado en el estudio es el MicroDust Pro y el sensor SEN077, el cual funciona con el principio de dispersión de luz directa.

## 2.8. Monóxido de carbono (CO)

Es un gas inodoro, inflamable, insípido, tóxico e incoloro, es dañino cuando se inhala en grandes cantidades, se encuentra en interiores y exteriores (Pico, Gonzalez y Sanchez, 2012, p.23). Es un agente reductor con una concentración promedio en la atmósfera de 0,1 ppm. Es producto de la combustión incompleta de la materia orgánica como el carbón, petróleo y madera en un ambiente donde no hay suficiente oxígeno y ocurren reacciones (EPA, 2017).



Si hay combustión de carbono en una atmósfera con suficiente oxígeno este produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), mientras que por oxidación del monóxido de carbono:



El monóxido de carbono tiene fuentes naturales como los gases volcánicos, minas de carbón, incendios, pantanos, tormentas eléctricas, metabolismo de las plantas y animales. Sin embargo, la fuente de producción de CO de mayor concentración es el motor de combustión interna (Palate, 2009, p. 25). Así como también los calentadores de queroseno, gas sin ventilación, chimeneas, estufas. Las emisiones del CO de los automóviles aumentan cuando el auto no está prendido. Ya que cuando el auto está en temperaturas bajas, este consume más combustible para el arranque, siendo menos eficiente cuando está frío (Martínez, 2004, p.14).

El CO se degrada en el aire y reacciona con sustancias químicas y se transforma en anhídrido carbónico. Debido a su toxicidad en las personas, el monóxido de carbono ingresa a los pulmones y se combina a la hemoglobina de la sangre produciendo carboxihemoglobina, el cual reduce el transporte de oxígeno a las células, alterando el sistema nervioso y cardiovascular. Las concentraciones altas de CO producen dolores de cabeza, pérdida de conocimiento y la muerte. El efecto causado por el CO depende de la persona y sus enfermedades. Por ejemplo, mujeres embarazadas, los bebés recién nacidos pueden tener altos riesgos de muerte (Palate, 2009, p.7). Así como también, las personas que padezcan de enfermedades cardiovasculares como angina, estos individuos

pueden experimentar dolores en el pecho, entre otros síntomas (Secretaría de Ambiente, 2017); (Levy, 2017)

## 2.9. Técnicas de medición de CO

La medición de CO se realiza por diversos métodos estos pueden ser: muestreo pasivo, muestreo con bioindicadores, muestreo activo, método automático, método óptico. El método automático permite realizar mediciones continuas para el CO. Como el sensor químico, es un dispositivo que da una respuesta a tiempo real, realiza una traducción directa de la concentración de un contaminante en fase líquida o gaseosa a señal física (Martínez, 2004, p.94); (Instituto Nacional de Ecología, s.f.). Los elementos que constituyen estos sensores son una membrana sensible, un transductor que convierte al sensor en señal física ya sea eléctrica u óptica y tiene un sistema de adquisición para la lectura. Los sensores se clasifican en conductimétrico, óptico o electroquímico (Parra y García, 2008) .

Los sensores electroquímicos determinan el contenido de oxígeno y los gases nocivos como el CO. Su funcionamiento se basa en el principio de la valoración potenciométrica sensible a iones. El método electroquímico está basado en mediciones de la corriente. Tiene un electrodo detector y un electrodo contador. El gas reacciona electroquímicamente con el electrodo detector mediante la reacción REDOX generando una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de moléculas de gas oxidadas (PRAXAIR, 2015).

### 3. CAPITULO III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Instrumentos

##### 3.1.1. Descripción del sensor de humedad relativa y temperatura ambiental (DTH-22)

El módulo DTH-22 es un sensor que mide humedad relativa y temperatura ambiental, el sensor viene calibrado. Este sensor se fabrica por sinterización de materiales semiconductores como polímeros o cerámica para proporcionar cambios pequeños o grande de temperatura. El exterior del sensor tiene una estructura encapsulada de plástico. El periodo de detección es de dos segundos y puede llegar a trasmitir hasta 20 metros. Tiene un procesador interno que realiza el proceso de medición recolectando los datos en señal digital (Liu y Manager, s.f.)

El funcionamiento del DTH-22 para medir la HR es que utiliza un sensor capacitivo de humedad, además se usa dos electrodos con sustrato de humedad entre ellos. Cada vez que la humedad cambia la conductividad el sustrato cambia y por ende cambia la resistencia entre los electrodos, por lo que el cambio de resistencia es medido y procesado por el IC. El rango de medición es de 0 a100% de humedad relativa (Liu y Manager, s.f.). Para medir la temperatura se usa sensor NTC (Coeficiente de Temperatura Negativa). El sensor NTC hace que la resistencia disminuya con el aumento de la temperatura. El rango de medición es de -40°C a 80°C, la precisión de la temperatura es  $\pm 0.5$  grados centígrados (Liu y Manager, s.f.).



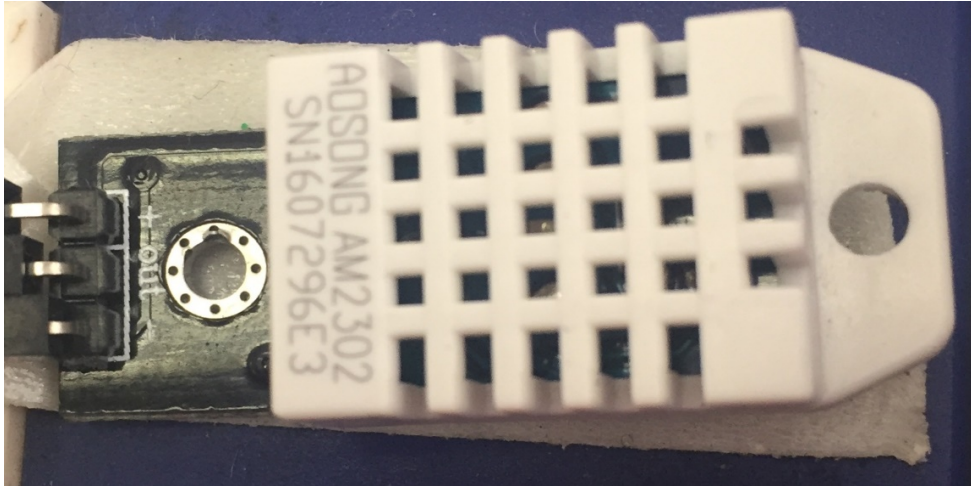


Figura 1. Sensor DHT22. Humedad relativa y temperatura ambiental.

### 3.1.2. Descripción del Anemómetro *Airflow* TA440

El TA440 es un equipo que tiene una sonda telescópica que contiene sensores de velocidad de viento, temperatura ambiental y humedad relativa. El rango de temperatura es de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ . Es un sensor de alambre caliente, emite corriente al alambre y se calcula la variación de la temperatura en función de otro sensor de referencia. Para un funcionamiento adecuado hay que asegurarse de que la sonda del sensor este expuesto y el hoyuelo este orientado hacia arriba. El *Airflow* requiere de muy poco mantenimiento (Airflow Instruments Inc, 2014).



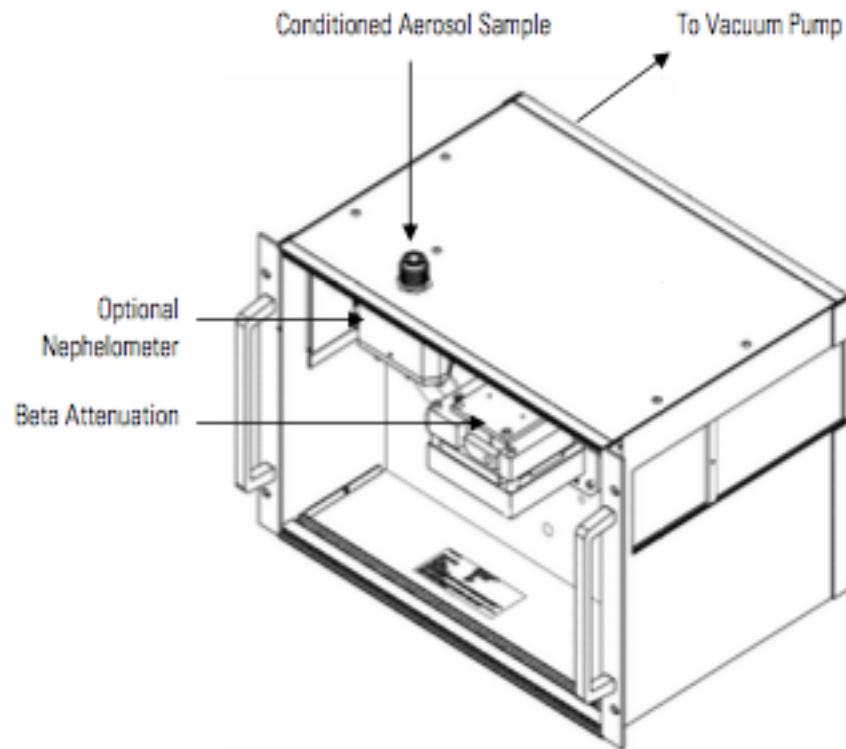
Figura 2. Equipo Airflow TA440.

Adaptada de ( Airflow Instruments Inc, 2014).

### 3.1.3. Descripción del Instrumento (Thermo Andersen/ FH62C14) para material particulado (PM<sub>2.5</sub>)

El instrumento FH62C14 es de *Thermo Scientific* es un monitor de partículas que proporciona mediciones a tiempo real de aerosoles ambientales PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM total. El FH62C14 se basa en el principio de atenuación beta para la medición de los aerosoles, las partículas son succionadas por la bomba, las mismas se depositan en una cinta filtro de fibra de vidrio. Mientras se realiza la recolección del aerosol en la cinta de filtro, el equipo usa el principio radiométrico de atenuación beta para recolectar y detectar continuamente el depósito de la masa. La cinta avanza de forma automática y pasa por una cámara. La cámara contiene una fuente radiactiva de carbono 14 (C<sub>14</sub>) que emite radiación beta y es captada por el receptor como se indica en la Figura 3. El monitor tiene un sistema de calefacción, está diseñado para mantener la humedad relativa del aire que pasa por la cinta del filtro. Está diseñado para que el monitor de masa continuo acepte el método de referencia gravimétrico y las condiciones de humedad relativa para que se adapte a las condiciones de la muestra del filtro de referencia. La masa se calcula con una ecuación y la intensidad del emisor debe ser proporcional a la concentración de las partículas (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007).

El FH62C14 tiene sensores de temperatura, sensor de humedad relativa, sensores de presión barométrica, bomba de vacío controlada por velocidad variable. El rango de medición es de 0 a 1000 µg/m<sup>3</sup>. Además, se controla la temperatura y la presión en la cámara para evitar que las partículas volátiles causen errores (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007).



*Figura 3.* Cámara de partículas de Thermo Andersen

Tomado de Thermo Fisher Scientific Inc, 2007

#### 3.1.4. Descripción del sensor (SEN077) de material particulado (PM<sub>2.5</sub>)

Es un sensor digital, en la Figura 4, el rango de medición es de 0 a 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El tiempo de vida del sensor es mayor a 5 años. El tamaño mínimo es de 0.3  $\mu\text{m}$  de resolución. Puede ser utilizado para obtener el número de partículas suspendidas en una unidad de volumen de aire en un rango de 0.3 a 10  $\mu\text{m}$  (DFRobot, 2017).

El funcionamiento del sensor se basa en la teoría de la dispersión láser. El láser irradia las partículas suspendidas que ingresan por el sensor a partir de la variación angular de la intensidad de luz dispersada. Se analiza los datos de acuerdo a la intensidad de dispersión angular y luego se calcula dependiendo del tamaño de las partículas (DFRobot, 2017).

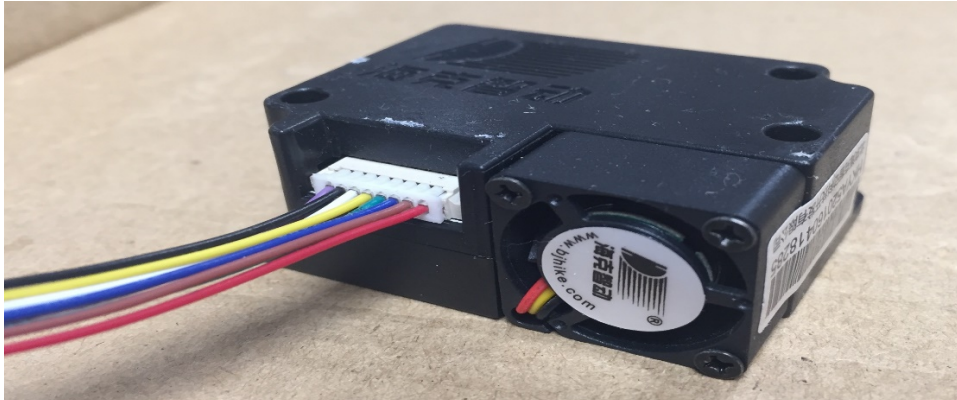


Figura 4. Sensor de Material particulado SEN077.

### 3.1.5. Descripción del Instrumento *MicroDust Pro* para material particulado (PM<sub>2.5</sub>)

El Equipo *MicroDust Pro* es fabricado por Casella, mide los niveles de partículas como polvo, humo, entre otros aerosoles (Figura 5). Es ideal para evaluar las concentraciones de partículas a tiempo real en mg/m<sup>3</sup>. El rango de medición es de 0,001 a 2500 mg/m<sup>3</sup>. El equipo *MicroDust Pro* se basa en el principio de dispersión de luz directa para las mediciones precisas y repetibles a la concentración de polvo. Sin embargo, es un instrumento sensible que se debe proteger contra la humedad excesiva, vibración y el choque físico.

El funcionamiento del equipo es que a través de un módulo de luz infrarroja es proyectada a una cámara de medición que tiene un volumen de muestreo conocido. Las partículas al estar en contacto con una longitud de onda de 880nm, el haz de luz se dispersa en un ángulo de 12° a 20°. La luz dispersada se encuentra en los componentes difractados y refractados, reduciendo al mínimo la incertidumbre asociada al color, forma y al índice de refracción de partículas. Se usa el principio de ciclón para la separación de las partículas a través de filtros, los cuales extraen solo la fracción necesaria a través de la cámara de medición. La cantidad de la luz dispersa será proporcional a la concentración total de aerosoles (CASELLA, s.f). El rango de medición de 1 mg/m<sup>3</sup> a 2500 mg/m<sup>3</sup>. La calibración del equipo se basa en la norma (ISO 12103-1 A2) polvo

fino para el muestreo de aerosoles. La duración del equipo depende de las pilas alcalinas.

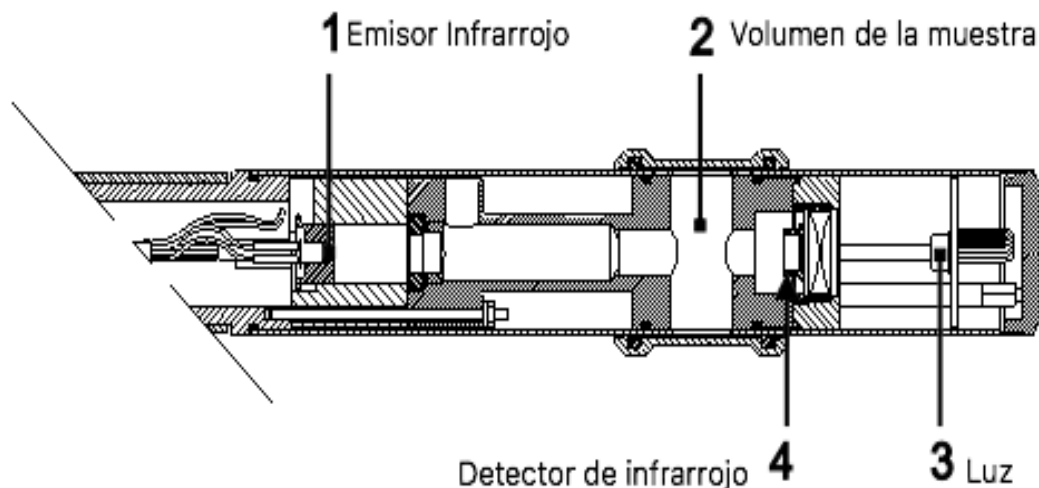
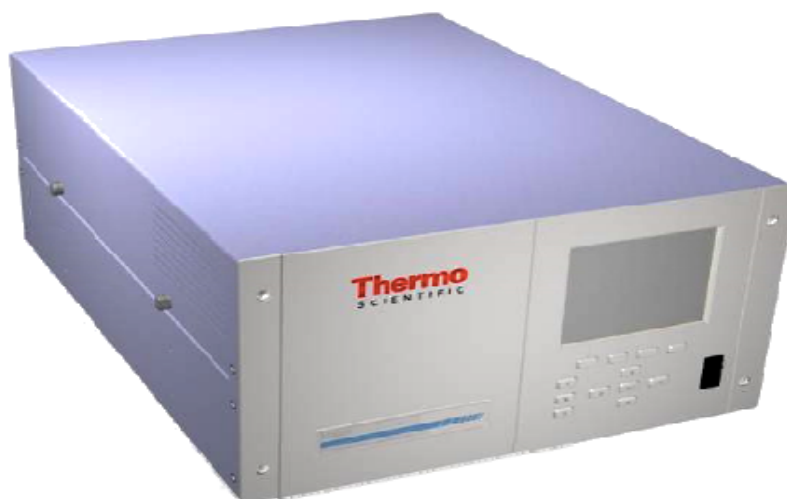


Figura 5. Sonda de muestreo de MicroDust Pro.

Adaptado de (CASELLA, s.f)

### 3.1.6. Descripción del Instrumento (*Thermo / 48C / 48i*) para monóxido de carbono

El funcionamiento del equipo de monóxido de carbono *Thermo/48i* (Figura 6) es que la radiación de una fuente infrarroja se corta y pasa por un filtro de gas alternando entre monóxido de carbono y dinitrogeno. Luego, pasa por un filtro de interferencia de paso y entra a un banco óptico donde ocurre la absorción por el gas de la muestra. La radiación infrarroja sale del banco óptico y cae a un detector de infrarrojo. Además, el filtro de gas de monóxido de carbono actúa para producir un haz de referencia, el cual no puede ser atenuado por el CO en la celda. Absorbe la radiación infrarroja a una longitud de onda de  $4.6 \mu\text{m}$ , se transforma la señal del analizador básico en una salida lineal. Igualmente, el *Thermo 48i* usa la curva de calibración que está almacenada internamente para linealizar con precisión la salida del instrumento. El rango de medición es 0-50 a 20000 ppm (Thermo Scientific, 2014).

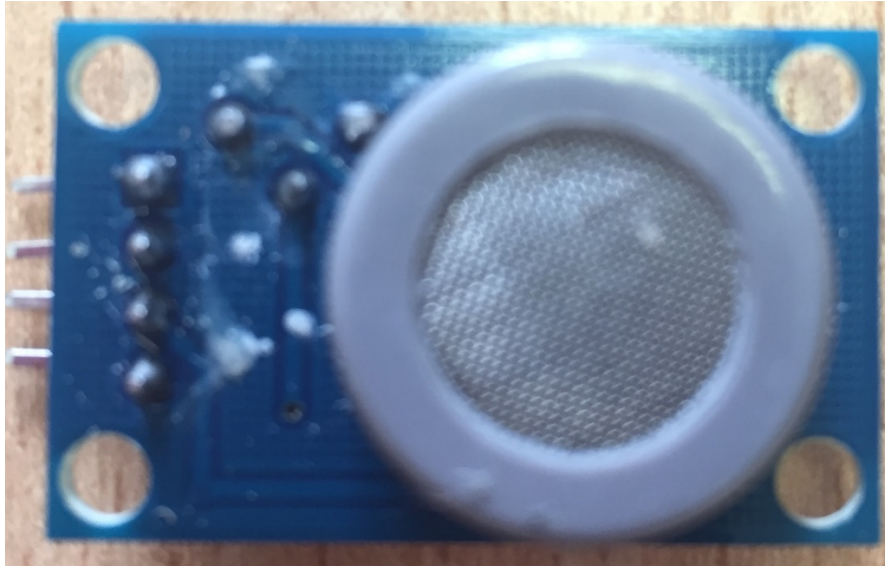


*Figura 6.* Equipo Thermo 48i

Tomado de Thermo Scientific, 2014

### 3.1.7. Descripción del sensor de monóxido de carbono (MQ-7)

La estructura de MQ-7 tiene un tubo de cerámica micro  $Al_2O_3$ , una capa de dióxido de estaño ( $SnO_2$ ), electrodo de medición y un calentador hecho de plástico y de acero inoxidable. El sensor de CO (Figura 7) consta de dos partes, la primera tiene un circuito de calentamiento que funciona para controlar el tiempo y la segunda parte es otro circuito de salida de la señal. El rango de medición es de 10 a 10000 ppm. El funcionamiento del MQ-7 es que se detecta el CO en temperaturas bajas a 1.5 V. Mientras que a temperaturas altas a 5.0 V limpia otros gases absorbidos de las bajas temperaturas. También, usa un electrocircuito simple convirtiendo el cambio de conductividad en señal de salida correspondiente al gas (Henan Hanwei Electronics CO., s.f.).



*Figura 7.* Sensor de Monóxido de carbono MQ7

### 3.2. Validación de los Instrumentos

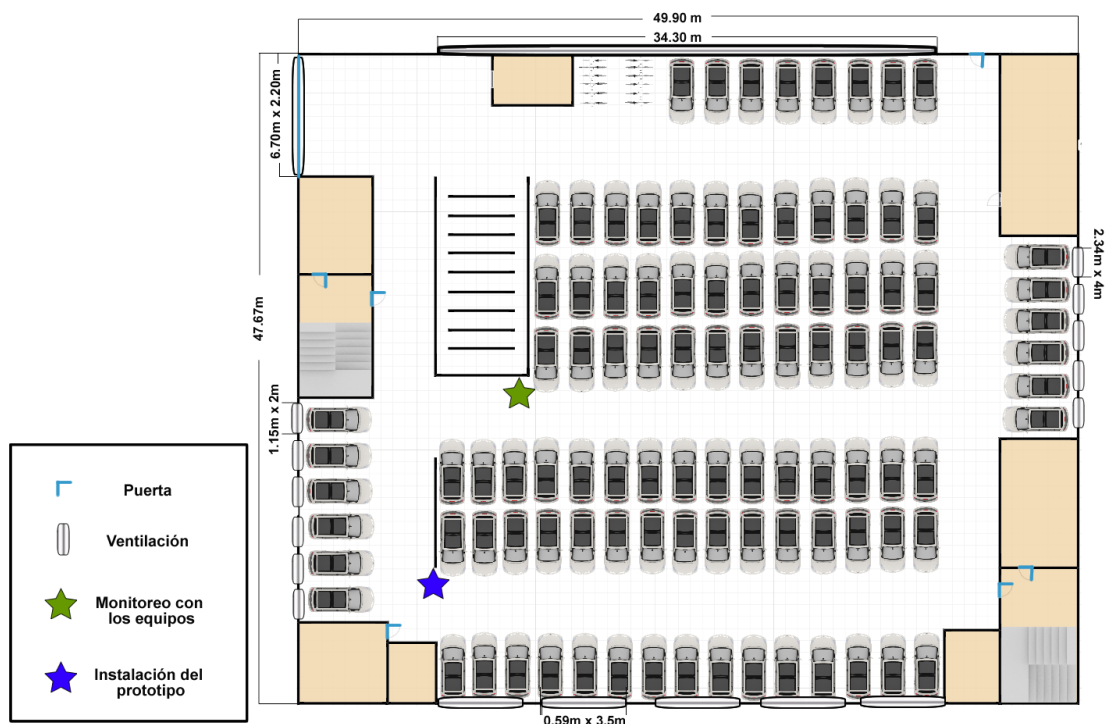
#### 3.2.1. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en Quito, en el garaje subterráneo de la Universidad de Las Américas. El parqueadero se encuentra ubicado en la Avenida de la Granados, tiene dos niveles, cuenta con ciento ochenta y seis espacios para vehículos livianos a diésel y gasolina (Figura 8). Este estacionamiento no es público, ya que es utilizado por estudiantes, visitas y profesores de la universidad. El área es de aproximadamente 2378.733 m<sup>2</sup>. La ventilación del parqueadero no es forzado. Tiene una puerta de ingreso para el nivel 1 y 2. Hay una rampa para el ingreso o salida de los vehículos del segundo nivel. El horario de funcionamiento es de siete de la mañana a diez de la noche. El parqueadero subterráneo tiene un largo 49.90 metros, de ancho 47.67 metros y 3 metros de alto (Figura 9). La zona establecida para la implementación del prototipo es en el parqueadero subterráneo primer nivel como se aprecia en la Figura 8.



Figura 8. Mapa de la Universidad de Las Américas.

Adaptado de (Google Satelital, s.f)





*Figura 9.* Plano del primer nivel del parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas.

### 3.2.2. Descripción de la estación Belisario

La Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) monitorea continuamente CO, PM<sub>2.5</sub> entre otros y produce datos confiables de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. El REMMAQ forma parte de la Secretaria de Ambiente y funciona desde el 2004. Son nueve estaciones del Distrito Metropolitano de Quito: Belisario, Centro, Camal, Cotocollao, Carapungo, Chillos, Tumbaco y Guamani.

La primera validación del prototipo se realizó en la estación Belisario. En la Figura 10, se muestra el monitoreo, se registra cada diez minutos y está en funcionamiento todo el año. Cada año se realiza un informe de calidad del aire, el cual cumple con información verídica.



*Figura 10.* Estación Belisario de la Secretaria de Ambiente DMQ, monitoreo con el prototipo y MicroDust Pro.

### 3.2.3. Realización del Prototipo

Primeramente, se colocó un Arduino y se realizó las conexiones respectivas para conectar el sensor de CO (MQ7), sensor de material particulado (SEN077), reloj Arduino, lector de tarjeta SD, Xbee y sensor DTH22 (Figura 11). Así mismo se colocó una batería externa. Se realizó una placa para disminuir el tamaño del prototipo. La estructura del prototipo se realizó a base de cartón (Figura 12). También se realizó la interfaz gráfica a tiempo real las concentraciones de material particulado y monóxido de carbono.

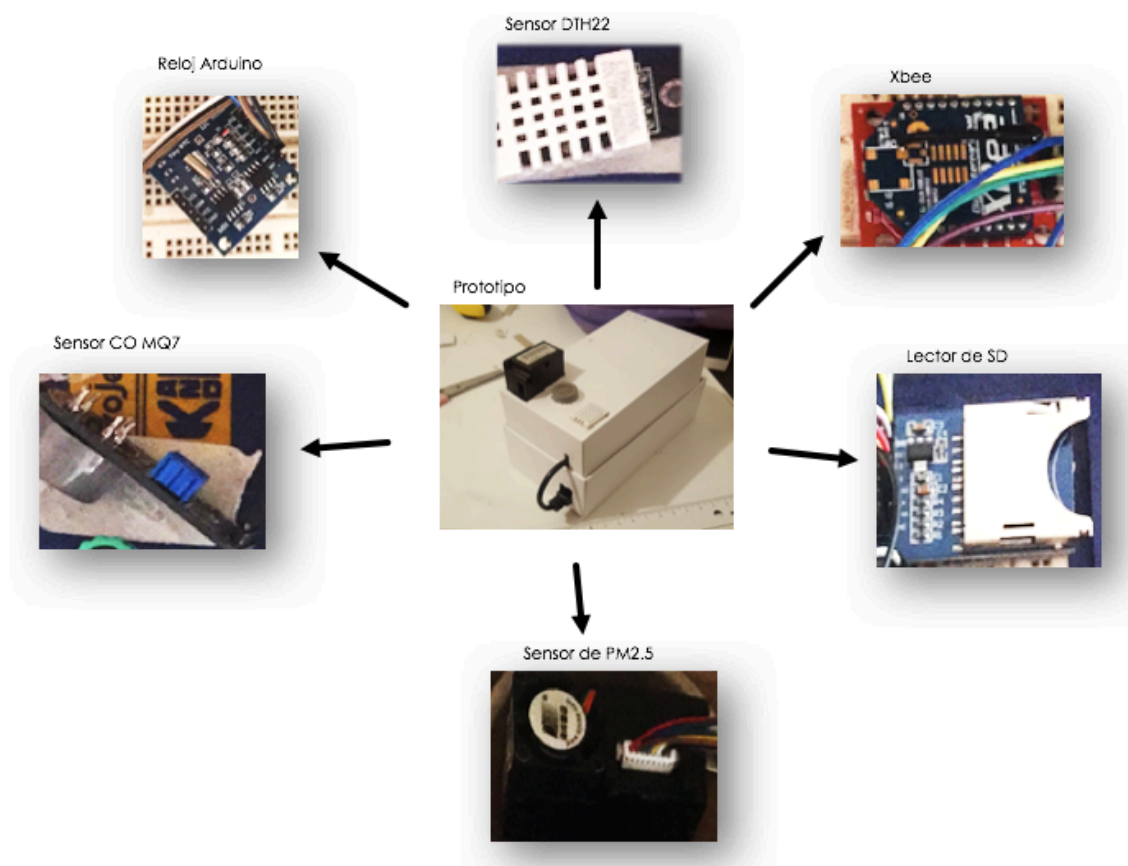


Figura 11. Componentes del Prototipo que se colocara en el garaje.



Figura 12. Prototipo con su respectiva estructura.

#### 3.2.4. Medición en la estación Belisario de $PM_{2.5}$ y monóxido de carbono

El día 20 de octubre de 2017, se realizó el primer monitoreo. Este se llevó a cabo en la estación Belisario de la red de monitoreo de la Secretaría de Ambiente de DMQ (Figura 13). Se usó el *MicroDust Pro* junto con los equipos Thermo de la Secretaría de Ambiente de  $PM_{2.5}$  y CO para la validación del prototipo de este estudio. Desde 13h30 de la tarde se comenzó a calibrar el *Microdust Pro*. Primeramente, se sincronizó la hora, la frecuencia de medición que fue de diez segundos y se configuró el equipo para un rango de  $2500 \text{ mg/m}^3$ . Luego, se colocó el prototipo y *Microdust Pro* a la misma altura de los equipos *Thermo Scientific* y *Thermo Ai8*. Las mediciones se iniciaron in situ a las 15h00 de la tarde. Y así mismo, se finalizó a las 18h00 de la tarde. Es decir, las mediciones duraron tres horas. La temperatura promedio durante las mediciones fue de  $18.21 \text{ }^\circ\text{C}$  y la humedad ambiental promedio fue de 52.28%.



Figura 13. Estación Belisario.

#### 3.2.4.1 Calibración del *MicroDust Pro*

Para evitar inconvenientes y mediciones erróneas se procedió a calibrar el instrumento *MicroDust Pro* con una serie de pasos.

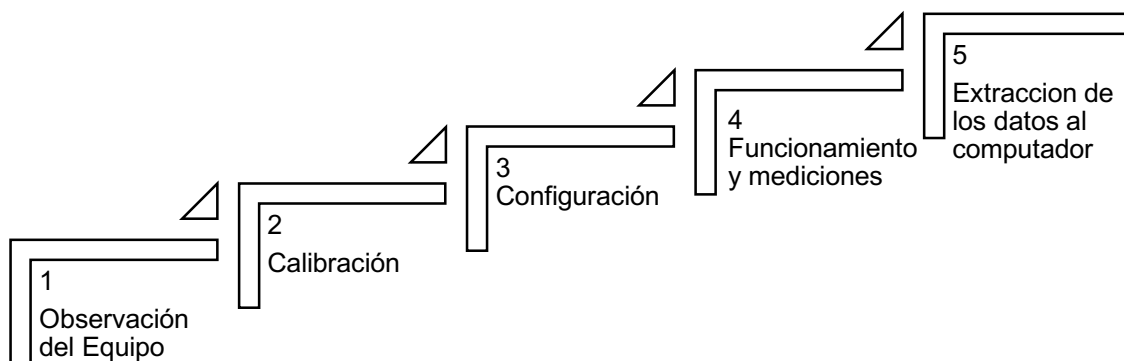


Figura 14. Diagrama para la calibración del Equipo *MicroDust Pro*.

- Se comprobó que el equipo estaba en buen estado y se procedió a colocar las pilas alcalinas. Todos los días se los cambio para asegurarse de que

el equipo funcione las cinco horas. Antes de todo se necesita calibrar el equipo por lo que el proceso tuvo dos fases (Figura 14).

- Se encendió el equipo, se seleccionó la opción calibrar, configurar el cero. Luego, se inyectó aire limpio, usando un filtro con una bomba de mano. Se esperó a que el valor se estabilice. Nuevamente, seleccionó la opción configurar la sensibilidad y con el patrón de calibración, se insertó en la cámara de medición y comprobó que la medición sea  $164 \text{ mg/m}^3$ . Se colocó el filtro en la cámara de medición y se verificó que este en buen estado. Se insertó el adaptador gravimétrico PUF (Filtro Espuma Poliuretano) de manera cuidadosa para evitar que se maltrate y cause lecturas erróneas. Además, se verificó las pilas de la bomba y se colocó el tubo en la sonda, el caudal de la bomba aire es de  $3.5 \text{ l/min}$ .
- Se configuró para que las mediciones se guarden de diez segundos, además, se configuró la hora y fecha sincronizar con los datos con los demás instrumentos. El rango de medición fue de  $2500 \text{ mg/m}^3$
- Se comenzó con las mediciones y se colocó en equipo en un solo sitio con los demás equipos a una altura de 20 centímetros. Verificar si el equipo y la bomba están en funcionamiento, al finalizar las mediciones es necesario comprobar que los datos se guardaron exitosamente.
- Se conectó al computador con un cable USB. Se descargó dos programas: *Casella Insight* y *Serial Port Writer Reader*. El primero, sirve para descargar los datos a la computadora mientras que el segundo software transforma los datos y los exporta a Excel.

#### 3.2.4.2 Meteorología

Durante la semana de mediciones se recolectó información del ambiente exterior de temperatura y humedad relativa de la estación Belisario, ya que esta es la más cercana al punto de muestreo. Los equipos que usan en la estación son *METone/382* y *Thies Clima/5.4032.007*. Además, se recolectó los datos del parqueadero con el anemómetro *Airflow TA44* y el sensor *DTH22*.

### 3.2.5. Flujo de tráfico y conteo de personas

Se realizó un conteo general de los vehículos estacionados, se contabilizó los vehículos que ingresan al parqueadero y salen del mismo durante dos horas desde las 8h15 hasta 10h15 de la mañana para que coincida con el horario de monitoreo. Se contó los vehículos y motos durante los 6 días. El punto de control fue ubicado en el primer nivel cerca de la rampa de subida y bajada del segundo nivel (Figura 9). Además, el día 11 de diciembre desde de las 7h00 hasta las 15h00 de la tarde, se colocó el prototipo en el parqueadero para realizar mediciones durante ocho horas, así mismo se realizó un conteo de vehículos que pasaban cerca del prototipo y el movimiento de los vehículos.

El día 16 de diciembre, se realizó un conteo de personas que asisten los días lunes a la Universidad de Las Américas, sede Granados. Se contó por hora de clases y el día lunes se contó el número de vehículos que ingresaban y salían del parqueadero durante las ocho horas desde las 7h00 de la mañana hasta las 15h00 de la tarde.

### 3.3. Mediciones en el parqueadero de la Universidad de Las Américas

El 10 de noviembre del 2017 a las 8h15 de la mañana se realizó el primer monitoreo en parqueadero con los instrumentos: el prototipo de estudio, *MicroDust Pro*, Anemómetro *Airflow TA440*. Se comenzó con la calibración del *Microdust Pro*, se sincronizó la hora, la frecuencia de medición fue de diez segundos. Se finalizó las mediciones a las 14h15 de la tarde. Las mediciones duraron seis horas. Los datos con el anemómetro dentro del parqueadero es decir en ambiente interior, la temperatura promedio fue de 20°C y la humedad relativa promedio fue de 71.21%. Mientras que el promedio en la estación Belisario de la temperatura fue de 14.95°C y de humedad relativa es de 63.23%.

Se realizaron las mediciones seis días consecutivos, se comenzó desde el día miércoles 15 de noviembre hasta el martes 21 de noviembre de 2017 con excepción del día domingo. Se realizaron las mediciones los días jueves, viernes, sábado porque son días menos concurridos mientras que los lunes y

martes son los días con mayor afluencia de estudiantes. Se comenzó desde 8h30 de la mañana hasta 14h30 de la tarde, es decir se monitoreo 6 horas cada día. El lugar donde se colocaron los equipos fue cerca a la rampa del segundo nivel a 30 cm a la altura del nivel del suelo (Figura 9). La frecuencia de medición de los equipos *MicroDust Pro* y Prototipo fue de 10 segundos. Así mismo, se recolectaron datos de la estación Belisario de la temperatura promedio y humedad relativa. En la Figura 14, se observa gráficamente el plano del parqueadero subterráneo. Además, el día miércoles 21 de diciembre de 2017, se realizaron las mediciones de la velocidad del viento en el parqueadero. Cada seis metros se midió la velocidad del viento.

#### 3.4. Software para el análisis de datos

Se descargó los datos del software *Casella Insight*, *Serial Port Writer Reader*, *LogDat2TM* y *RealTerm*, para el análisis, estadística básica y gráficos se utilizó el software Microsoft Excel.

## 4. CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Validación de resultados

La Secretaria de Ambiente de DMQ maneja la Red de Monitoreo atmosférico, y es la encargada de brindar datos confiables de la calidad del aire a nivel nacional. Por lo que la REMMAQ tiene equipos de altos costos, aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Uno de estos equipos es el *Thermo Andersen FH62C14* para  $PM_{2.5}$ , el principio de funcionamiento es de atenuación de rayos beta con método de referencia (EPA No. EQPM-1102-150) y el equipo *Thermo /48C /48i* para CO, funciona mediante absorción infrarroja no dispersiva con método de referencia (EPA No. RFCA-0982-054). Los equipos son validados y calibrados cada cierto tiempo (Secretaria de Ambiente, 2017). Ahora bien, se validaron los equipos en la estación Belisario. Además, se realizaron las respectivas correlaciones tanto para CO y  $PM_{2.5}$ .

En la Figura 15, se observa la distancia entre la estación Belisario y la Universidad de Las Américas, se encuentra a 4.1 km de distancia. Los datos de la estación Belisario sirvieron para realizar comparaciones con la temperatura ambiental, humedad relativa,  $PM_{2.5}$  y CO con relación al parqueadero subterráneo de la Universidad, sede Granados.



Figura 15. Distancia entre Universidad de Las Américas y la estación Belisario

Adaptado de (Google Satelital, s.f)

#### 4.1.1. Correlación de Material Particulado ( $PM_{2.5}$ )

Para analizar los resultados se realizaron promedios cada diez minutos para comparar entre *Thermo Andersen*, *MicroDust Pro* y el prototipo del estudio. En la Figura 16 se observa que los datos del prototipo tienden a ser bajas concentraciones en comparación con el *Thermo Andersen* y *MicroDust Pro*. Esto puede deberse a que el sensor debe estar 48 horas antes encendido para que comience a dar valores reales (Henan Hanwei Electronics CO., s.f.). También puede influir la humedad relativa, ya que el ambiente al estar con humedad relativa mayor a 70% tienden a medir valores inexactos (Pico, Gonzalez, y Sanchez, 2012, pp.5). Siendo una interferencia de humidificación de los



aerosoles, sin embargo, el comportamiento entre los equipos *Thermo Andersen*, *MicroDust* y el prototipo tiene tendencias similares.

El sensor SEN077 permite monitorear  $PM_{2.5}$  de modo continuo y a tiempo real, además, de que es económico y sencillo de manejarlo. Sin embargo, el sensor tiene alta dependencia de las condiciones atmosféricas, como la humedad relativa y la temperatura (Martínez, 2004, p.94).

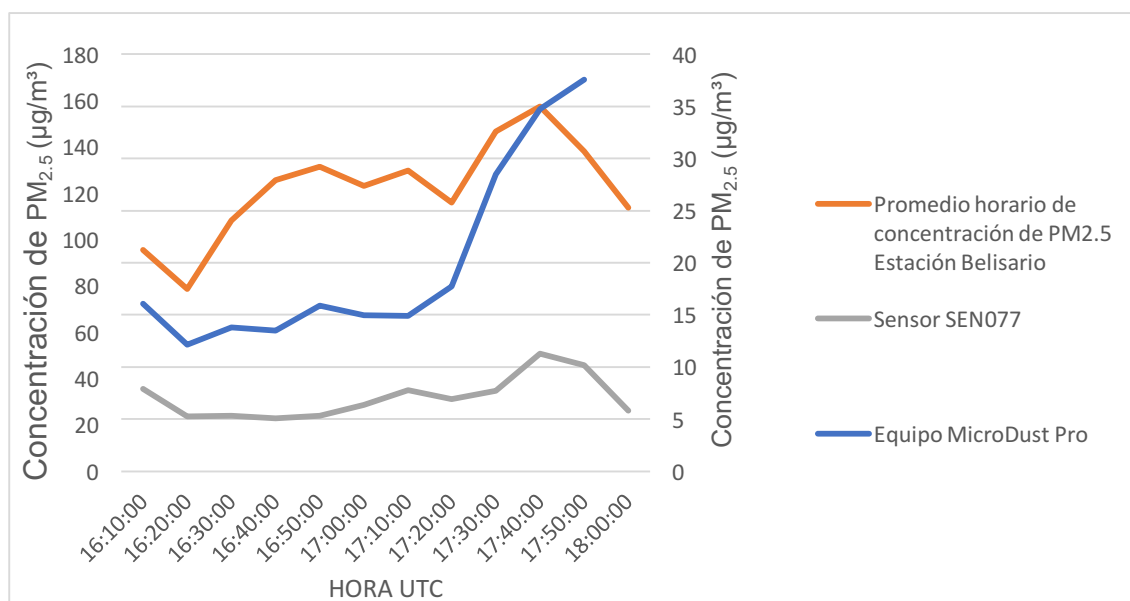


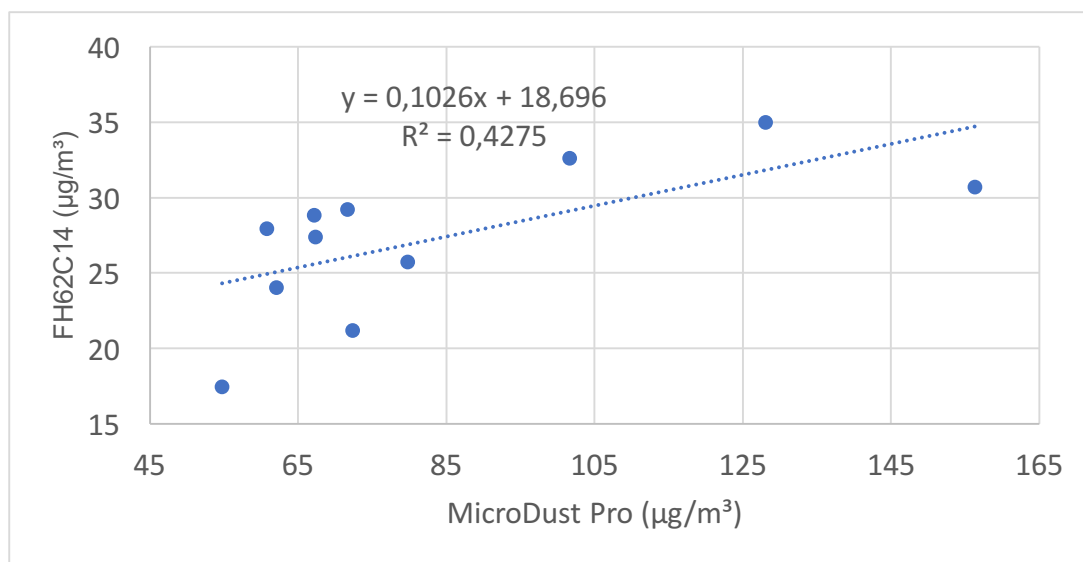
Figura 16. Concentraciones de  $PM_{2.5}$  con los Instrumentos Thermo Andersen, MicroDust Pro y Sensor SEN077.

#### 4.1.1.1 Correlación entre los instrumentos *Thermo Andersen* y *MicroDust Pro*

En la Figura 17 se observa una regresión lineal entre el Thermo Andersen y *MicroDust Pro*. Tiene una correlación lineal positiva, ya que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.42. Por lo tanto, se puede afirmar que hay correlación entre estos dos equipos. Puesto que, según la estadística el valor del coeficiente que sea mayor a 0.25 puede considerarse bueno, ya que los datos obtenidos corresponden a la experimentación realizada (Cimbage et al., 2014). Se excluyeron en total ocho valores, estos pueden ser valores atípicos, siendo

posibles errores del mismo equipo. También puede deberse a algunas actividades antropogénicas cercanas al lugar de medición. Con la Ecuación 1, se corrigió los valores del equipo *MicroDust Pro*. Ya que el equipo *Thermo Andersen* se basa en el método de absorción de rayos y tiene un sistema de calefacción que regula la temperatura y humedad relativa. Entonces, la muestra que ingresa al equipo no es afectada por los parámetros externos (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007). Mientras que el equipo *MicroDust Pro* al funcionar con un haz de luz dispersa, la conversión de la dispersión de luz a concentraciones de los aerosoles es afectada por la humedad de la muestra. Las partículas incrementan el tamaño ocasionando que los datos se sobreestimen (Pico, Gonzalez, y Sanchez, 2012, p.72). Por lo que el 20 de octubre de 2017, la humedad relativa fue 64.48%. En la Figura 18 se muestra las concentraciones  $PM_{2.5}$  corregidas con la Ecuación 1. El promedio horario de  $PM_{2.5}$  fue de  $27.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

$$y = 0,1026x + 18,696 \quad (\text{Ecuación 1})$$



*Figura 17.* Presentación gráfica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  del equipo FH62C14 frente al equipo MicroDust Pro de la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indican los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

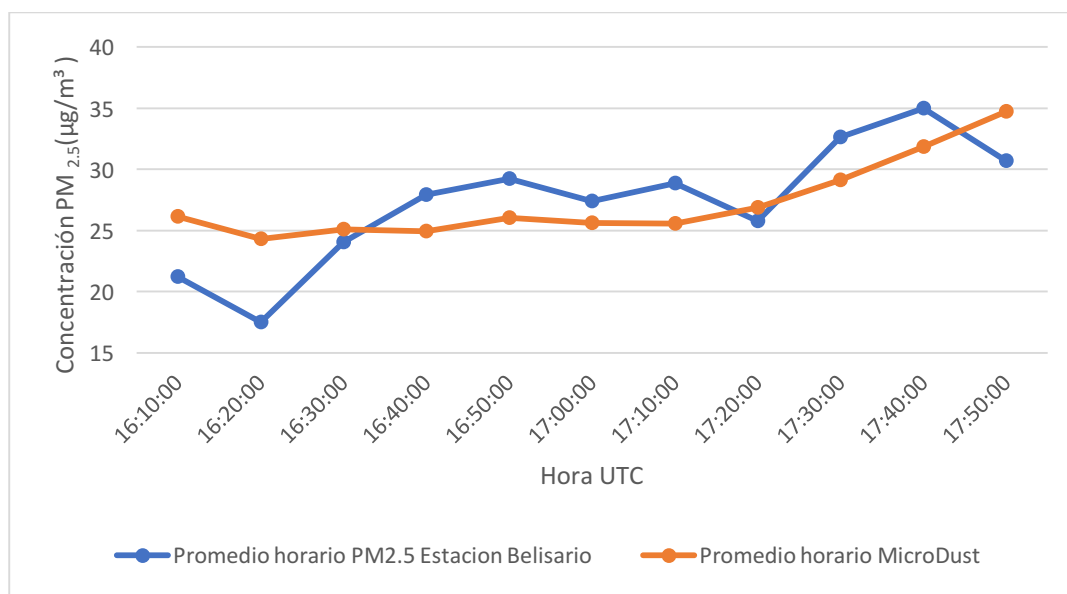


Figura 18. Presentación gráfica de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> corregidas con la Ecuación 1.

#### 4.1.1.2 Correlación entre los instrumentos Thermo Andersen y sensor de PM<sub>2.5</sub> SEN077

En la Figura 19 se observa la regresión lineal entre el equipo *Thermo Andersen* y el sensor SEN077. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.36. Siendo una correlación lineal positiva. Por lo tanto, se puede afirmar que hay buena relación entre el sensor SEN077 y el equipo *Thermo Andersen*. Además, se eliminaron los valores extremos y no se consideró ocho valores atípicos. Ya que estos pueden ser errores aislados debido a un error en la lectura o transcripción del sensor (Guijarro, 2015); (Arciniegas, 2012). Como anteriormente se mencionó, puede ser que el valor erróneo sea debido algunas actividades antropogénicas cercanas al lugar de medición.

La concentración de PM<sub>2.5</sub> se corrigió con la Ecuación 2. Por lo tanto, en la Figura 19 se muestra las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> corregidas con la estación Belisario y el Sensor SEN077.

$$y = 1,4535x + 16,831 \quad (\text{Ecuación 2})$$

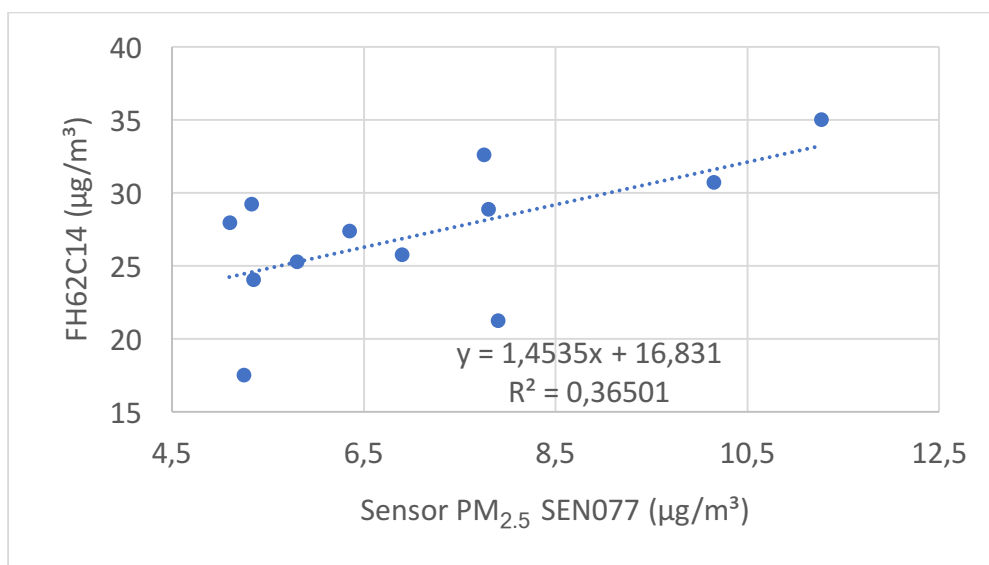


Figura 19. Presentación gráfica de PM<sub>2.5</sub> del equipo FH62C14 frente al sensor SEN077 en la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

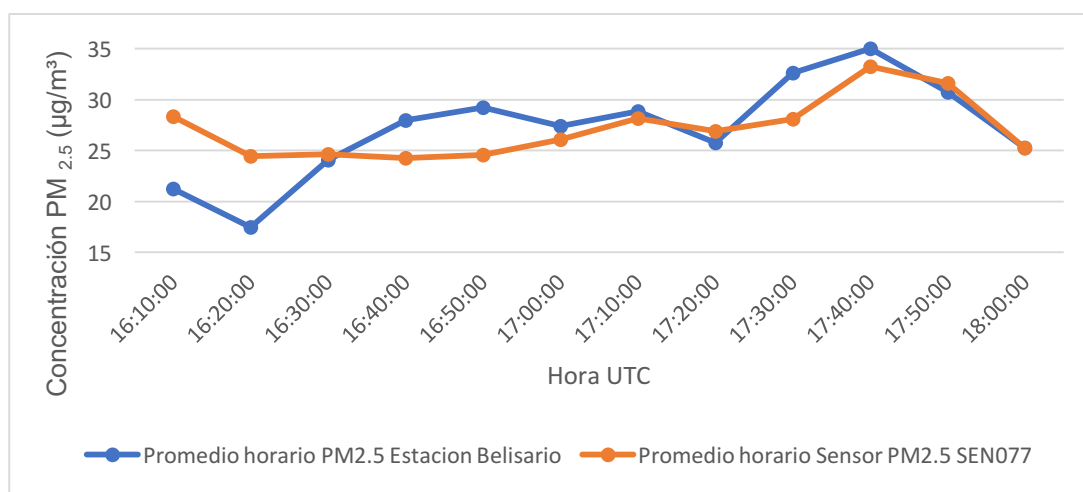


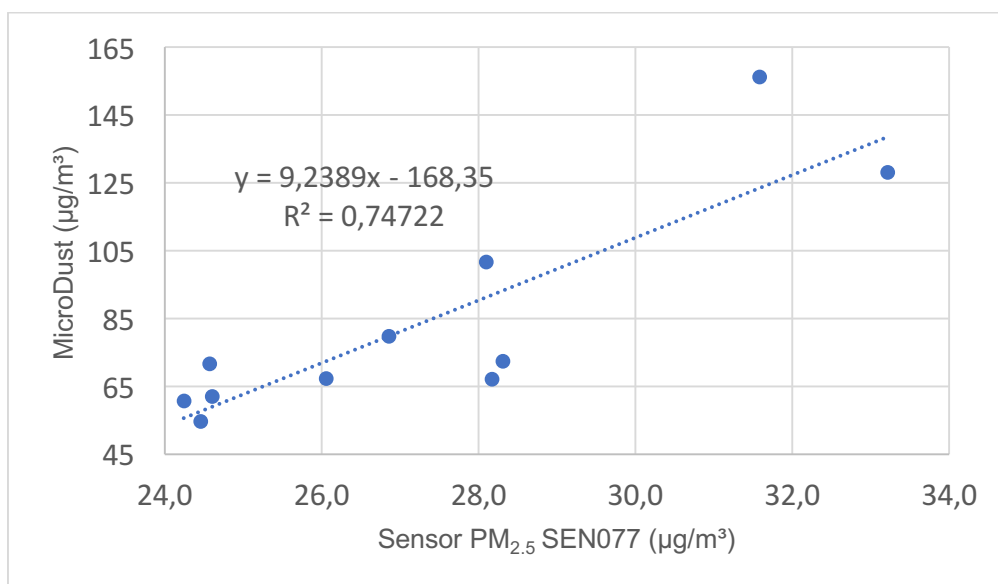
Figura 20. Presentación gráfica de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> corregidas con la Ecuación 2.

#### 4.1.1.3 Correlación entre los instrumentos *MicroDust Pro* y Sensor SEN077

En la Figura 21 se observa los resultados de la validación del *MicroDust Pro* con el sensor SEN077. Los dos instrumentos usan la misma técnica de medición.

Por lo tanto, el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) fue de 0.74 siendo una correlación lineal positiva fuerte. Es decir, que los dos equipos guardan relación entre sí. Cabe recalcar que los dos equipos funcionan con el mismo principio de dispersión de luz. Ya que al estar en contacto con humedad relativa mayor a 70%, las partículas aumentan el tamaño y se sobredimensionan. Además, se utilizó la Ecuación 3 para la corrección de los datos del sensor. En la Figura 22 se observa la concentración del promedio horario de  $PM_{2.5}$  del sensor (SEN077) y *MicroDust Pro*.

$$y = 9,2389x - 168,35 \quad (\text{Ecuación 3})$$



*Figura 21.* Presentación gráfica de  $PM_{2.5}$  del equipo *MicroDust Pro* frente al equipo SEN077 en la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

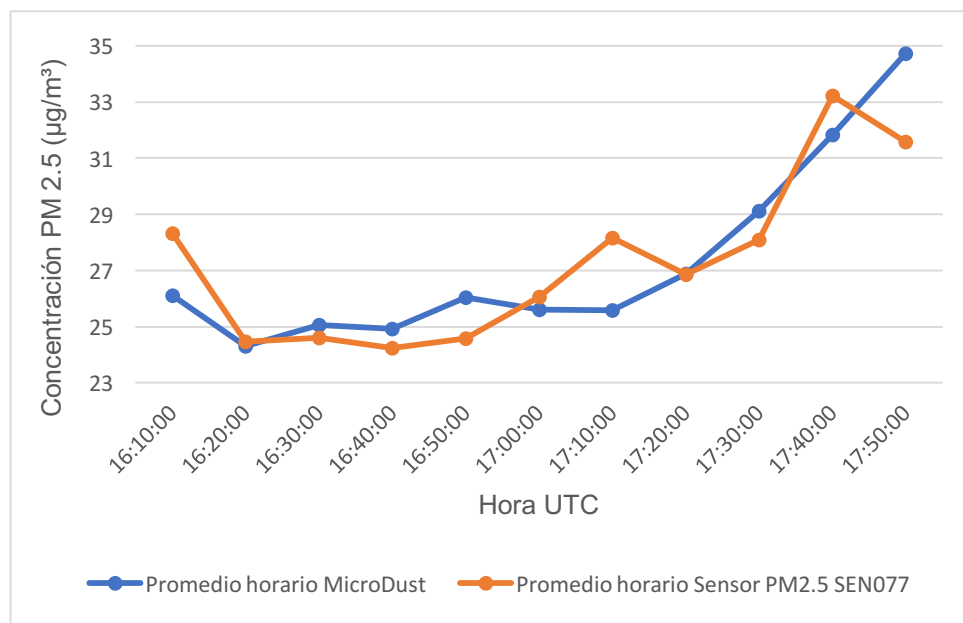


Figura 22. Presentación gráfica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  corregidas con la Ecuación 3.

#### 4.1.2. Correlación del Monóxido de carbono (CO)

El día 20 de octubre se realizó las mediciones en la estación Belisario para la validación de los equipos. Los resultados se presentan en la Figura 23, donde se muestra el comportamiento de las concentraciones de CO entre el Sensor MQ7 y Thermo 48i. Se determinó que los dos equipos tienden a tener el mismo comportamiento entre sí. Sin embargo, el Sensor MQ7 muestra valores bajos en comparación con el equipo de la estación Belisario. Los resultados inexactos se deben a que el sensor MQ7 debe estar prendido 48 horas antes del funcionamiento para que las mediciones sean estables (Henan Hanwei Electronics CO., s.f.). En la Figura 24 se puede observar la correlación entre estos dos equipos y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.77. Es decir, es una correlación lineal positiva fuerte, por lo que guardan relación entre sí. Se utilizó la Ecuación 4 para corregir los datos del sensor y calibrar con el equipo Thermo 48i. Ya que se requiere tener una concentración conocida del gas para la calibración. En la Figura 25 se realizó un gráfico de la concentración de CO del promedio horario de los dos equipos.

$$y = 0,0885x - 2,3822$$

(Ecuación 4)

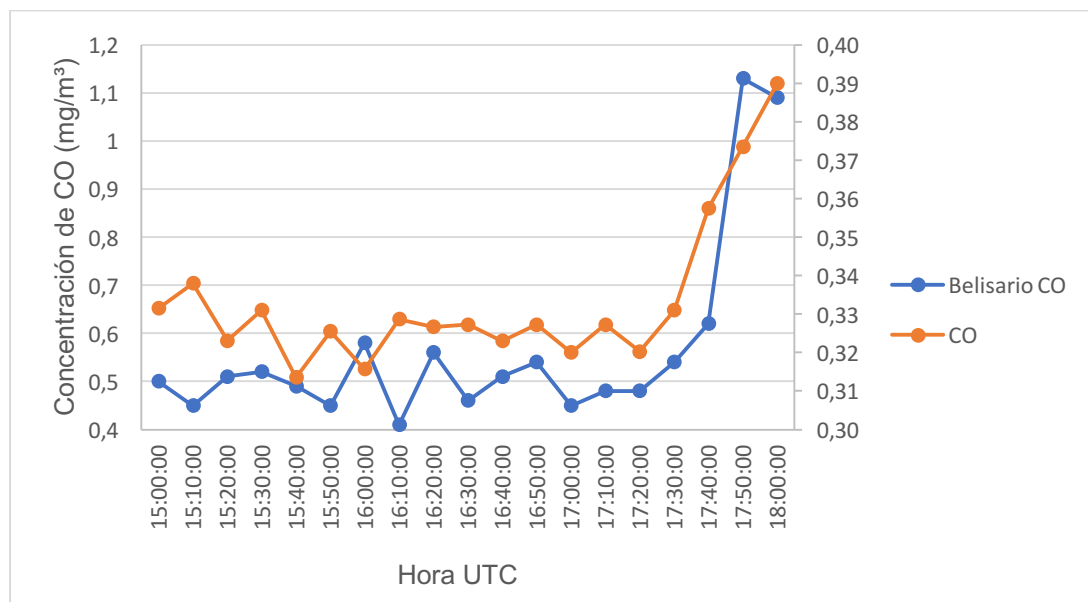


Figura 23. Presentación gráfica de las concentraciones de CO en la estación Belisario.

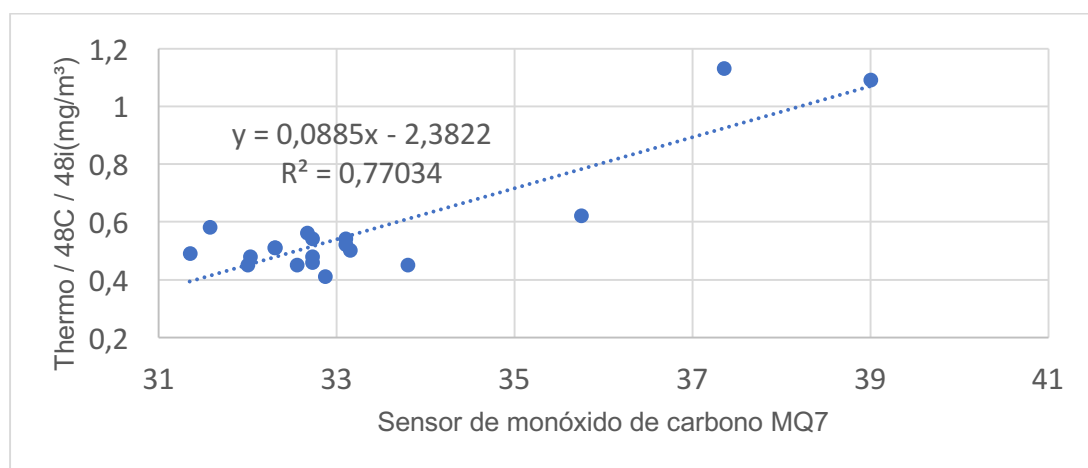


Figura 24. Presentación gráfica de CO del equipo Thermo 48C/E8i frente al Sensor MQ-7 en la Estación Belisario del día 20 de octubre del 2017. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la Ecuación.

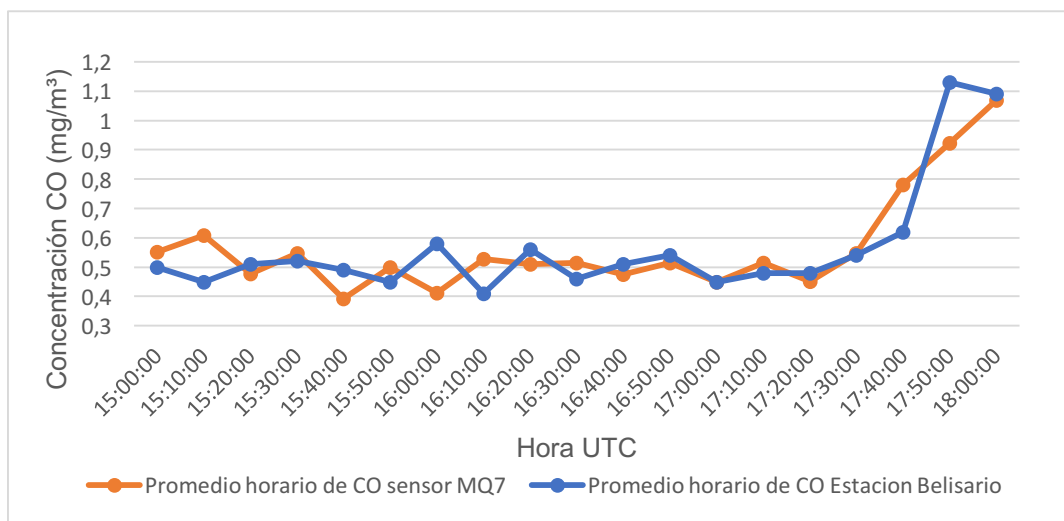
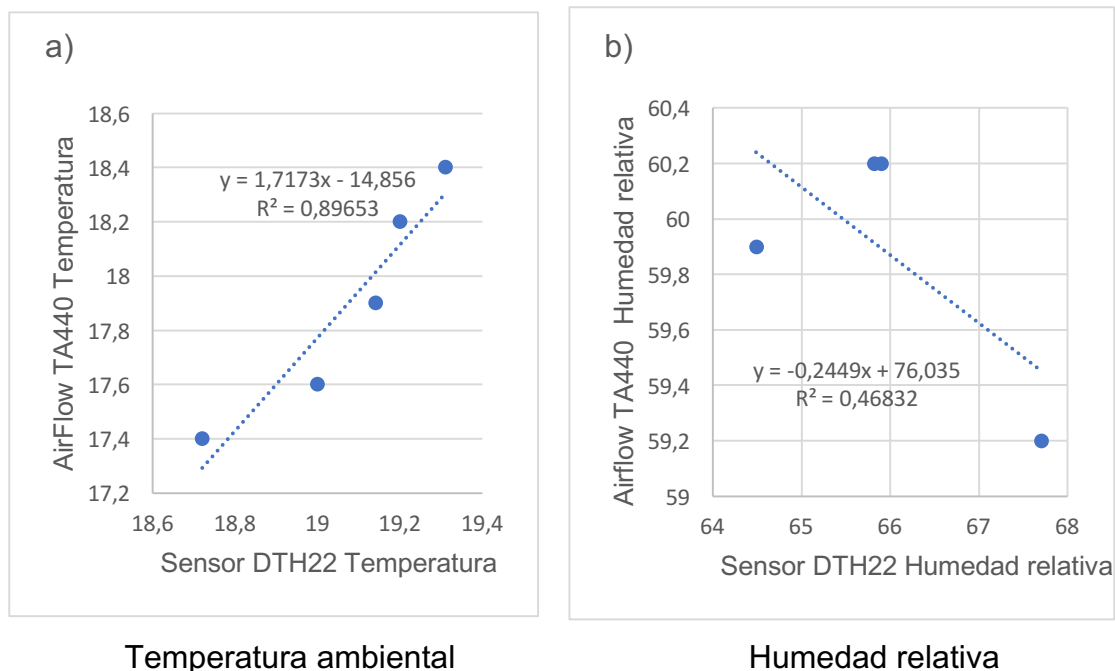


Figura 25. Presentación gráfica de las concentraciones de CO corregidas con la Ecuación 4.

#### 4.1.3. Validación de Humedad relativa y temperatura ambiental

El miércoles 15 de noviembre de 2017, se realizaron mediciones con el sensor DTH22 y el Equipo *Airflow* TA440 en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas. Desde las ocho cuarenta y cinco de la mañana (8h45) hasta las 13h45. En la Figura 26, se observa la regresión lineal entre el *Airflow* TA440 y DTH22 con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.89. Es decir, es una correlación lineal positiva fuerte, ya que los datos se encuentran alineados y no dispersos. Mientras que en la misma Figura 26 se observa que los datos representan una baja correlación lineal negativa con un coeficiente ( $R^2$ ) de 0.46 de humedad relativa. El sensor DTH22 aumenta la humedad relativa mientras que el equipo *Airflow* disminuye por lo que no hay relación. Esto puede deberse a que el sensor DTH22 de humedad relativa puede tener algún defecto de fábrica o pudo ser un mal manejo del sensor. Además, el equipo *Airflow* no es un equipo de alta confianza.





Temperatura ambiental

Humedad relativa

**Figura 26.** Presentación gráfica del equipo *Airflow* TA440 frente al sensor DTH22 en la Estación Belisario del día 15 de noviembre del 2017. a) Temperatura y b) humedad relativa. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

#### 4.1.4. Resultados del monitoreo en el parqueadero subterráneo de las concentraciones de $PM_{2.5}$

En la Tabla 1 y Figura 27 se encuentra el promedio de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de los 5 días de mediciones en el parqueadero subterráneo. Se aprecia que el día lunes 20 de noviembre a las 10h30 de la mañana, la concentración fue de  $79.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mientras que a las 13h30 de la tarde, la concentración disminuyó a  $52.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se puede deducir que a las 10h30 de la mañana hubo bastante movimiento de los vehículos debido al ingreso de los estudiantes. Mientras que a las 13h00 y 14h00, los estudiantes y administrativos salen a la hora de almuerzo. Comparando con el día sábado 18 de noviembre, la mayor concentración de  $PM_{2.5}$  fue entre las ocho y media de la mañana 8h30 hasta las 10h30, ya que los estudiantes entran y salen a las clases por la mañana. A las 13h30, la concentración disminuyó a  $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto se debe a que hay menor asistencia a la universidad los días sábados por ser fin de semana. La ventilación

del parqueadero no es forzada y se encuentran cuatro puntos ventilados como se observa en la Figura 9. Las razones por lo que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  son altas es que la dispersión no elimina los contaminantes atmosféricos, los reparte en un volumen mayor y la concentración disminuye. La dilución es producida por un movimiento turbulento de la atmósfera y es un mecanismo para disminuir las concentraciones de los contaminantes más no para eliminarlos en su totalidad presentes durante la mitad del día y la tarde, por calentamiento solar (Puigcerver y Carrascal, 2008).

Tabla 1.

*Promedios horarios de las concentraciones de  $PM_{2.5}$*

Hora UTC	Promedio horario de concentraciones de $PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				
	miércoles 15-nov	jueves 16-nov	viernes 17-nov	*sábado 18-nov	lunes 20-nov
08:30:00	51.5	65.7	39.2	39.9	
09:30:00	41.9	61.0	39.3	38.9	70.9
10:30:00	44.6	58.4	44.2	38.6	79.0
11:30:00	39.1	33.6	43.4	36.1	70.5
12:30:00	34.5	43.6	52.4	31.8	
13:30:00	31.1	46.5	37.18	21.7	52.3

Nota:(\*) día con menor influencia de vehículos, en el parqueadero subterráneo de la UDLA.

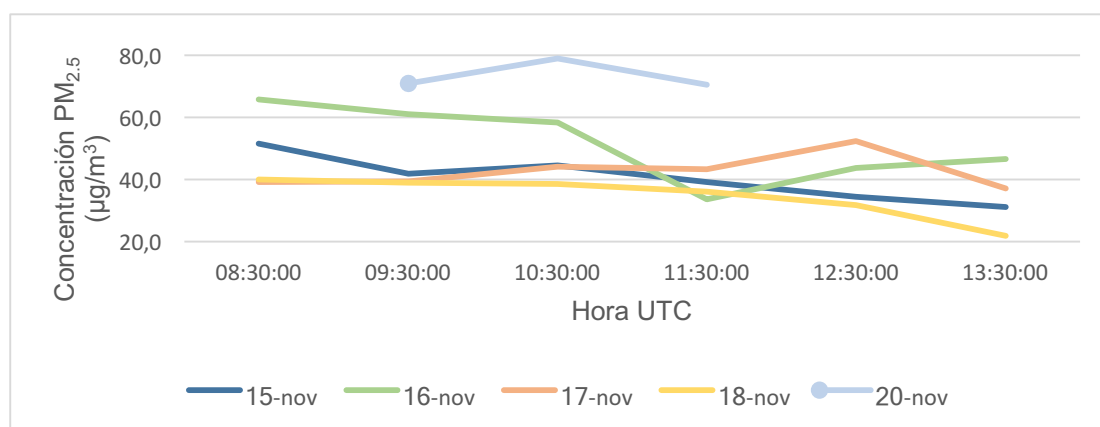
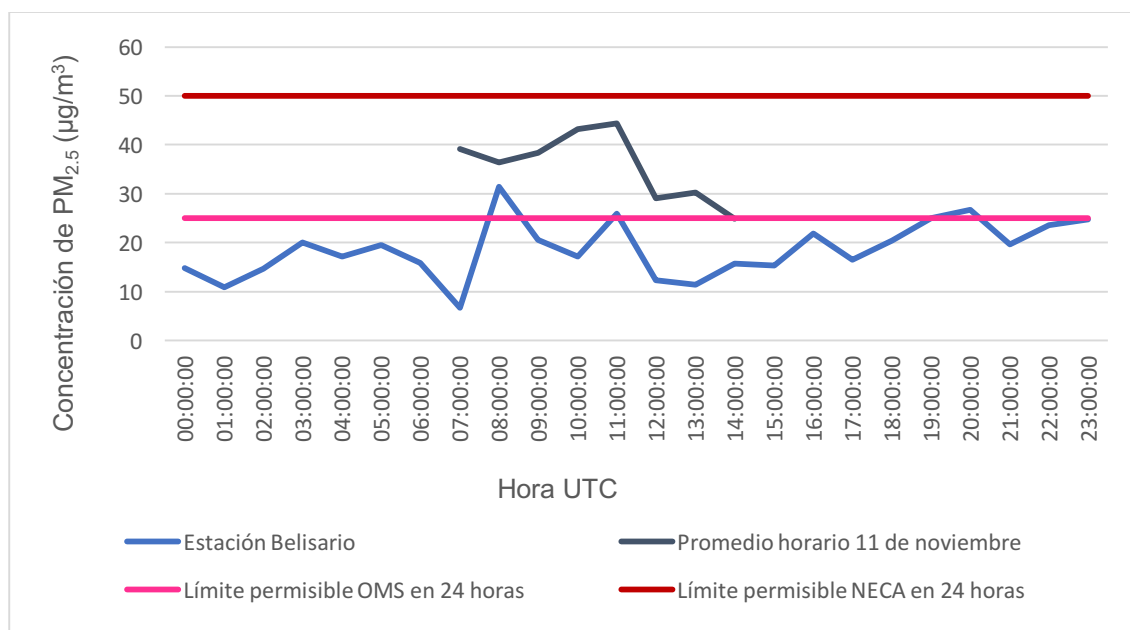


Figura 27. Presentación gráfica del promedio horario de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

El día lunes 11 de diciembre de 2017, se colocó el prototipo en el parqueadero subterráneo desde las 7h00 de la mañana hasta (15h00) de la tarde en total ocho horas. En la Figura 28, se observa las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de la estación Belisario durante las 24 horas y las mediciones realizadas en el parqueadero. Con el gráfico, se deduce que la contaminación de  $PM_{2.5}$  es mayor en el interior que en el exterior, ya que el promedio en el parqueadero fue de  $35.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mientras que en el exterior fue de  $18.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante las ocho horas de medición. Aunque no se realizó las mediciones las veinte cuatro horas, se observa que tan solo las ocho horas concentraciones son altas. Por lo que se afirma que, en el parqueadero de la Universidad de Las Américas, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  sobrepasan los límites permisibles de la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, no sobrepasa los límites permisibles de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA)  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto se debe a la distribución deficiente del aire y especialmente en aparcamiento cerrados, ya que hay un movimiento masivo de los vehículos en los parqueaderos (Junta de la Union Europea, 2011).



*Figura 28.* Presentación gráfica las concentraciones de  $PM_{2.5}$  comparado con la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA) y la organización Mundial de La Salud (OMS).

#### 4.1.4.1 Influencia del tráfico en la concentración de $PM_{2.5}$ en el parqueadero subterráneo

En el Distrito Metropolitano de Quito, la principal fuente generadora de contaminación por  $PM_{2.5}$  es el tráfico vehicular, ya que en el 2011 las emisiones de  $PM_{2.5}$  represento un 62%. Los vehículos a diésel representaban un 53.5% y los de gasolina un 8.3% (Secretaria de Ambiente, 2015). Cabe recalcar que las emisiones de las partículas son producidas por todo tipo de vehículos, ya sea por el proceso de abrasión de los neumáticos, los frenos y por el proceso de re suspensión de polvo del suelo (Martínez y Rodríguez, 2000). En la Figura 29 se observa el promedio diario del número de vehículos y el promedio horario de la concentración de  $PM_{2.5}$  de los 6 días de medición. El día sábado 18 de noviembre la concentración promedio fue de  $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y así mismo hubo un movimiento de 46 vehículos. Mientras que el día lunes 20 de noviembre, la concentración de  $PM_{2.5}$  aumento a  $94 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un movimiento de 67 vehículos. Esto quiere decir que el día lunes, hay un mayor movimiento vehicular y a la vez la contaminación del aire interior es mucho más alta que en días no concurridos como los jueves y viernes.

Los valores del día martes, 21 de noviembre no se tomaron en cuenta, ya que ese día se comenzó más tarde, por lo que no es factible añadir esos valores. En la Figura 30 se observa la regresión lineal con relación a la concentración de  $PM_{2.5}$  y el promedio del número de automóviles por día. Teniendo como resultado un coeficiente ( $R^2$ ) de 0.78, es decir que la correlación es positiva fuerte. Por lo que se deduce que a mayor cantidad de carros la concentración  $PM_{2.5}$  aumenta.

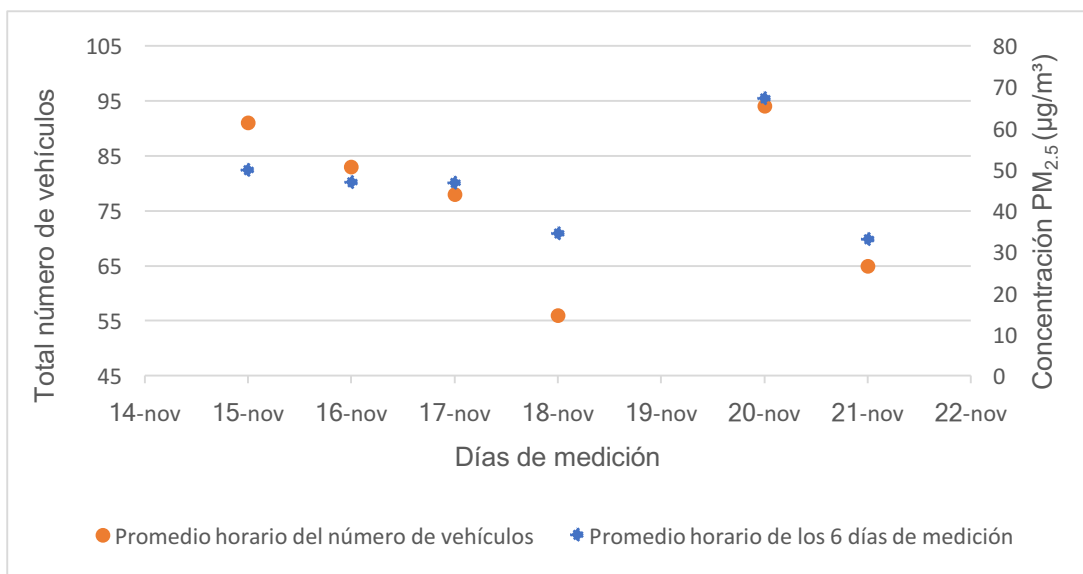


Figura 29. Presentación gráfica de la concentración de PM<sub>2.5</sub> y el número total vehículos durante los 6 días de medición.

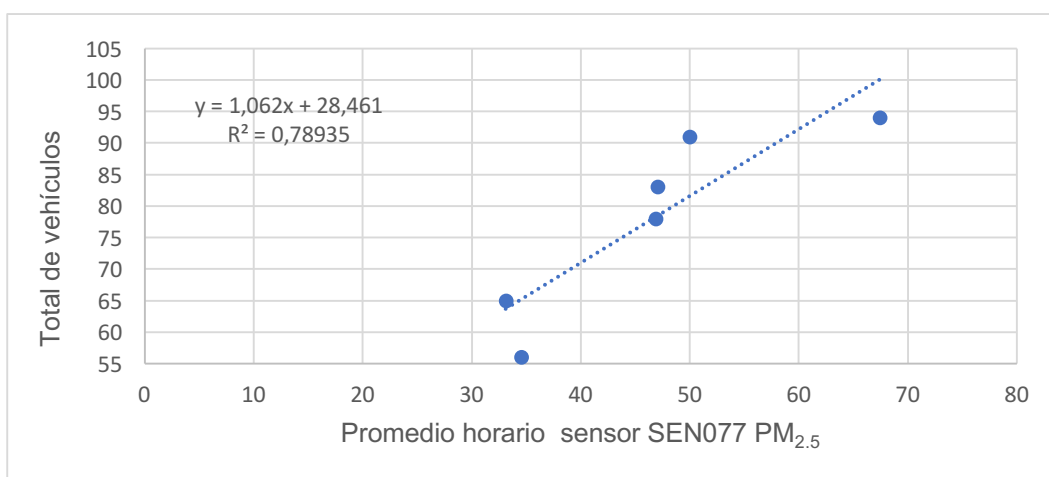


Figura 30. Presentación gráfica del total de vehículos y el promedio horario de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

#### 4.1.5. Resultados del monitoreo de CO en el parqueadero subterráneo

Se realizó mediciones durante 6 días consecutivos con excepción del día domingo durante 6 horas desde de las 8h30 de la mañana hasta 14h30 de la tarde. En la Figura 31 y Tabla 2 se observa los promedios horarios de las concentraciones de CO. El día lunes 20 de noviembre las concentraciones son

más altas que otros días, esto se debe a que hay mayor cantidad de vehículos en el parqueadero. Mientras que el día sábado 18 de noviembre las concentraciones son bajas debido a que los fines de semana en la universidad hay menos asistencia. Otra razón es que al estacionar los vehículos por un largo periodo de tiempo en el parqueadero los motores se enfrían y al momento de encender el vehículo se produce altas concentraciones de CO debido a que el convertidor catalítico se vuelve ineficaz.

Tabla 2.

*Promedio horario de las concentraciones de CO.*

	Promedio horario CO (mg/m <sup>3</sup> )				
Hora UTC	miércoles 15-nov	jueves 16-nov	viernes 17-nov	sábado 18-nov	lunes 20-nov
08:30:00	2,3	2,4	3,6	2,3	3,6
09:30:00	3,3	2,5	2,3	2,0	3,4
10:30:00	2,1	2,6	2,8	2,4	3,0
11:30:00	2,3	2,3	3,0	2,5	2,6
12:30:00	2,3	2,5	2,9	2,6	2,8
13:30:00	3,4	2,8	3,4	2,1	3,1

Nota: Mediciones realizadas en el parqueadero subterráneo de la Universidad de las Américas durante el 15 de noviembre al 20 de noviembre de 2017.

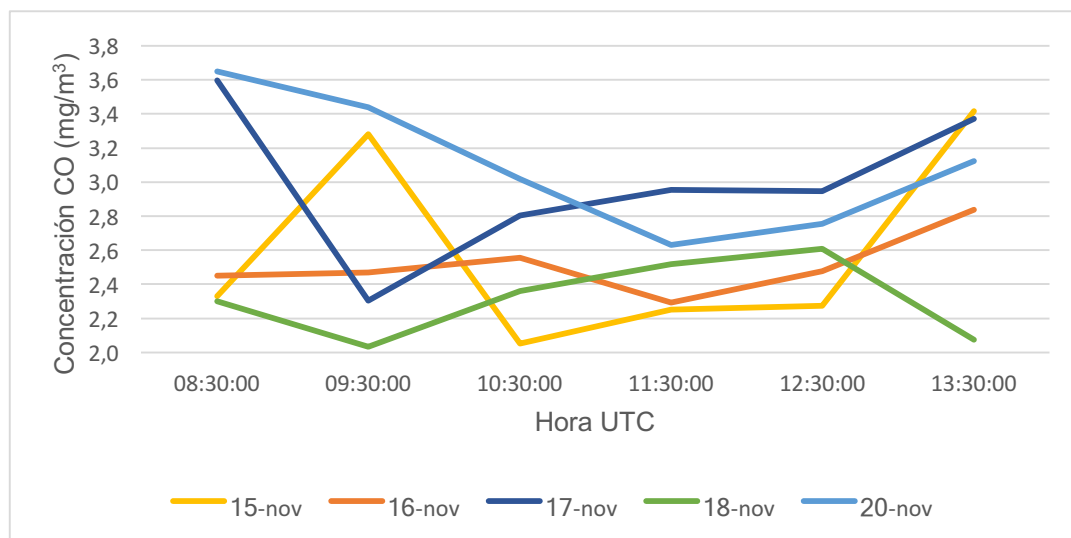


Figura 31. Presentación gráfica de la concentración de CO durante los 5 días de medición.

El día lunes 11 de diciembre 2017, se realizaron mediciones desde las 7h00 de la mañana hasta las 15h00 de la tarde, en total ocho horas de monitoreo. Además, se realizó conteo del movimiento de los vehículos durante las ocho horas de medición y también se contó los que pasaron cerca del prototipo. En la Figura 32 se observan concentraciones de CO comparadas con la Norma de Calidad del Aire (NECA), el límite permisible en ocho horas es de  $10 \text{ mg/m}^3$ . Por lo que se puede confirmar que las concentraciones de CO en el parqueadero subterráneo no sobrepasan los límites permisibles. Por ende, la contaminación de CO es baja con un promedio total de  $3.09 \text{ mg/m}^3$ . Cabe recalcar que según la EPA las concentraciones en interiores pueden llegar a ser mayores que el ambiente exterior, por ende, el riesgo a la salud es mayor en interiores que exteriores (EPA, 2007).

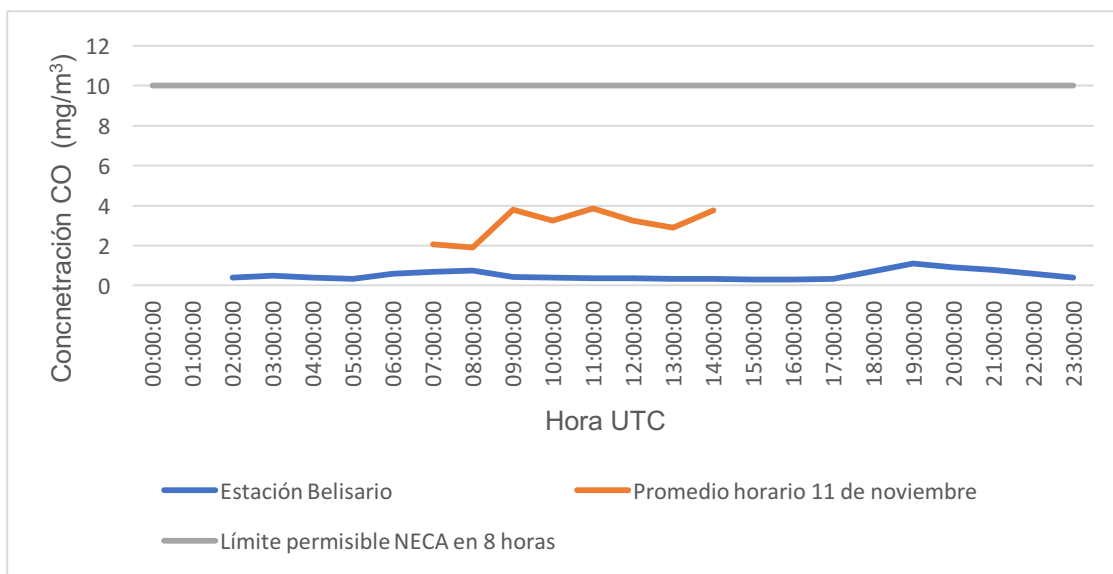


Figura 32. Presentación gráfica del monóxido de carbono comparando con la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA) y OMS

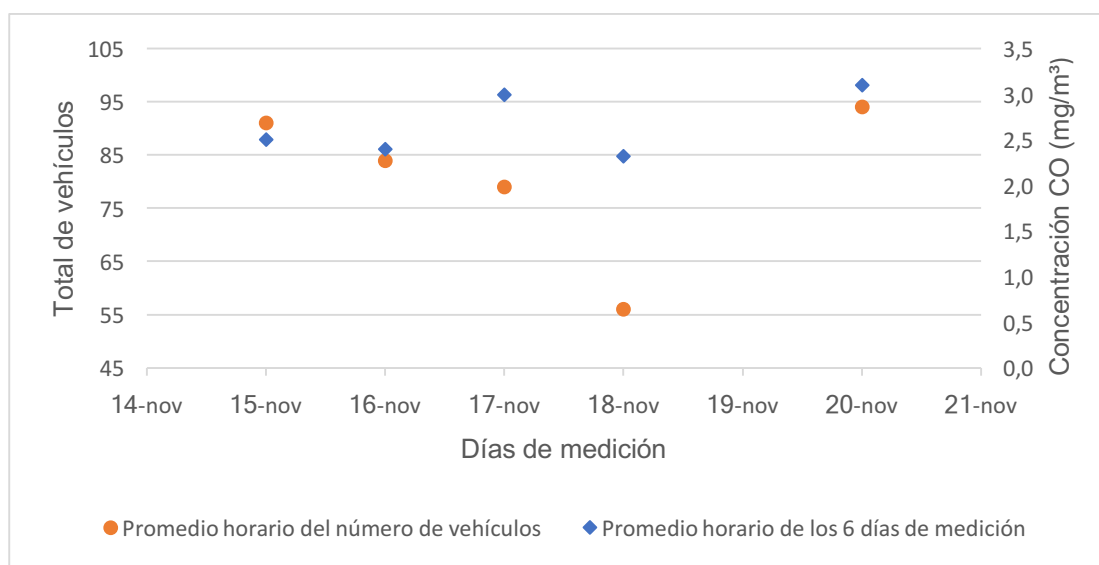
#### 4.1.5.1 Influencia del tráfico en las concentraciones de CO en el parqueadero subterráneo

Las emisiones generadas por el transporte se deben a los elementos conformados por el motor, el combustible y el modo de uso. Las emisiones provienen de procesos diferentes como el proceso de combustión completa, la cual genera  $\text{CO}_2$  y vapor de agua. Sin embargo, puede producirse una combustión incompleta del motor, ya sea por la falta de oxígeno, la variabilidad de la mezcla oxígeno-combustible y las temperaturas bajas cuando los motores inician su funcionamiento produciendo emisiones de CO. Así mismo las emisiones provienen del escape, liberando algunos contaminantes como monóxido de carbono, óxidos de azufre y material particulado (Lara, Mendoza, Mart, Elia y Alonso, 2009).

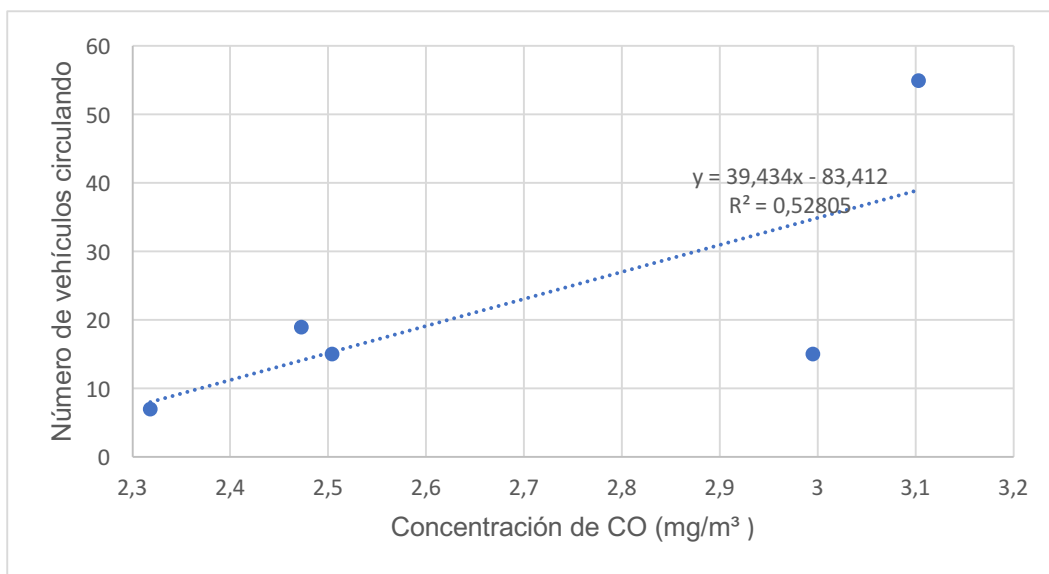
Se realizó una regresión lineal de los vehículos que están circulando en el parqueadero y la concentración de CO durante los 6 días de medición. En la Figura 33 se puede observar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 0.52. Esto quiere decir, que los datos de concentración de CO tienen relación con el



flujo vehicular. Además, se excluyó los valores del día martes debido a que no se realizaron las mediciones a la misma hora. En la Figura 34 se puede observar que el día sábado 18 de noviembre, la concentración de CO fue de  $2.31 \text{ mg/m}^3$  siendo la concentración más baja con un promedio de 56 autos al día mientras que el día lunes 20 de noviembre, la concentración fue de  $3.10 \text{ mg/m}^3$  y el promedio de los vehículos en ese mismo día fue de 94 autos. Es decir, a mayor número de autos mayor concentración de CO. La contaminación por CO se debe a que en Quito al estar a una elevación de 2800 mnsn, existe menos oxígeno por ende hay mayor consumo de combustible y mayor emisión de CO (Pérez, 2009). De igual manera, al acelerar genera mayor cantidad de monóxido de carbono (EPA, 2006)



*Figura 33.* Presentación gráfica de la concentración de CO y el número total vehículos durante los 6 días de medición.

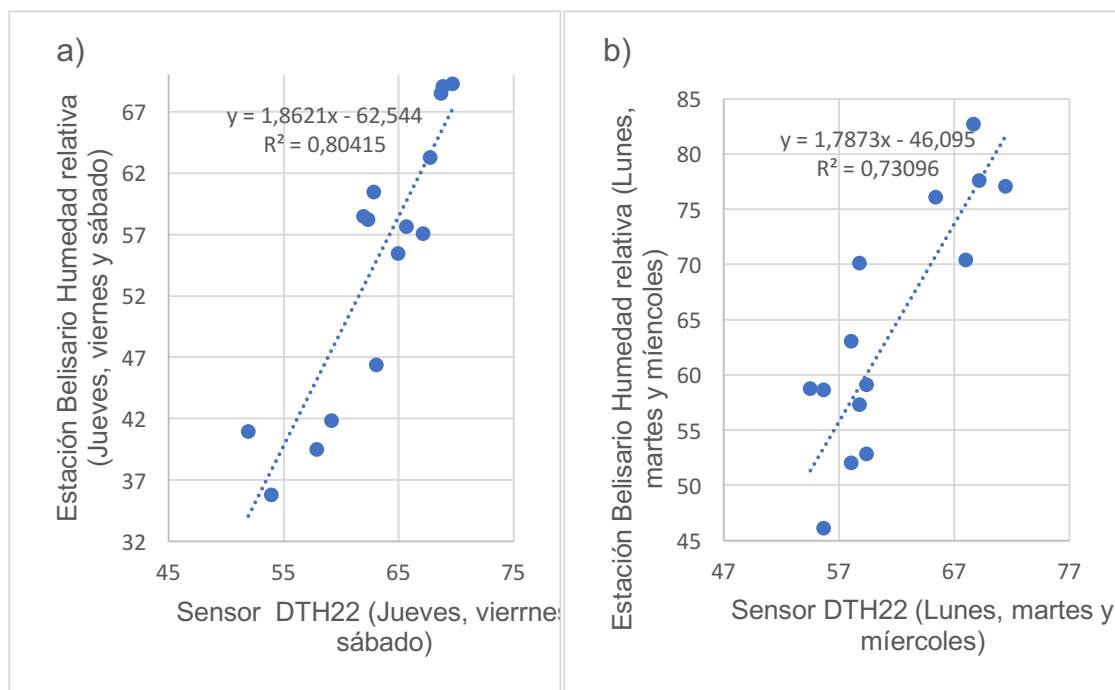


*Figura 34.* Presentación grafica del número de vehículos circulando y el promedio horario de las concentraciones de CO. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

#### 4.1.6. Comparación entre el ambiente exterior y el parqueadero subterráneo

##### 4.1.6.1 Humedad Relativa

Se utilizó los valores de humedad relativa de la estación Belisario y así mismo se usó los datos de las mediciones del parqueadero subterráneo. Por lo que se representó en la Figura 35a dos regresiones lineales. Se dividió los días en dos grupos. El primer grupo comprenden los días laborales lunes, martes y miércoles y el segundo grupo los días jueves, viernes y sábado, ya que los días jueves o viernes en la universidad los estudiantes salen de campo. Mientras que el sábado es menos concurrido en la universidad. Por lo tanto, en la Figura 35b se puede observar que hay una correlación lineal positiva fuerte, ya que el coeficiente ( $R^2$ ) es 0.80 y para los días lunes, martes y miércoles el coeficiente ( $R^2$ ) es 0.73, es decir que hay una buena relación entre la humedad relativa exterior y el parqueadero subterráneo.



*Figura 35.* Presentación gráfica de la humedad relativa de la estación Belisario durante los días de medición. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

a) jueves, viernes y sábado

b) lunes, martes y miércoles

Las horas de mediciones en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas fue desde las 8h30 de la mañana hasta las 14h30. En la Figura 36 se observa la humedad relativa de la estación Belisario del mes de noviembre de las 24 horas. El día miércoles 16 de noviembre, la humedad relativa del exterior e interior del parqueadero fue de 75% teniendo un comportamiento parecido durante las 6 horas de medición. El día viernes 17 de noviembre se observa que la humedad relativa en el exterior fue de 70%. Así como también en el interior del parqueadero. Sin embargo, a las 10h00 la humedad relativa en el exterior, bajo a 58% y en el interior del parqueadero fue de 69%. Durante todo el día en el parqueadero la humedad relativa permaneció más alta. El día sábado 18 se observa que la humedad relativa comenzó con 60% y disminuyó a 55% durante las 6 horas de medición en el parqueadero mientras que en el exterior la humedad relativa fue de 45% a 39%.

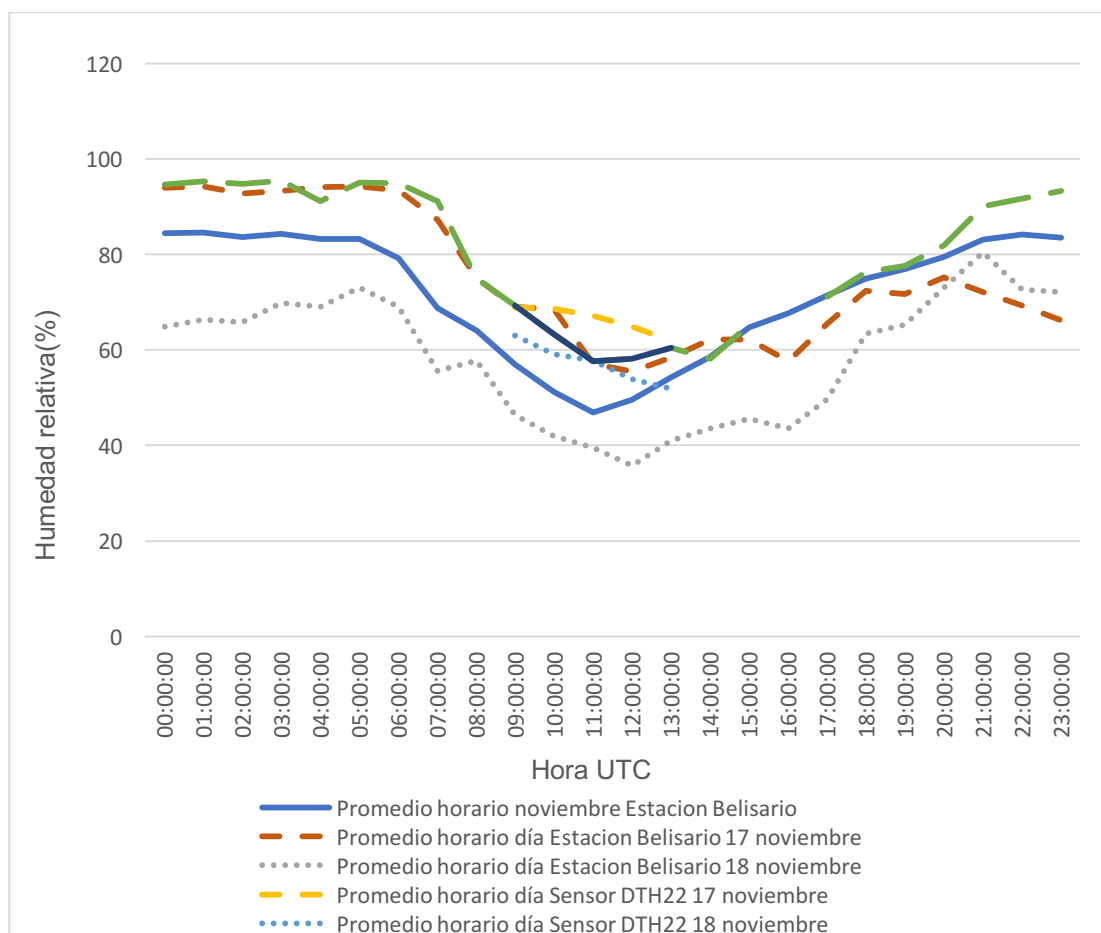


Figura 36. Presentación gráfica de Humedad relativa de la estación Belisario y del parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas.

#### 4.1.6.2 Temperatura ambiental

En la Figura 37 a y b se observa las dos regresiones lineales entre a la estación Belisario y el sensor DTH-22 de temperatura ambiental. Se puede interpretar que hubo relación entre el ambiente externo y el parqueadero subterráneo durante los días de medición jueves, viernes y sábado y los días lunes, martes y miércoles con coeficientes de ( $R^2$ ) 0.62, 0.71, respectivamente.

En la Figura 38 se observa el promedio horario de noviembre durante las 24 horas. También se observa que el día miércoles 16 de noviembre, la temperatura ambiental exterior de las 8h30 de la mañana fue de 15°C hasta 17°C mientras que en el parqueadero subterráneo la temperatura comenzó con 18°C hasta 19°C.

Esto se debe al balance térmico de las edificaciones en climas cálidos húmedos, ya que el flujo por ventilación es negativo porque se intercambia masa de aire exterior por aire interior siendo la temperatura de aire exterior menor a la temperatura del aire interior (Sosa. M, 1999). Además, si la ventilación no es la adecuada la temperatura tiende a aumentar por los aportes caloríferos de las paredes al aire contenido.

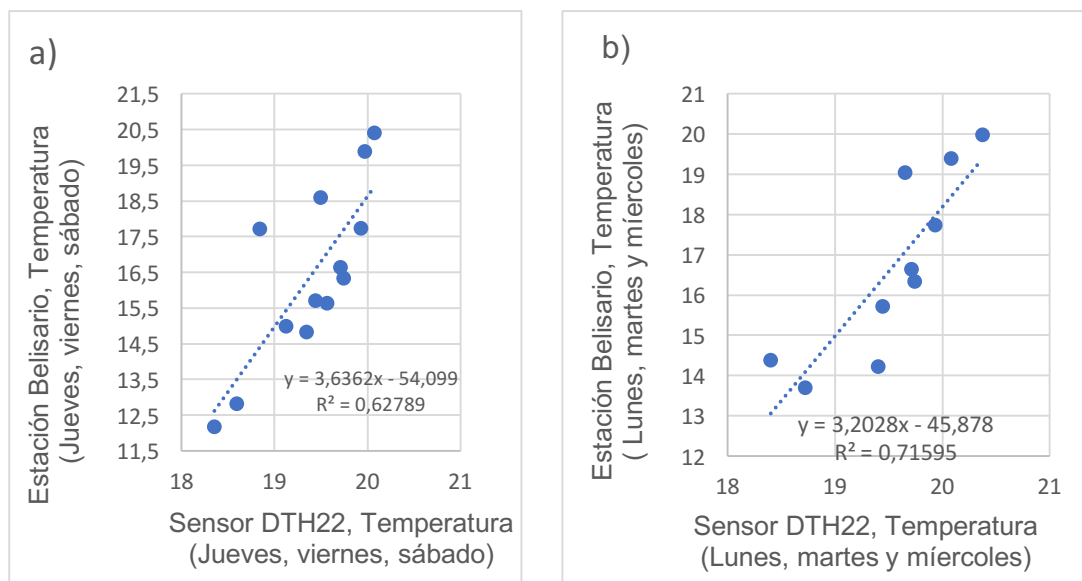


Figura 37. Presentación gráfica de la temperatura ambiental de la estación Belisario durante los días de medición. Se indica los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión.

a) jueves, viernes y sábado

b) lunes, martes y miércoles.

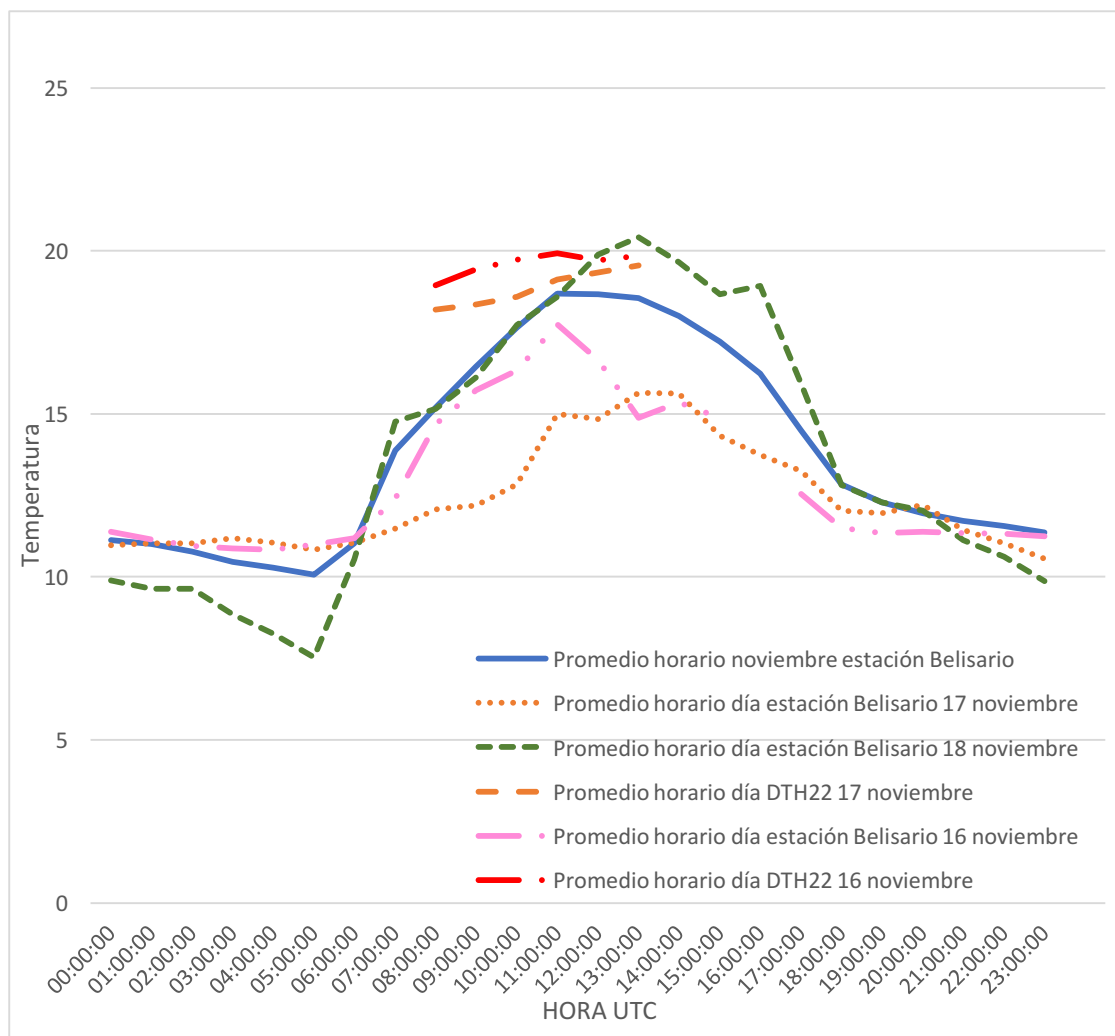


Figura 38. Presentación gráfica de la temperatura ambiental del exterior y del parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas.

#### 4.1.7. Correlación entre $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas

La concentración de  $PM_{2.5}$  se debe a las condiciones meteorológicas, ya que pueden contribuir un 16% para reducir la concentración de  $PM_{2.5}$  (Wang y Ogawa, 2015) En la Figura 39a se muestra dos regresiones lineales de la concentración de  $PM_{2.5}$  con humedad relativa. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.35 siendo una relación positiva baja. Sin embargo, se observa que cuando la humedad relativa es baja la concentración de  $PM_{2.5}$  aumenta. Esto se debe al crecimiento higroscópico, ya que cuando la humedad es alta las partículas se vuelven muy pesadas para permanecen en el aire. Ocurriendo

deposición seca, es decir, las partículas caen al suelo disminuyendo la concentración de  $PM_{2.5}$  (Wang y Ogawa, 2015)

La regresión lineal que se encuentra lado derecho en la Figura 39 b es la concentración de  $PM_{2.5}$  y la temperatura. Se observa que la correlación es negativa baja con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.08. Es decir, no hay relación entre la temperatura y la concentración, ya que los datos están muy dispersos.

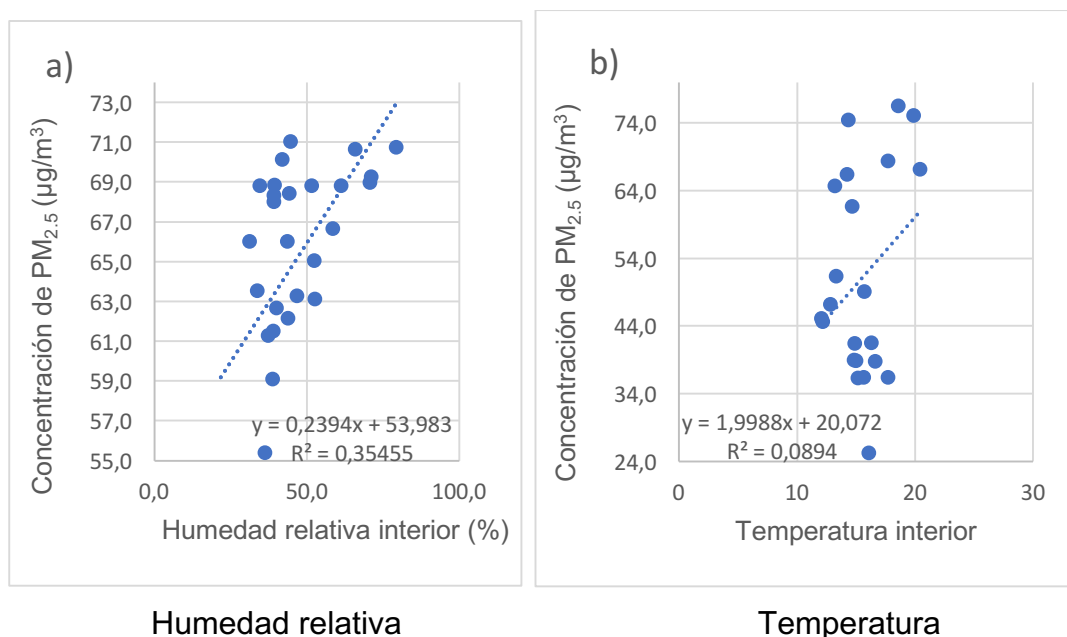


Figura 39. Presentación gráfica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

a) temperatura ambiental

b) humedad relativa interior.

Así mismo, en la Figura 40a se observa dos regresiones lineales representa la concentración de  $PM_{2.5}$  con respecto a la humedad relativa exterior. El coeficiente de determinación ( $R_2$ ) fue de 0.29, es decir la correlación es positiva baja. Hay poca relación con la humedad relativa del exterior y la concentración de  $PM_{2.5}$ . Así mismo, en la Figura 40b representa la concentración  $PM_{2.5}$  y la temperatura exterior. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.27, la correlación es positiva baja. Una de las razones por lo que puede haber poca

relación con las variables meteorológicas, es que el parqueadero está cubierto, por lo que la composición del aire va hacer diferente en el interior y el exterior. Además, dependerá de la tasa de intercambio entre el aire interior y exterior. Las concentraciones emitidas en el aire interior se diluyen menos que las que se emiten en el exterior debido a la diferencia de volúmenes de aire disponibles (Pico, Gonzalez, y Sanchez, 2012, p.2)

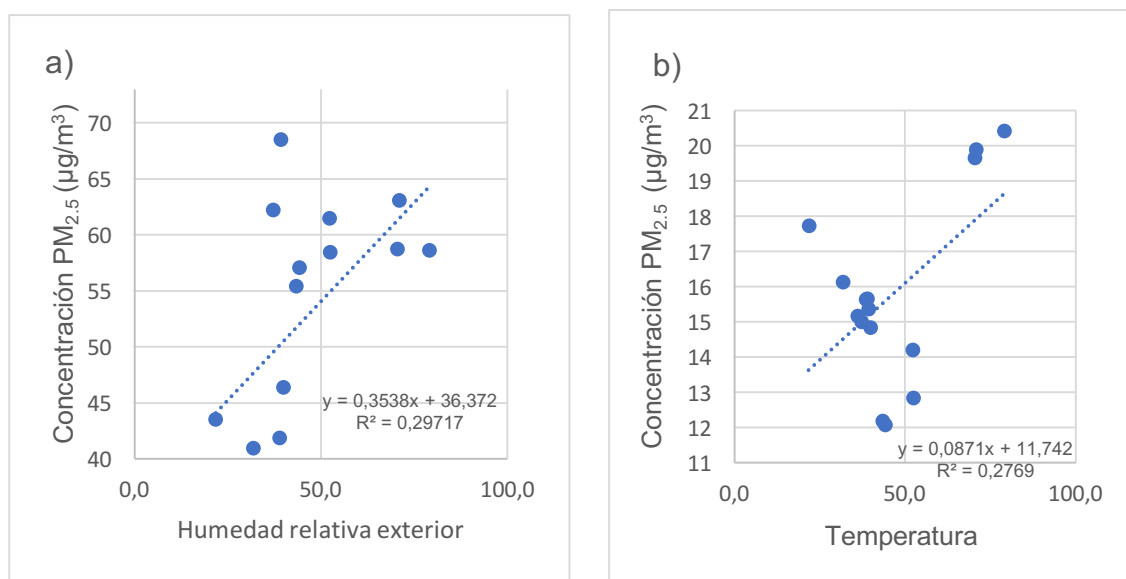


Figura 40. Presentación gráfica de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>

a) humedad relativa exterior

b) temperatura ambiental

#### 4.1.8. Correlación entre CO y variables meteorológicas

La concentración de CO depende de las condiciones de operación como el mantenimiento del vehículo, la velocidad del viento, la estabilidad de la atmosfera, etc (Machado et al., 2007).

En la Figura 41a se observa dos regresiones lineales de las concentraciones de CO con la humedad relativa y temperatura ambiental interior. Por lo que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.24 y 0.10, respectivamente, siendo las dos correlaciones positivas bajas. Así mismo, en la Figura 41b se observa las dos regresiones lineales de las concentraciones de CO con la humedad relativa y temperatura ambiental exterior, los datos se tomaron de la estación



Belisario. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.46, deduciendo que hay una relación positiva media y 0.19 deduciendo que hay relación positiva baja, respectivamente.

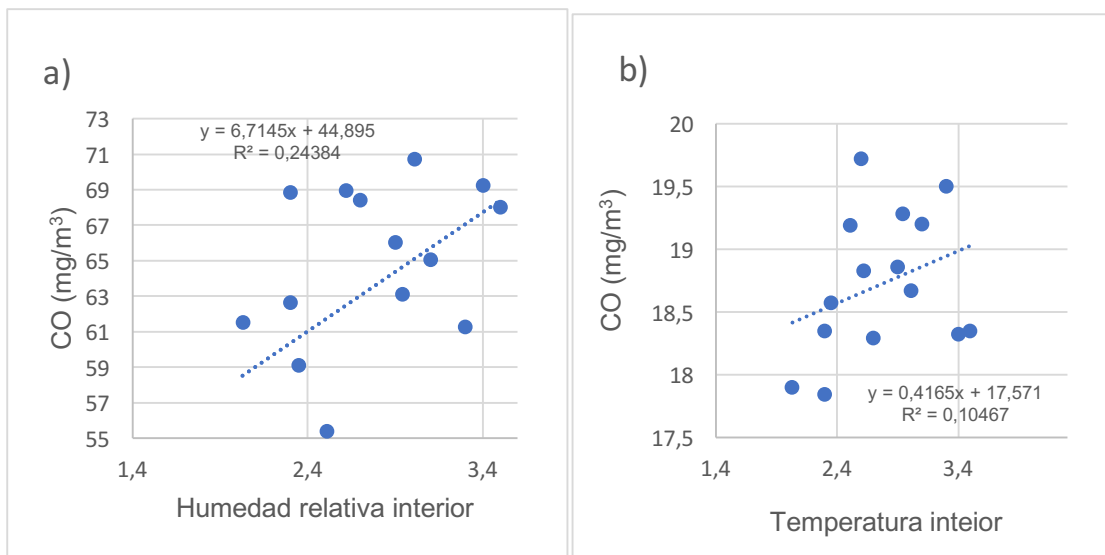


Figura 41. Presentación gráfica de las concentraciones de CO.

a) humedad relativa interior

b) temperatura ambiental

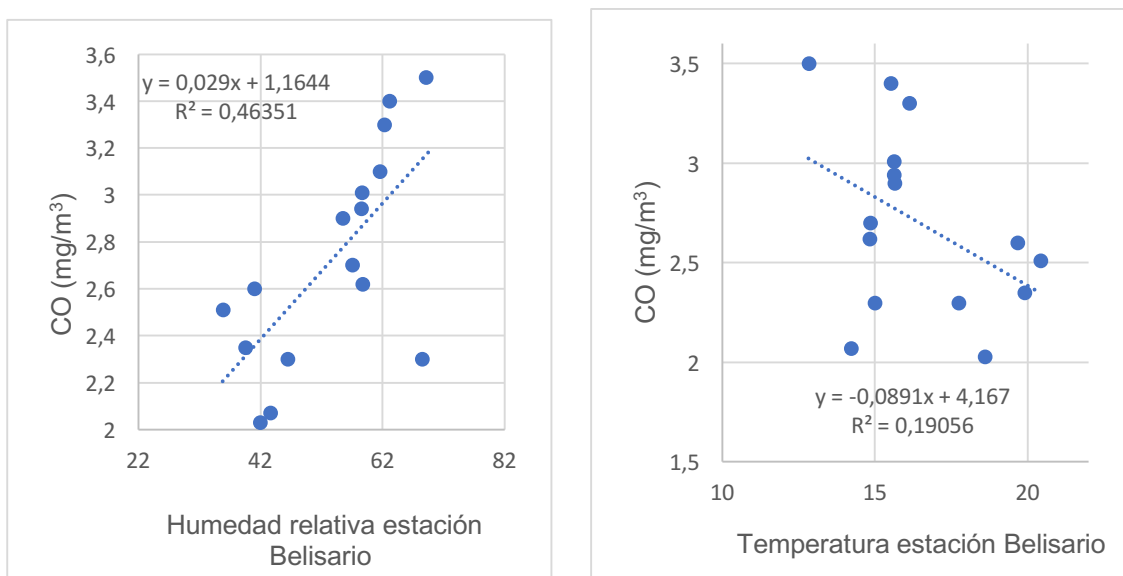


Figura 42. Presentación gráfica de las concentraciones de CO.

a) temperatura

b) humedad relativa exterior.

#### 4.1.9. Flujo de tráfico y personas

Se realizó un conteo de estudiantes, profesores y personal administrativo en la Universidad de Las Américas, sede Granados. Con ayuda de las hojas informativas realizadas por la Secretaria Académica de la universidad se pudo constatar los días lunes, el número de estudiantes en las aulas, profesores y personal administrativo con excepción de las visitas. Esto se realizó para saber el comportamiento de las personas con relación a las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el parqueadero, ya que las instalaciones como los estacionamientos son usados por las personas de la universidad. En la Figura 43 se observa una regresión lineal con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.29, siendo una relación positiva baja. Es decir que a mayor número de personas mayor concentración de  $PM_{2.5}$ , sin embargo, las variables meteorológicas también influyen en las concentraciones de los contaminantes. En la Figura 44 se muestra la regresión lineal de las concentraciones de CO con respecto al número de personas en la UDLA, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.42. Es decir, tiene una relación positiva media. A mayor número de personas mayor contaminación de CO en el parqueadero. Esto se relaciona con aparcamientos subterráneos y los vehículos que estacionan las personas de la universidad. Ya que la combustión es una fuente principal de emisiones ya sea por el tubo de escape de los vehículos que son la fuente dominante de hidrocarburos aromáticos que afecta en gran medida la calidad del aire (Marc, Smielowska y Zabiegala, 2016)

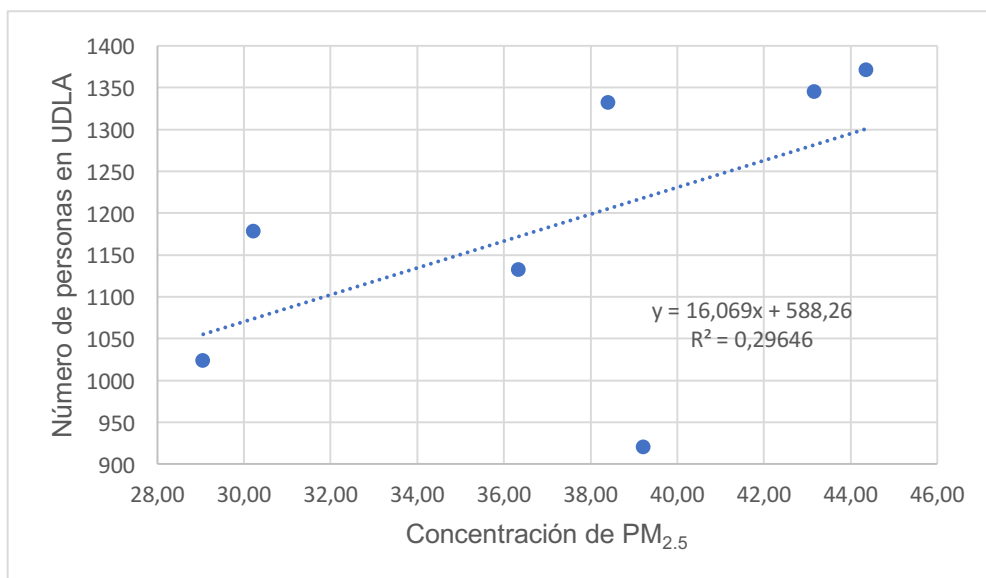


Figura 43. Presentación gráfica de la concentración de PM<sub>2.5</sub>, con respecto al número de personas de Universidad de Las Américas, sede Granados

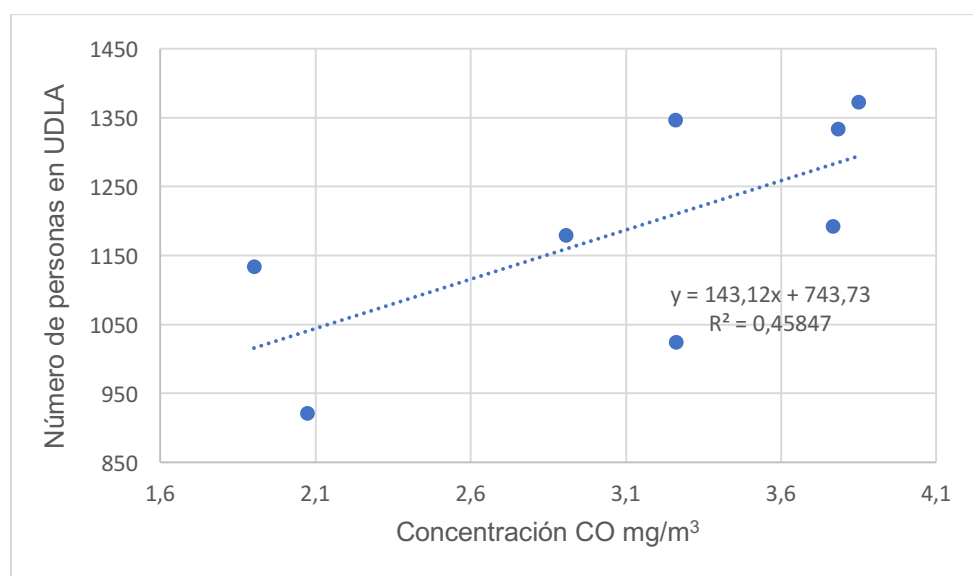
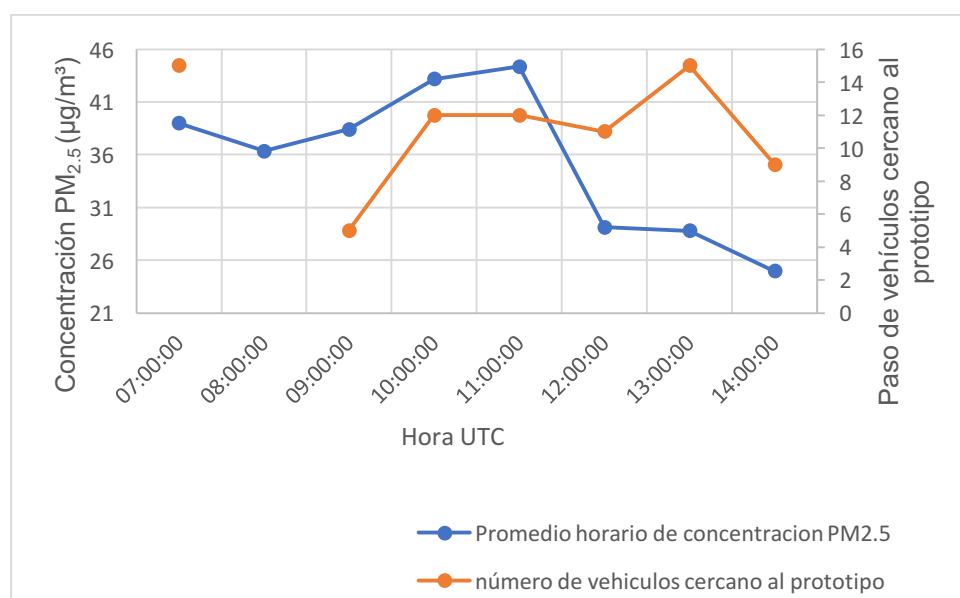


Figura 44. Presentación gráfica de la concentración de CO, con respecto al número de personas de Universidad de Las Américas, sede Granados.

En la Figura 45 se observa el comportamiento entre el promedio horario de las concentraciones PM<sub>2.5</sub> y el número de vehículos. A las 7h00 pasaron 15 vehículos debido a que comienzan a ingresar los estudiantes, profesores y personal administrativo o de servicios. A las 9h00 pasaron 5 autos y la

concentración disminuyó a  $38,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mientras que a las 10h00 y 11h00 pasaron 12 vehículos y la concentración fue  $43.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $44.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. A las 13h00 aumentó el paso de los vehículos mientras que la concentración disminuyó por completo. Esto se puede deberse a la influencia de otros factores como la temperatura, ya que cuando aumenta la temperatura disminuye la humedad o viceversa. Las partículas menores a  $2.5 \mu\text{m}$  al estar con humedad relativa alta forma compuesto higroscópicos que absorben la humedad (Muñoz, Carmona, Pedroza, y Granados, s.f.). El promedio del día de la humedad relativa fue de 42,2%. La velocidad del viento es otro factor que puede influir con la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ .



*Figura 45.* Presentación gráfica de la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ , con respecto al número de vehículos de la Universidad de Las Américas, sede Granados.

En la Figura 46 se observa que las concentraciones de CO tienen un comportamiento similar con el número de vehículos que pasaron cerca del prototipo. La máxima concentración del promedio horario fue a las 11h00 de la mañana con  $3.85 \text{ mg}/\text{m}^3$  pasaron 12 vehículos. Mientras que la mínima concentración del promedio horario fue a las 7h00 de la mañana con  $2.07 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Sin embargo, a las 13h00 de la tarde la concentración fue de  $2.91 \text{ mg}/\text{m}^3$  y pasaron 15 vehículos. Esto se debe a varios factores meteorológicos.

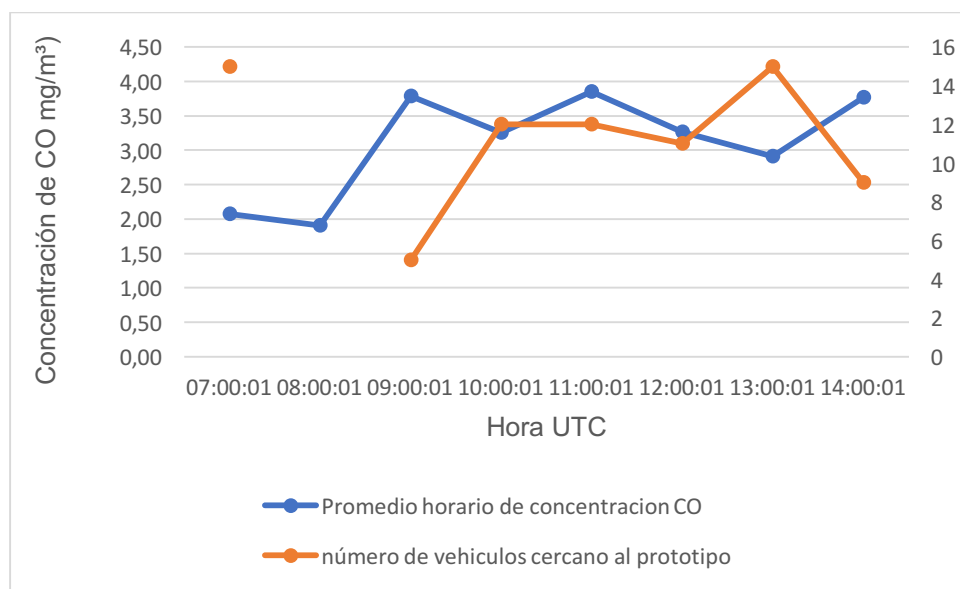


Figura 46. Presentación gráfica de las concentraciones de CO, con respecto al número de vehículos de la Universidad de Las Américas, sede Granados.

#### 4.2. Velocidad del viento

La dispersión atmosférica se encuentra influenciada por el viento. Éste influye en el transporte y dilución de los contaminantes (Manzur, Benzal, Gonzales, 2012). En la Figura 46 se observa los puntos donde se tomaron las mediciones del viento. Dando como resultado que la velocidad del viento es menor en el lado izquierdo y al fondo del parqueadero (Figura 47). Mientras que cerca de la puerta y adelante del parqueadero la velocidad del viento es mayor. Por lo que mientras mayor es la velocidad del viento menor es la concentración de contaminantes. Cuando la velocidad es alta, el volumen del aire se desplaza por la unidad de tiempo. Además, si la intensidad del viento es mayor, la concentración de contaminantes disminuirá (Venegas y Mazzeo, s.f). Sin embargo, hay otros factores como la humedad relativa y temperatura que influyen en el aumento o la disminución de los contaminantes.

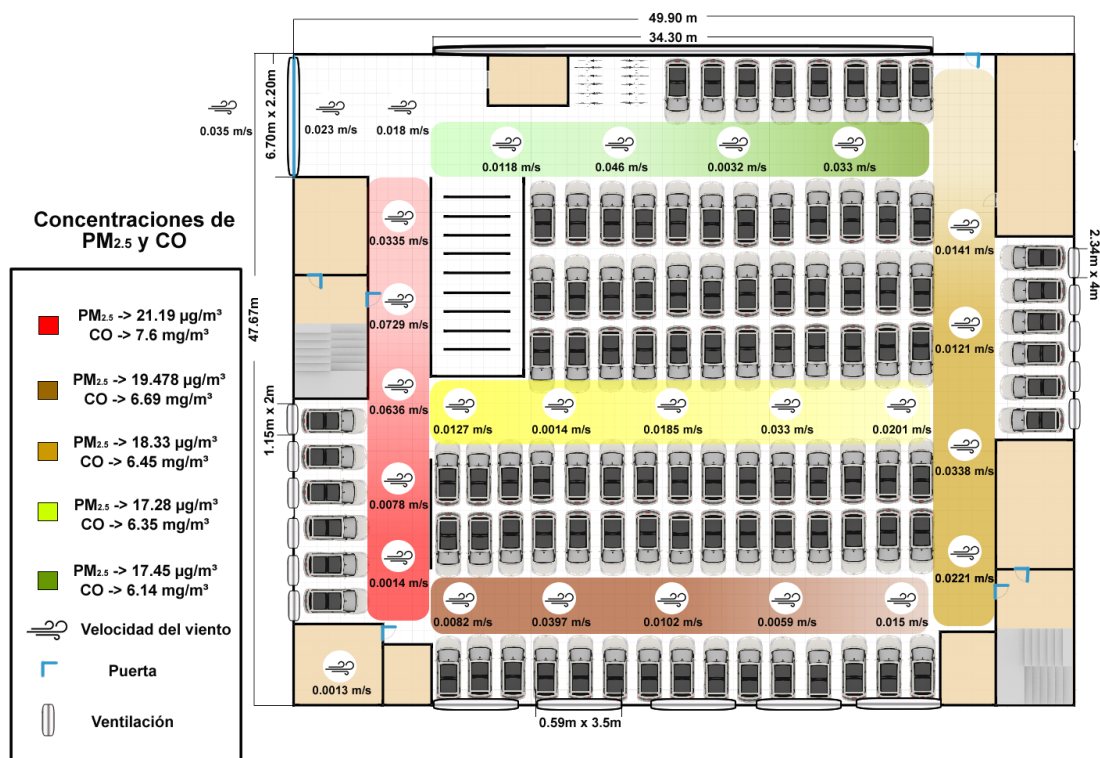


Figura 47. Plano del Parqueadero de la Universidad de Las Américas. Indicando la velocidad del viento y las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y CO

#### 4.3. Niveles de exposición

En el parqueadero subterráneo trabajan cuatro personas de edad media. Los cuales se encuentran expuestos a los contaminantes presentes. Sus funciones comienzan a las 7h00 de la mañana hasta las 3h00 de la tarde durante cuatro días. El promedio de tiempo de exposición es de 7 horas con una frecuencia de 18 respiraciones por minuto (Ramón, 2000). Para calcular la exposición, se debe calcular el volumen de respiración por minuto, se multiplica la frecuencia de respiración por el volumen total. Se utilizó un volumen de 0.5 litros, es el promedio de respiración de un adulto (Ramón, 2000). El volumen de respiración es de 9 l/min. La exposición a PM<sub>2.5</sub> depende de los días, ya que el día lunes la concentración de PM<sub>2.5</sub> es mayor que el día sábado. Por lo que en la Tabla 3 se muestra el cálculo de las exposiciones por siete horas y por día. En la siguiente Tabla 4 se observan las exposiciones en tiempo diferente usando el promedio de PM<sub>2.5</sub> 47.44 µg/m<sup>3</sup>.

El día lunes, la exposición de PM<sub>2.5</sub> será mayor a los otros días con un valor de 220.96 µg. Mientras que el día sábado la exposición es menor con una concentración 111.7 µg. En el análisis se tomó en cuenta la frecuencia de respiración y el tiempo de la exposición. Sin embargo, hay más factores que dependen de la exposición como la actividad metabólica, la respiración entre otros (Bigazzi y Figliozzi, 2014).

Calculo de la exposición

$$E = \frac{VE}{1000} * TE * DPM$$

Donde:

V<sub>E</sub>: Volumen de respiración por minuto (L/min)

E: Exposición (µg)

T<sub>E</sub>: Tiempo de exposición (min)

DPM: Concentración de material particulado (µg/m<sup>3</sup>)

Exposición del personal que trabaja en el parqueadero

Miércoles

$$E = \frac{9}{1000} l/min * 420min * 40,4 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$E = 152,712 \mu g$$

Jueves

$$E = \frac{9}{1000} l/min * 420min * 51,5 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$E = 194,67 \mu g$$

Viernes

$$E = \frac{9}{1000} l/min * 420 min * 42,6 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$E = 161,02 \mu g$$

Sábado

$$E = \frac{9}{1000} l/min * 420min * 34,5 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$E = 130,41 \mu\text{g}$$

Lunes

$$E = \frac{9}{1000} l/min * 420min * 68,2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$E = 257,7 \mu\text{g}$$

Tabla 3.

*Exposición de PM<sub>2.5</sub> del personal que trabaja en el parqueadero subterráneo.*

Personal	Lunes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Cuatro personas	220.96 $\mu\text{g}$	130.89 $\mu\text{g}$	166.86 $\mu\text{g}$	138.02 $\mu\text{g}$	111.7 $\mu\text{g}$

Tabla 4.

*Tiempo de exposición de PM<sub>2.5</sub> parqueadero subterráneo.*

Tiempo	Exposición $\mu\text{g}$
1 min	0.4
10 min	4.2
1 hora	25.6
4 horas	102.47
6 horas	153.70
8 horas	204.94

Debido al tamaño las partículas son 100% respirable, ya que al inhalar pasan por los pulmones y se depositan en los alvéolos pulmonares y pueden llegar al torrente sanguíneo (Linares y Díaz, 2008). Las cuatro personas que trabajan en el parqueadero subterráneo realizan sus actividades durante los 4 días de la semana. Sin embargo, al estar expuesto a PM<sub>2.5</sub> sin ningún tipo de protección personal incrementa el riesgo de padecer enfermedades respiratorias. Según los resultados en la Tabla 3. Se observa que el día lunes se exponen a una



concentración de 220.996  $\mu\text{g}$  mientras que el día martes, miércoles y jueves se exponen a 120.89  $\mu\text{g}$ , 166.86  $\mu\text{g}$ , 138.02  $\mu\text{g}$ , respectivamente. El sábado es el día con una menor exposición 117.7  $\mu\text{g}$ . Si las concentraciones son mayores a 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  tiene un efecto en la salud como la disminución de la capacidad respiratoria (López et al., 2007). Además, la contaminación por material particulado aunque sea en bajas concentraciones afecta a la salud del ser humano (OMS, 2016).

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

La contaminación en interiores afecta a todas las personas, ya que pasan la mayoría del tiempo en espacios cerrados. Es por esta razón que se ha fabricado el prototipo con sensores que detecten concentraciones de contaminantes críticos  $PM_{2.5}$ , y CO, y factores meteorológicos humedad relativa y temperatura ambiental para generar información a tiempo real, que se cuantifique el nivel de riesgo a los que están expuestos y de esta manera se planteé soluciones adecuadas dependiendo del lugar.

En Quito, la concentración de  $PM_{2.5}$  y CO se encuentra influenciada por la altitud y las condiciones meteorológicas. Además, de varios factores como el combustible de mala calidad y los vehículos sin mantenimiento provocan contaminación y afectan a la salud del ser humano. Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el parqueadero de la Universidad de Las Américas, sede Granados sobrepasó las concentraciones del  $PM_{2.5}$  del exterior de la estación Belisario manejada por la Secretaria de Ambiente de DMQ. Así como también, encuentran por encima de los límites de la OMS. Además, las concentraciones de CO son bajas y no están por encima de la normativa NECA ni de la OMS.

El sensor SEN077 de PM demostró tener buena correlación con el equipo de la *Thermo Andersen/ FH62C14* y *MicroDust Pro* (UDLA) con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.36. Aunque, el prototipo tenga limitaciones al tener un funcionamiento de principio de dispersión de luz. Al estar con humedad relativa mayor a 70% las mediciones se ven afectadas por el vapor de agua. Además, de que las partículas primarias y secundarias al estar con mayor humedad se vuelven demasiado pesadas para permanecer en el aire, ocurriendo una deposición seca, reduciendo el número de partículas y disminuyendo la concentración de  $PM_{2.5}$ .

El sensor MQ7 de CO demostró tener buena correlación con *Thermo / 48C / 48i*. Ya que, el coeficiente de determinación  $R^2$  fue de 0.77. Sin embargo, el sensor debe estar prendido 48 horas antes de su funcionamiento para que las mediciones sean óptimas.

También, se validó el sensor DTH-22 de temperatura y humedad relativa con Airflow TA440. Demostró tener buena correlación con la temperatura con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.89 y una buena correlación con la humedad relativa con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.4.

Las mediciones durante una semana ayudaron a demostrar que el día lunes hay un mayor número de vehículos estacionando y circulando mientras que la contaminación  $PM_{2.5}$  y CO en ese mismo día aumentó. En cuanto al día sábado el número de vehículos estacionados y en movimiento resultó en disminución la concentración  $PM_{2.5}$  y CO. Sin embargo, las concentraciones de CO son bajas en comparación con las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

La temperatura ambiental y humedad relativa del exterior e interior tuvieron relación entre sí, ya que el coeficiente de correlación fue de  $R^2$  0.6 y 0.7, respectivamente. Sin embargo, la velocidad del viento también influye en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  Y CO.

En fin, el prototipo es escalable y trae datos confiables siendo una parte de la solución y aportando información a tiempo real, además el prototipo es de bajo costo y es viable para el monitoreo de contaminación interior.

## 5.2 Recomendaciones

Se debería profundizar el tema con la calibración de los sensores de bajos costos, así como también sería enriquecedor ampliar el estudio acerca de la validación de los equipos para mejores resultados.

Es recomendable dejar 48 horas encendido el sensor de CO para obtener datos verídicos.

Se debería validar con otros equipos de alto costo y de confianza para mejores resultados del prototipo.

Se debería realizar un conteo de estudiantes, administrativo de servicio y visitas para determinar la influencia de las concentraciones de CO y PM<sub>2.5</sub> durante toda la semana.

Realizar un conteo de vehículos 8 horas durante una semana para analizar el comportamiento de las concentraciones de CO y PM<sub>2.5</sub>.

Es recomendable hacer un prototipo portable para que no haya daños en los sensores ni en la tarjeta SD o que queden descubiertos al aire libre.

Buscar un sensor de CO menos sensible y de otra marca para mejorar el prototipo.

Es recomendable que, en el parqueadero de la Universidad de Las Américas, sede Granados implemente ventiladores mecánicos o forzados para que la exposición de PM<sub>2.5</sub> no afecte a la salud de los empleados. Además, los trabajadores deberían usar equipos de protección personal como mascarillas.

Es recomendable realizar mediciones en otros espacios no solo el parqueadero, sino también en guarderías, escuelas, casas, entre otros.

## REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2017). Monóxido de carbono. Recuperado el 6 de noviembre de 2017 de <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impactindoor-air-quality>
- Air-O-Cell [equipo]. (2017). México: Air-Care. Recuperado de [http://www.aircare.com.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=89&Itemid=81](http://www.aircare.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=81)
- Amaral, S. S., de Carvalho, J. A., Costa, M. A. M., y Pinheiro, C. (2015). An overview of particulate matter measurement instruments. *Atmosphere*, 6(9), 1327–1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>
- Arciniegas Suárez, C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM 10. *Luna Azul*, (34), 195–213.
- Barría, R. M., Calvo, M., y Pino, P. (2016). Contaminación intradomiciliar por material particulado fino (MP2,5) en hogares de recién nacidos. *Revista Chilena de Pediatría*, 87(5), 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.rchipe.2016.04.007>
- Bigazzi, A. y Figliozzi, M. (2014). Review of Urban Bicyclists' Intake and Uptake of Traffic-Related Air Pollution. *Transport Reviews*, 34:2, 221-245. doi:10.1080/01441647.2014.897772
- CASELLA. (s.f.). MicroDust Pro Aerosol Monitoring System, 44(0). Recuperado el 10 de noviembre de 2017 de <http://www.casellasolutions.com/in/en/documentlibrary/support-docs/microdust-pro-handbook.pdf>
- Cheng, L., Li, B., Cheng, Q., Baldwin, A. N., & Shang, Y. (2017). Investigation of indoor air quality of large department store buildings in China based on field measurements. *Building and Environment*, 118, 128–143. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.031>
- Cimbage, C., Thomasz, O., Caruana, C., Eugenia, M., Miguel, J., Thomasz, E.

- O., ... Miguel, J. (2014). Sistema de Información Científica, 1–22.
- Cociorva, S., y Iftene, A. (2017). Indoor Air Quality Evaluation in Intelligent Building. *Energy Procedia*, 112 (Octubre 2016), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1095>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Registro Oficial 449 de 20 de octubre de 2008 y Registro Oficial 490, Suplemento, de 20 de mayo de 2011
- DFRobot. (2017). PM2.5 laser dust sensor SKU: SEN0177, 2–11. Recuperado el 10 de noviembre de 2017 de [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PM2.5\\_laser\\_dust\\_sensor\\_SKU:SEN0177](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PM2.5_laser_dust_sensor_SKU:SEN0177)
- Espinoza, E., y Molina Claudia. (2014). Contaminación del aire en Cuenca-Ecuador, 2009- 2013 posibles efectos en la salud. Revista de la Facultad de Ciencias Médicas, Universidad de Cuenca. V32. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/medicina/article/view/File/883/781>
- Gadyszewska-Fiedoruk, K., y Nieciecki, M. (2016). Indoor Air Quality in a Multi-car Garage. *Energy Procedia*, 95, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.034>
- Gallego, P. A., González, F. I., y Sánchez, G. B. (2012). Contaminación atmosférica. Madrid, ES: UNED- Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com>
- Germán, C. R. L., Abarca, J. G. S., y Mares, C. J. (2014). Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino. Distrito Federal, MÉXICO: Grupo Editorial Patria. Recuperado de <http://www.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec>
- Green Car Congress. (2017). WHO links 7 million premature deaths annually to air pollution. Recuperado de 12 de noviembre de 2017 <http://www.greencarcongress.com/2014/03/20140325-who.html>
- Google Satellite. (s.f). Universidad de Las Américas Quito. Recuperado el 20 de enero de 2018 de <https://www.google.com.ec/maps/search/udla+quito/@-0.1658538,-78.4691499,16z/data=!3m1!4b1?hl=es>

- Guardino. S. (2012). Calidad de aire interior. In *Capítulo 44 Calidad del aire interior En enciclopedia OIT (D-INSHT I)*. Madrid. Recuperado el 21 de noviembre de 2017 de <http://www.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec>
- Guijarro, J. A. (2015). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización, (agosto).
- Henan Hanwei Electronics CO., L. (s.f.). MQ-7 Semiconductor Sensor for Carbon Monoxide, 2–4. Recuperado el 15 de septiembre de 2017 de <https://www.pololu.com/file/0J313/MQ7.pdf>
- Herrera, J., Rodríguez, S., y Marín, J. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 25(506), 10. Recuperado el 15 de septiembre de 2017 de [http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/viewFile/176/174](http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/viewFile/176/174)
- INEC. (2015). *Anuario Transporte 2015*. Recuperado el 23 de enero de 2018 de [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2015/2015\\_AnuarioTransportesResultados.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2015/2015_AnuarioTransportesResultados.pdf)
- INEC. (2016). *Anuario Transporte 2016*. Recuperado el 23 de enero de 2018 de [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2016/2016\\_AnuarioTransportes\\_%20Principales%20Resultados.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2016/2016_AnuarioTransportes_%20Principales%20Resultados.pdf)
- Instituto Nacional de Ecología. (s.f.). *Manual 1. Principios de medición de la calidad del aire. Connect*. Recuperado el 18 de septiembre de 2017 de [http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1- Principios de Medición de la Calidad del Aire.pdf](http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-Principios-de-Medición-de-la-Calidad-del-Aire.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Junta de la Unión Europea (2011). Calidad del aire. Recupero el 29 de

- noviembre de <https://doi.org/10.1590/S1020-49891998001200018>
- Jafta, N., Barregard, L., Jeena, P. M., y Naidoo, R. N. (2017). Indoor air quality of low and middle income urban households in Durban, South Africa. *Environmental Research*, *in press*(March), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.008>
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., y Amann, M. (2015). Contributions to cities ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, *120*, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
- Kumar, P., Skouloudis, A. N., Bell, M., Viana, M., Carotta, M. C., Biskos, G., y Morawska, L. (2016). Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings. *Science of the Total Environment*, *560–561*(April), 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.032>
- Lara, C., Mendoza, J. F., Mart, W., Elia, M., y Alonso, M. (2009). Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana, (322).
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., y Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, *525*(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- Levy, R. J. (2017). Carbon monoxide and anesthesia-induced neurotoxicity. *Neurotoxicology and Teratology*, *60*, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2016.09.002>
- Linares. C y Diaz. J. (2008). *Un buen indicador de la contaminación urbana por causas antropogénicas. Las PM<sub>2.5</sub> y su afección a la salud*. Recuperado el 1 de febrero de 2018 de [https://www.um.es/estructura/servicios/sprevencion/cseguridad/documentos/EE\\_58\\_PM25.pdf](https://www.um.es/estructura/servicios/sprevencion/cseguridad/documentos/EE_58_PM25.pdf)
- Li, Y., y Xiang, R. (2013). Particulate pollution in an underground car park in Wuhan, China. *Particuology*, *11*(1), 94–98.



<https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.010>

- Liu, T., y Manager, B. (s.f.). Aosong Electronics Co., Ltd Aosong Electronics Co., Ltd, 22, 1–10. Machado, A., Garcia, N., Garcia, C., Cordova, A., Linares, M., Alaña, J., y Huertas, J. (2007). Determinación y estudio de dispersión de las concentraciones de monóxido de carbono en la zona oeste de la ciudad de Maracaibo – Venezuela.
- López, E., Quiroz, C., Cardozo, F., Espinosa, A. (2007). *Contaminación atmosférica y efectos en la salud de la población de Medellín y su área metropolitana*. Recuperado el 4 de febrero 2018 de [http://www.sabaneta.gov.co/institucional/DocumentosMunicipio/Contaminacion%20Atmosferica%20y%20efectos%20hacia%20la%20salud%20-%20Efectos%20en%20la%20Salud%20\[3%20de%204\].pdf](http://www.sabaneta.gov.co/institucional/DocumentosMunicipio/Contaminacion%20Atmosferica%20y%20efectos%20hacia%20la%20salud%20-%20Efectos%20en%20la%20Salud%20[3%20de%204].pdf)
- Manual, S. (2014). Operation and service manual p/n 1980584. Recuperado el 20 de noviembre de 2017 de <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/null%7Cnull/manuals/EPM-manual-Model%2048ihl.pdf>
- Manzur, M., Benzal, G., y Gonzales, S. (2012). Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Recuperado el 21 de diciembre de 2017 de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26838/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26838/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- Marc, M., Smielowska, M., y Zabiegala, B. (2016). Concentrations of monoaromatic hydrocarbons in the air of the underground car park and individual garages attached to residential buildings. *Science of the Total Environment*, 573, 767–777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.173>
- Martínez, A. (2004). Contaminación atmosférica. Universidad de Castilla: La Mancha. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com>
- Muñoz, R., Carmona, M., Pedroza, J., y Granados, M. (s.f.). Análisis de datos de PM<sub>2.5</sub> registrados con equipo TEOM en las estaciones AZC y SUR del red automática de monitoreo atmosférico, 1–11. Recuperado el 28 de noviembre de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliaire/mexicon/R-0205.pdf>
- Nunes, M., Garcia, C., y Alba, S. (2006). *Evaluación psicológica en la salud*.

- Scielo (Vol. 14). Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018845572006000200005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018845572006000200005)
- OMS. (2016). *Contaminación del aire interiores y salud*. Recuperado el 6 de noviembre de 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/es/>
- OMS. (2016). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. Recuperado el 11 de mayo 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- OPS. (2016). *Guías y normas de calidad del aire en exteriores*. Recuperado el 11 de mayo 2017 de [http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/normas/2\\_1.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/normas/2_1.pdf)
- Oyarzún, M. (2010). *Contaminación aérea y sus efectos en la salud*. *Revista chilena de enfermedades respiratorias* (Vol. 26). <https://doi.org/10.4067/S0717-73482010000100004>
- Palate, G. L. A. (2009). *Contaminación 12*. Córdoba: El Cid Editor | apuntes. Recuperado de <https://ebookcentral-proquest-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/detail.action?docID=3182612>
- Parra, V., y García, V. P. (2008). Sensores químicos basados en materiales moleculares: De la molécula al material, del material al dispositivo. *Sensores Químicos*, 5–14.
- Patier, R. F. (2006). *Metodología de evaluación de la calidad del aire*. Recuperado de <https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/606/623>
- Pérez, C. P. (2009). Gestión de la contaminación atmosférica urbana El caso de Quito, 1–17.
- Pico, G., Gonzalez, I., y Sanchez, B. (2012). *Contaminación atmosférica* (UNED-Univ). Madrid. Recuperado de <http://site.ebrary.com/lib/udlasp/reader.action?docID=10646498>
- PRAXAIR. (2015). Principios de detección de gases. Recuperado el 6 de noviembre de 2017 de [https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2015-03-16-Principios de detección.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2015-03-16-Principios%20de%20detecci3n.pdf)
- Puigcerver, M., y Carrascal, D. (2008). *El medio atmosférico meteorología y*

*contaminación* (Universita). Barcelona.

Pureti. (2017). *Si se mide la Calidad de Aire Interior puede mejorarla*. Si mide la calidad del aire puede mejorarlo. Recuperado el 11 de mayo 2017 de <http://www.pureti.es/mide-la-calidad-aire-interior-puede-mejorarla/>

Ramón. G. (2000). Sistema respiratorio y actividad física. Recuperado el 2 de enero de 2017 de [http://viref.udea.edu.co/contenido/menu\\_alterno/apuntes/ac24-sist-respiratorio.pdf](http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac24-sist-respiratorio.pdf)

Rodriguez, Soriana. Desamparados, M. (2012). Contaminantes atmosféricos particulados: evaluación de las fuentes de origen y de su contribución a la contaminación atmosférica en el clúster cerámico de Castellón (Servei de). Castellón de la Plana, ES: Universitat Jaume I. Recuperado de <http://site.ebrary.com/bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/detail.action?docID=11201598&p00=contaminación+atmosferica>

Salvador Martínez, P., y Artíñano Rodríguez de Torres, B. (2000). Informes Técnicos Ciemat 921, 146. Recuperado de [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/38/106/38106963.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/106/38106963.pdf)

Secretaria de Ambiente. (2014). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, sector energía 2011* <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjfzflZuPjYAhVR7FMKHJQCFCcQFggIMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.quitoambiente.gob.ec%2Fambiente%2Findex.php%2Fbiblioteca-digital%2Fcategory%2F69-proyectos%3Fdownload%3D503%3Ainventario-gei-dmq-2011-energia&usg=AOvVaw0b99avojuPto9Aqa-CTkkU>

Secretaria de Ambiente. (2015). Consultoría: Actualización del Plan de Manejo de la Calidad del Aire 2005 – 2010 Informe Final. Recuperado el 20 de mayo 2017 de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwitj7LByL\\_YAhVISyYKHdPYDQQFggIMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.quitoambiente.gob.ec%2Fambiente%2Findex.php%2Fbibl](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwitj7LByL_YAhVISyYKHdPYDQQFggIMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.quitoambiente.gob.ec%2Fambiente%2Findex.php%2Fbibl)

- ioteca-digital%2Fcategory%2F61-politicas-y-planeacion ambiental%3Fdownload%3D529%3Acalidad-del-aire final&usg=AOvVaw21QRc74saVun-VaxgVKqpn
- Secretaría del Ambiente. (2016). *Calidad del aire*. Recuperado el 20 de mayo de 2017 de [http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria\\_Ambiente/red\\_monitoreo/informacion/iqca\\_2014.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca_2014.pdf)
- Secretaría del Ambiente. (2014). *Secretaría de Ambiente: Informe Final Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio, DMQ 2011*. Retrieved from [http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=536&Itemid=59&lang=es](http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=536&Itemid=59&lang=es).
- Secretaría del Ambiente. (2011). *Informe Anual de Calidad del Aire*. Recuperado el 19 de julio de 2017 de [http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria\\_Ambiente/red\\_monitoreo/informacion/iqca\\_2011.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca_2011.pdf)
- SPEC. (2017). *Digital Gas Sensor – Carbon Monoxide*. Recuperado de <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-CO-968-034.pdf>
- Simion. D. (2003). *Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana*. CEPAL. Santiago de Chile. Recuperado el 8 de noviembre de 2017 de <https://ebookcentral-proquest-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec>.
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., y Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO<sub>2</sub>. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 238, 706–715. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036>
- Spiru, P., y Simona, P. L. (2017). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Energy Procedia*, 128, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.039>
- Sosa. M. (1999). *Ventilación Natural efectiva y cuantificable*. Recuperado el 3 de

diciembre de 2017 de

[https://books.google.com.ec/books?id=2yOTK6FA7K4C&pg=PA16&lpg=PA16&dq=condiciones+climaticas+variables+en+interiores+y+exteriores&source=bl&ots=Us333wcCA7&sig=ThIYw\\_GT8SfNPgfq3jg7IUzWmUs&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiL5-aL\\_\\_rXAhVB1CYKHa70D5MQ6AEITzAK#v=onepage&q=condiciones%20climaticas%20variables%20en%20interiores%20y%20exteriores&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=2yOTK6FA7K4C&pg=PA16&lpg=PA16&dq=condiciones+climaticas+variables+en+interiores+y+exteriores&source=bl&ots=Us333wcCA7&sig=ThIYw_GT8SfNPgfq3jg7IUzWmUs&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiL5-aL__rXAhVB1CYKHa70D5MQ6AEITzAK#v=onepage&q=condiciones%20climaticas%20variables%20en%20interiores%20y%20exteriores&f=false)

Steinemann, A., Wargocki, P., y Rismanchi, B. (2017). Ten questions concerning green buildings and indoor air quality. *Building and Environment*, 112(2017), 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.010>

Suárez, V., y Pérez, C. (2006). *Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras*. Recuperado el 24 de mayo de 2017 de [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36407400/v3.n2.diaz.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1497834999&Signature=nqNU8Nt9DfceGwBAPyMF%2F0TKuQ%3D&response-contentdisposition=inline%3B%20filename%3DContaminacion\\_por\\_material\\_particulado\\_e.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36407400/v3.n2.diaz.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1497834999&Signature=nqNU8Nt9DfceGwBAPyMF%2F0TKuQ%3D&response-contentdisposition=inline%3B%20filename%3DContaminacion_por_material_particulado_e.pdf)

Thermo Fisher Scientific Inc. (2007). *FH62C14*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017 de <https://doi.org/https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/manuals/EPM-manual-FH62C14.pdf>

Tham, K. W. (2016). Indoor air quality and its effects on humans. A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy and Buildings*, 130, 637–650. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.071>

Tran, T. V., Dang, N. T., y Chung, W. Y. (2016). Battery-free smart-sensor system for real-time indoor air quality monitoring. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 248, 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.198>

TULSMA. (2017). Texto Unificado de Legislación Secundaria de medio Ambiente, libro VI Anexo 4. Recuperado el 23 de enero de 2018 de

[http://www.silec.com.ec.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/WebTools/LexisFinder/DocumentVisualizer/DocumentVisualizer.aspx?id=AMBIENTE-TEXTO\\_UNIFICADO\\_DE\\_LEGISLACION\\_SECUNDARIA\\_DE\\_MEDIO\\_AMBIENTE&query=tulsma#l\\_DXDataRow832](http://www.silec.com.ec.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/WebTools/LexisFinder/DocumentVisualizer/DocumentVisualizer.aspx?id=AMBIENTE-TEXTO_UNIFICADO_DE_LEGISLACION_SECUNDARIA_DE_MEDIO_AMBIENTE&query=tulsma#l_DXDataRow832)

United States Protection Agency. (2006). About Urban air Toxic. Recuperado el 3 de septiembre de <https://www.epa.gov/urban-air-toxics/about-urban-airtoxics>

United States Protection Agency. (2015). *Ozone Basics*. Recuperado el 27 de abril de 2017 de <https://www.epa.gov/ozone-pollution/ozone-basics#what%20where%20how>

EPA. (2015). *Air Pollutants Criteria*. Recuperado el 27 de abril de 2017 de [https://www.epa.gov/sites/production/files/201510/documents/ace3\\_criteria\\_air\\_pollutants.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/201510/documents/ace3_criteria_air_pollutants.pdf)

Ubilla, C., y Yohannessen, K. (2017). Contaminación Atmosférica Efectos En La Salud Respiratoria En El Niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>

Vargas, F. Gallego, I. (2005). *Calidad ambiental interior: Bienestar, confort y salud*. *Revista Espanola de Salud Publica* (Vol. 79). <https://doi.org/10.1590/S1135-57272005000200011>

Venegas, L., y Mazzeo, N. (s.f). *La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera*. Recuperado el 21 de diciembre de 2017 de <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas%20congreso/15.Venegas.CLIV2.pdf>

Vuković, G., Aničić Urošević, M., Razumenić, I., Kuzmanoski, M., Pergal, M., Škrivanj, S., y Popović, A. (2013). Air quality in urban parking garages (PM10, major and trace elements, PAHs): Instrumental measurements vs. active moss biomonitoring. *Atmospheric Environment*, 85, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.053>

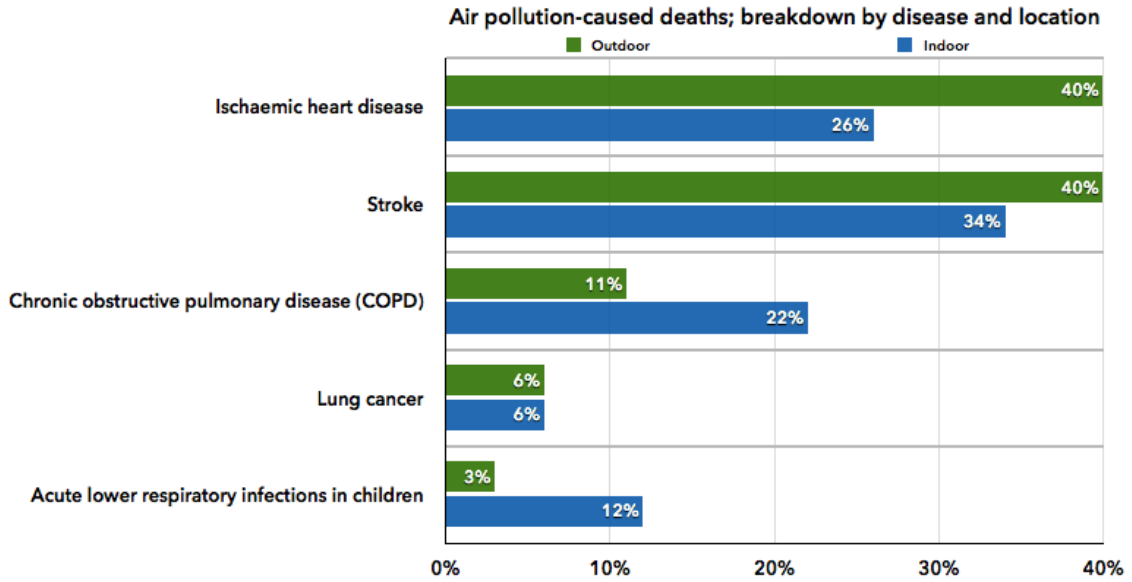
Wang, J., y Ogawa, S. (2015). Effects of Meteorological Conditions on PM2.5

- Concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9089–9101. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>
- Yadav, R., Sahu, L. K., Beig, G., Tripathi, N., y Jaaffrey, S. N. A. (2017). Ambient particulate matter and carbon monoxide at an urban site of India: Influence of anthropogenic emissions and dust storms. *Environmental Pollution*, 225, 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.038>
- WHO. (2014). 7 million premature deaths annually linked to air pollution. Recuperado el 22 de abril de 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>
- WHO. (2016). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. Recuperado el 22 de abril de 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Zhao, Y., Song, X., Wang, Y., Zhao, J., y Zhu, K. (2017). Seasonal patterns of PM10, PM2.5, and PM1.0 concentrations in a naturally ventilated residential underground garage. *Building and Environment*, 124, 294–314. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.014>

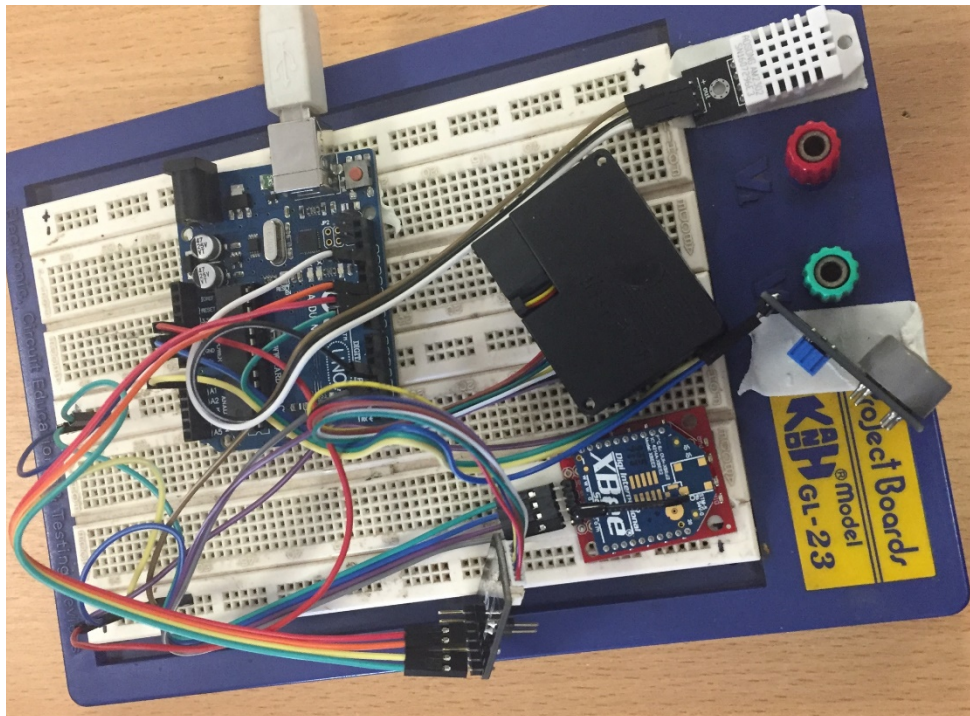
## **ANEXOS**



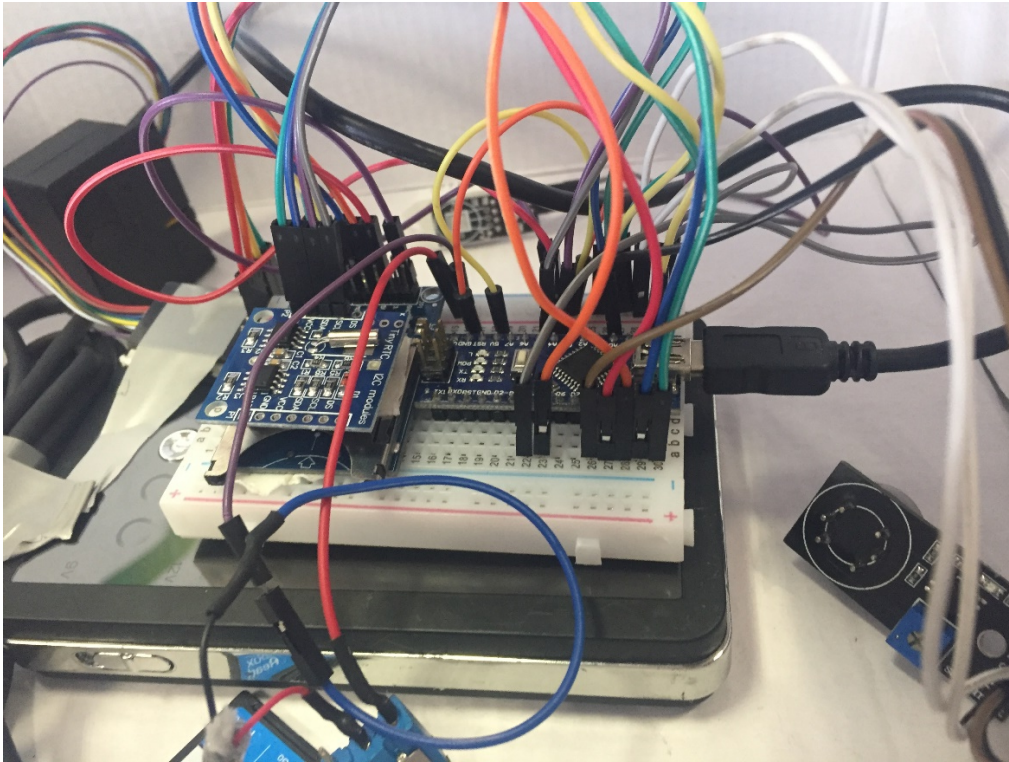
**Anexo 1.** Enfermedades producidas por la contaminación del aire en exterior (verde) e interior (azul). Tomada de Green Car Congress, 2014



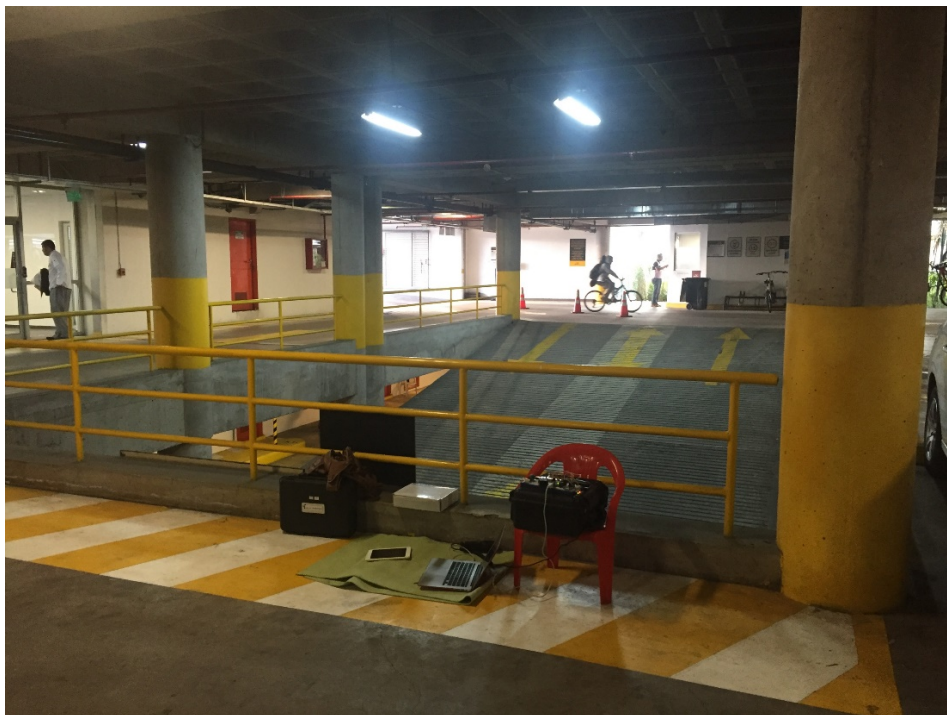
**Anexo 2.** Conexiones del prototipo



### Anexo 3. Prototipo finalizado



### Anexo 4. Monitoreo en el parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas



**Anexo 5.** Equipos utilizados para el monitoreo del parqueadero subterráneo



**Anexo 6.** Estructura del prototipo



**Anexo 7.** Instalación del prototipo parqueadero subterráneo de la Universidad de Las Américas



## Anexo 8. Software para la visualización de los datos

