



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO Y MORFOLOGÍA DE PARTÍCULAS MENORES A  
PM10 EN EL INTERIOR DEL TRANSPORTE PÚBLICO: CASO MORELIA.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO.

PRESENTADA POR:

P.I.Q. Yazmin Almonte García.

Asesor: Doctor en Ciencias de Ingeniería Marco Antonio Martínez Cinco.

Co-asesor: Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental Arturo Rangel Gonze.

Morelia, Michoacán, Agosto del 2015

## RESUMEN.

El tamaño de partícula determina si ésta puede ser inhalada y en qué parte del sistema respiratorio se deposita. Las emisiones de vehículos automotores constituyen una de las principales fuentes de material particulado (PM) en un ambiente urbano, sin embargo existen pocos estudios realizados acerca de la distribución de tamaño de partícula, por lo cual el objetivo de este estudio fue determinar la distribución de tamaño de partícula en el interior de los diferentes tipos de vehículos de transporte público (“Combi” y “Camión”), en 26 zonas del circuito periférico de la ciudad de Morelia, durante el periodo de otoño-invierno (diciembre) del 2013, seleccionando cinco horarios diferentes del día atendiendo al criterio de horas pico y no pico (07:00, 10:00, 14:00, 16:00 y 19:00 horas). La distribución del tamaño de partícula, en el interior de los transportes públicos colectivos “Combi” y “Camión”, presenta una mayor concentración de número de partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ , en donde el transporte público colectivo “Camión” presenta en general un 5.56 % mayor concentración de número de partículas en comparación con el transporte colectivo “Combi”, esto es debido al tipo de combustible que cada uno utiliza. Los niveles de mayor número de partículas estuvieron presentes en el horario de 7:00 a 8:00 horas, debido a la mayor cantidad de vehículos transitando en la ciudad. Coincide con los horarios de entrada a la mayoría de las escuelas y entradas en el turno matutino de múltiples trabajos. Y de acuerdo a la zona de medición, las zonas que presentaron mayor número de partículas fueron “Refresquera Pepsi” y “Office Depot”, atribuyendo estos resultados al transporte vehicular pesado en la zona poniente y al proceso de repavimentación realizado en la zona oriente de la ciudad de Morelia.

Palabras clave: **Material Particulado, Distribución, Tamaño, Partícula, Transporte Público.**

## **ABSTRACT.**

The particle size determines whether it can be inhaled and where in the respiratory system is deposited. Emissions from motor vehicles are a major source of particulate matter (PM) in an urban environment, but there are few studies about the distribution of particle size, so the objective of this study was to determine the size distribution particle inside of the different types of public transport vehicles ("Combi" and "Camión"), in 26 zones of the peripheral circuit of the Morelia's city, during the autumn-winter (December) 2013, selecting five different times of day by the criterion of peak and off-peak hours (7:00, 10:00, 14:00, 16:00 and 19:00 hours). The particle size distribution, within the collective public transport "Combi" and "Camión" has a higher concentration of number of particles smaller than  $2.5\mu\text{m}$ , where the public transport "Camión" generally has a 5.56 % higher particle number concentration compared to public transport "Combi", this is due to the type of fuel that everyone uses. Levels of more particles were present at the time of 7:00 to 8:00 hours. And according to the measurement zone, the zones with higher number of particles were "Refresquera Pepsi" and "Office Depot" attributing these results to heavy vehicular transport in the western part of Morelia's city and the process of resurfacing done in the eastern part of Morelia's city.

**Keywords: Particulate Matter, Particle Size Distribution and Public Transport.**

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.1	GENERALIDADES .....	15
1.2	ANTECEDENTES.....	18
1.3	OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.1	<i>Objetivos particulares .....</i>	<i>21</i>
1.4	JUSTIFICACIÓN .....	21
1.5	HIPÓTESIS.....	22
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1	PARTÍCULAS .....	23
2.1.1	<i>Clasificación de partículas.....</i>	<i>23</i>
2.1.2	<i>Morfología de Partículas.....</i>	<i>25</i>
2.1.3	<i>Fuentes del material particulado.....</i>	<i>25</i>
2.1.3.1	<i>Según Tipo de fuente generadora.....</i>	<i>25</i>
2.1.3.2	<i>Según naturaleza de las partículas emitidas.....</i>	<i>26</i>
2.1.4	<i>Efectos de las partículas en el aire sobre la salud humana.....</i>	<i>28</i>
2.1.5	<i>Distribución de tamaños de partículas.....</i>	<i>29</i>
2.2	MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM) .....	30
	<i>EDS: Espectroscopia de Energía Dispersiva .....</i>	<i>32</i>
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1	CAMPAÑA DE CAMPO.....	41
3.2	TRATAMIENTO DE DATOS.....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>47</b>
4.1	DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	47
4.1.1	<i>Distribución de tamaños de partícula con respecto al día de medición.....</i>	<i>47</i>
4.1.2	<i>Distribución de tamaños de partícula con respecto al horario de medición.....</i>	<i>51</i>
4.1.3	<i>Distribución de tamaños de partícula con respecto a la zona de medición (parada).....</i>	<i>53</i>
4.2	DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR SUPERFICIE.....	67
4.2.1	<i>Distribución de tamaño de partícula por superficie respecto al día de medición.....</i>	<i>67</i>
4.2.2	<i>Distribución de tamaño de partícula por superficie respecto a la zona de medición.....</i>	<i>69</i>
4.3	DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR VOLUMEN DE PARTÍCULA.....	72
4.3.1	<i>Distribución de tamaño de partícula por volumen de partícula respecto al día de medición.....</i>	<i>72</i>

4.3.2	<i>Distribución de tamaño de partícula por volumen respecto a la zona de medición</i> .....	73
4.4	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE PARTÍCULAS. ....	76
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>99</b>

## GLOSARIO.

<b>μm</b>	Micrómetros.
<b>BRT</b>	Metro-bus (Bus Rapid Transit).
<b>C</b>	Carbono.
<b>CO</b>	Monóxido de carbono.
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono.
<b>COV</b>	Compuestos orgánicos volátiles.
<b>Dp</b>	Diámetro de partícula.
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua.
<b>H</b>	Hidrógeno.
<b>INECC</b>	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
<b>LP</b>	Licuado de Petróleo.
<b>mm</b>	Milímetros.
<b>Nm</b>	Nanómetros.
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de nitrógeno.
<b>NO</b>	Monóxido de nitrógeno.
<b>NOx</b>	Óxidos de nitrógeno.
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno.
<b>Pb</b>	Plomo.
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Material particulado o partículas aerodinámicas con diámetro menor a 2.5 micras.
<b>PM<sub>10.0</sub></b>	Material particulado o partículas aerodinámicas con diámetro menor a 10 micras.
<b>PM</b>	Material particulado.

<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de azufre.
<b>SO<sub>x</sub></b>	Óxidos de azufre.
<b>SUMA</b>	Secretaria de Urbanismo y Medio Ambiente del Estado de Michoacán.
<b>SUV</b>	Vehículo utilitario (Sport Utility Vehicles).
<b>UNIMAT</b>	Unidad de Monitoreo Atmosférico de Morelia.
<b>UMSNH</b>	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
<b>USEPA</b>	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency).
<b>VAN</b>	Vehículo para transportar grupos de personas.
<b>WGA</b>	Asociación de Gobernadores del Oeste de los Estados Unidos. (Western Governors` Association).
<b>ZMMorelia</b>	Zona Metropolitana de Morelia.
<b>ZMVM</b>	Zona Metropolitana del Valle de México.

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Definición de los términos que describen las partículas suspendidas en el aire. .....	23
<b>Tabla 2.</b> Clasificación por Tamaño de Partícula. ....	24
<b>Tabla 3.</b> Paradas o zonas de medición. ....	37
<b>Tabla 4.</b> Fotografías de las paradas o zonas donde se efectuaron las mediciones dentro del vehículo de transporte público “Combi” y “Camión” .....	38
<b>Tabla 5.</b> Fechas y horarios de medición en el transporte público “Combi” y “Camión”. .....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Grafica de material particulado en toneladas por año del transporte "Combi" y "Camión".....	20
Figura 2. Clasificación de las fuentes de material particulado de origen antrópico.....	27
Figura 3. Microscopio electrónico de barrido.....	32
Figura 4. Partes principales del espectrómetro.....	33
Figura 5. Espectroscopio de rayos x.....	33
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología del Conteo de Partículas. ....	34
Figura 7. Transporte público colectivo .....	35
Figura 8. Transporte público colectivo "Camión". ....	35
Figura 9. Ruta Periférico de la ciudad de Morelia. ....	36
Figura 10. Mapa con la ubicación de las zonas de medición (paradas) en el circuito periférico (libramiento) de Morelia.....	38
Figura 11. Formato de captura de datos utilizado durante la campaña de monitoreo en el periférico de la ciudad de Morelia.....	44
Figura 12. Contador de partículas Fluke 983.....	45
Figura 13. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día lunes 12 de diciembre de 2013 para combi y lunes 9 de diciembre de 2013 para camión. ....	47
Figura 14. Distribución de tamaño de partícula de camión y combi en el día martes 3 de diciembre de 2013 para combi y martes 10 de diciembre de 2013 para camión. ....	48
Figura 15. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día miércoles 4 de diciembre de 2013 para combi y miércoles 11 de diciembre de 2013 para camión. ....	48
Figura 16. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día jueves 5 de diciembre de 2013 para combi y jueves 12 de diciembre para camión. ....	49
Figura 17. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día viernes 6 de diciembre de 2013 para combi y viernes 13 de diciembre de 2013 para camión. ...	49
Figura 18. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día sábado 7 de diciembre de 2013 para combi y sábado 14 de diciembre de 2013 para camión. ...	50
Figura 19. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 7:00 a 8:00. ....	52

Figura 20. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 10:00 a 11:00. ....	52
Figura 21. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 14:00 a 15:00. ....	52
Figura 22. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 16:00 a 17:00. ....	53
Figura 23. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 19:00 a 20:00. ....	53
Figura 24. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición: salida. ....	55
Figura 25. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición: embotelladora refresquera Pepsi. ....	55
Figura 26. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición: colonia Xangari. ....	56
Figura 27. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Costco. ....	56
Figura 28. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición: casa de gobierno. ....	57
Figura 29. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición: zoológico "Benito Juárez". ....	57
Figura 30. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Aurrera. ....	58
Figura 31. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición hospital medico IMSS. ....	58
Figura 32. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Office Depot. ....	59
Figura 33. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición centro comercial Las Américas. ....	59
Figura 34. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición centro comercial Plaza Morelia. ....	60
Figura 35. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición salida Mil Cumbres. ....	60

Figura 36. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Instituto Lancaster.....	61
Figura 37. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición colonia San Rafael.....	61
Figura 38. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Motel Inn. ....	62
Figura 39. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Salida Charo. ....	62
Figura 40. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Mercado de Abastos.....	63
Figura 41. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Instituto Tecnológico de Morelia. ....	63
Figura 42. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición colonia Torreón Nuevo. ....	64
Figura 43. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición avenida Huaniqueo.....	64
Figura 44. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Walmart.....	65
Figura 45. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Central de Autobuses Morelia.....	65
Figura 46. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición SCT. ....	66
Figura 47. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Salida a Quiroga.....	66
Figura 48. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Colonia Manantiales. ....	67
Figura 49. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Llegada.....	67
Figura 50. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su superficie y respecto al día de medición. ....	68
Figura 51. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su superficie con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Combi”.....	70

Figura 52. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su superficie con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Camión” .....	71
Figura 53. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su volumen y respecto al día de medición. ....	72
Figura 54. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su volumen con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Combi” .....	74
Figura 55. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su volumen con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Camión” .....	75
Figura 56 (a). Aglomeración de partículas de hollín en el transporte público colectivo “Combi”. ....	77
Figura 57 (a). EDS de partícula de hollín del transporte público colectivo “Combi” .....	78
Figura 58 (b). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Combi”. 78	
Figura 59 (c). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Combi”. 79	
Figura 60 (d). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Combi”. ....	79
Figura 61 (e). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Combi”. 80	
Figura 62 (f). Aglomerado de partícula de hollín en el transporte colectivo “Camión”. 81	
Figura 63 (f). EDS de aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión”. ....	81
Figura 64 (g). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión” .....	82
Figura 65 (g). EDS de aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión” .....	82
Figura 66 (h). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión” .....	83
Figura 67 (i). Partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo “Combi” .....	84
Figura 68 (i). EDS de partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo “Combi” .....	85
Figura 69 (j). Partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo “Combi” .....	85

Figura 70 (j). EDS de partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo "Combi".....	86
Figura 71 (k). Partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo "Combi".....	86
Figura 72 (k). EDS d partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo "Combi".....	87
Figura 73 (l). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	87
Figura 74 (l). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	88
Figura 75 (m).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	88
Figura 76 (m).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	89
Figura 77 (n).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	89
Figura 78 (n).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	90
Figura 79 (o).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	90
Figura 80 (o).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	91
Figura 81 (p).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo Camión".....	91
Figura 82 (p).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	92
Figura 83 (q).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	92
Figura 84 (q).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	93
Figura 85 (r).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	93

Figura 86 (r).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	94
Figura 87 (s).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	94
Figura 88 (s).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	95
Figura 89 (t).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	95
Figura 90 (t).EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo "Camión".....	96
Figura 91 (u).Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".....	96

# 1 INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Generalidades.

La contaminación del aire puede ser definida como cualquier condición atmosférica en la que las sustancias están presentes en concentraciones suficientemente altas por encima de sus niveles normales del ambiente para producir un efecto mensurable en el hombre, animales, vegetación, o materiales. Por “sustancias” nos referimos a los elementos químicos naturales o hechos por el hombre o a los compuestos que pueden estar en el aire. <sup>1</sup>

El origen de la contaminación del aire es una fuente de emisión. Las principales fuentes de emisión son: transporte, la generación de energía eléctrica, incineración de basuras, la quema de combustible industrial y doméstico, y los procesos industriales.

La contaminación por partículas es causada por diferentes fuentes de origen natural o antropogénico como por ejemplo, polvo (proviene de la erosión de los suelos o de la actividad volcánica), polen, residuos de combustión incompleta, procesos industriales, tala de árboles, incineradores de residuos tanto sólidos como hospitalarios y la combustión vehicular. <sup>2</sup>

Los vehículos automotores, propulsados por motores de combustión interna, son una fuente-antropogénica-móvil (constituida por los vehículos automotores que incluyen automóviles, camiones, autobuses, etc., diseñados para circular en la vía pública), producen en general emisiones de gases contaminantes por el tubo de escape que son producto de la quema del combustible, gasolina, diésel, gas LP, gas natural o biocombustibles, si la combustión en un motor fuera perfecta, el oxígeno (O<sub>2</sub>) en el aire convertiría todo el hidrógeno (H) del combustible en agua (H<sub>2</sub>O) y todo el carbono (C) en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En la realidad, el proceso de combustión no es perfecto y, en consecuencia, los motores de los vehículos emiten varios tipos de contaminantes, tales como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas suspendidas (material particulado,

---

<sup>1</sup>(Seinfeld, 1986).

<sup>2</sup>(Molina M., et al, 2004).

PM). Además de ciertos contaminantes presentes en los combustibles como los óxidos de azufre (SOx) y, hasta hace algunos años, desde el año de 1996, año en que se dejó de comercializar la gasolina nova en México, el plomo (Pb), se liberaba al ambiente a través del proceso de combustión. (INE, SEMARNAT, WGA, 2007)

Se ha encontrado por tanto que al liberarse estos contaminantes de la combustión al ambiente una parte de ellos es atrapado en el interior de los vehículos, lo que con lleva a que las personas (pasajeros y conductor) estén expuestas a estos contaminantes durante el tiempo que dura su trayecto a bordo del vehículo; mientras que la otra parte se libera al ambiente. El parque vehicular en las ciudades de todo el mundo ha crecido a un ritmo acelerado en los últimos años. El aumento de la flota vehicular obedece a varios factores como: el aumento de la población, la tendencia a nivel mundial en el uso preferencial del automóvil particular sobre el transporte público y las facilidades por parte de las agencias para adquirir un vehículo. (INE, SEMARNAT, WGA, 2007).

Los esfuerzos para formular una estrategia coherente y la obtención de apoyo público para el control de la contaminación del aire se han visto obstaculizados en gran medida por la falta de capacidad de asociar los efectos en la salud con las dosis de contaminantes en el aire. (INEM, 1999).

El material particulado fracción respirable está dividido en dos grupos principales de acuerdo a su tamaño PM10 y PM2.5.<sup>3</sup>

Las partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  (PM10) son partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera, en su mayoría de pH básico, producto de la combustión no controlada. El segundo tamaño PM2.5, agrupa a partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, y corresponde a la fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100% y tienen mayor efecto en la salud, ya que pueden ingresar al sistema respiratorio depositándose en los alveolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo produciendo efectos negativos en la misma, tales como aumento en las enfermedades respiratorias

---

<sup>3</sup>(Samara, C. y Voutsas, D. 2005).

y cardiacas, asma, bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar, y disminución del funcionamiento pulmonar. <sup>4</sup>

La morfología y química del PM nos proporciona información sobre su origen, formación, transporte, reactividad, transformación al reaccionar e impacto en el ambiente de las partículas. <sup>5</sup>

Estudios han revelado que partículas de diferentes fuentes de contaminación tienen diferente composición elemental, diferente morfología. <sup>6</sup>

---

<sup>4</sup>(Samet JM y col., 2000).

<sup>5</sup>(Maldern et al., 2001).

<sup>6</sup>(Cohen et al., 1996).

## 1.2 Antecedentes.

Anteriormente Yifang & Hinds(2002) realizaron un estudio de distribución de tamaño de partículas ultrafinas en una carretera principal en Los Angeles. En este estudio demostraron que la concentración del número de partículas ultrafinas (6-220 nm) disminuye exponencialmente con la distancia a favor del viento de la autopista, además de que la concentración total del número de partículas se relaciona directamente a la densidad del tráfico y disminuye de manera significativa durante la disminución de éste. En un área urbana, las emisiones de vehículos de motor por lo general constituyen la fuente más importante de partículas ultrafinas. Debido a que la mayoría de las partículas de gases de los vehículos están en el rango de tamaño de 20 a 130 nm para los motores diésel y de 20 a 60 nm para los motores de gasolina. Además sus estudios de laboratorio encontraron que la nueva tecnología de los motores y la reformulación de combustible han disminuido las concentraciones de masa de las partículas emitidas por los vehículos, pero las concentraciones de número de partículas ultrafinas se han mantenido sin cambios o incluso han incrementado.<sup>7</sup>

Por otra parte en Hong Kong, L.Y. Chan\* & colaboradores(2002) estudiaron la exposición del viajero a material particulado en el interior de diferentes tipos de transporte público. Los resultados implicaron implícitamente que el aire ambiente, así como la calidad del aire en el vehículo es enormemente deteriorado por el escape del vehículo. Las emisiones del escape de los vehículos, especialmente de diésel son la principal fuente de las partículas finas a nivel de calle en Hong Kong y otras ciudades metropolitanas. El nivel de exposición de partículas en vehículos es afectado en gran medida por la elección del microambiente y el modo de ventilación adoptado. La adopción de un sistema de aire acondicionado se encontró que era un factor importante que influye en el nivel de material particulado del vehículo. Por lo tanto, las opciones alternativas del trayecto estudiado, son los vehículos con aire acondicionado como un sustituto para vehículos sin aire acondicionado. Las relaciones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en todos los modos de desplazamientos medidos fueron altas, varió de 63% a

---

<sup>7</sup>(Yifang & Hinds, 2002).

78% y los resultados implícitamente indicaron que las emisiones de escape de los vehículos de motor fueron la causa del alto nivel de exposición a partículas en el interior de los vehículos.<sup>8</sup>

Xiangly & Luke(2005) realizaron una evaluación de la exposición en los países en desarrollo. Ya que la contaminación de partículas en el aire es más grave en el mundo en desarrollo que en los países desarrollados, especialmente en los países en desarrollo actualmente en virtud de la rápida industrialización y los cambios en el uso del suelo.<sup>9</sup>

Wöhrnschimmel Henry, Zuk Miriam, y colaboradores (2005) realizaron otro estudio en la Ciudad de México, que consistió en medir en el interior de los vehículos de transporte público, autobús (“Camión”), minibús (“Camión”) y metro-bus las concentraciones de CO, benceno, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, antes y después de implantar en la ciudad la red de transporte público, metro-bus, BRT por sus siglas en inglés (Bus Rapid Transit); y que demostró que se abaten los tiempos de traslado, así como se mejora realmente la calidad del aire que respira la gente mientras viaja en el interior del metro-bus. En el año 2005 se puso en funcionamiento el BRT (metro-bus) el cual opera a lo largo de 20 km sobre la avenida Insurgentes, con 98 autobuses articulados de alta capacidad (160 pasajeros) con motor diésel moderno y que viaja en carriles separados. Este estudio consistió básicamente de dos periodos de medición del primero de mayo a agosto del 2004 el cual se efectuó en el interior de minibuses y autobuses a lo largo de la misma avenida; mientras que el segundo periodo de medición se efectuó de agosto a octubre del 2005 ya con el BRT en funcionamiento y los minibuses y autobuses fuera de servicio. Los dos periodos de medición se efectuaron solo por las mañanas de 7:30 a 9:00 horas. En el cual se comprobó que después de este cambio en el sistema de transporte público fueron considerables y significativos las reducciones para CO, benceno y PM<sub>2.5</sub>, que son contaminantes asociados principalmente con las emisiones vehiculares. Para estos contaminantes, las reducciones después de la implementación del BRT representaron en promedio el 45%, 69% y 30% menos en relación a los minibuses respectivamente y un promedio de 25%, 54% y 20% menos

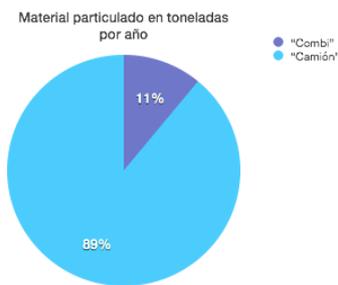
---

<sup>8</sup>(L.Y. Chan\*, 2002).

<sup>9</sup>(Xianglu Han, Luke P. Naeher, 2005).

respectivamente, en relación a los autobuses. A partir de estos resultados se concluyó que las exposiciones a los pasajeros a los contaminantes del aire durante los desplazamientos se podrían reducir de manera efectiva por los sistemas BRT, este resultado puede ser debido a la optimización de la ventilación de los metro-buses, la altura de su entrada, y la distancia a la que rodea las fuentes vehiculares, ya que el metro-bus circula por una carril especial, al cual solo tiene acceso el propio metro-bus.

Mientras tanto en la zona metropolitana de Morelia se realizó un estudio de emisiones por Castillo & Blanc(2008) en el que se obtuvieron datos de las emisiones de material particulado en toneladas por año. Para el transporte colectivo combi se registraron 1.23 toneladas por año y para autobuses de 9.97 toneladas por año.



**Figura 1. Gráfica de material particulado en toneladas por año del transporte "Combi" y "Camión".**

### **1.3 Objetivo General.**

Evaluar la distribución de tamaño de partículas respirables en el transporte público, en la Avenida Periférico Independencia de la ciudad de Morelia, Michoacán y asociarla con la morfología de algunas muestras de partículas.

#### **1.3.1 Objetivos particulares.**

- Determinar y comparar la distribución de partículas menores a  $PM_{10}$  mediante el análisis de conteo en la ruta circuito en la Avenida Periférico Independencias de la ciudad de Morelia, Michoacán en el interior de los vehículos automotores de ruta: “Camión” y “Combi”.
- Determinar los tiempos de recorrido por muestreo en el cual hay mayor exposición de partículas haciendo una comparación en los vehículos automotores de ruta: “Camión” y “Combi”.
- Evaluar mediante el análisis estadístico de partículas aquellas que de acuerdo a su diámetro aerodinámico son más dañinas a la salud.
- Relacionar la morfología y composición de las partículas con su posible origen.

### **1.4 Justificación.**

Los requerimientos de la calidad del aire en la ciudad de Morelia se deben a la preocupación que existe por el impacto que tienen los contaminantes atmosféricos en la salud de la población, generados por el parque vehicular. En los últimos años la cantidad de vehículos automotores destinados para el transporte público han aumentado considerablemente, lo cual ha propiciado a mayores emisiones de los contaminantes en este caso específico del material particulado.

Aunque se han realizado algunos estudios referentes a la calidad del aire en Morelia no existe ningún estudio elaborado en el interior del transporte público para determinar la distribución de tamaño de partículas suspendidas menores a  $PM_{10}$ .

Tener información sobre la distribución de material particulado que afecta a la población usuaria del transporte público es fundamental para que los organismos federales, estatales y municipales actúen para crear medidas y programas que mejoren la calidad del aire. Realizar un estudio de emisiones en el transporte público, de cada una de las rutas por donde transitan, sería un factor importante para desarrollar las bases de un proyecto donde se pueda proponer un transporte urbano sustentable.

### **1.5 Hipótesis.**

La distribución del tamaño de partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros, en el interior del transporte público, varía con respecto a la modalidad del transporte, tipo de combustible y zona donde se realiza la medición, además presenta altos niveles de número de partículas menores a 2.5 micrómetros, a los cuales se ve expuesta la población usuaria de este transporte.

## 2 MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Partículas.

Material particulado se refiere a cualquier sustancia, excepto agua pura, que existe como líquido o sólido en la atmósfera bajo condiciones normales atmosféricas y es de tamaño microscópico o submicroscópico pero más grande que las moléculas individuales (2 Å). Entre todos los constituyentes atmosféricos, el material particulado es único en su complejidad. Una descripción completa de las partículas atmosféricas requiere especificación no sólo de su concentración sino también su tamaño, composición química, fase (líquido o sólido) y morfología.<sup>10</sup>

#### 2.1.1 Clasificación de partículas.

**Tabla 1. Definición de los términos que describen las partículas suspendidas en el aire.**

<b>Partículas</b>	Cualquier material, excepto agua no combinada, que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales.
<b>Aerosol</b>	Una dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas, en medios gaseosos.
<b>Polvo</b>	Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal, capaces de estar en suspensión temporal en el aire.
<b>Ceniza fina</b>	Partículas de ceniza finamente divididas arrastradas por el gas de combustión. Las partículas pueden contener combustible no quemado.
<b>Niebla</b>	Aerosol visible.
<b>Vapores</b>	Partículas formadas por condensación, sublimación, o reacción química, predominantemente mayores de 1 µm (humo o tabaco).
<b>Neblina</b>	Dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.

<sup>10</sup>(García, 2013).

<b>Humo</b>	Partículas pequeñas arrastradas por los gases, que resultan de la combustión.
<b>Hollín</b>	Una aglomeración de partículas de carbón.

La materia particulada producida por fuentes incluye la sal de océanos, cenizas volcánicas, producto de la erosión por el viento, polvo de las carreteras, desechos de incendios forestales, el polen y las semillas de plantas. Se emplean diversos criterios para clasificar las partículas arrastradas por el viento, (véase, Tabla 2).

Debido a que existen partículas de diferente tamaño y forma, se han clasificado en términos de diámetro aerodinámico. De acuerdo a su diámetro, se agrupan en “finas” y “gruesas”. Las partículas “finas” son las de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5  $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ . Mientras que las partículas “gruesas” están constituidas por aquellas cuyo diámetro aerodinámico se centra alrededor de 10  $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{10}$ .<sup>11</sup>

**Tabla 2. Clasificación por Tamaño de Partícula. (Kiely, 1999)**

Descripción del grupo	Composición	Tamaño de Partícula	
		OMS	USEPA (PM-10)
Gruesas	Polvo, tierra, depósitos	>2.5 $\mu\text{m}$	$\geq 10 \mu\text{m}$
Finas	Aerosoles, partículas de combustión, vapores	<2.5 $\mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$

También se pueden clasificar de acuerdo a la fuente de emisión en: partículas primarias y partículas secundarias. EL término partículas primarias se refiere a cualquier material emitido directamente por una fuente de emisión y que, a temperatura y presión ambientales, se encuentre en estado sólido o líquido suspendido en la atmósfera; en tanto, las partículas secundarias corresponden a los

<sup>11</sup>(Sbarato & al.).

aerosoles formados a partir de materiales gaseosos (por ejemplo, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y COV), como resultado de reacciones químicas atmosféricas.<sup>12</sup>

### **2.1.2 Morfología de Partículas.**

La morfología es un rasgo microfísico importante que se refiere al comportamiento aerodinámico de partículas, posibles efectos sobre la salud, la fase, el mecanismo de formación, y la identificación de la fuente.<sup>13</sup>

### **2.1.3 Fuentes del material particulado.**

Existen diferentes criterios para clasificar las fuentes de emisión del material particulado. Los dos criterios más comúnmente utilizados son:

- Según tipo de fuente generadora, se clasifican en fuentes naturales y fuentes antropogénicas.
- Según naturaleza de las partículas emitidas, se clasifican como fuentes primarias y fuentes secundarias.

#### **2.1.3.1 Según tipo de fuente generadora.**

##### **a) Fuentes Naturales.**

Algunas partículas provienen de fuentes naturales tales como el rocío del agua de mar, partículas de polen, polvo, y partículas provenientes de erupciones volcánicas y procesos geotérmicos, así como materiales arrastrados por los vientos derivados de la erosión del suelo. Generalmente, las partículas provenientes de fuentes naturales

---

<sup>12</sup>(Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999).

<sup>13</sup>(Moffet, Desyaterik, Hopkins, Tivanski, & Gilles, 2008).

tienden a ser gruesas, con cortos periodos de permanencia en el aire y altas velocidades de sedimentación.<sup>14</sup>

#### **b) Fuentes antropogénicas.**

Las fuentes antrópicas de contaminación atmosférica por partículas son muy variadas: incluyen procesos industriales de extracción y transformación; procesos de generación de calor a nivel industrial y doméstico; quema de combustibles fósiles, quema de residuos a campo abierto; actividades de transporte, almacenamiento y traslado de materiales; y vehículos, entre otros. Muchas de las partículas emitidas por fuentes antropogénicas tienen diámetro menor a 2.5 micrómetros e incluyen una gran variedad de elementos tóxicos, en comparación con las partículas emitidas por fuentes naturales.

#### **2.1.3.2 Según naturaleza de las partículas emitidas.**

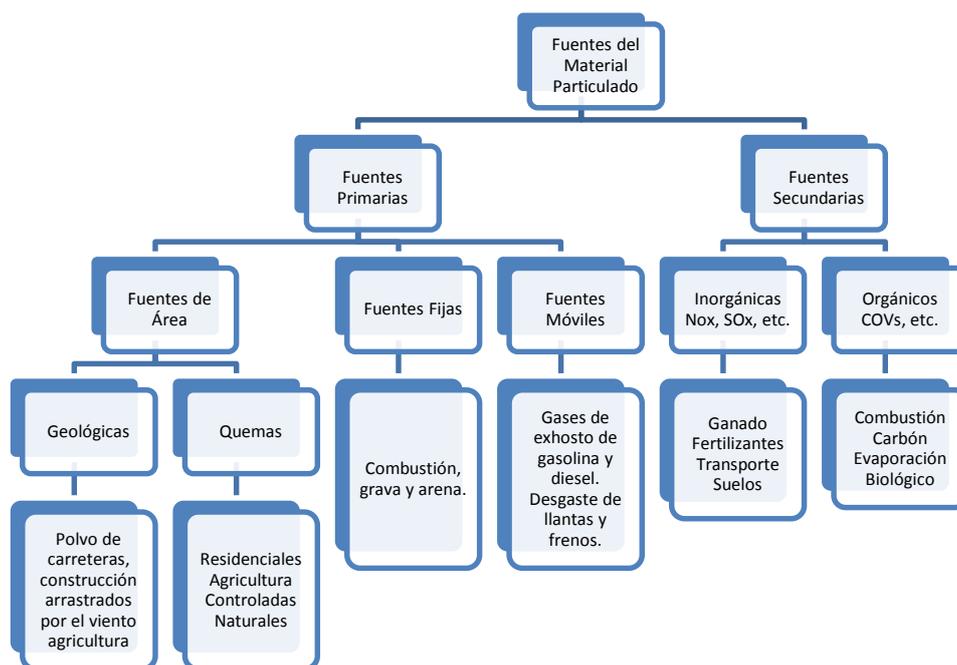
Según las características de las partículas las fuentes de emisión de PM pueden ser clasificadas en dos categorías, que son:

- Fuentes Primarias: Fuentes que emiten material particulado directamente a la atmósfera.
- Fuentes Secundarias: Fuentes que emiten sustancias que forman el material particulado a partir de precursores en la fase gaseosa como consecuencia de procesos físicos y químicos a nivel atmosférico.

Las fuentes primarias se pueden dividir en: fuentes de área, fuentes fijas y fuentes móviles; las fuentes secundarias se pueden dividir en inorgánicas y orgánicas, dependiendo del tipo de proceso químico que transforma el precursor químico a material particulado.

---

<sup>14</sup>(Lozada, 2006).



**Figura 2. Clasificación de las fuentes de material particulado de origen antrópico.**

**a) Fuentes primarias de material particulado.**

Fuentes de área: Las fuentes de área refieren al conjunto de fuentes distribuidas espacialmente que conforman un escenario de interés desde el punto de vista de la contaminación atmosférica. Ejemplos de estas fuentes son las geológicas y las quemadas.

- **Geológicas:** Las fuentes geológicas se refieren al material particulado proveniente de los caminos y carreteras, de los procesos de construcción, de las actividades de la agricultura, y del polvo arrastrado por el viento. Sin embargo algunos procesos industriales u otro tipo de procesos generan grandes cantidades de polvo, tales como la manufactura de cemento, procesos de minería, molienda de piedra, etc., los cuales emiten partículas de tamaño superior a 1  $\mu\text{m}$  y en su mayor parte superiores a 2.5  $\mu\text{m}$ . En áreas urbanas, el principal emisor de PM geológico son los polvos de caminos y carreteras.
- **Quemas:** Las quemadas a campo abierto, los incendios forestales, las quemadas controladas, y las quemadas en agricultura, pueden emitir cantidades importantes de material particulado.

Fuentes fijas o estacionarias: Estas fuentes como su nombre lo indica carecen de movilidad e incluyen, por ejemplo, los procesos de combustión ampliamente utilizados a nivel industrial por medio de los cuales se queman combustibles principalmente sólidos como el carbón, líquidos (derivados del petróleo) y el gas natural.

Fuentes móviles: Las emisiones relacionadas con las fuentes móviles pueden llegar a ser en las áreas urbanas la contribución más importante a la concentración de partículas suspendidas. En general las fuentes móviles de emisión de material particulado son los vehículos utilizados en el transporte terrestre, tanto público como particular. El PM a partir de las fuentes móviles incluye las emisiones directas de los motores de automóviles, camiones, autobuses, etc., que utilizan básicamente como combustibles diésel y gasolina.

#### **b) Fuentes secundarias de material particulado.**

Las fuentes secundarias de material particulado son aquellas que no emiten partículas directamente a la atmósfera sino que las sustancias liberadas al llegar a la atmósfera se forman o se modifican por procesos de condensación, crecimiento, nucleación y reacciones químicas dando lugar a las denominadas partículas secundarias.<sup>15</sup>

#### **2.1.4 Efectos de las partículas en el aire sobre la salud humana.**

Uno de los episodios clásicos de contaminación relacionados con la presencia del material particulado en áreas urbanas se registró en Londres en 1952, cuando una densa niebla invadió la ciudad por cuatro días generando un repentino aumento de la mortalidad, que se calculó entre 3,500 y 4,000 defunciones, siendo la bronquitis el mayor contribuyente al aumento de la mortalidad, las principales víctimas fueron ancianos y personas con problemas respiratorios o cardiovasculares.

---

<sup>15</sup>(Lozada, 2006).

Las partículas, solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro muy grave para la salud. Los contaminantes entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias. Los daños a los órganos respiratorios pueden presentarse directamente, ya que se ha estimado que más del 50 por ciento de las partículas ultrafinas que penetran en las cavidades pulmonares se depositaran allí.

Las partículas pueden tener un efecto tóxico de una o más de las tres siguientes:

1. La partícula puede ser intrínsecamente tóxica debido a sus características inherentes químicas y/o físicas.
2. La partícula puede inferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. La partícula puede actuar como un conductor a una sustancia tóxica absorbida.

La longitud del tiempo de exposición es importante. Se ha observado en algunos casos que la exposición a las partículas en combinación con otros contaminantes, como el SO<sub>2</sub>, produce un mayor deterioro de la salud que la exposición separada a cada contaminante.<sup>16</sup>

Los efectos principales en la salud que son causa de preocupación incluyen los efectos en la respiración y el sistema respiratorio, el agravamiento de afecciones respiratorias y cardiovasculares ya existentes, la alteración de los sistemas de defensa del organismo contra materiales extraños, daños al tejido pulmonar, carcinogénesis y mortalidad prematura. Las personas con afecciones pulmonares o cardiovasculares crónicas obstructivas, influenza o asma, los ancianos y los niños son los más sensibles. (U.S. EPA Report 450-R-92-001, 1992).

### **2.1.5 Distribución de tamaños de partículas.**

La distribución de tamaños es una propiedad relevante de las partículas porque condiciona directamente su ciclo de vida. Las partículas ambientales tienen

---

<sup>16</sup>(Kenneth Wark, 2008)

típicamente una distribución modal, lo que significa que el total de las partículas tienden a agruparse en torno a varios diámetros. Este carácter modal es una combinación de procesos continuos que conducen a la formación y crecimiento de las partículas de la atmósfera. Las partículas de menor tamaño suelen ser material particulado secundario, mientras que las partículas más grandes suelen ser de origen primario.<sup>17</sup>

Por otra parte el tamaño de la partícula determina si ésta puede ser inhalada y cuál parte del sistema respiratorio se deposita. Las partículas pueden ser inhaladas cuando son menores de 10  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la distribución del tamaño de partículas en el aire ambiente nos permite una mayor especificación de la descripción de las partículas atmosféricas, ya que desde el punto de vista de la salud, no se trata de bajar la carga de polvo atmosférico total, en un área urbana, sino de disminuir el fuerte conteo de partículas de los tamaños pequeños.

La distribución de tamaños de partículas esféricas o equivalentes en general no se puede expresar por medio de un solo parámetro o función, como, por ejemplo, el diámetro de partícula promedio. Los métodos varían desde la observación del material, en el caso de las partículas burdas, hasta el conteo de partículas cuando éstas son de tamaño microscópico. En cualquier caso se clasifican en intervalos de tamaños arbitrarios. Se emplean también expresiones matemáticas para describir la distribución de tamaños de partícula.<sup>18</sup>

## **2.2 Microscopio electrónico de barrido (SEM).**

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran

---

<sup>17</sup>(García, 2013).

<sup>18</sup>(Henry & Heinke, 1999).

profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

### **Funcionamiento.**

En el microscopio electrónico de barrido es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en la columna del microscopio, donde se aceleran mediante una diferencia de potencial de 1000 a 30000 voltios. Los electrones acelerados por un voltaje pequeño se utilizan para muestras muy sensibles, como podrían ser las muestras biológicas sin preparación adicional o muestras muy aislantes. Los voltajes elevados se utilizan para muestras metálicas, ya que éstas en general no sufren daños como las biológicas y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para tener una mejor resolución. Los electrones acelerados salen del cañón, y se enfocan mediante las lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así tener una mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz de electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones del mismo haz, y los átomos de la muestra; puede haber, por ejemplo, electrones que reboten como las bolas de billar. Por otra parte, la energía que pierden.

## Microscopio electrónico de barrido (MEB)

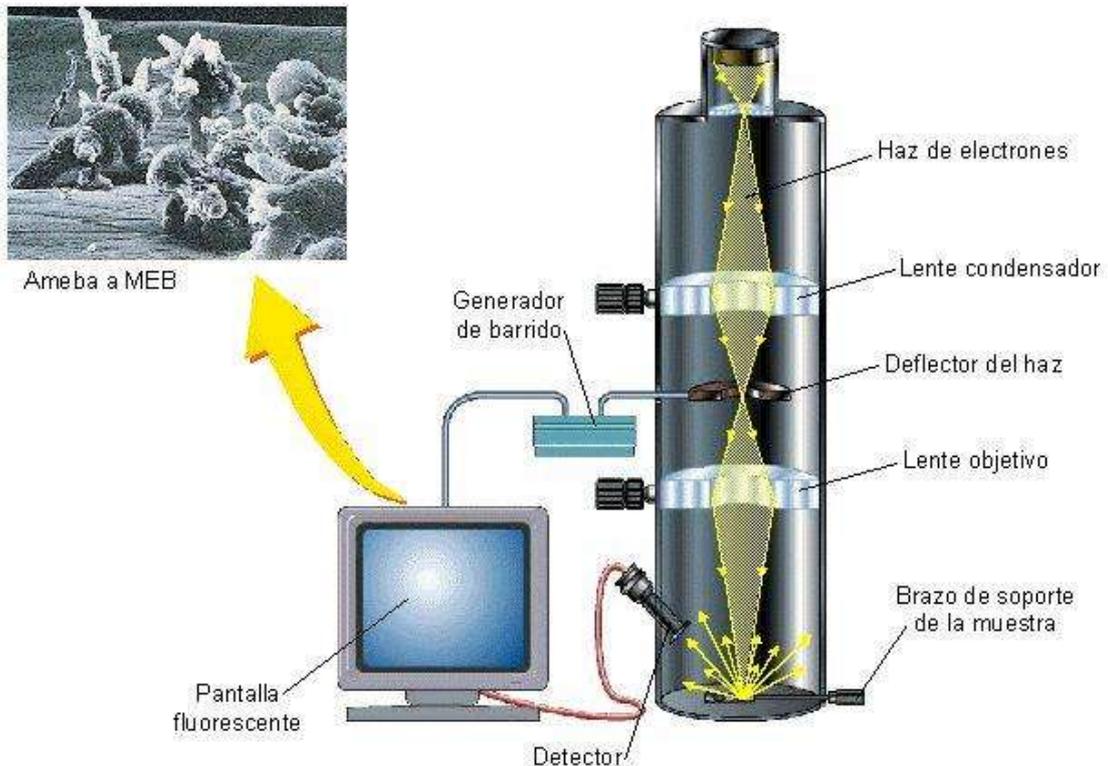
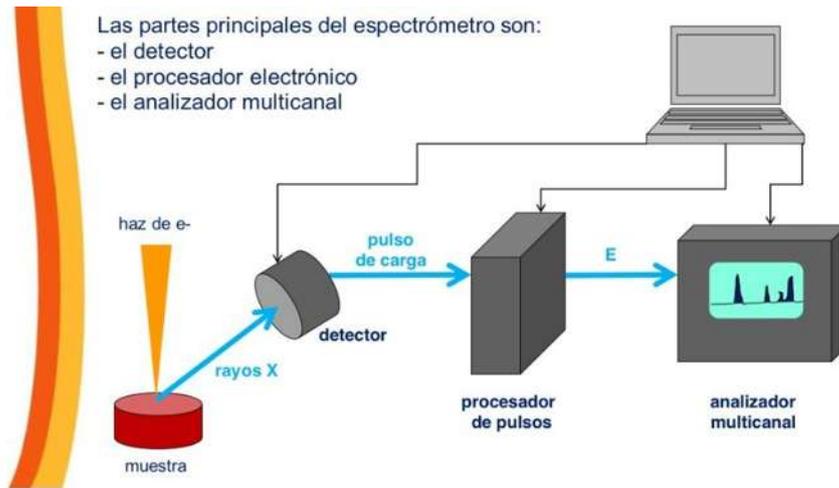


Figura 3. Microscopio electrónico de barrido.

### EDS: Espectroscopia de Energía Dispersiva.

El análisis EDS es un procedimiento estándar para identificar y cuantificar la composición elemental de áreas de muestra hasta con tamaño tan pequeño como de algunos micrómetros cúbicos. El material de muestra es bombardeado con electrones de un SEM y los rayos X producidos son medidos con un espectroscopio de rayos X. Cada elemento tiene una longitud de onda característica y puede ser identificado por ésta.



**Figura 4. Partes principales del espectrómetro.**



**Figura 5. Espectroscopio de rayos x.**

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS.



**Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología del conteo de partículas.**

La ciudad de Morelia cuenta con dos tipos de vehículos de transporte público, los vehículos de transporte público “Combi” y los vehículos de transporte público “Camión”, denominados así, debido a sus características particulares de peso, capacidad para transportar gente y tipo de combustible que utilizan, entre otros. Debido a la falta de homogenización en cuanto a modelos y marcas en los vehículos de

transporte público. Nombraremos transporte público “Combi” a aquellos vehículos con capacidad para transportar aproximadamente hasta 20 personas, usuarios y chofer, y transporte público “Camión” a aquellos vehículos con una capacidad para transportar aproximadamente hasta 40 personas, usuarios y chofer.

Para la realización de este estudio de conteo de partículas en el transporte público colectivo, fue necesario seleccionar una ruta por la cual circularan los dos tipos de transportes públicos colectivos de la ciudad, “Combi” y “Camión”(véase, Figura 9).

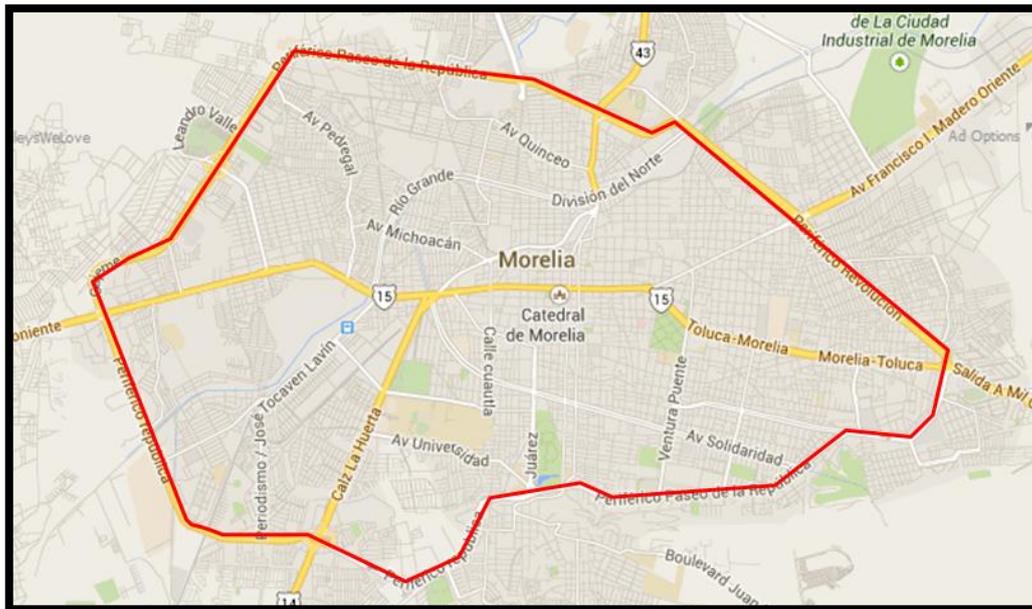
El libramiento cuenta con dos anillos por los que circulan los vehículos, una parte hace su recorrido de trayecto por el anillo interno del libramiento y la otra parte, por el anillo exterior, es decir, una parte lo hace de norte a sur y otro de sur a norte; en su carril interno mide aproximadamente 26.3 km y 26.7 km en su carril externo, y está conformado por el Periférico Paseo de la Republica y el Periférico Paseo Revolución.



**Figura 7. Transporte público colectivo “combi”.**



**Figura 8. Transporte público colectivo “camión”.**



**Figura 9. Ruta Periférico de la ciudad de Morelia.**

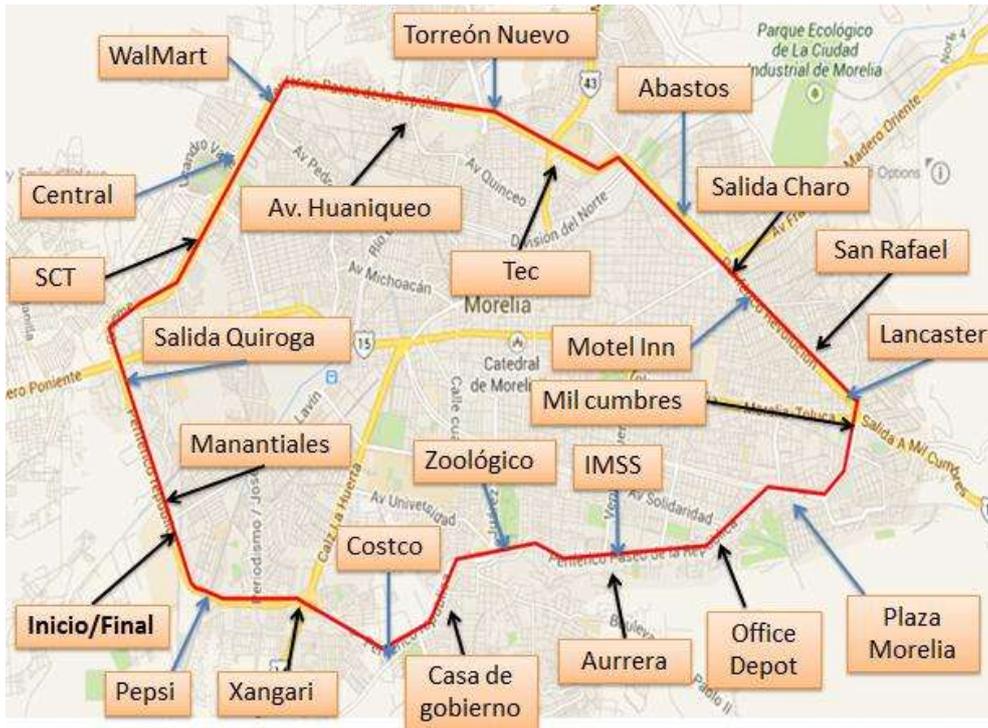
Posteriormente se eligieron los horarios de medición basados en el principio de horas pico y no pico, las cuales fueron las siguientes: horas pico: 7:00 am, 2:00 p.m. y 7:00 p.m.; y horas no pico: 10:00 a.m. y 4:00 p.m.

Los días seleccionados para realizar las mediciones fueron de lunes a sábado, ya que se considera el domingo, un día irregular para la mayoría de la gente, debido a que ese día el tráfico disminuye por factores como: la falta de actividades escolares y laborales.

Por último, se seleccionaron las zonas de medición, tomando en cuenta en cuales lugares bajaban o subían los pasajeros con mayor frecuencia. Se seleccionaron 26 zonas, mostradas a continuación:

**Tabla 3. Paradas o zonas de medición.**

<b>No. de Parada</b>	<b>Nombre de la parada</b>
1	Salida (parada enfrente del INFONAVIT, Periférico Paseo de la Republica esquina con Av. Siervo de la Nación).
2	Embotelladora refresquera "Pepsi".
3	Colonia "Xangari".
4	Tienda de autoservicio "Costco".
5	Casa de gobierno.
6	Zoológico "Benito Juárez".
7	Tienda de autoservicio "Bodega Aurrera".
8	IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social).
9	Tienda de autoservicio "Office Depot".
10	Centro comercial "Las Américas".
11	Centro comercial "Plaza Morelia".
12	Salida Mil Cumbres.
13	Instituto "Lancaster".
14	Colonia "San Rafael".
15	Motel Inn.
16	Salida a Charo.
17	Mercado de Abastos.
18	Instituto Tecnológico de Morelia.
19	Colonia "Torreón Nuevo".
20	Avenida Huaniqueo.
21	Tienda de autoservicio "Wal-Mart".
22	Central de autobuses de Morelia.
23	SCT (Secretaria de Comunicaciones y Transportes).
24	Salida a Quiroga.
25	Colonia "Manantiales".
26	Llegada (parada enfrente del INFONAVIT, Periférico Paseo de la Republica esquina con Av. Siervo de la Nación).



**Figura 10. Mapa con la ubicación de las zonas de medición (paradas) en el circuito periférico (libramiento) de Morelia.**

En la Tabla 4, se muestran las fotografías de las diferentes paradas que se muestrearon, en orden como se enlistaron en la Tabla 3 y como se muestran en la Figura 10.

**Tabla 4. Fotografías de las paradas o zonas donde se efectuaron las mediciones dentro del vehículo de transporte público “Combi” y “Camión”.**



**1. “Salida”**

**2. “Pepsi”**



3. Colonia "Xangari"



4. Tienda. "Costco"



5. "Casa de gobierno"



6. "Zoológico"



7. "Bodega Aurrera"



8. "IMSS"



9. "Office Depot"



10. "Plaza las Américas"



11. "Plaza Morelia"



12. "Mil Cumbres"



13. "Lancaster"



14. "San Rafael"



15. "Motel Inn"



16. "Salida Charo"



17. "Mercado de Abastos"



18. "Tecnológico de Morelia"



19. "Torreón Nuevo"



20. "Av. Huaniqueo"



21. "Wal-Mart"



22. "Central de Autobuses"



23. "SCT"



24. "Salida Quiroga"



25. Colonia "Manantiales"



26. "Final"

### 3.1 Campaña de campo.

La medición se efectuó en el periodo (otoño-invierno), comprendido del 2 de diciembre al 14 de diciembre del 2013 por el anillo exterior del libramiento, es decir, de sur a norte de la ciudad de Morelia. Cada muestra consta de una vuelta al circuito periférico, con lecturas en 26 zonas o paradas diferentes establecidas de acuerdo al tráfico que se presentan durante todo el recorrido del circuito periférico.

Cinco muestras se recolectaron por día en diferentes horarios establecidos de horas pico y no pico, 07:00, 10:00, 14:00, 16:00 y 19:00 horas. Además se registró el tiempo comprendido desde el inicio hasta el final del recorrido del trayecto.

El punto de partida fue en el paraje situado frente a las oficinas de INFONAVIT, ubicado en Periférico Paseo de la Republica esquina con avenida Siervo de la Nación; haciendo un recorrido a través del periférico de la Ciudad de Morelia y terminando en ese mismo punto.

Durante la toma de muestras, la ventanilla del conductor estuvo semi-abierta, es decir, hasta la mitad. Sin aire acondicionado o calefacción. Cabe señalar que, las ventanillas intermedias estuvieron cerradas, vehículos libre de humo de tabaco. Otro aspecto a

señalar es la posición de donde se tomó la muestra dentro del vehículo, siempre en la misma posición, a una altura intermedia del vehículo de transporte público.

Es importante mencionar que durante el periodo de muestreo el ayuntamiento de Morelia daba mantenimiento en los carriles centrales a poco menos de 3 kilómetros del libramiento, en sus carriles centrales, que comprenden desde de la avenida Ventura Puente (parada del centro de autoservicio “Bodega Aurrera”), hasta el boulevard Rafael García de León (parada del centro comercial “Plaza las Américas”).

Durante la toma de muestreo se consideró la posibilidad de presenciar fenómenos ajenos a nosotros como precipitación pluvial, emisiones inusuales por parte de otros vehículos que circulaban al mismo tiempo del transporte público y acumulación de tráfico a causa de factores externos como marchas, plantones, accidentes y circulación del ferrocarril. Cabe señalar que ninguno de estos fenómenos se presentó durante el periodo de muestreo.

Es causa de mención que durante el periodo de muestreo efectuado en el tipo de transporte público “Camión” Ruta Roja 1, se presentó un día festivo religioso, marcado en el calendario como no oficial, el día 12 de diciembre, día de la Virgen de Guadalupe y que es un día de tradición en el cual se suspenden algunas actividades escolares y laborales para la comunidad moreliana.

Las fechas en la que se realizó la evaluación de la concentración ambiental fue el 2 de diciembre del 2013 al 14 de diciembre del 2013, es decir, en época estacional otoño-invierno, ya que en esta fecha la variación de la temperatura por el día es susceptible por el cuerpo humano, es decir, se puede apreciar que las mañanas y las noches son más frías que en el resto del día; además de que para este tiempo las lluvias cesaron.

Las fechas, los horarios en que se muestrearon y el tipo de transporte público que se usó, se resume en la Tabla 5.

**Tabla 5. Fechas y horarios de medición en el transporte público “Combi” y “Camión”.**

<b>Fecha</b>	<b>Horario</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Horario</b>	<b>Tipo</b>
<b>02/12/2013</b>	07:00	Combi	<b>09/12/2013</b>	07:00	Camión
	10:00	Combi		10:00	Camión
	14:00	Combi		14:00	Camión
	16:00	Combi		16:00	Camión
	19:00	Combi		19:00	Camión
<b>03/12/2013</b>	07:00	Combi	<b>10/12/2013</b>	07:00	Camión
	10:00	Combi		10:00	Camión
	14:00	Combi		14:00	Camión
	16:00	Combi		16:00	Camión
	19:00	Combi		19:00	Camión
<b>04/12/2013</b>	07:00	Combi	<b>11/12/2013</b>	07:00	Camión
	10:00	Combi		10:00	Camión
	14:00	Combi		14:00	Camión
	16:00	Combi		16:00	Camión
	19:00	Combi		19:00	Camión
<b>05/12/2013</b>	07:00	Combi	<b>12/12/2013</b>	07:00	Camión
	10:00	Combi		10:00	Camión
	14:00	Combi		14:00	Camión
	16:00	Combi		16:00	Camión
	19:00	Combi		19:00	Camión
<b>06/12/2013</b>	07:00	Combi	<b>13/12/2013</b>	07:00	Camión
	10:00	Combi		10:00	Camión
	14:00	Combi		14:00	Camión
	16:00	Combi		16:00	Camión
	19:00	Combi		19:00	Camión
<b>07/12/2013</b>	07:00	Combi	<b>14/12/2013</b>	07:00	Camión
	10:00	Combi		10:00	Camión
	14:00	Combi		14:00	Camión
	16:00	Combi		16:00	Camión
	19:00	Combi		19:00	Camión

El formato que se utilizó para recabar los datos (niveles de exposición de CO, temperatura y tiempo de trayecto) durante la campaña, es como se puede apreciar en la Figura 11.

**MEDICIÓN DE PARTÍCULAS CONTAMINANTES EN TRANSPORTE PÚBLICO**

MODELO: Nissan Urban NÚMERO: 81 FECHA: 04/12/2013 HORA DE INICIO: 14:10 HORA FINAL: 15:28

PARADAS	CONTADOR DE PARTÍCULAS								MEDIDOR DE CO Y CO2 (ppm)				HORA	CRONOM.
	T(°C)	% H. R.	0.3 (µm)	0.5 (µm)	1.0 (µm)	2.0 (µm)	3.0 (µm)	10.0 (µm)	T(°C)	% H. R.	CO	CO2		
BASE	26	53	596720	7069	2715	1974	696	84	26	53	3	2097		0
PEPSI	27	51	63295	6802	1510	774	194	16	27	51	3	812		5:00
XANGARI	28	49	80308	1039	2906	1665	309	29	28	49	5	1032		8:27
COSTCO	28	50	83554	12670	2411	1288	242		28	50	3	691		10:46
CASA DE GOBIERNO	29	48	88157	10132	1826	1232	159	18	29	48	9	1125		13:52
ZOOLOGICO	29	49	105894	9133	2427	1805	223	29	29	49	10	924		15:35
AURBERA	31	48	80833	8470	1119	558	140	24	31	48	3	700		17:40
IMSS	30	49	97009	8653	2989	1937	567	86	30	49	3	878		22:00
OFFICE DEPOT	30	52	100151	5923	653	323	67	10	30	52	1	705		28:38
LAS AMERICAS	31	50	107204	7507	1517	940	270	35	31	50	3	750		31:03
PLAZA MORELIA	30	52	104759	119208	4100	2026	721	86	30	52	3	719		34:53
MIL CUMBRES	31	49	105597	7227	1057	573	146	24	31	49	7	698		37:34
LANCASTER	31	50	107253	8349	1047	878	160	23	31	50	6	94		39:00
SAN RAFAEL	31	51	133097	11055	3346	2046	475	67	31	51	7	741		39:53
MOTEL INN	31	51	98103	12182	2239	951	154	16	31	51	4	672		41:20
SALIDA CHARO	31	50	97076	7463	1520	873	196	28	31	50	3	600		43:03
ABASTOS	31	51	121817	8101	1552	733	164	20	31	51	14	705		46:15
TEC.	33	48	87362	14670	2585	1075	180	27	33	48	10	600		50:19
TORREÓN NUEVO	30	54	248052	7249	1089	518	94	7	30	54	3	674		53:42
AV. HUANIQUEO	30	54	137495	16840	5227	1592	240	41	30	54	3	600		55:00
WALMART	30	55	100853	47379	6992	3791	803	126	30	55	8	770		1:00:55
CENTRAL	32	51	89115	17996	10665	6725	1721	164	32	51	5	715		1:03:50
SET	33	48	127023	12770	4060	2457	576	26	33	48	5	774		1:06:22
SALIDA QUIROGA	31	51	92731	7678	1511	814	171	23	31	51	3	552		1:13:00
MÑANITALES	33	49	103102	8427	1825	1055	272	42	33	49	40	608		1:15:00
BASE	33	48	119399	30887	18809	13573	4106	754	33	48	5	629		1:18:09

Elabora: Víctor Daniel Sandoval García  
 Anahí Guadalupe Solís Castro  
 Rubén Ramos García

Reviso: Arturo Rangel Gonze  
 Aprobó: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco

Figura 11. Formato de captura de datos utilizado durante la campaña de monitoreo en el periférico de la ciudad de Morelia.

## Descripción del Equipo.

El equipo que se utilizó para la determinar distribución del tamaño de partículas fue el Contador de partículas Fluke 983; mide y representa en pantalla, simultáneamente, y en seis canales la distribución de tamaño de partículas: 0.3; 0.5; 1.0; 2.0; 5.0; 10.0  $\mu\text{m}$ , además de medir temperatura y porcentaje de humedad relativa.



Figura 12. Contador de partículas Fluke 983.

## 3.2 Tratamiento de datos.

Los datos obtenidos en este muestro fueron tratados con las siguientes ecuaciones, con ayuda del software Excel se realizaron los gráficos de distribución de tamaño de partícula.

Superficie de partícula:

$$S_i = (\pi D_{pi}^2) N_i \text{ec. (1)}$$

Dónde:

$D_{pi}$  = Diámetro de partícula i

$N_i$  = Número de partícula i

Superficie Total:

$$S_T = \sum S_i \text{ec. (2)}$$

Dónde:

$S_i$  = Superficie de partícula i

Volumen de partícula:

$$V_i = \left(\frac{1}{6} \pi D_{pi}^3\right) N_i \text{ec. (3)}$$

Dónde:

$D_{pi}$  = Diámetro de partícula i

$N_i$  = Número de partícula i

Volumen total:

$$V_T = \sum V_i \text{ec. (4)}$$

Dónde:

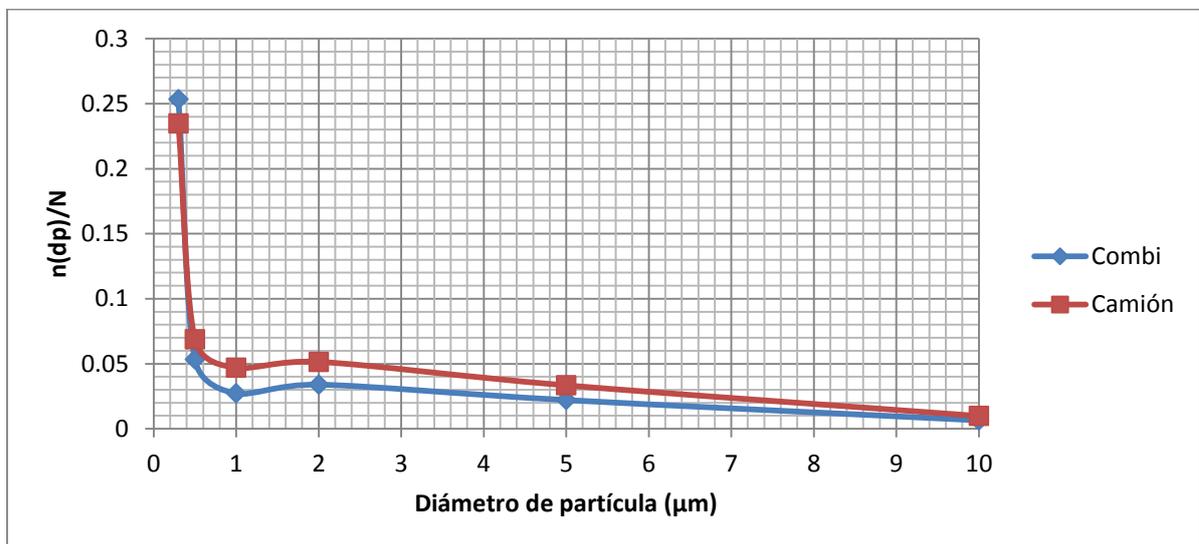
$V_i$  = Volumen de partícula i

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

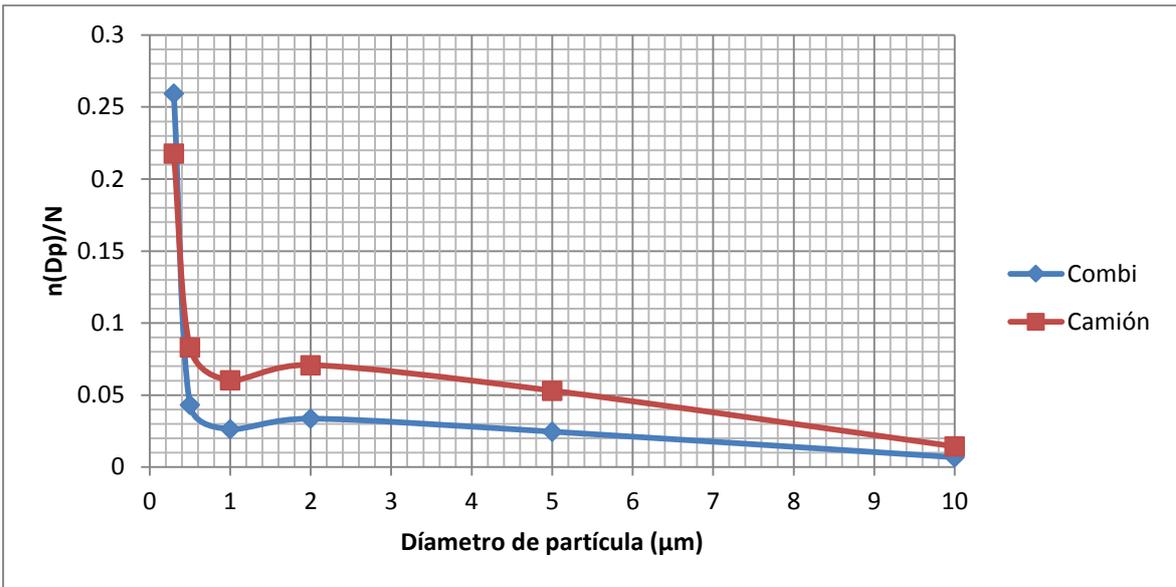
### 4.1 Distribución de tamaño de partícula.

#### 4.1.1 Distribución de tamaños de partícula con respecto al día de medición.

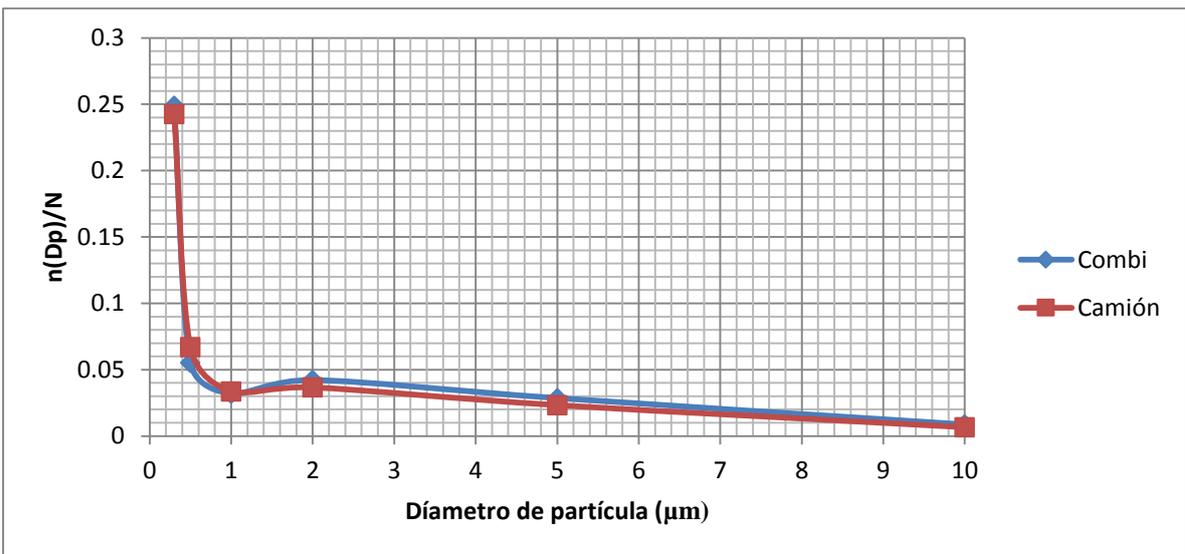
Los siguientes gráficos representan la distribución de tamaño de partícula con respecto al día de medición haciendo una comparación entre los tipos de transporte público monitoreados en este estudio, "Combi" y "Camión". En donde se representa en el eje horizontal el tamaño de partícula, mientras que en el eje vertical se representa la fracción de las partículas por intervalo del tamaño de las partículas.



**Figura 13. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día lunes 12 de diciembre de 2013 para combi y lunes 9 de diciembre de 2013 para camión.**



**Figura 14. Distribución de tamaño de partícula de camión y combi en el día martes 3 de diciembre de 2013 para combi y martes 10 de diciembre de 2013 para camión.**



**Figura 15. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día miércoles 4 de diciembre de 2013 para combi y miércoles 11 de diciembre de 2013 para camión.**

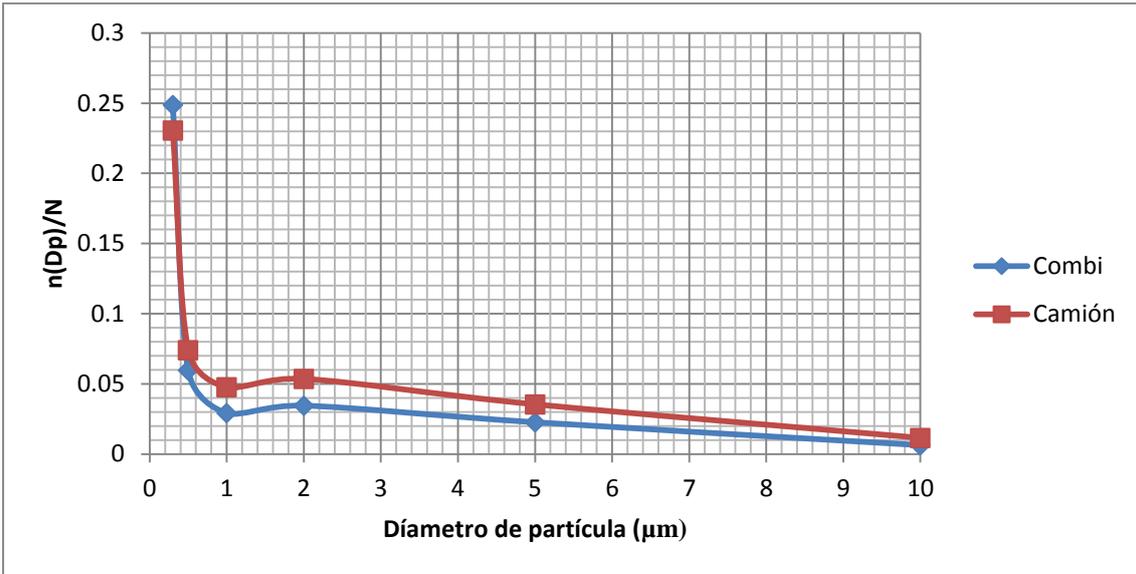


Figura 16. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día jueves 5 de diciembre de 2013 para combi y jueves 12 de diciembre para camión.

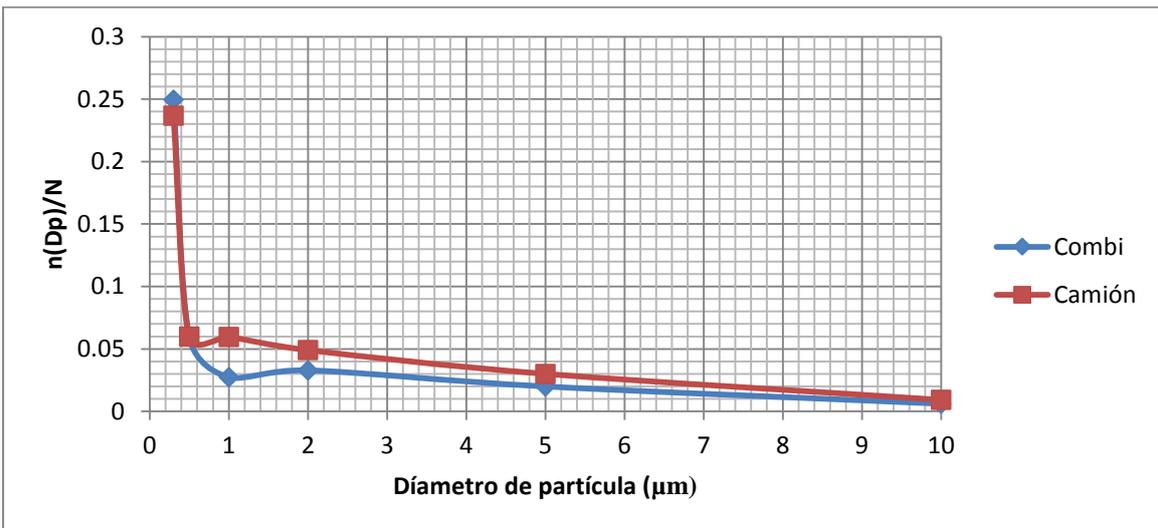
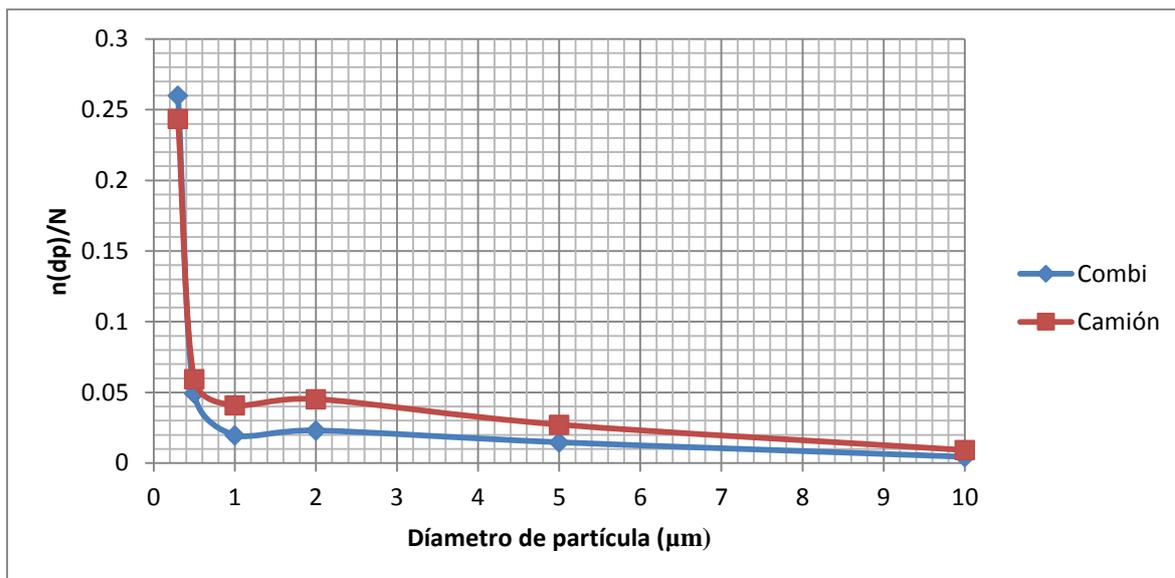


Figura 17. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día viernes 6 de diciembre de 2013 para combi y viernes 13 de diciembre de 2013 para camión.



**Figura 18. Distribución de tamaños de partícula de camión y combi en el día sábado 7 de diciembre de 2013 para combi y sábado 14 de diciembre de 2013 para camión.**

En todos los gráficos respecto al día de medición el transporte público colectivo "Camión" presentó una mayor concentración de número de partículas en comparación con el transporte público colectivo "Combi" con respecto a todos los tamaños, a excepción del tamaño de 0.3 μm, donde el transporte colectivo "Combi" generó un 3.63 % mayor concentración de número de partículas en comparación con el transporte colectivo "Camión".

El día sábado fue donde se observó un mayor número de partículas de tamaño 0.3 μm en ambos tipos de transporte público colectivo, "Combi" y "Camión" (véase, Figura 18). En los siguientes tamaños de partícula no existe una tendencia, ya que en los tamaños restantes el transporte colectivo "Combi" presentó una mayor concentración de número de partículas en el día martes (véase, Figura 14), mientras que para el transporte colectivo "Camión" fue el día miércoles (véase, Figura 15). Ambos días son días hábiles en los cuales existe una mayor cantidad de tráfico debido a las actividades, laborales, escolares, etc. y lo cual explicaría los altos niveles de concentración de número de partículas.

#### **4.1.2 Distribución de tamaños de partícula con respecto al horario de medición.**

En los gráficos de distribución de tamaño de partícula con respecto al horario de medición, se observa que en general para los diferentes tamaños de partículas y para ambos transportes colectivos, "Combi" y "Camión", el horario de 7:00 a 8:00 horas fue en el que se obtuvo una mayor concentración de número de material particulado; esto puede atribuirse a que en este horario de medición existe un mayor tránsito vehicular, mencionado antes como "horario pico", lo cual indica que el tráfico es el mayor contribuyente del material particulado.

Por otra parte también aquí se observa que en casi todos los horarios, el transporte colectivo "Combi" obtuvo una mayor cantidad de número de partículas en el tamaño de  $0.3 \mu\text{m}$  a excepción del horario de 19:00 a 20:00 horas, en el cual ambos transportes colectivos mostraron un comportamiento similar.

En cuanto a las partículas de diámetro aerodinámico de  $0.3 \mu\text{m}$ , el horario de 16:00 a 17:00 horas es en el que se presentó el valor más alto respecto a estas partículas en el transporte público colectivo "Combi"; mientras que en el transporte público colectivo "Camión" el horario de 19:00 a 20:00 horas fue en el que se mostró el valor más alto de número de partículas de tamaño  $0.3 \mu\text{m}$ .

A excepción de las partículas de  $0.3 \mu\text{m}$ , las partículas de los tamaños restantes registraron los valores más altos en el horario de 7:00 a 8:00 horas como ya se había mencionado.

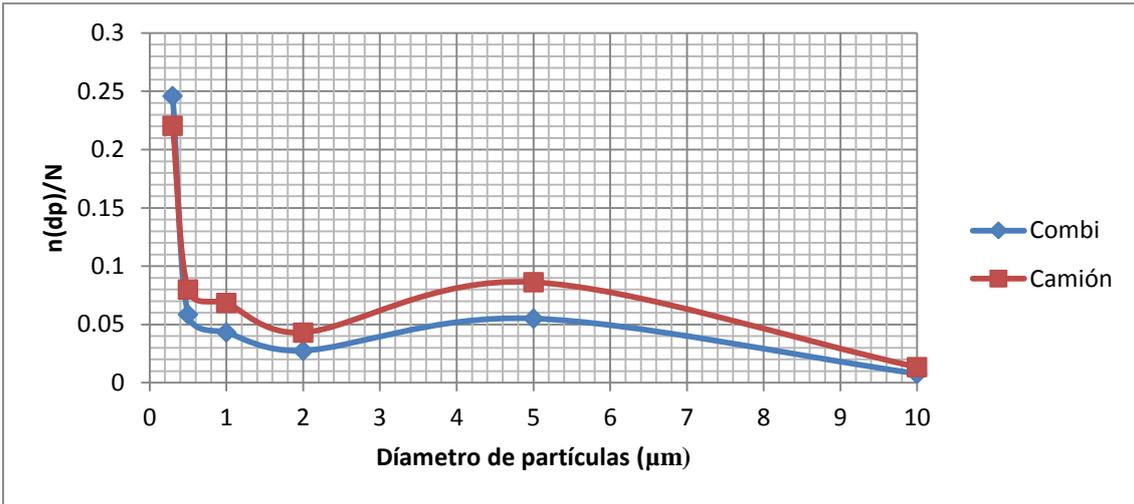


Figura19. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 7:00 a 8:00.

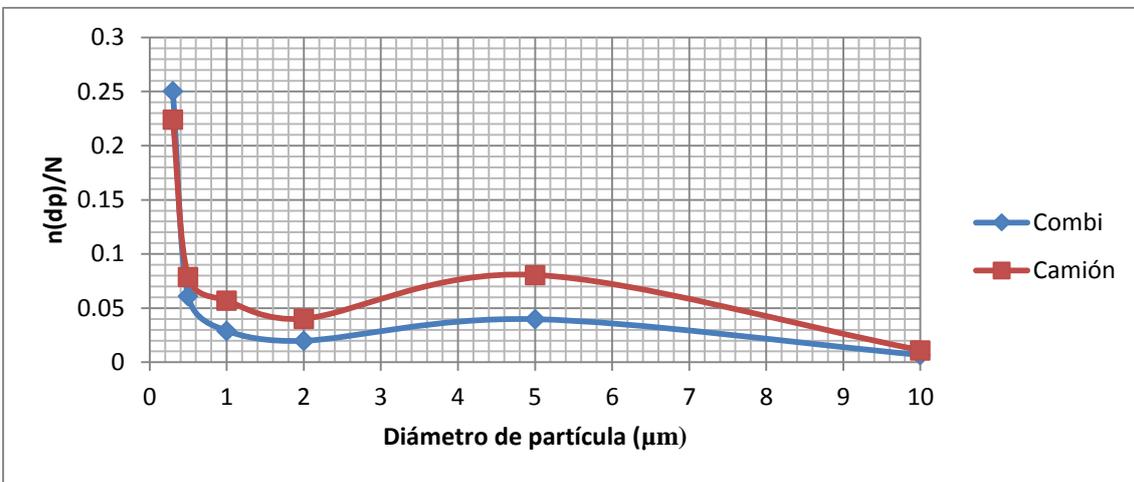


Figura 20. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 10:00 a 11:00.

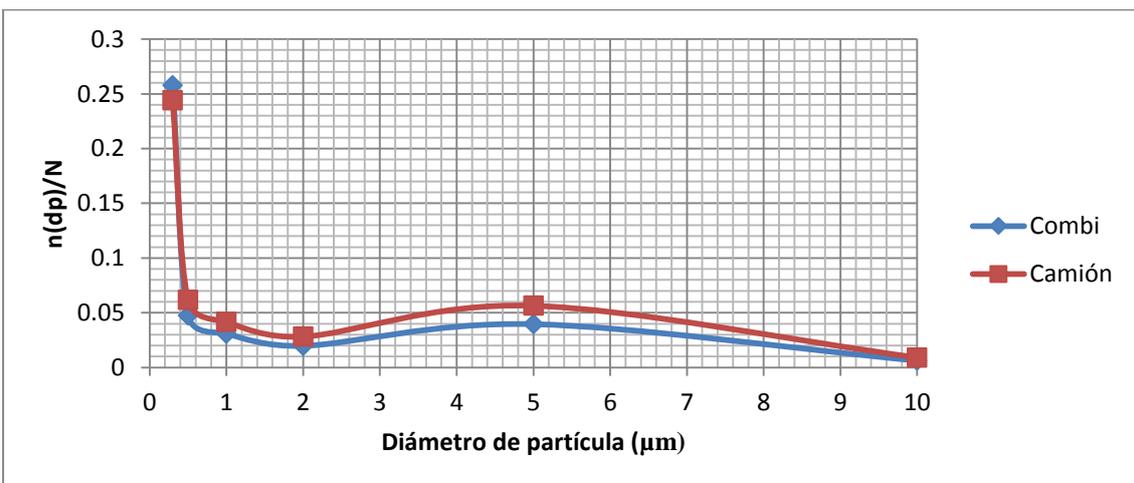


Figura 21. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 14:00 a 15:00.

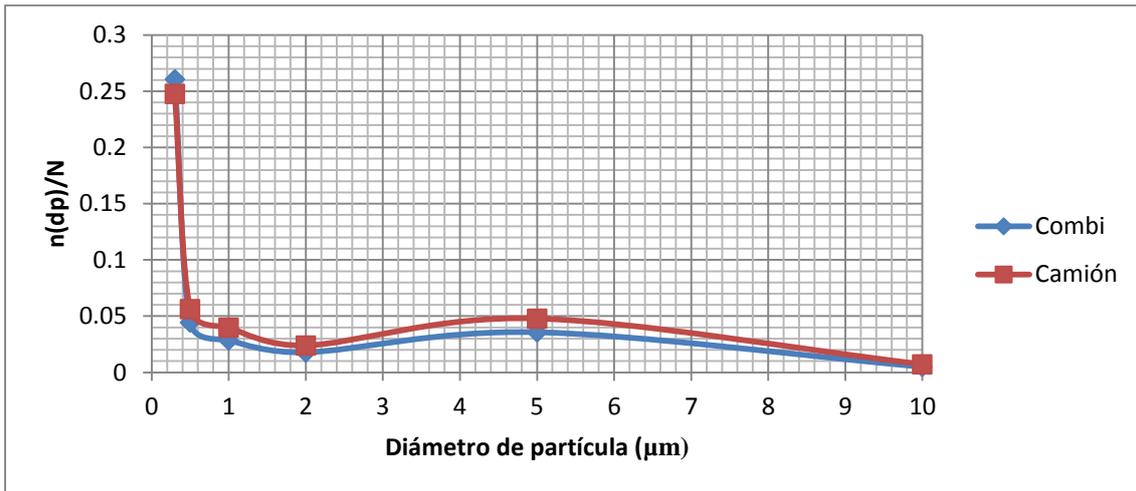


Figura 22. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 16:00 a 17:00.

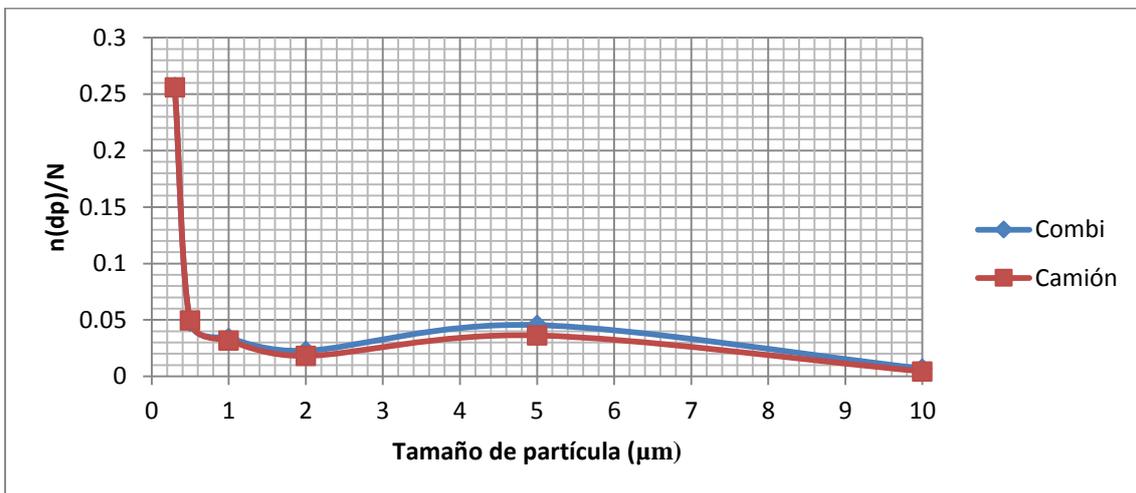


Figura 23. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en el horario de medición 19:00 a 20:00.

#### 4.1.3 Distribución de tamaños de partícula con respecto a la zona de medición (parada).

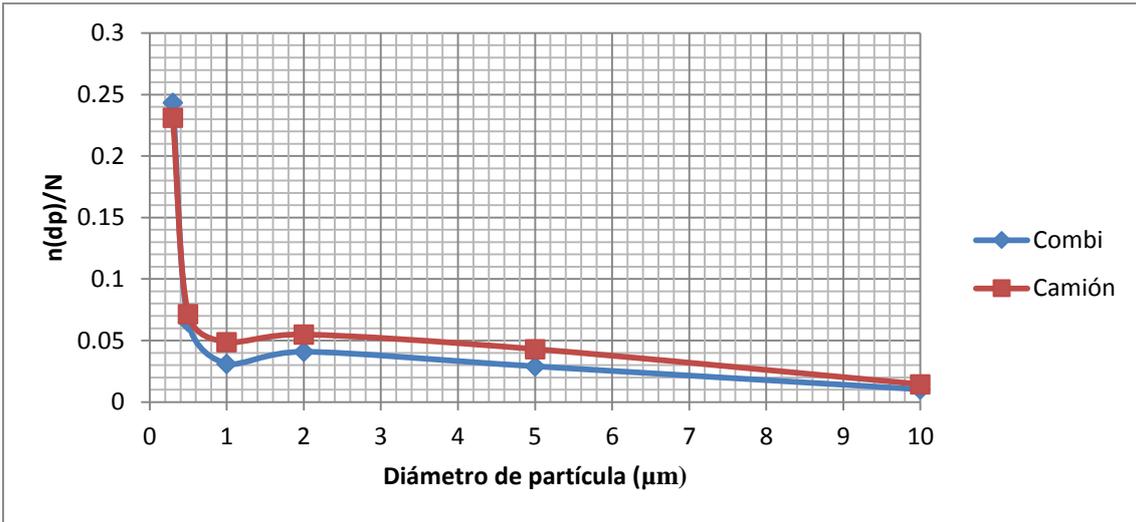
Respecto a la zona de medición, los vehículos de transporte público colectivo "Camión" mostraron una mayor concentración de número de partículas en comparación con los vehículos de transporte colectivo "Combi", esto se debe principalmente al tipo de combustible que utilizan, ya que los transportes que utilizan diésel como combustible tienden a emitir una mayor concentración de número de partículas que los transportes que utilizan gasolina. Y aunque por tipo de transporte los valores individuales más altos

no tienen una tendencia; sí coinciden aquellas paradas con los valores más altos de concentración de número de partículas agrupados en cuanto a partículas finas ( $0.3 \mu\text{m}$  a  $2.0 \mu\text{m}$ ) y partículas gruesas ( $5 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$ ).

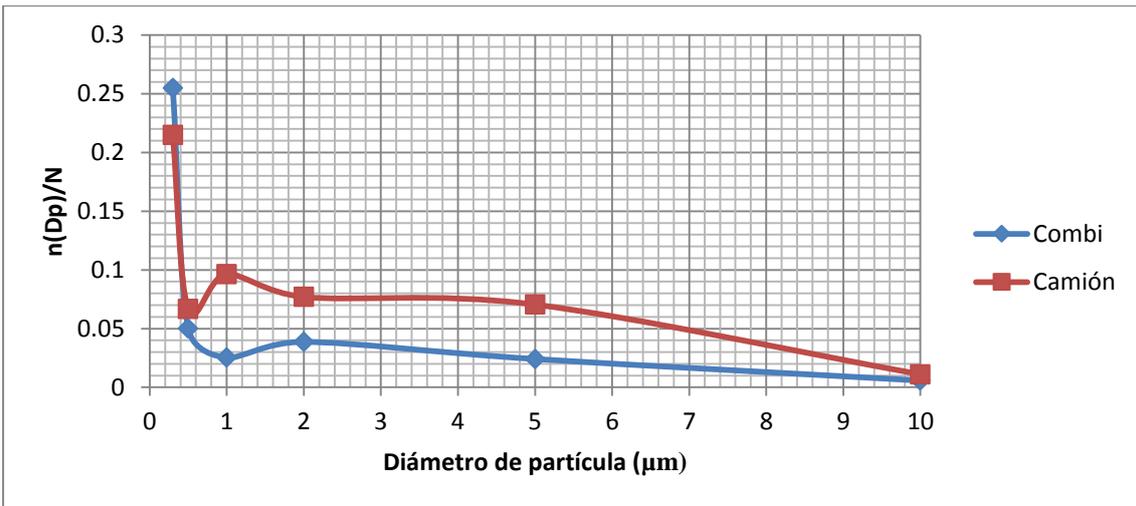
Las zonas que presentan los valores más altos de concentración de número de partículas para los tipos de transporte público "Combi" y transporte público "Camión" agrupándolas en partículas finas y gruesas, se encuentra ubicadas hacia la parte poniente de Morelia y son: "Salida a Quiroga", "Colonia Manantiales", "(Salida y Llegada)" y "Pepsi"; y otras que se encuentran en la parte oriente de Morelia, las cuales son: "Tienda de Autoservicio Aurrera", "IMSS" y "Tienda de Autoservicio Office Depot". En la parte poniente de Morelia puede deberse a la circulación de tráfico pesado; y en cuanto a la zona oriente se hizo mención anteriormente que en el tiempo de medición, ese tramo vehicular estuvo en procesos de repavimentación habiendo una gran cantidad de polvo procedente de esa parte en particular.

En todas las zonas de medición se obtuvo una distribución bimodal, presentando la primera moda en el valor de  $0.3 \mu\text{m}$ , en el cual se observa la mayor concentración de número de partículas, y la segunda en el valor de  $2.0 \mu\text{m}$ ; a excepción de la zona de medición "Pepsi", en la cual se obtiene una distribución bimodal en los valores de  $0.3 \mu\text{m}$  y  $1.0 \mu\text{m}$  (véase, Figura 25).

La zona de medición "Refresquera Pepsi" fue en la cual en general se presentaron los valores más altos de concentración de número de partículas; donde en el tamaño de  $0.3 \mu\text{m}$  se observa un 8.52 % mayor de número de partículas en el transporte colectivo "Combi" respecto al transporte colectivo "Camión". Y la siguiente moda el transporte público colectivo "Camión" la presenta en el diámetro aerodinámico de  $1.0 \mu\text{m}$  en donde el transporte público colectivo "Camión" tiene un 58.5 % mayor concentración de número de partículas que el transporte colectivo "Combi".



**Figura 24. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición salida.**



**Figura 25. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición embotelladora refresquera Pepsi.**

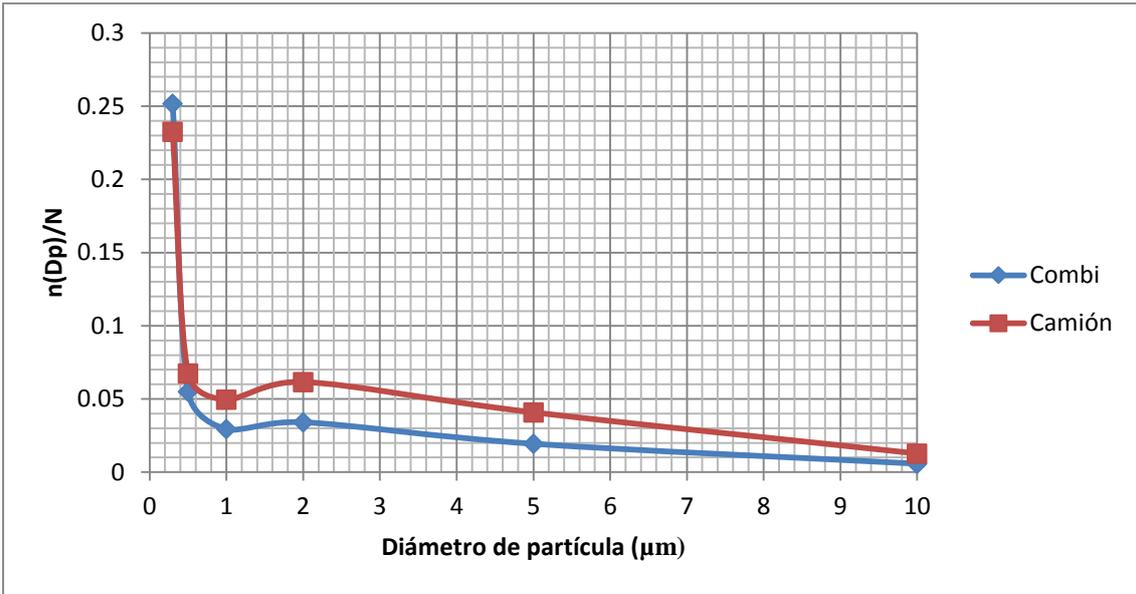


Figura 26. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición colonia Xangari.

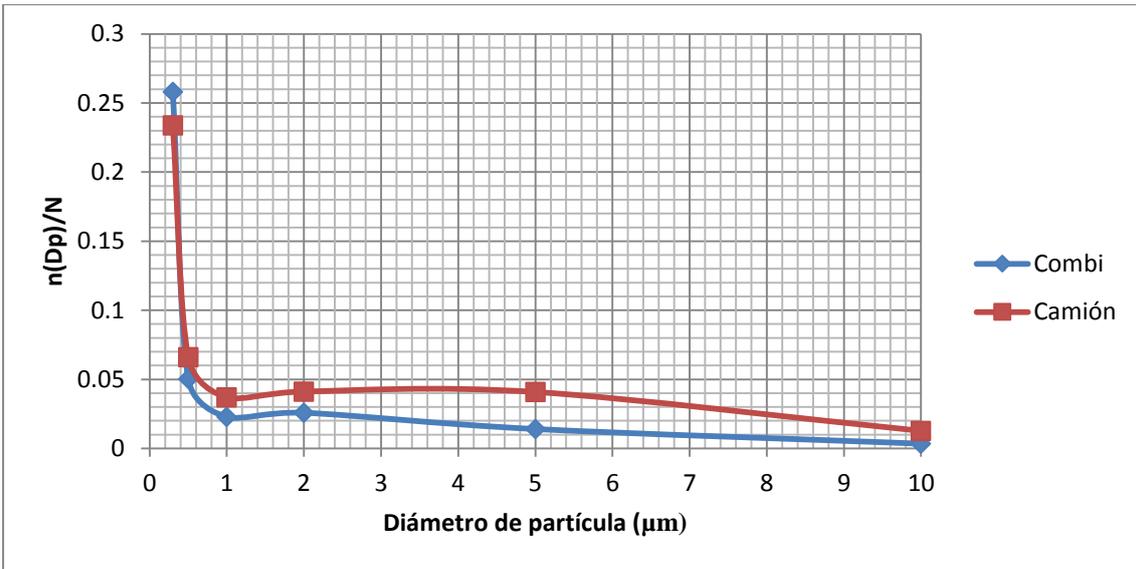
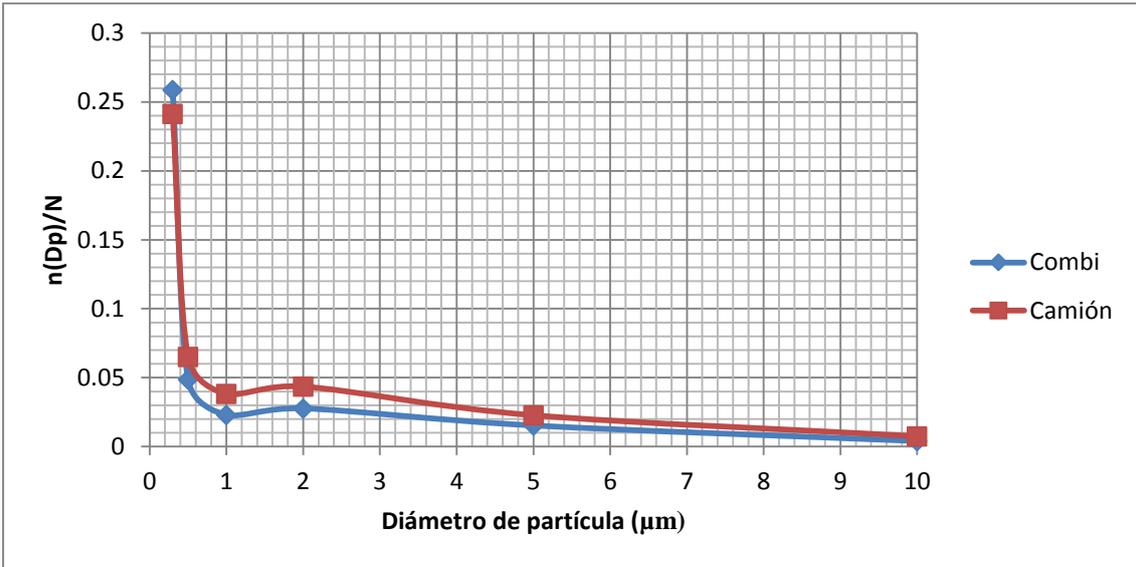
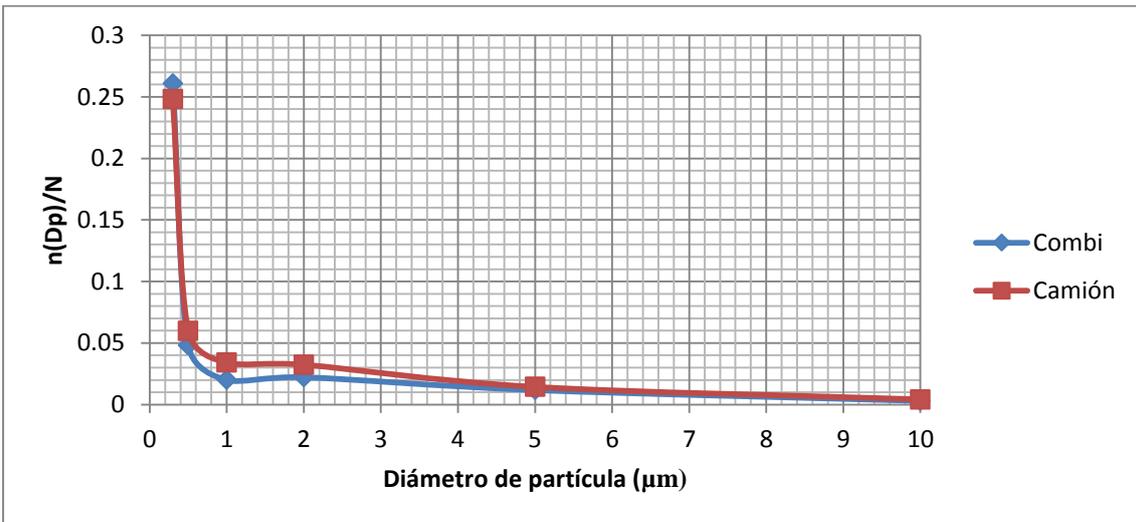


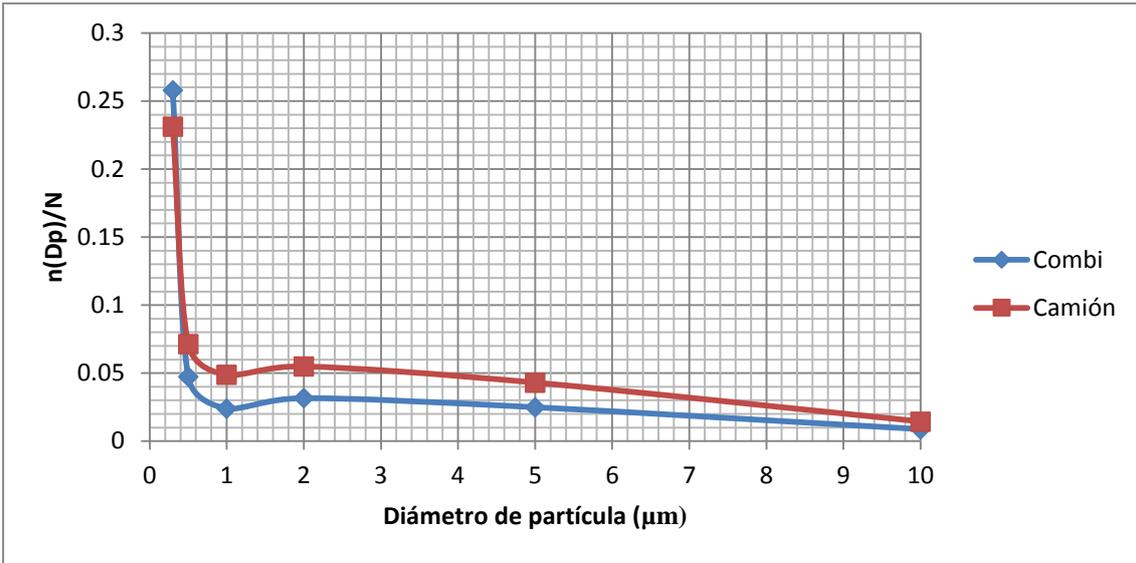
Figura 27. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Costco.



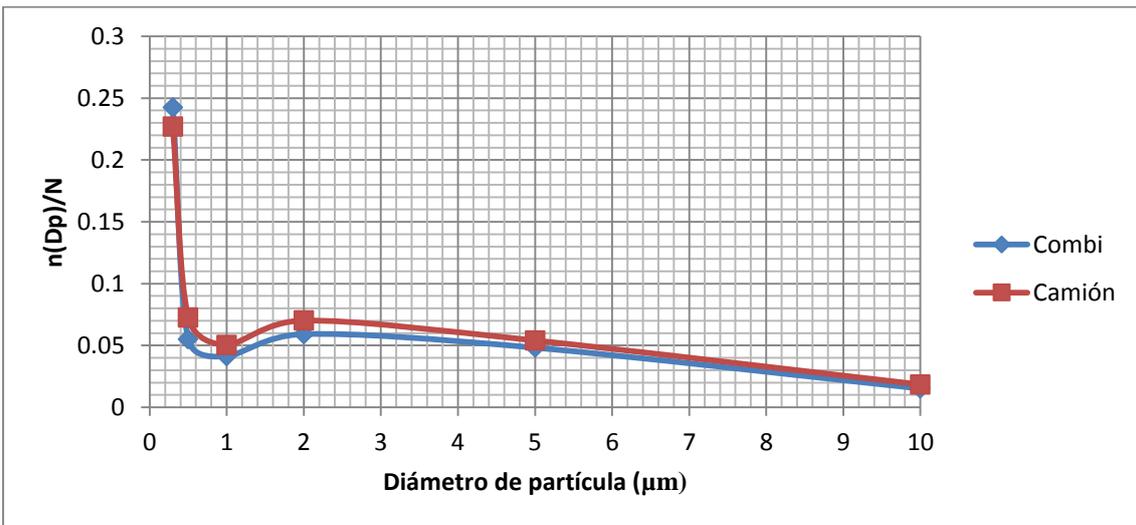
**Figura 28. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición casa de gobierno.**



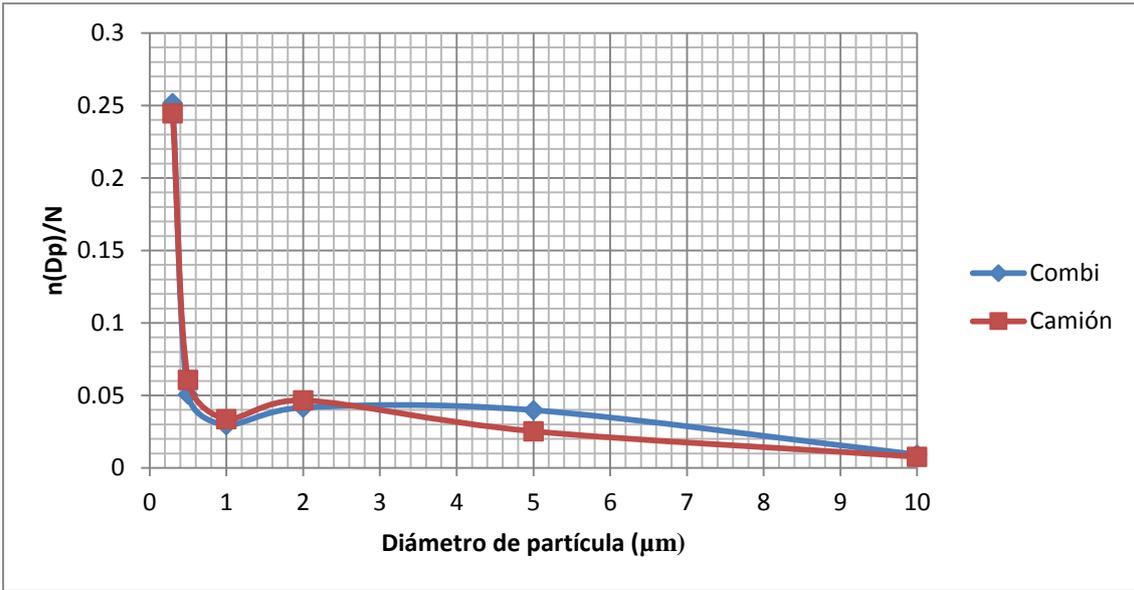
**Figura 29. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición zoológico "Benito Juárez".**



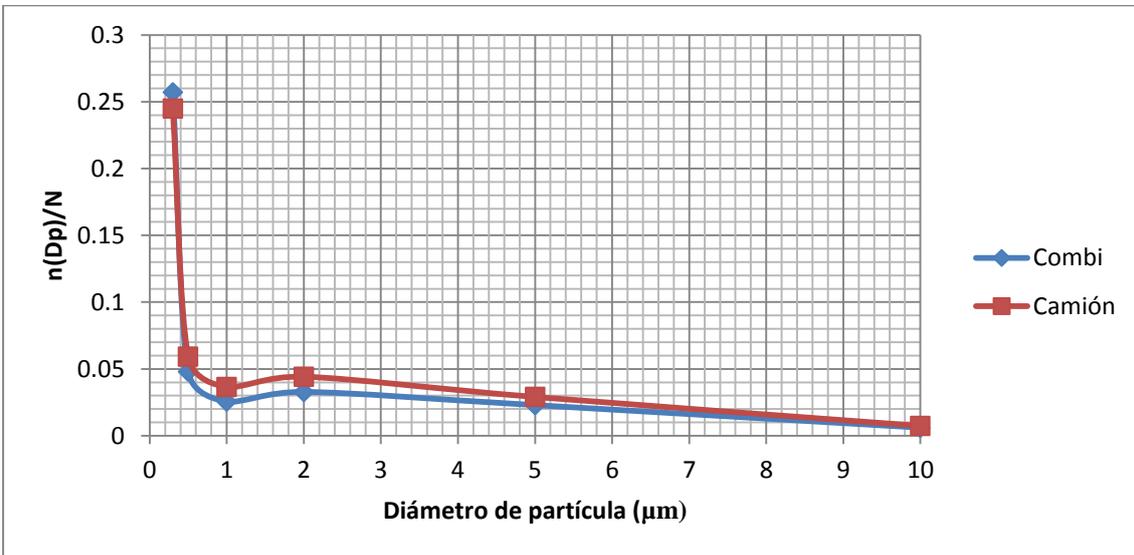
**Figura 30. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Aurrera.**



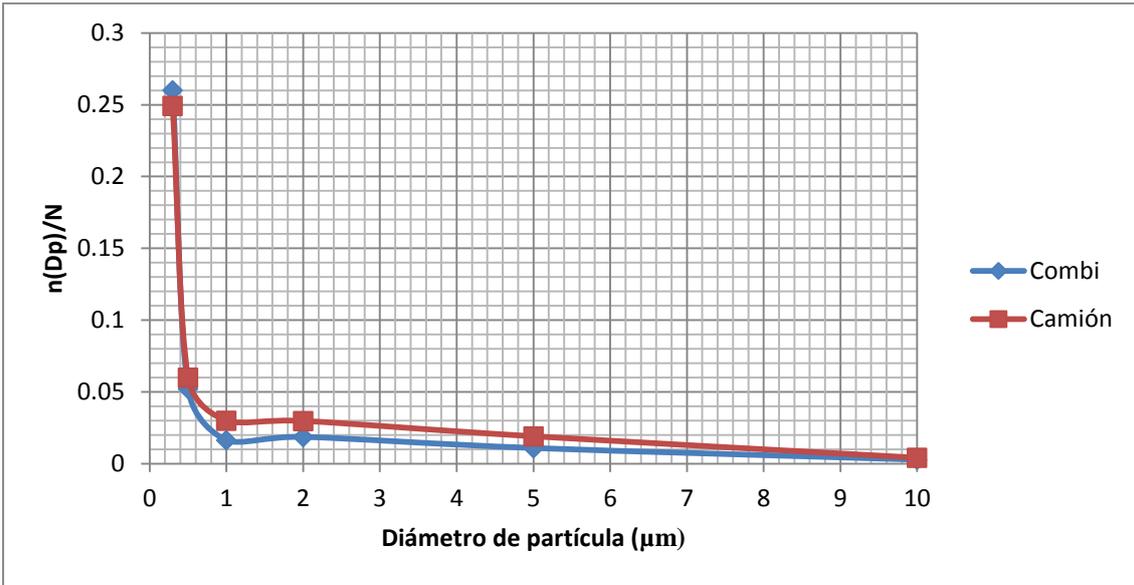
**Figura 31. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición hospital medico IMSS.**



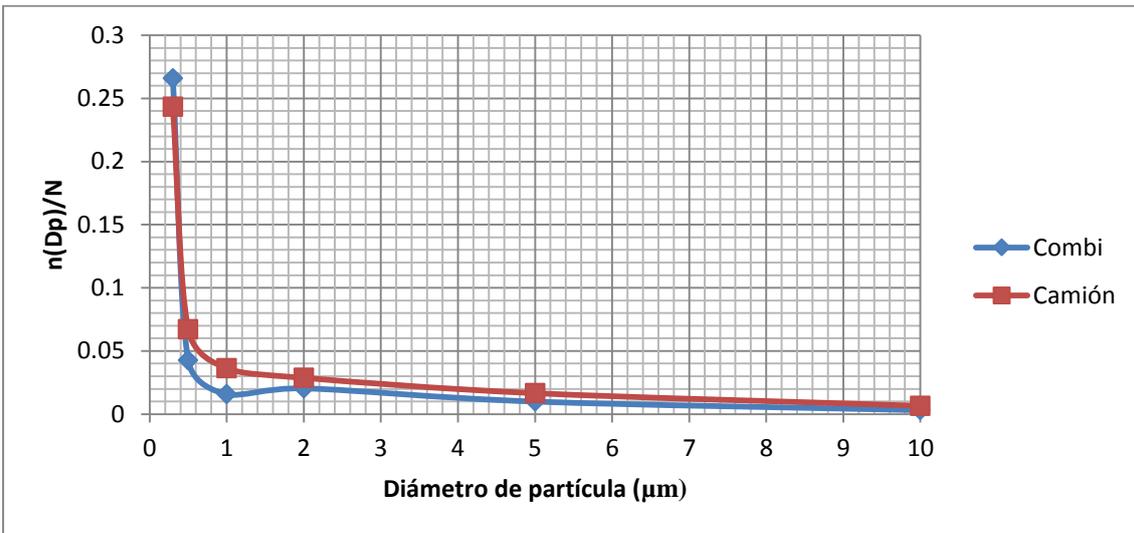
**Figura 32. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Office Depot.**



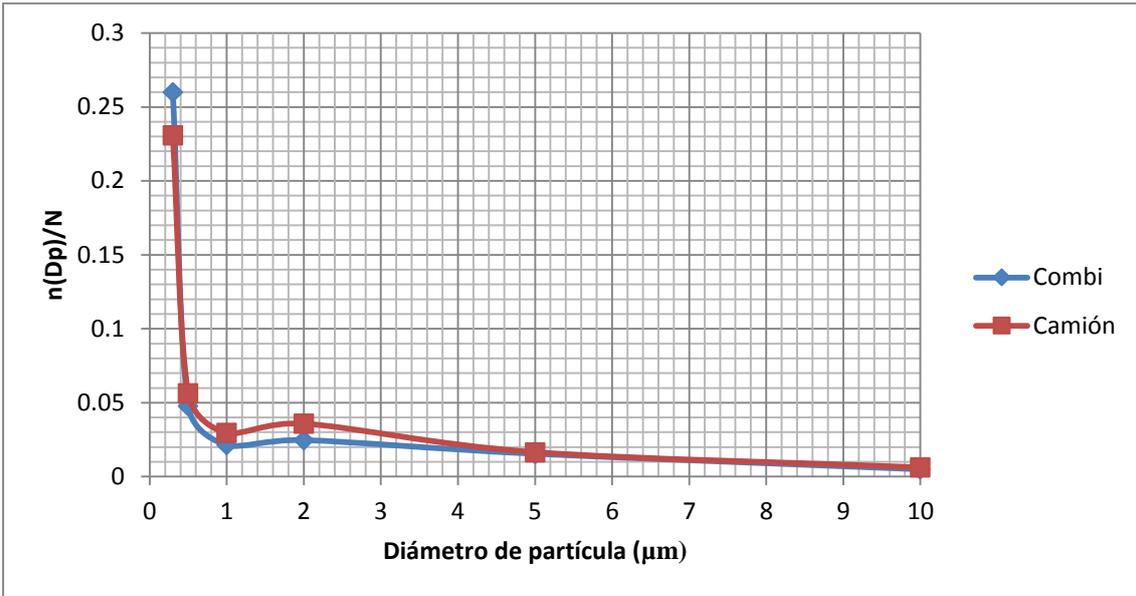
**Figura 33. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición centro comercial Las Américas.**



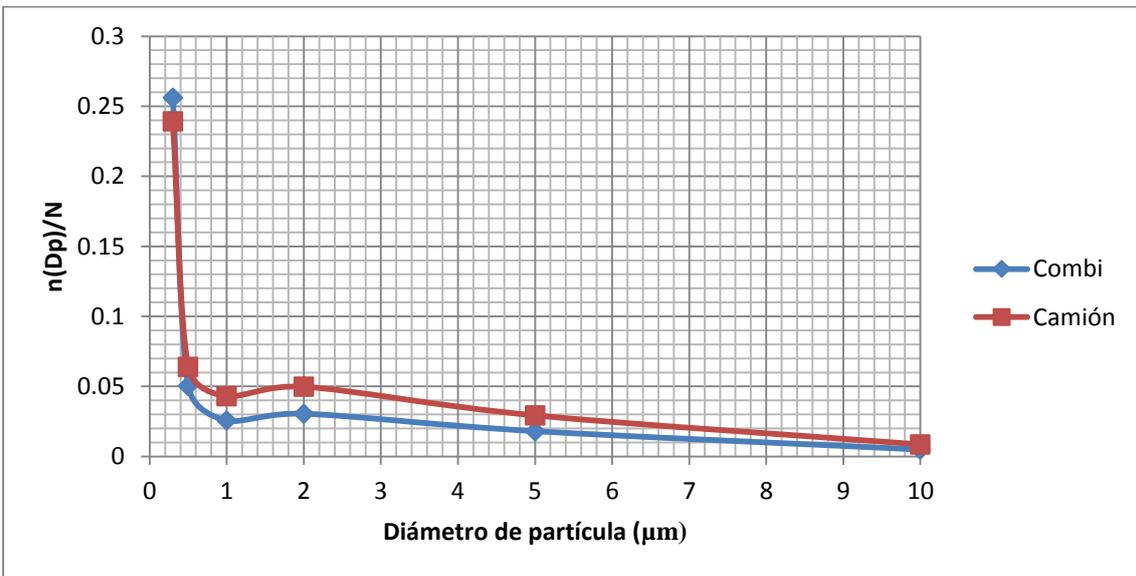
**Figura 34. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición centro comercial Plaza Morelia.**



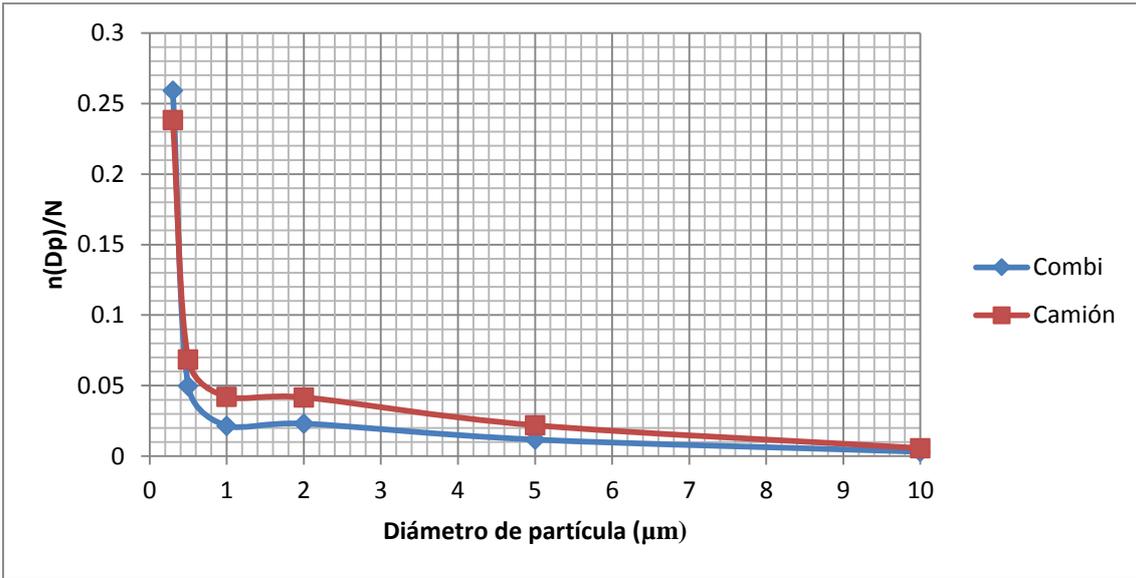
**Figura 35. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición salida Mil Cumbres.**



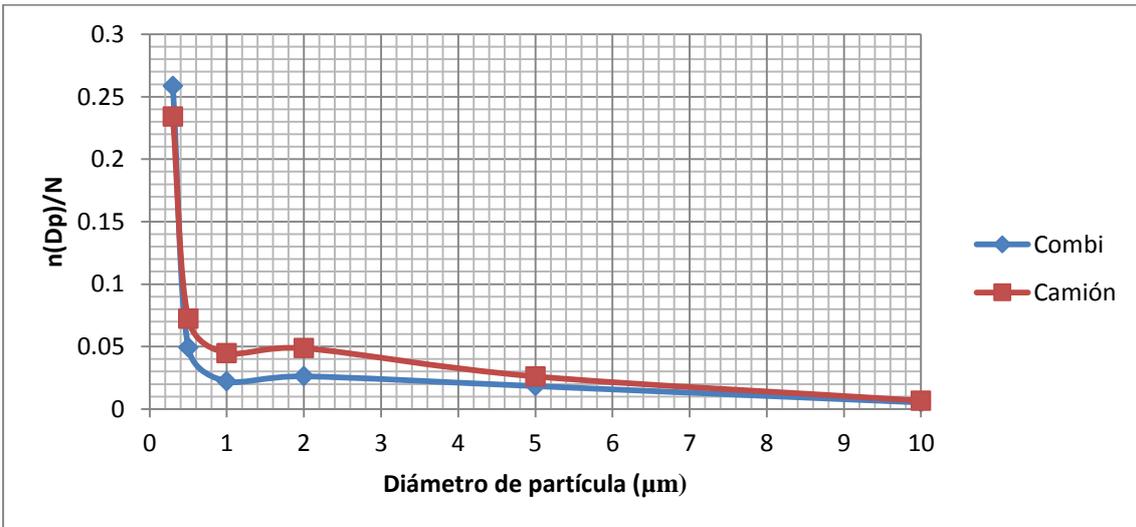
**Figura 36. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Instituto Lancaster.**



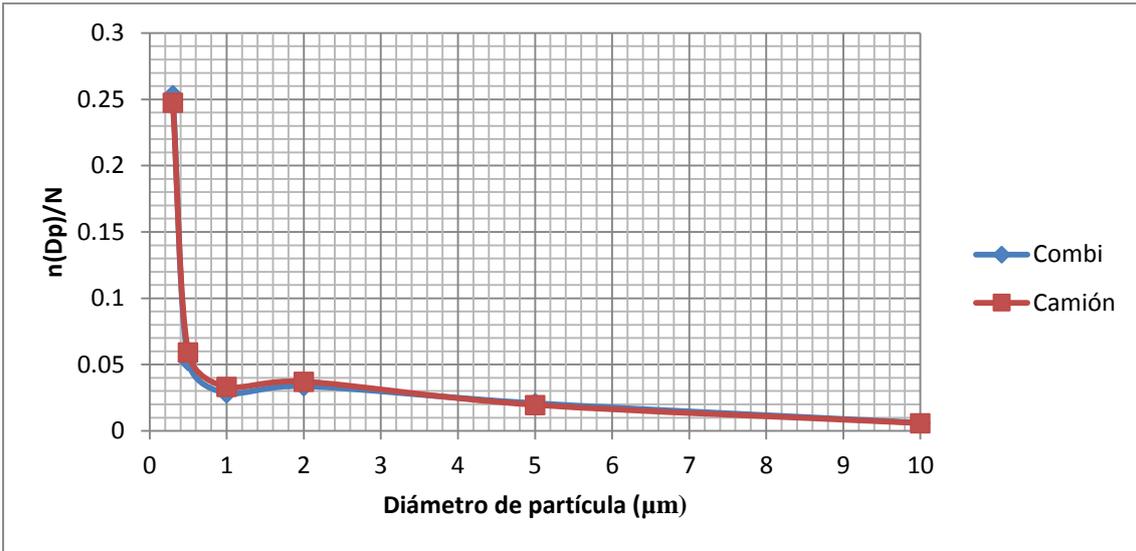
**Figura 37. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición colonia San Rafael.**



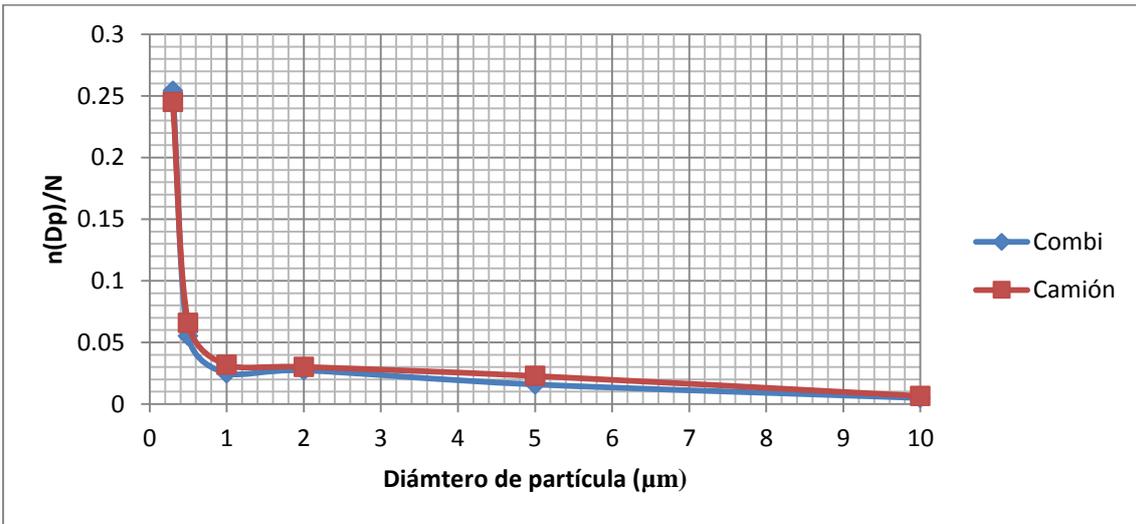
**Figura 38. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición motel Motel Inn.**



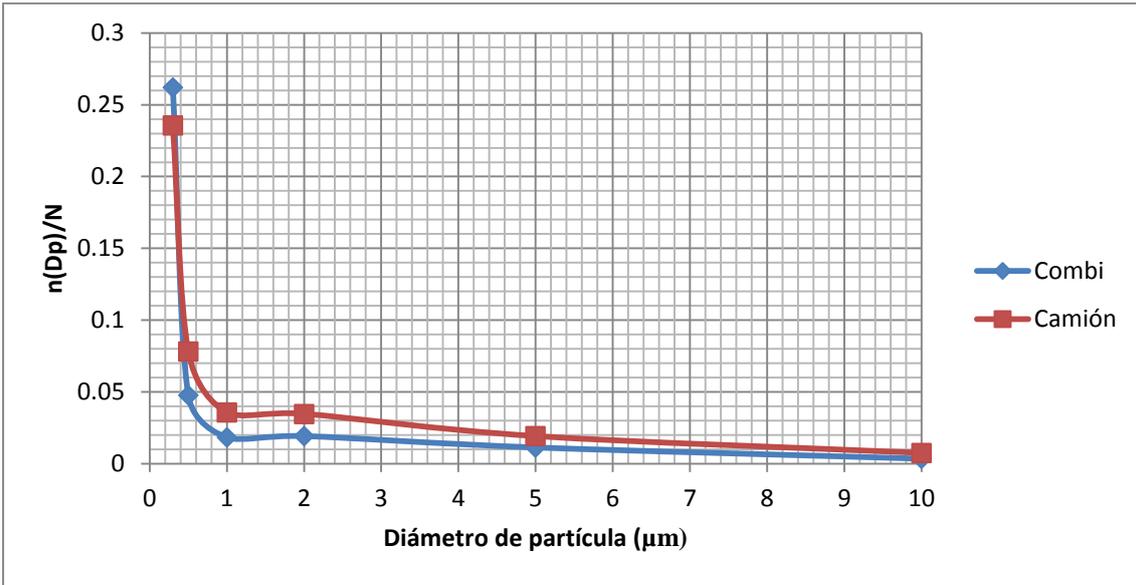
**Figura 39. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Salida Charo.**



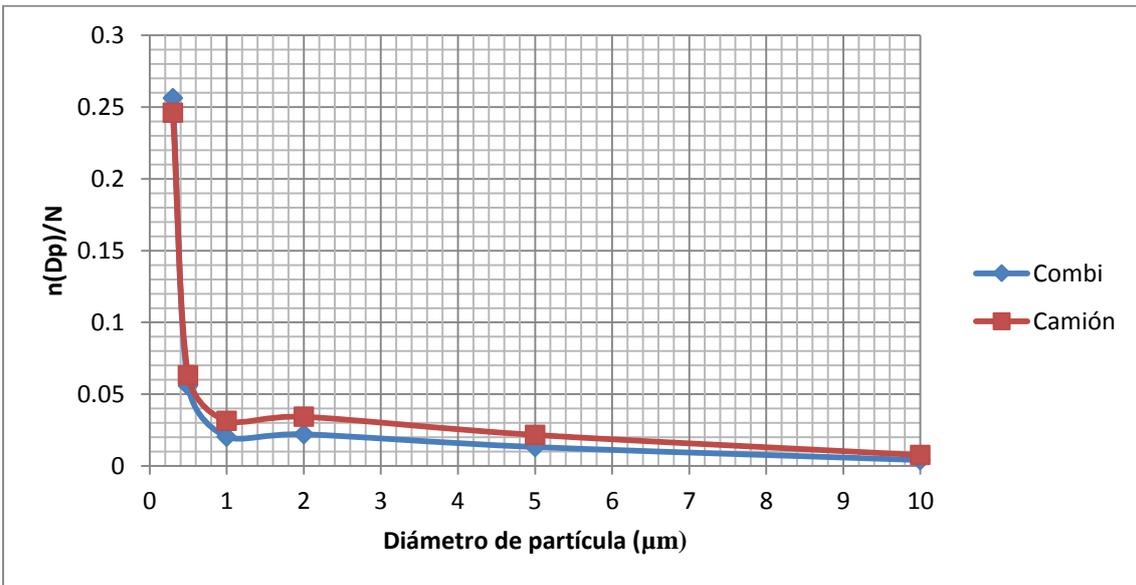
**Figura 40. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Mercado de Abastos.**



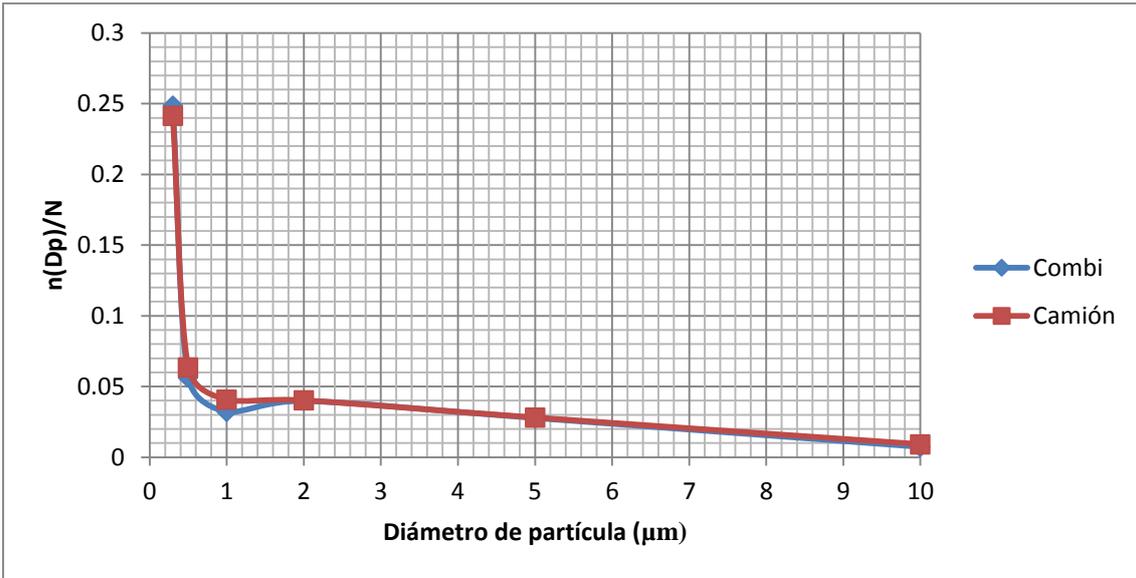
**Figura 41. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Instituto Tecnológico de Morelia.**



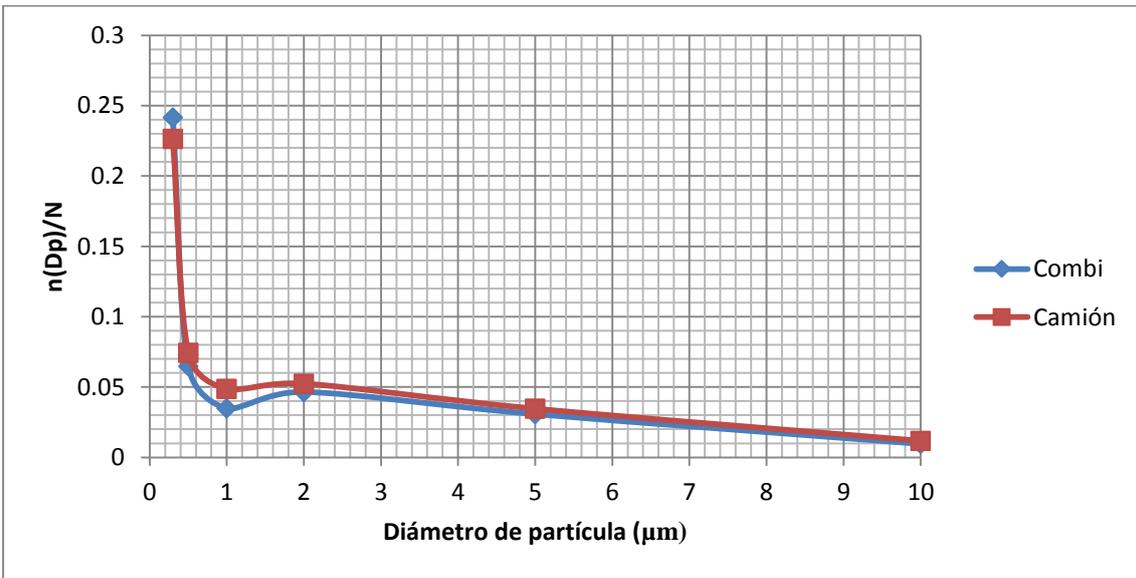
**Figura 42. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición colonia Torreón Nuevo.**



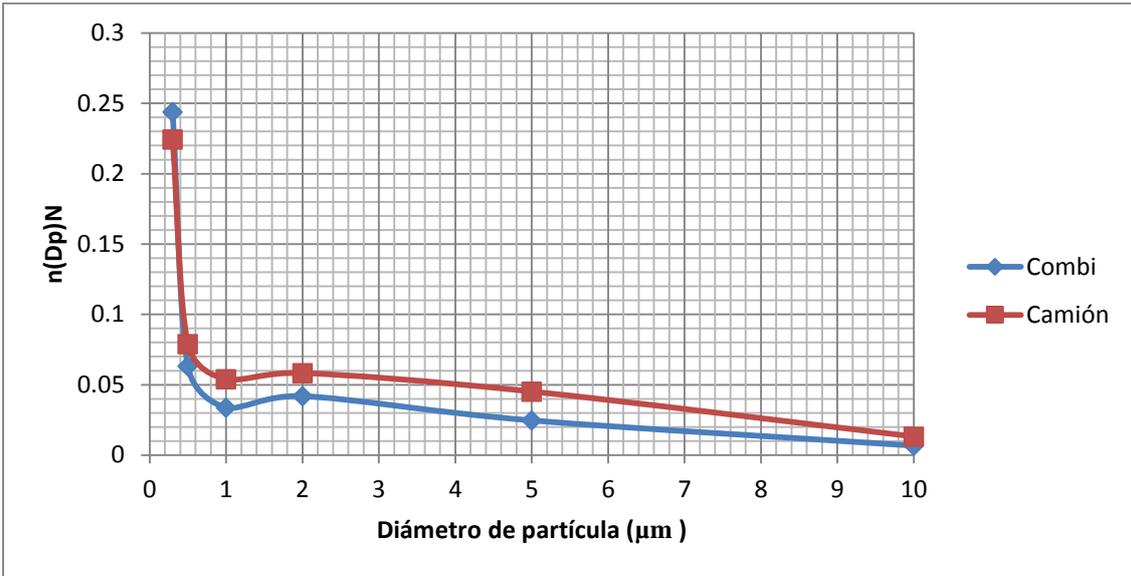
**Figura 43. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición avenida Huaniqueo.**



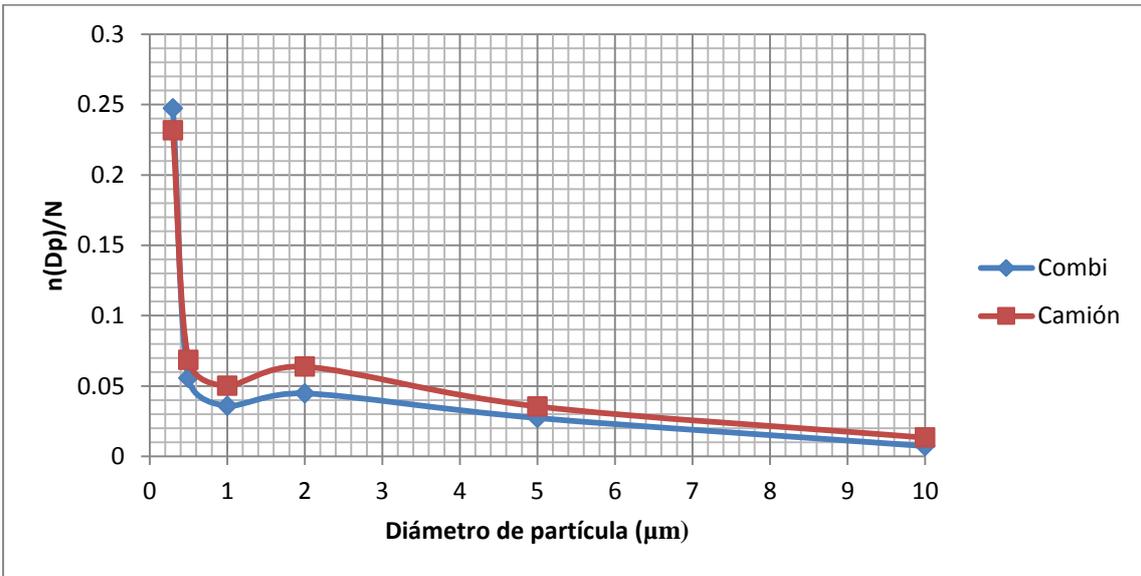
**Figura 44. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición tienda de autoservicio Walmart.**



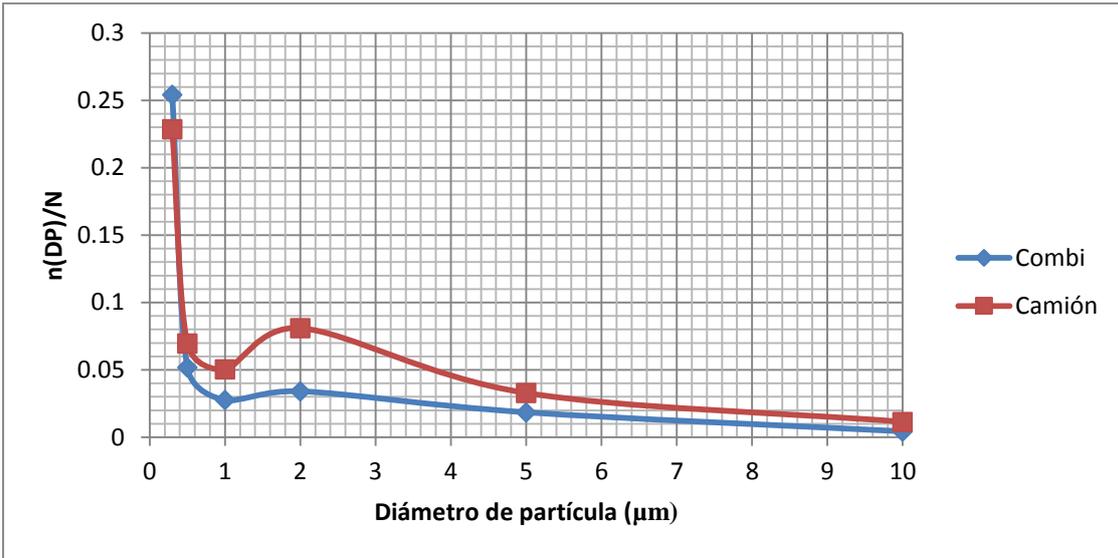
**Figura 45. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Central de Autobuses Morelia.**



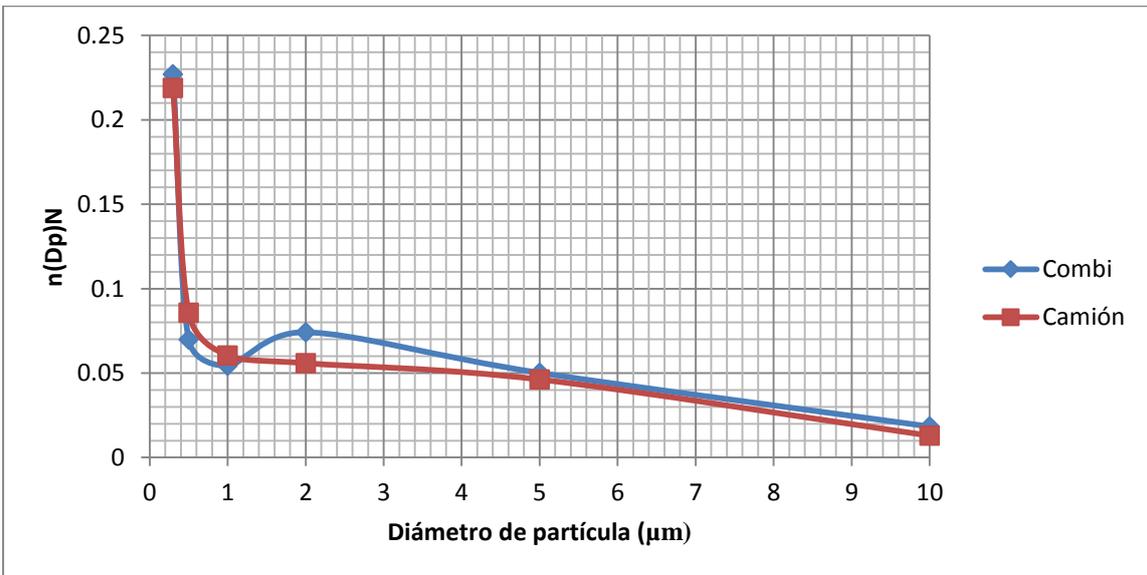
**Figura 46. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición SCT.**



**Figura 47. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Salida a Quiroga.**



**Figura 48. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición colonia Manantiales.**



**Figura 49. Distribución de tamaño de partículas de camión y combi en la zona medición Llegada.**

#### 4.2 Distribución de tamaño de partícula por superficie.

La superficie es la parte por donde un sólido interactúa con lo que le rodea, ya sea gas, un líquido u otros sólidos. Conocer la distribución de tamaño partículas de acuerdo a su superficie nos permite tener una aproximación de qué tipo de partículas adquieren mayor cantidad de contaminantes.

#### 4.2.1 Distribución de tamaño de partícula por superficie respecto al día de medición.

Respecto a la superficie de las partículas por día de medición se puede observar una distribución bimodal en los tamaños de  $0.3 \mu\text{m}$  y  $5.0 \mu\text{m}$  (véase, Figura 50). En donde en el diámetro aerodinámico de  $0.3 \mu\text{m}$  presenta la primera moda, donde el valor más alto que se obtuvo en todos los días de medición fue en el día 6 que corresponde al día sábado. Mientras que las partículas con diámetro de  $5.0 \mu\text{m}$  se puede observar el valor más alto de superficie total de partículas en el día 8 que corresponde al día martes. Se puede decir entonces que a menor tamaño de partícula habrá mayor superficie y por lo tanto estas partículas absorben contaminantes con mayor facilidad.

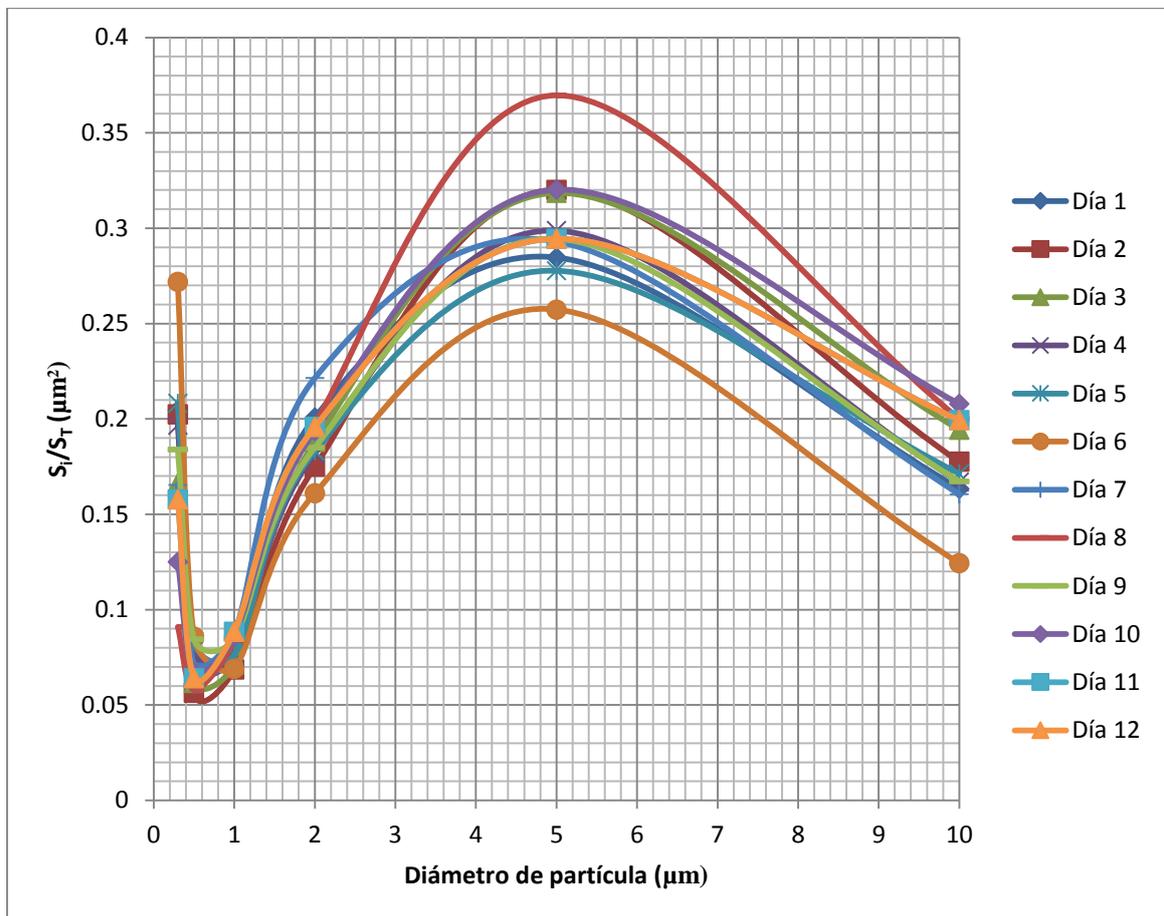
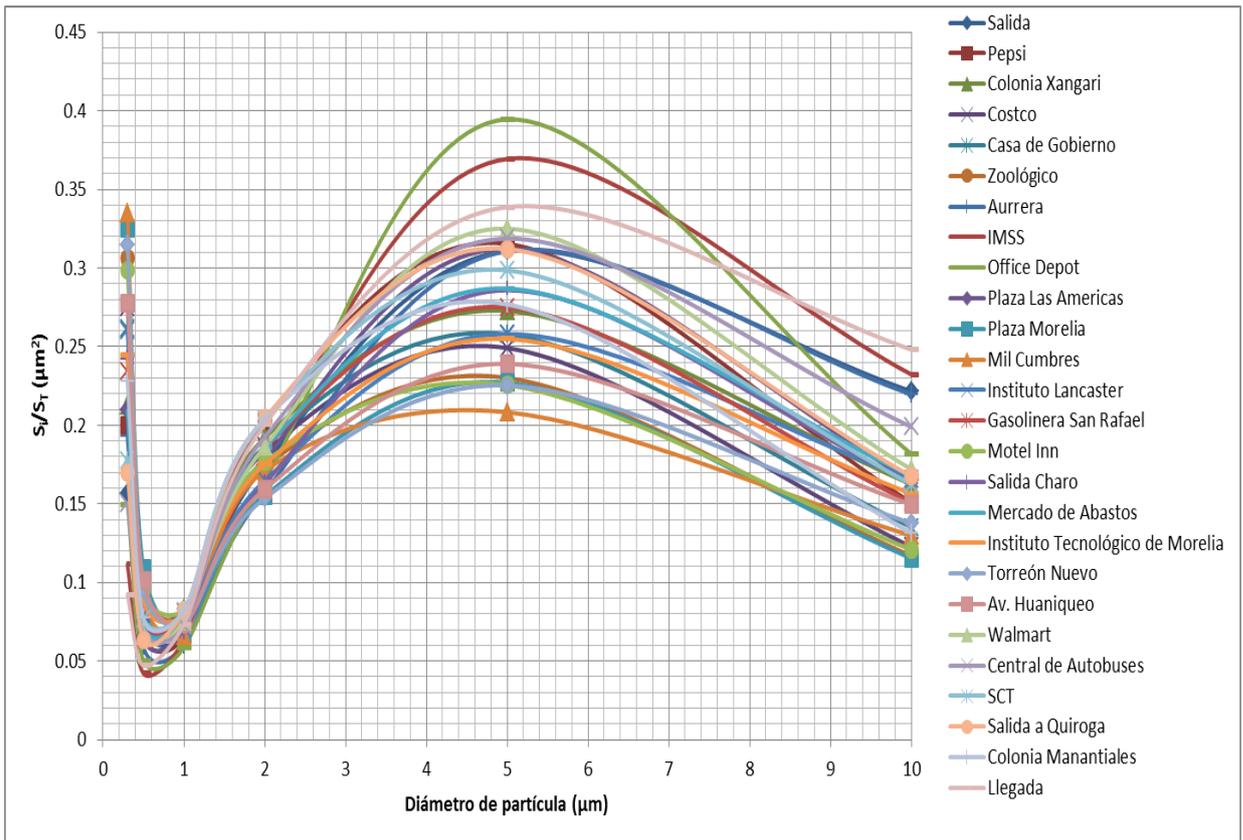


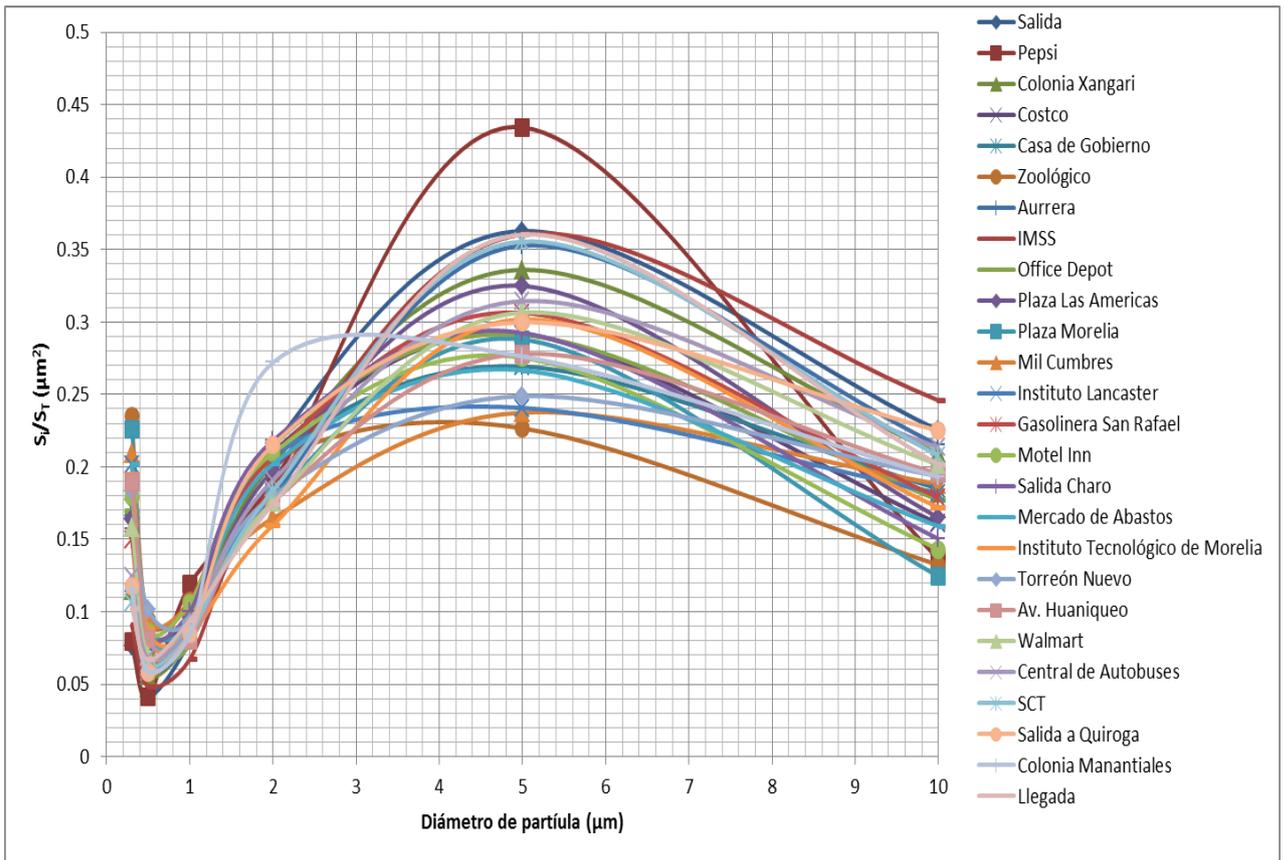
Figura 50. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su superficie y respecto al día de medición.

#### **4.2.2 Distribución de tamaño de partícula por superficie respecto a la zona de medición.**

De acuerdo a la zona de medición, el transporte público colectivo “Combi” obtuvo el valor más alto de superficie total para las partículas de  $5.0 \mu\text{m}$  en la parada “Tienda de autoservicio Office Depot” (véase, Figura 51), esto puede explicarse debido al proceso de repavimentación que se presentó durante el tiempo de monitoreo de este estudio. Mientras que el transporte colectivo “Camión” presentó el valor más alto en el tamaño de partícula  $5.0 \mu\text{m}$  en la zona medición “Refresquera Pepsi” (véase, Figura 48), esto coincide con los gráficos distribución de tamaño número de partículas mencionados anteriormente donde se atribuía al tráfico pesado que suele haber en esta zona.



**Figura 51. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su superficie con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Combi”.**



**Figura 52. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su superficie con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Camión”.**

### 4.3 Distribución de tamaño de partícula por volumen de partícula.

#### 4.3.1 Distribución de tamaño de partícula por volumen de partícula respecto al día de medición.

Respecto al volumen de partícula por día de medición la moda se encuentra en el tamaño de partícula de  $5\mu\text{m}$  y el valor más alto se encuentra en el día 8, que se refiere al día martes, (véase, figura 53). El grafico de volumen tiende a recorrer la moda a un valor más alto del tamaño de partícula.

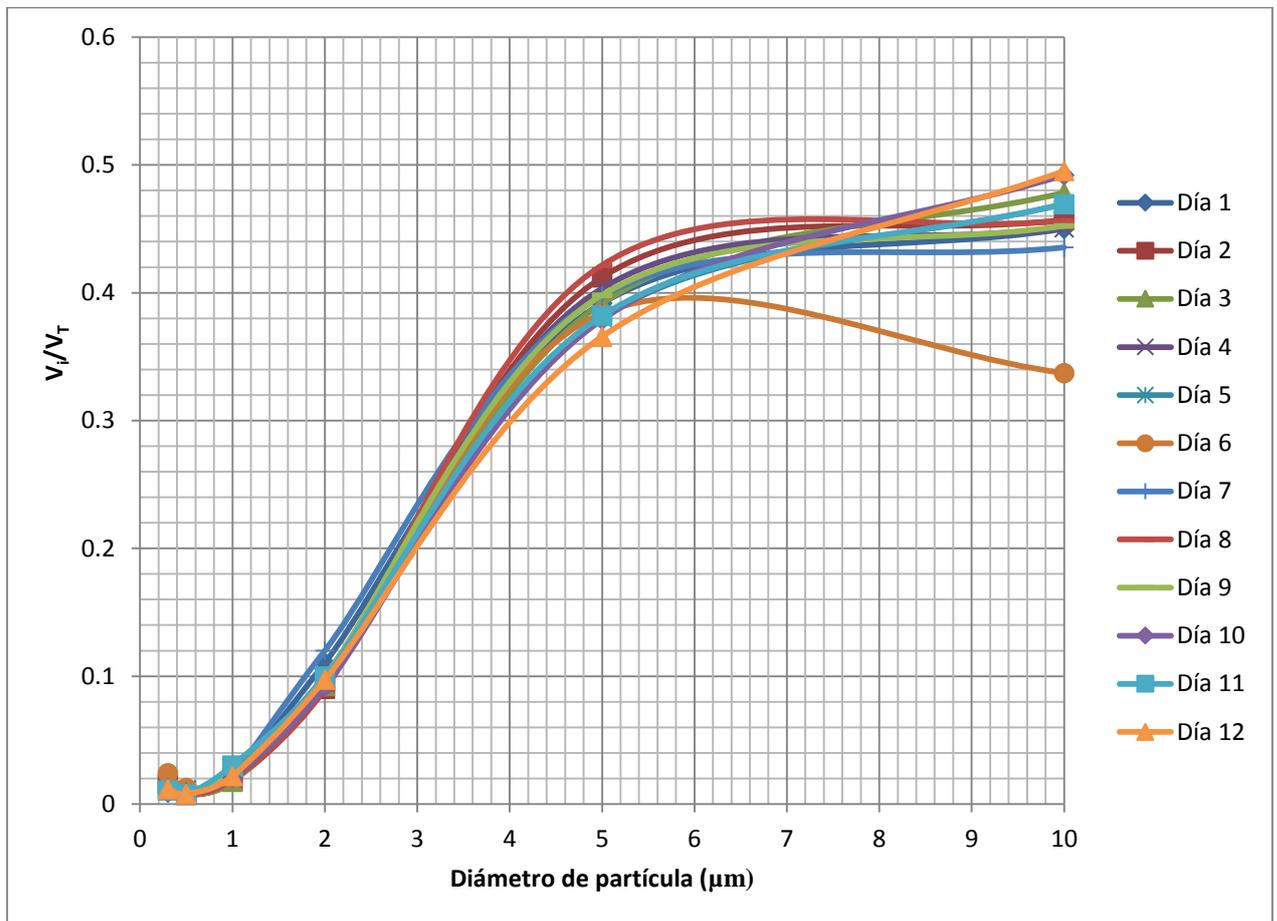
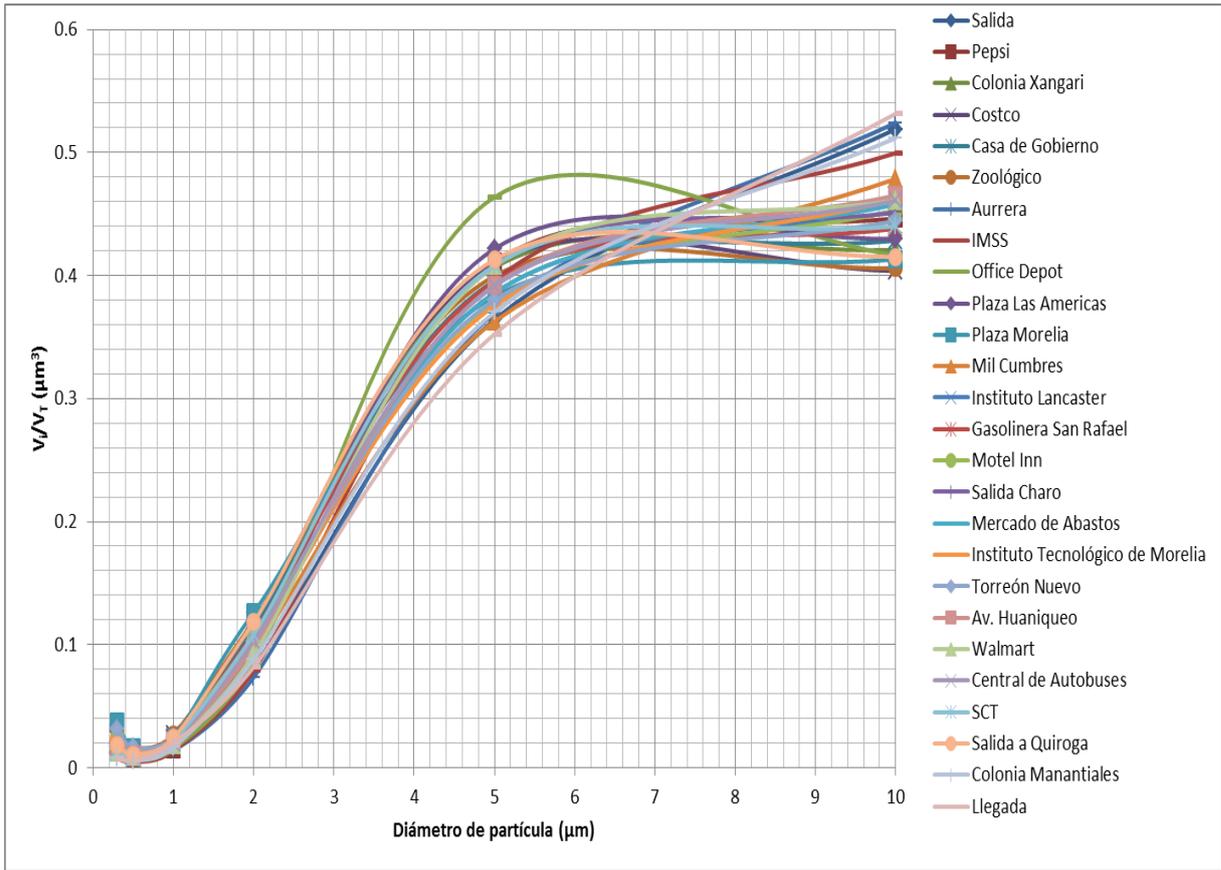


Figura 53. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su volumen y respecto al día de medición.

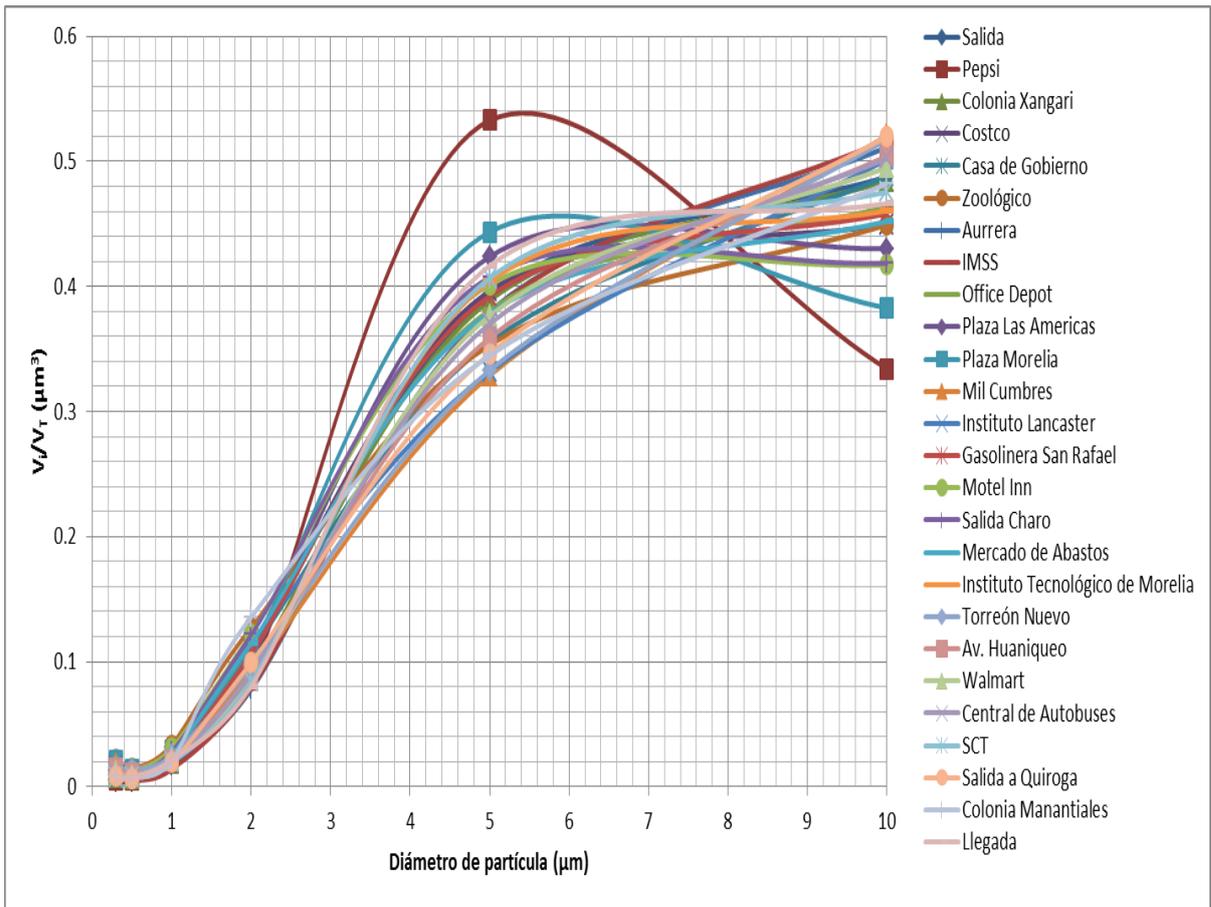
#### **4.3.2 Distribución de tamaño de partícula por volumen respecto a la zona de medición.**

En el transporte público colectivo “Combi” de acuerdo al gráfico de distribución de partículas por volumen, se presentó la moda en el diámetro aerodinámico de  $5\ \mu\text{m}$  teniendo el valor más alto en la zona de medición “Office Depot”. Para el transporte colectivo “Camión”, la moda se observó en el mismo diámetro aerodinámico y la zona de medición que obtuvo el mayor valor fue “Refresquera Pepsi”.

Estas paradas coinciden con las mencionadas anteriormente en la distribución de tamaño de partícula y en la distribución de tamaño de partícula por superficie, la zona “Office Depot” debido al proceso de repavimentación y, la zona “Refresquera Pepsi” debido al tráfico pesado que suele presentarse en esa área.



**Figura 54. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su volumen con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo "Combi".**



**Figura 55. Distribución de tamaño de partícula de acuerdo a su volumen con respecto a la zona de medición en el transporte colectivo “Camión”.**

#### 4.4 Caracterización morfológica de partículas.

La caracterización química y morfológica de materia en estado particulado se realiza con el propósito de determinar, por una parte, las características físicas (forma, tamaño, y aspecto) y por otra parte, la presencia de elementos o contaminantes específicos, que nos permitan inferir la composición de las partículas, y de ser posible, destacar la presencia de marcadores específicos de su origen.

Estudios revelan que partículas de diferentes fuentes de contaminación tienen diferentes composiciones elementales.<sup>19</sup>

Con respecto a este estudio se encontraron diferentes tipos de partículas en ambos transportes colectivos, "Combi" y "Camión"; entre éstas están las partículas de hollín y partículas de origen mineral que destacan más.

Partículas de hollín: Las partículas de hollín observadas residen en grandes grupos de partículas de carbón con un tamaño aproximadamente de entre 1 y 10 micrómetros. El hollín es una de las partículas producidas por los escapes de los vehículos, producto de la combustión incompleta. Los vehículos que utilizan diésel como combustible tienden a generar mayor número de partículas de hollín que los vehículos con motores de gasolina.

La similitud en la morfología entre las partículas de diésel y gasolina es grande. Así que se consideran partículas de "Hollín," las provenientes de vehículos (diésel o gasolina).<sup>20</sup>

Los aglomerados de hollín tienen generalmente formas irregulares pero las partículas individuales tienen una forma casi esférica y tienen tamaños nanométricos. En ambos transportes colectivos se encontraron aglomerados de hollín, para combivéanse las Figuras 56(a), 58(b), 59(c), 60(d), 61(e) y para camión las Figuras 62(f), 64(g), 66(h).

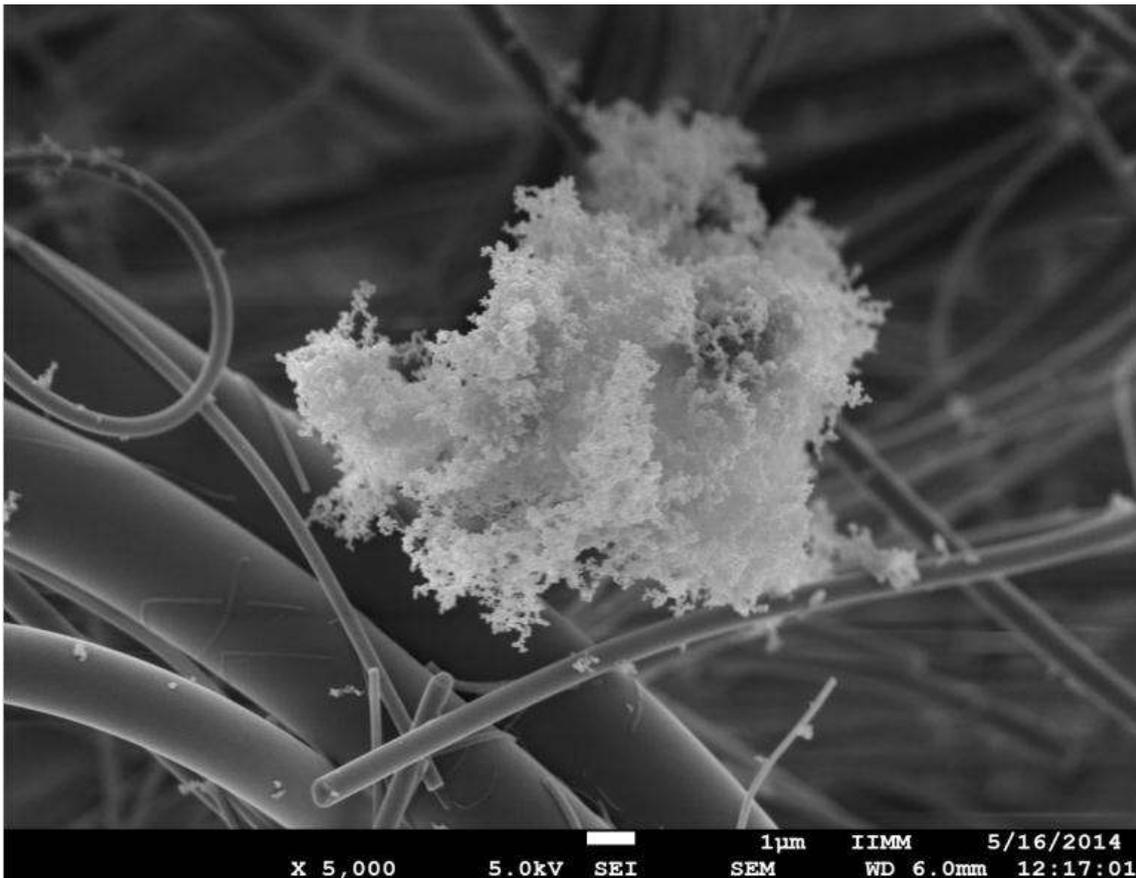
Los aglomerados de hollín desarrollados de pequeños grupos hasta largas cadenas, al estar mojados, cambia la morfología. Perdiendo su aspecto "de pelusa."

---

<sup>19</sup>(Cohen et al., 1996).

<sup>20</sup>(Shi et al., 2003).

Observando el EDS de las partículas de hollín en “Combi” y “Camión” se pueden encontrar C, O, Si y Cu; donde el Si se encuentra en abundancia debido al material de la fibra del filtro que se utilizó, que en este caso fue fibra de Cuarzo; y el Cu es debido a que el microscopio sólo funciona con materiales conductores eléctricos por eso, a las muestras no conductoras se les aplican polvos de Cu.



**Figura 56 (a) Aglomeración de partículas de hollín en el transporte público colectivo “Combi”.**

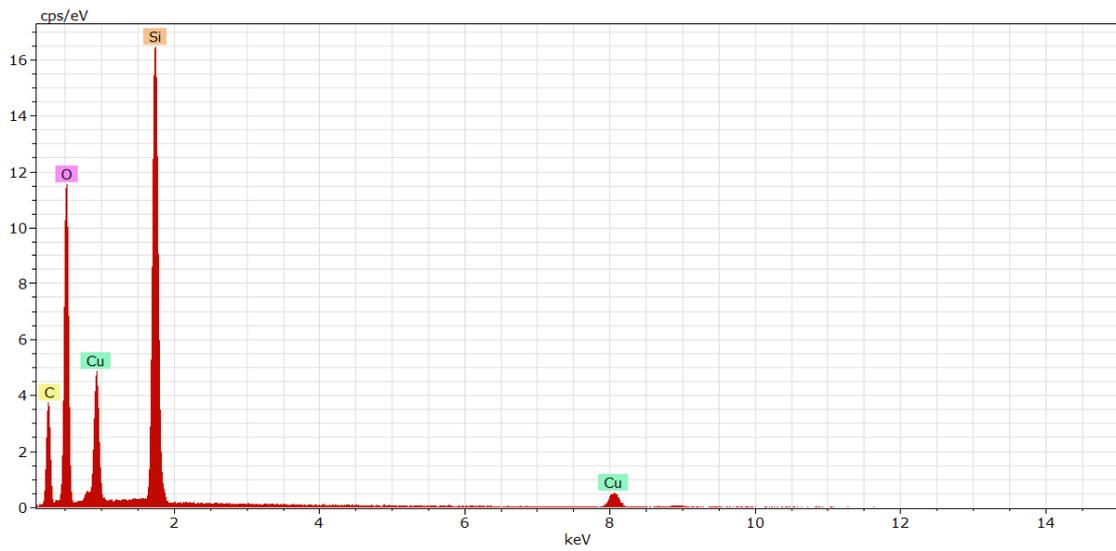


Figura 57 (a)EDS de partícula de hollín del transporte público colectivo “Combi.”

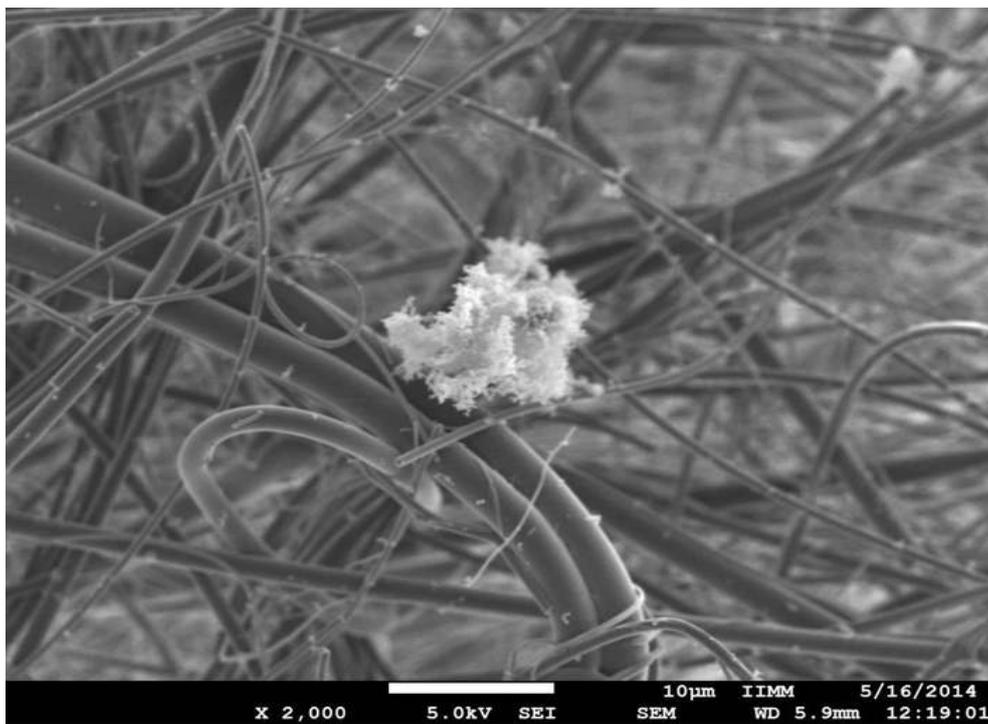


Figura 58 (b) Aglomeración de partículas de hollín en el transporte público colectivo “Combi”.

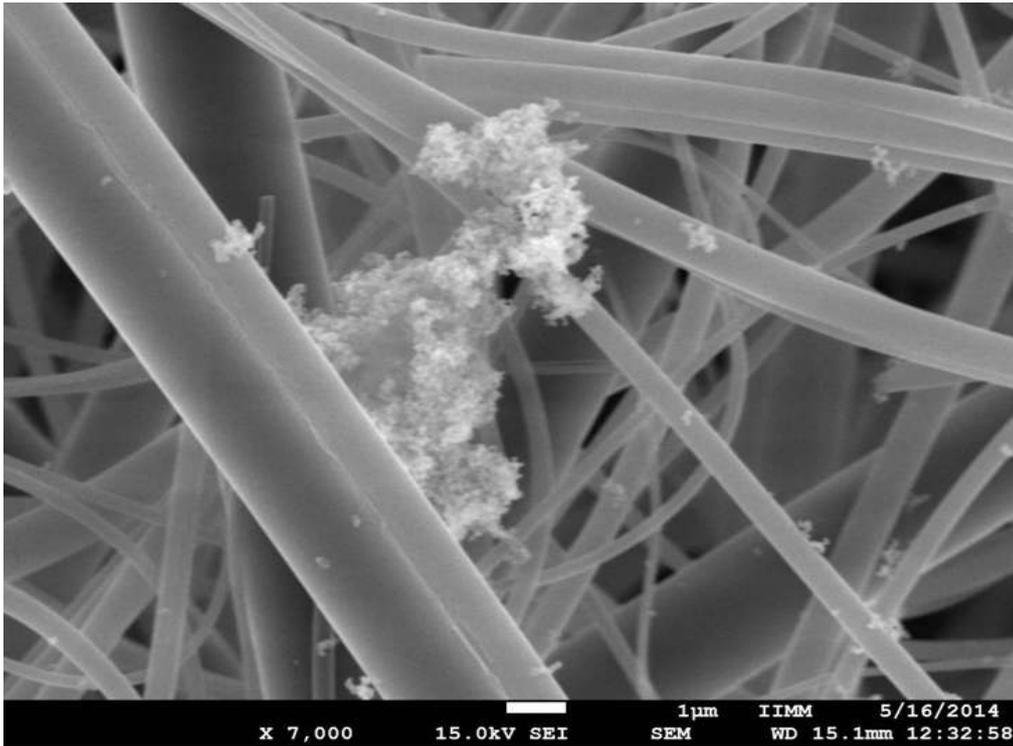


Figura 59 (c) Aglomeración de partículas de hollín en el transporte público colectivo “Combi”.

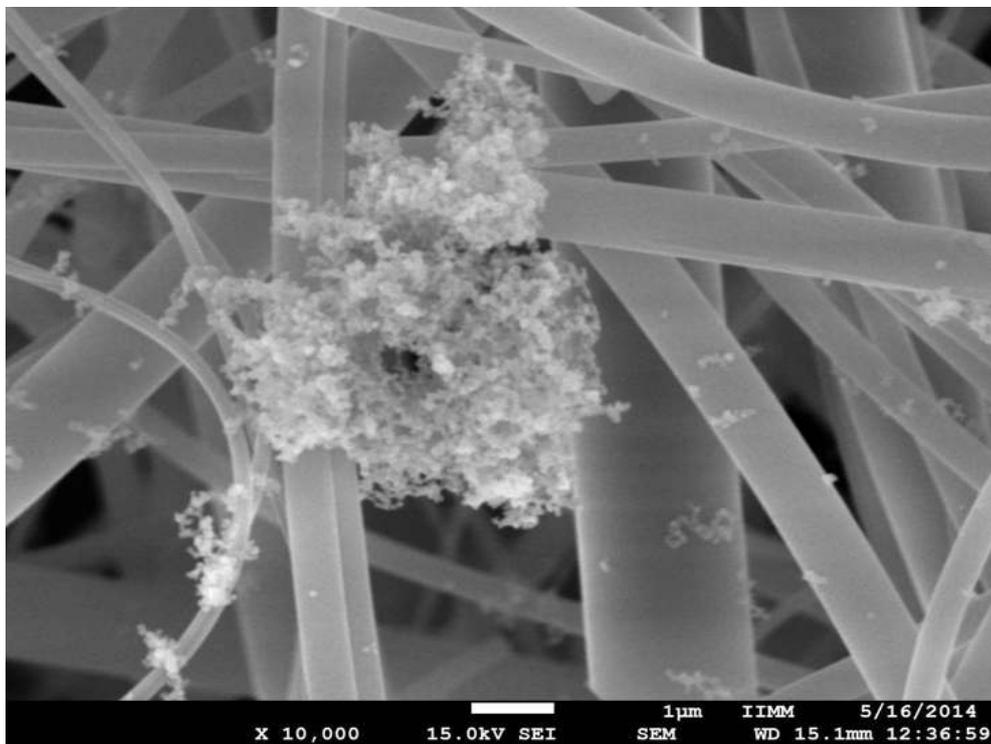


Figura 60 (d) Aglomeración de partículas de hollín en el transporte público colectivo “Combi”.

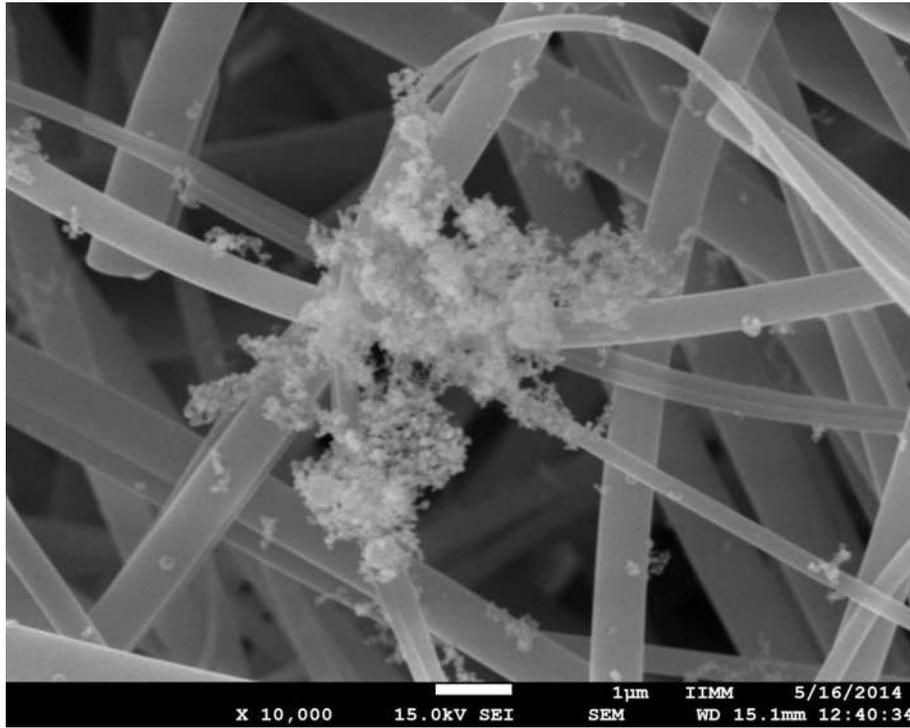


Figura 61 (e) Aglomeración de partículas de hollín en el transporte público colectivo "Combi".

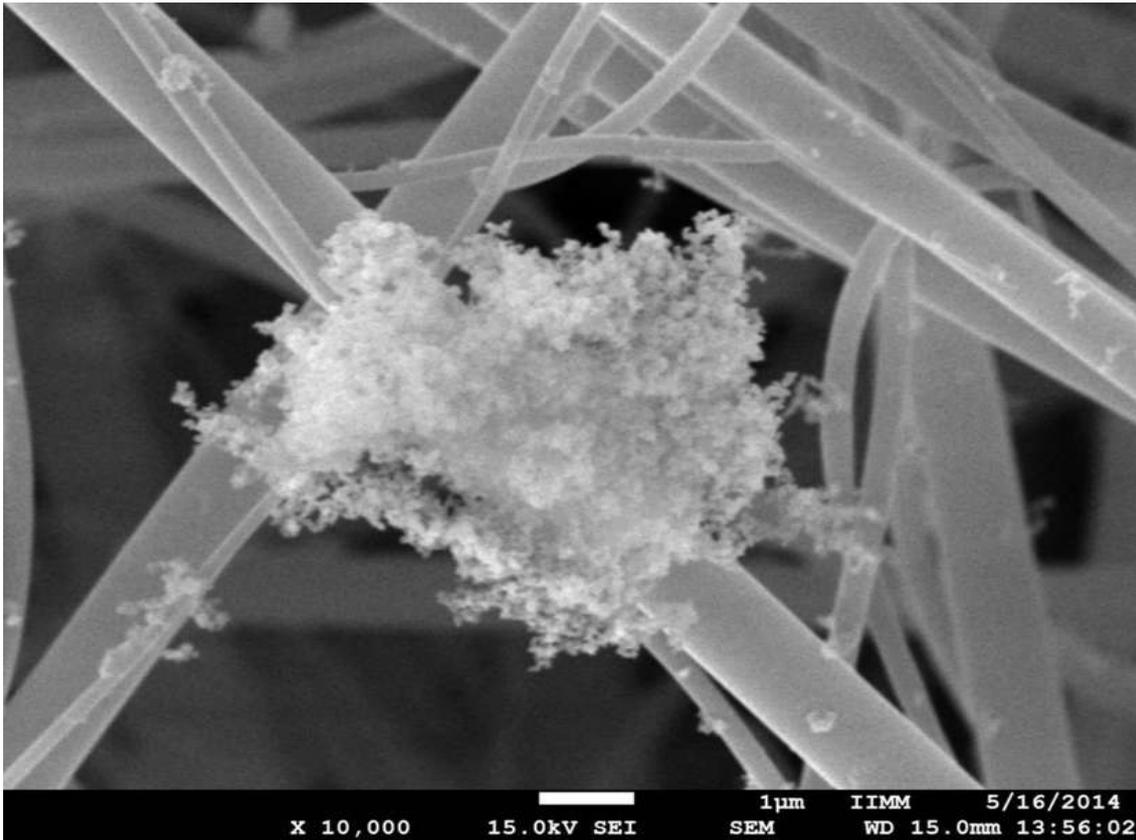


Figura 62 (f). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión”.

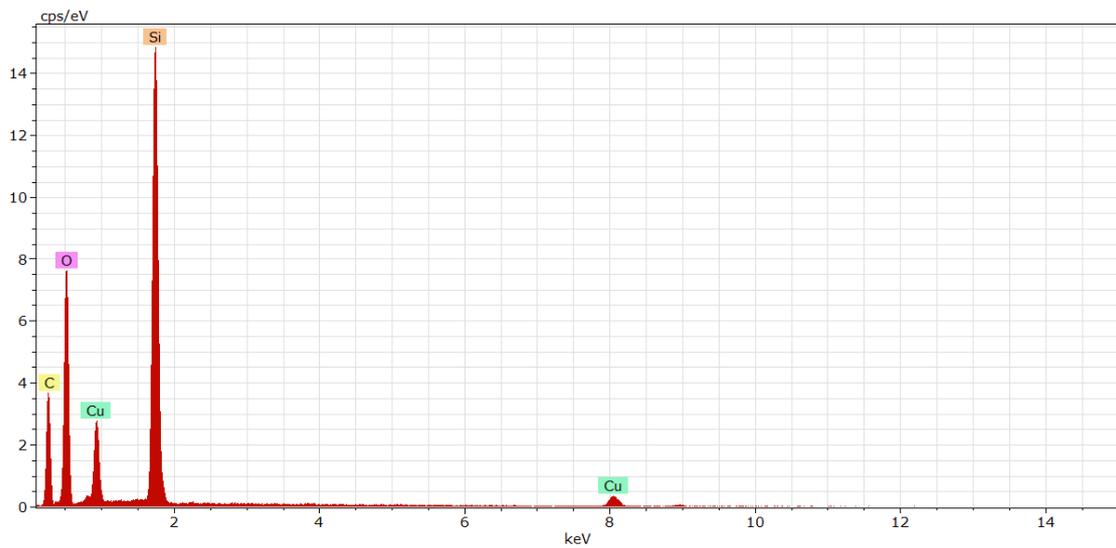


Figura 63 (f). EDS de aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión”.

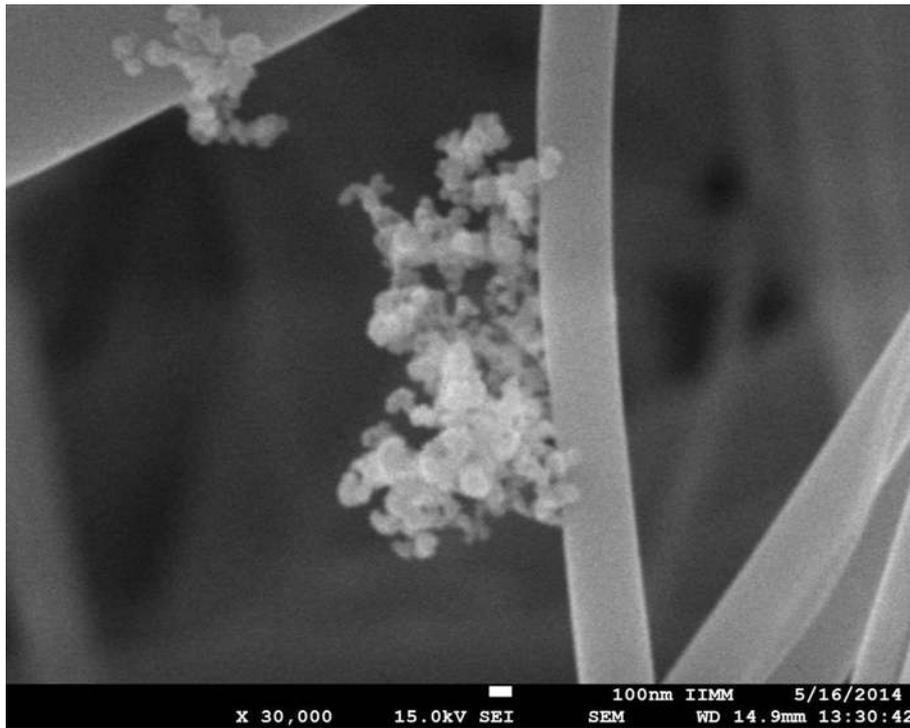


Figura 64 (g). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión”.

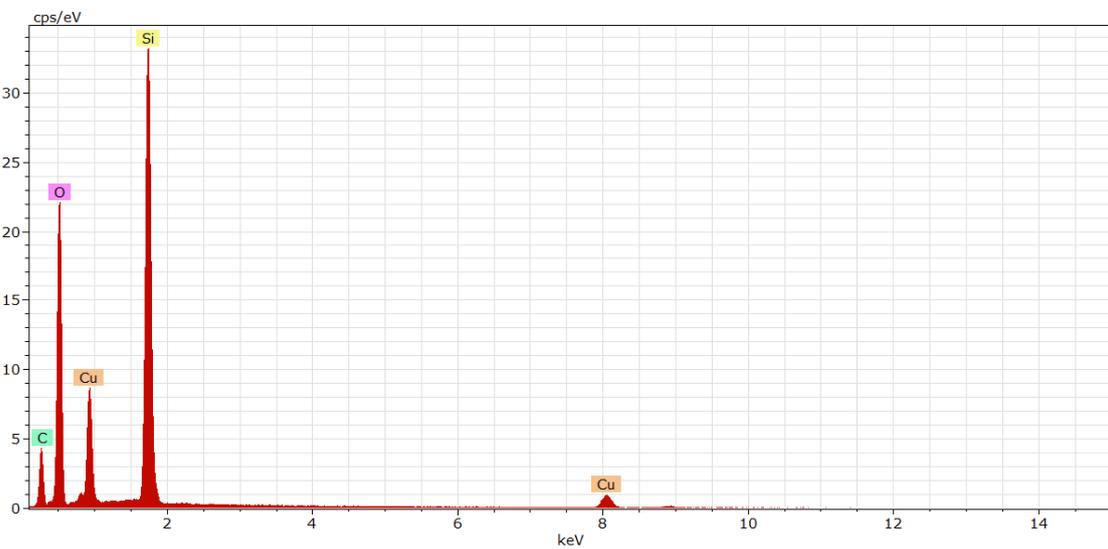
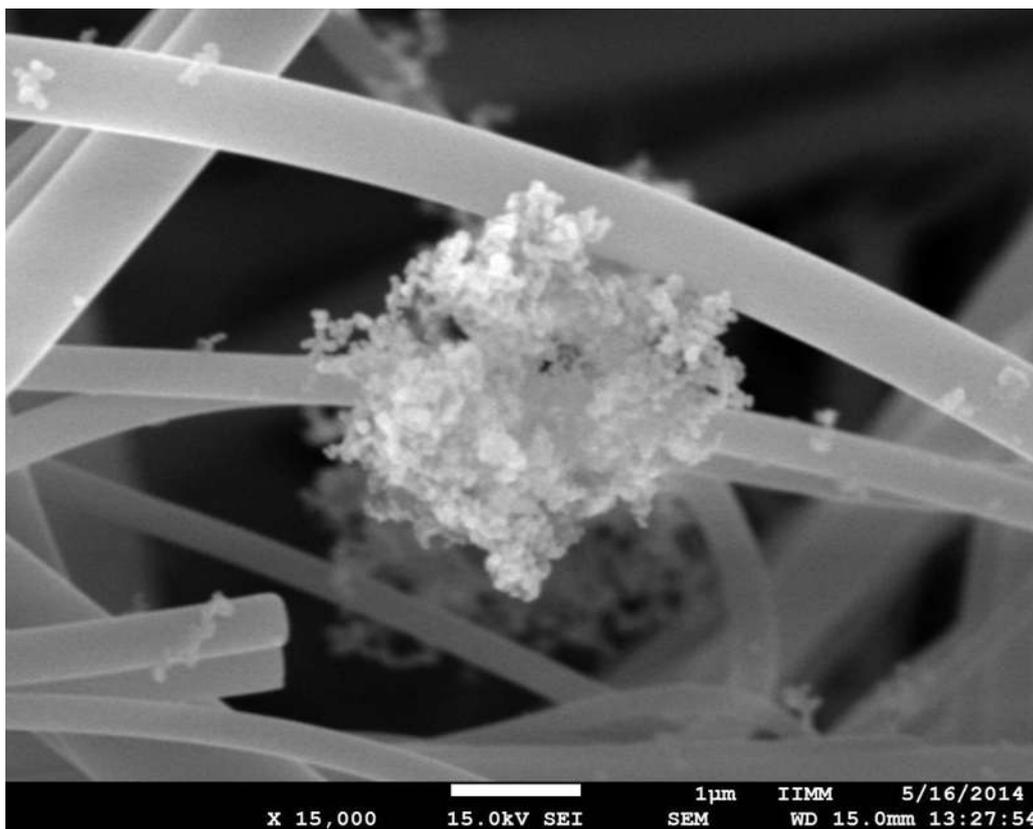


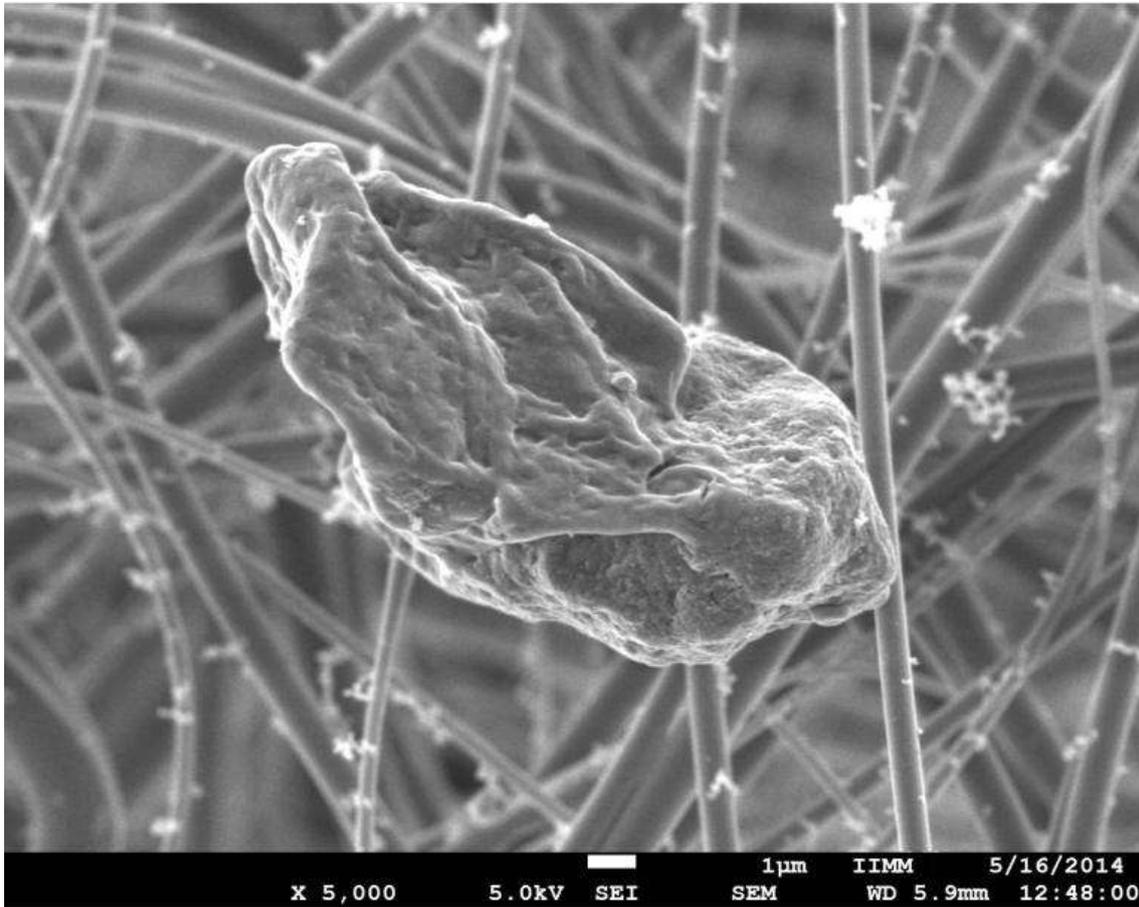
Figura 65 (g). EDS de aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión”.



**Figura 66 (h). Aglomerado de partículas de hollín en el transporte colectivo “Camión”.**

Partículas minerales: Las partículas minerales se derivan principalmente de fuentes naturales como el polvo del suelo y algunas otras actividades antropogénicas tales como la construcción y la combustión del carbón. Las partículas minerales normalmente tienen formas irregulares. En este estudio se encontraron diferentes tipos de partículas minerales con formas y composiciones químicas distintas. Esta clase de partículas fueron observadas en el transporte público colectivo “Combi” y “Camión” de forma irregular. Para el medio de transporte “Combi” véanse las siguientes figuras 67(i), 69(j), 71(k). Que contienen Si, Al, Fe, Ca, Mn, K y otros metales en menor cantidad. Mientras que en el transporte colectivo “Camión” se encontró también material particulado mineral, donde obtuvimos una mayor cantidad de figuras como en las siguientes: Figuras 73(l), 75(m), 77(n), 79(o), 81(p), 83(q), 85(r), 87(s), 89(t), 91(u).

Las formas irregulares en la clasificación mineral también se debe a una reacción secundaria en la atmosfera. <sup>21</sup>



**Figura 67 (i). Partícula mineral de forma irregular en el transporpe colectivo “Combi”**

---

<sup>21</sup>(Shi et al., 2003).

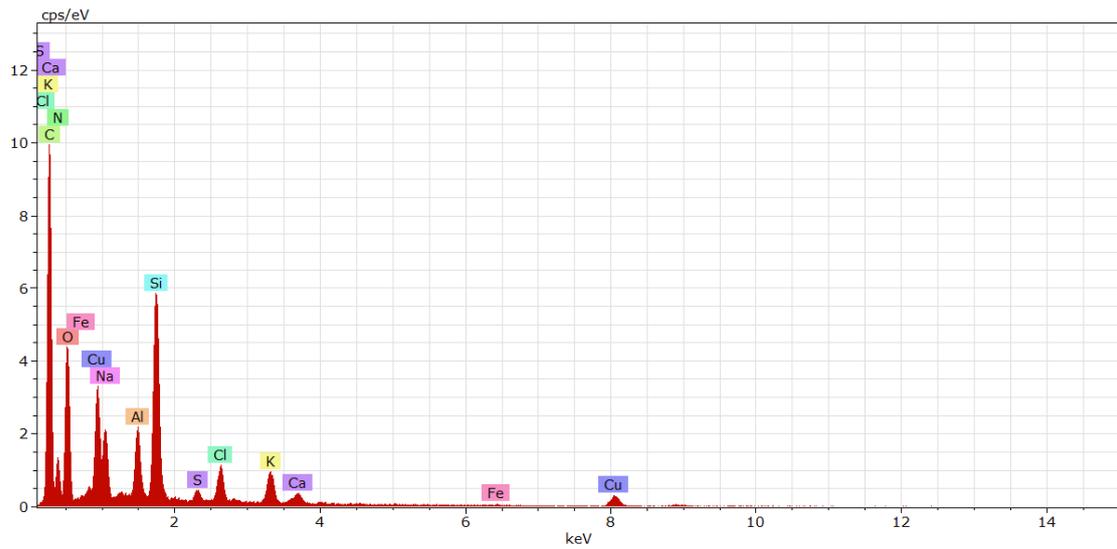


Figura 68 (i). EDS de partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo "Combi".

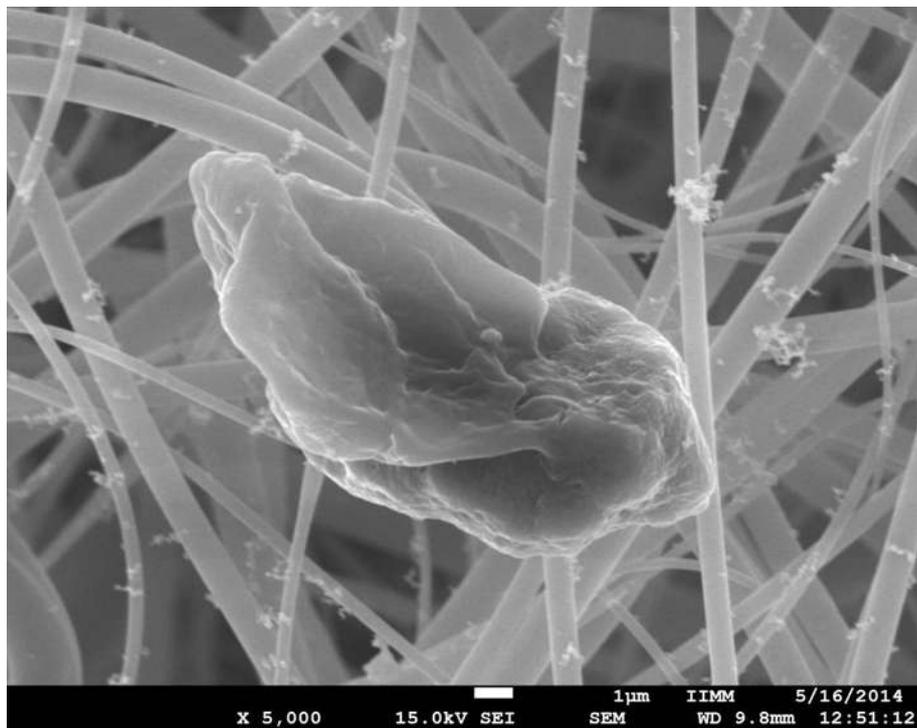


Figura 69 (j). Partícula mineral de forma irregular en el transporpe colectivo "Combi"

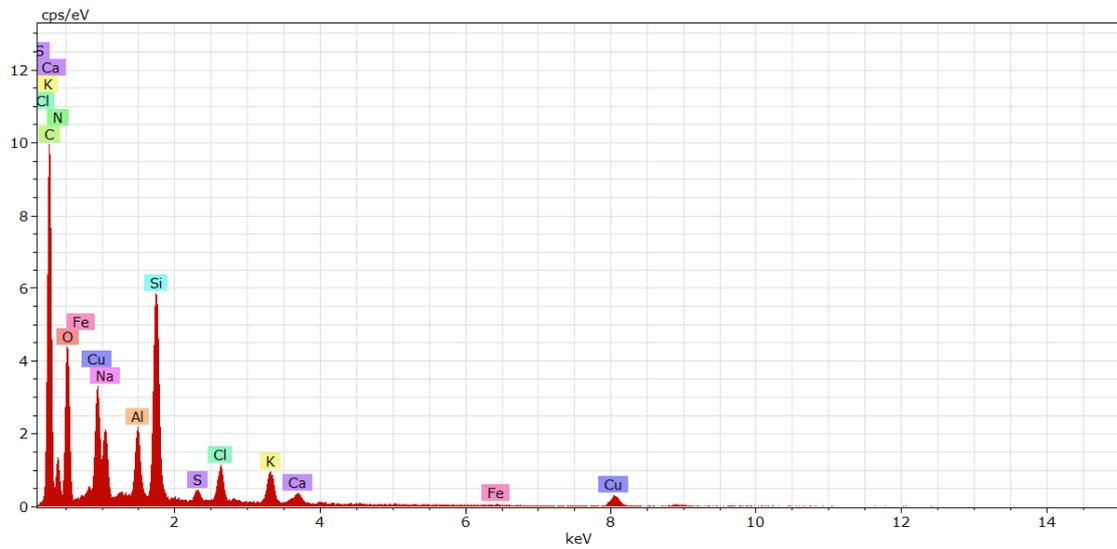


Figura70 (j). EDS de partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo “Combi”.

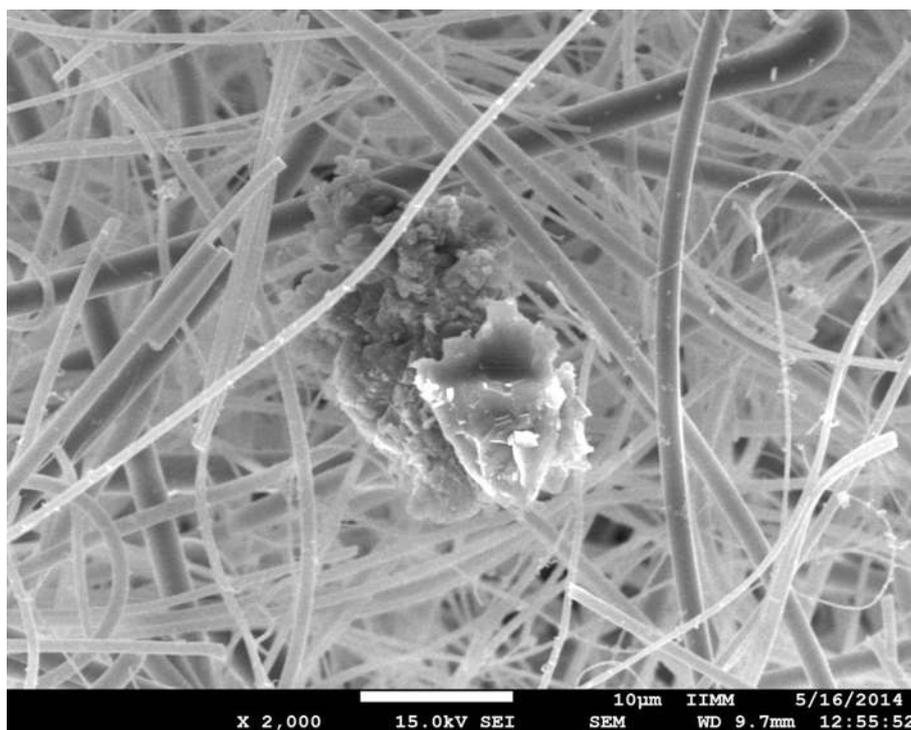


Figura 71 (k). Partícula mineral de forma irregular en el transporpe colectivo “Combi”

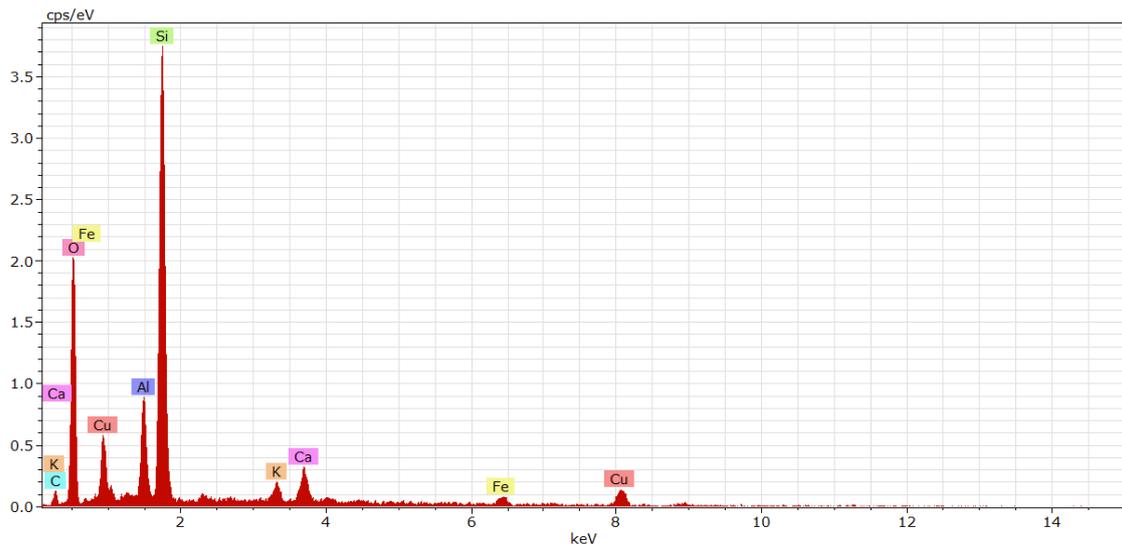


Figura 72 (k). EDS de partícula mineral de forma irregular en el transporte colectivo "Combi".

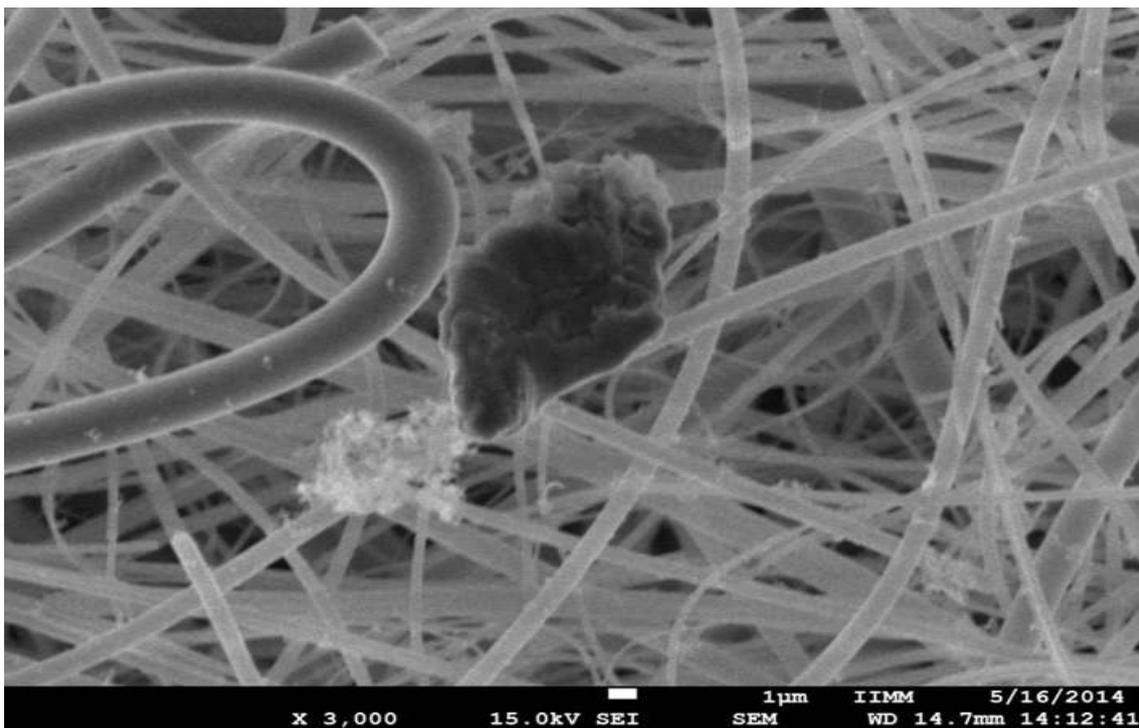


Figura 73 (l). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo "Camión".

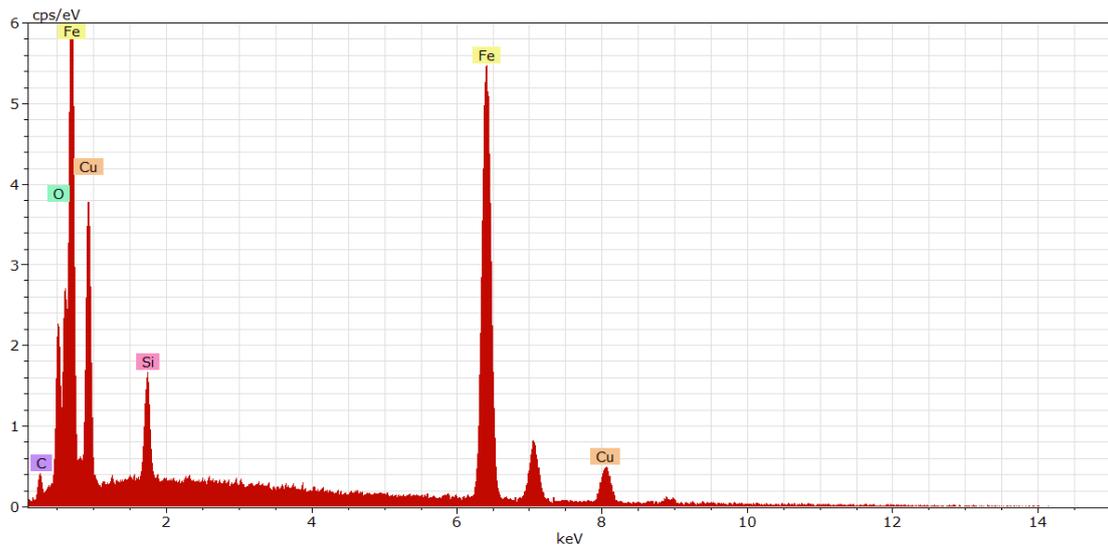


Figura 74 (l). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

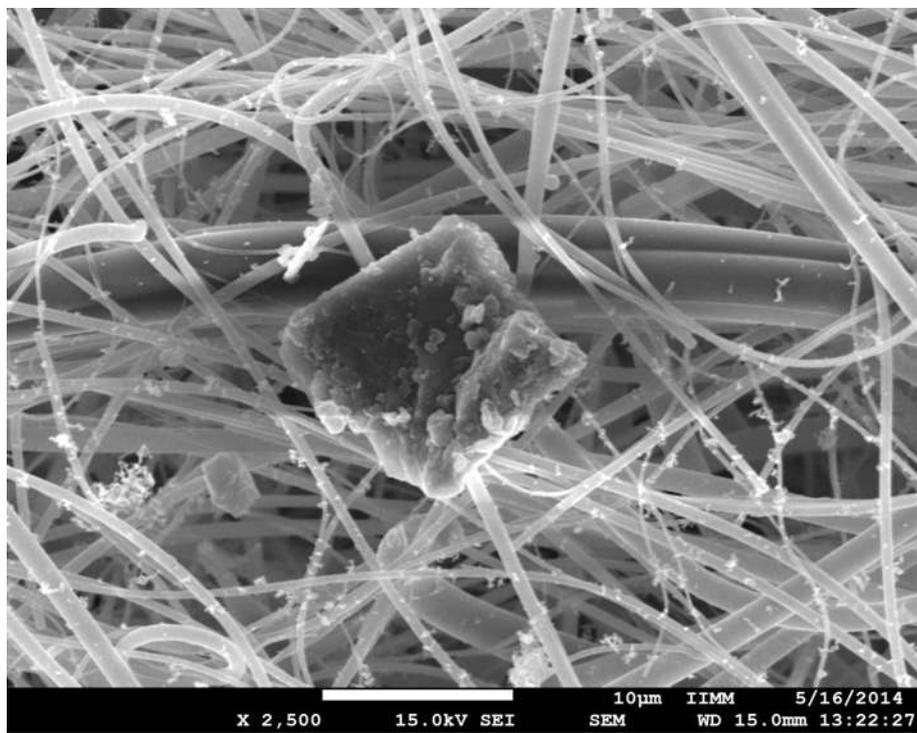


Figura 75 (m). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

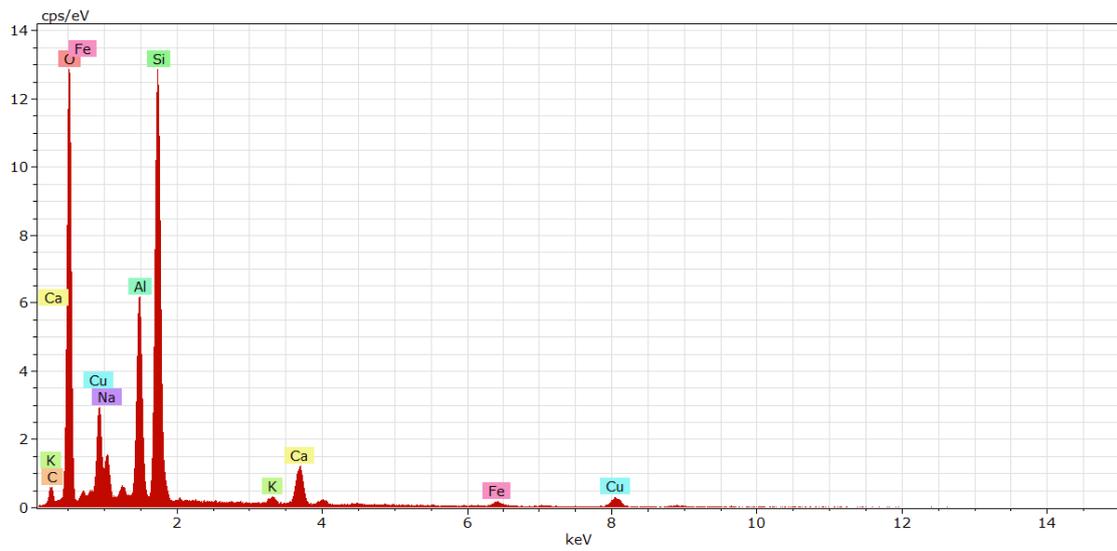


Figura 76 (m). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

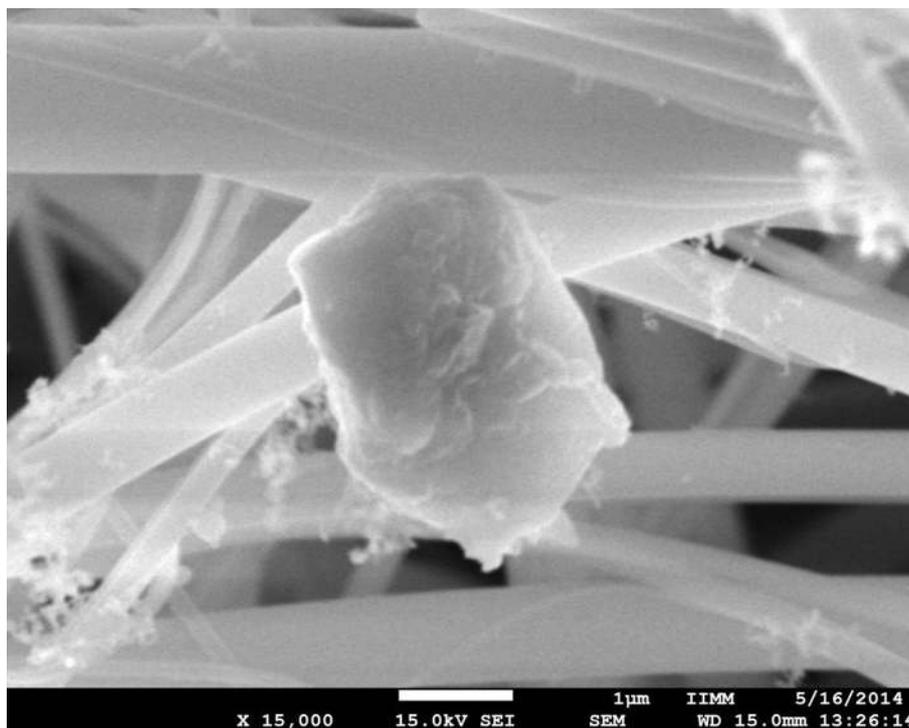


Figura 77 (n). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

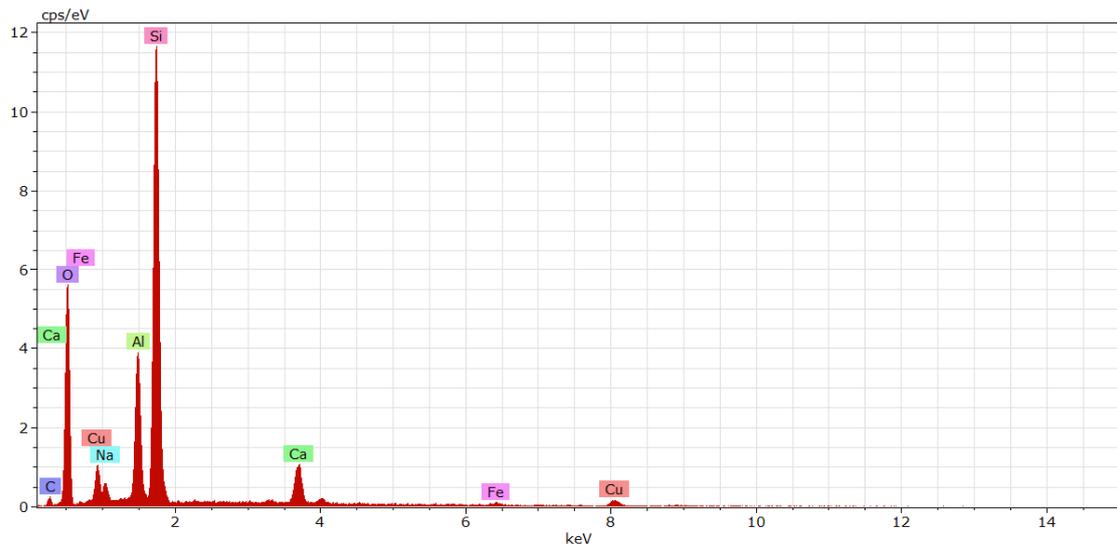


Figura 78 (n). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

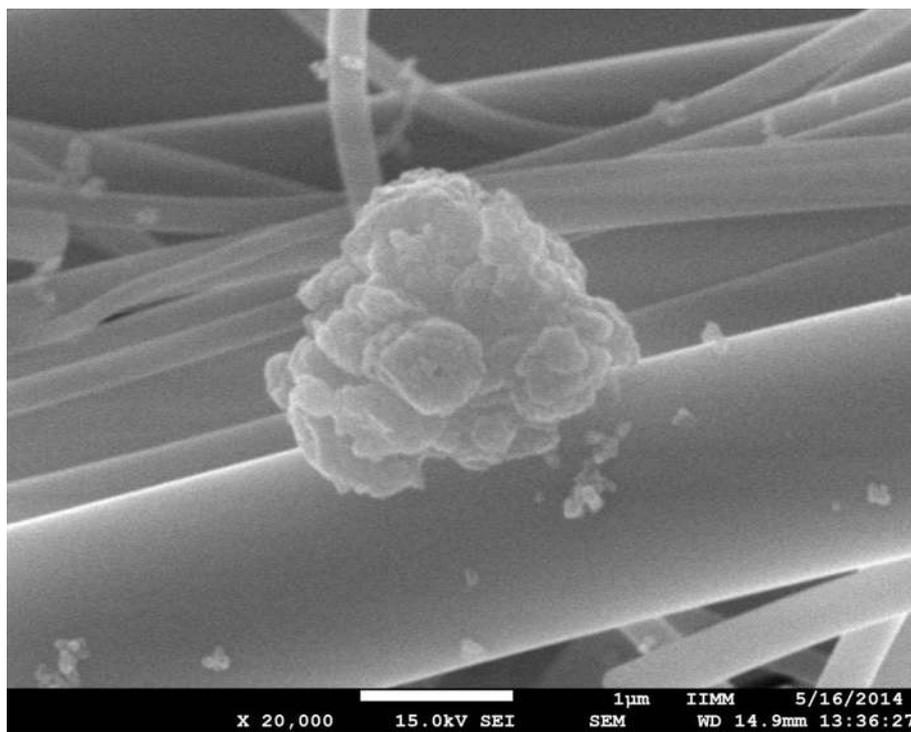


Figura 79 (o). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

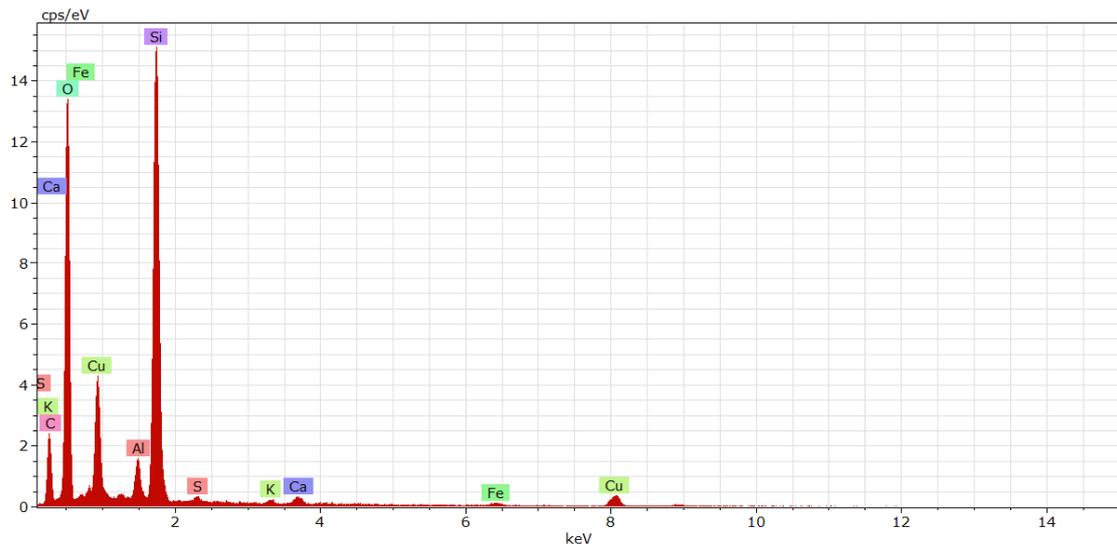


Figura 80 (o). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

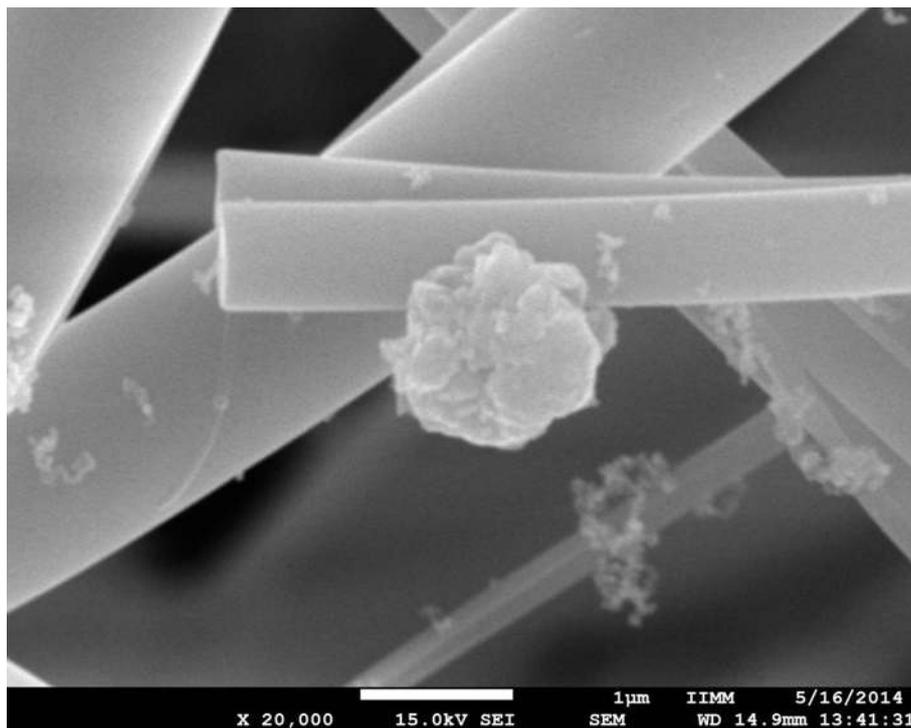


Figura 81 (p). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

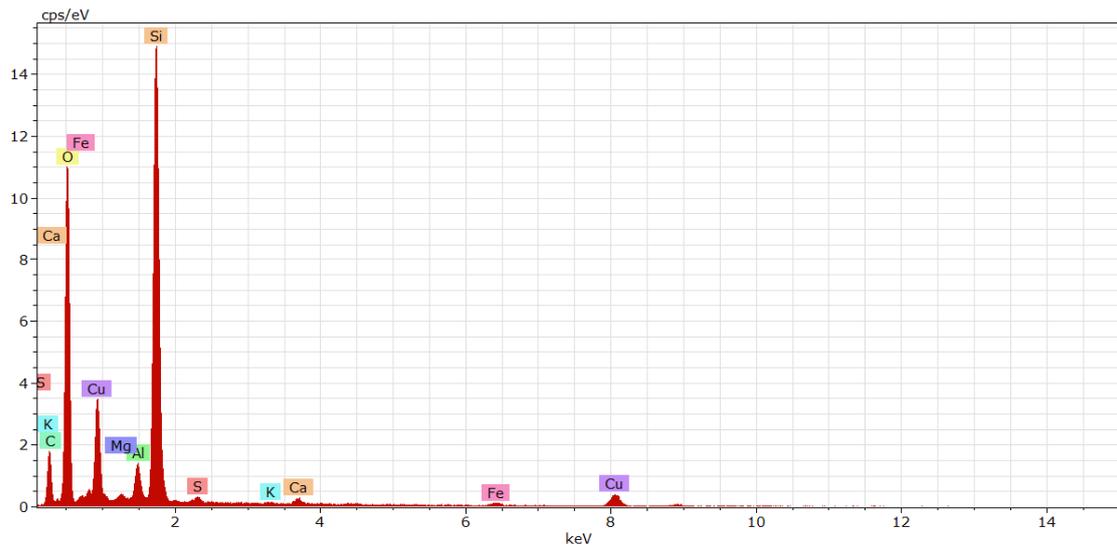


Figura 82 (p). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

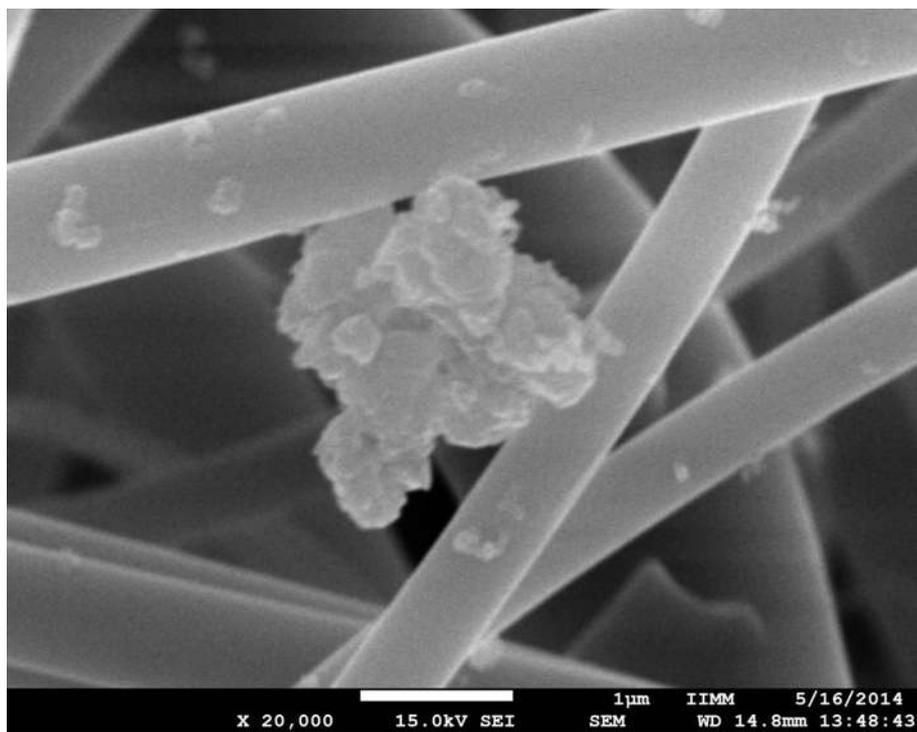


Figura 83 (q). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

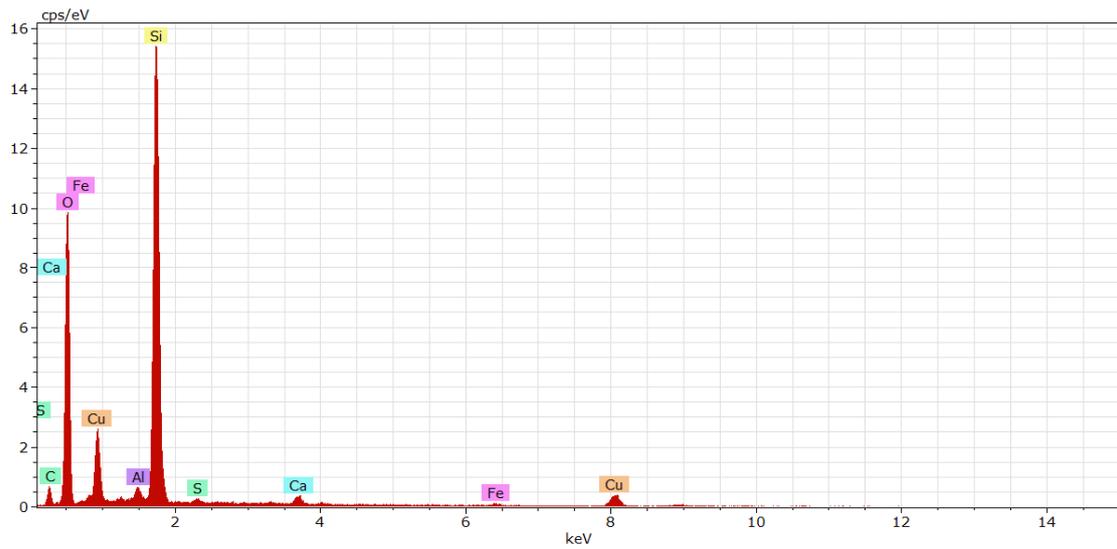


Figura 84 (q). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

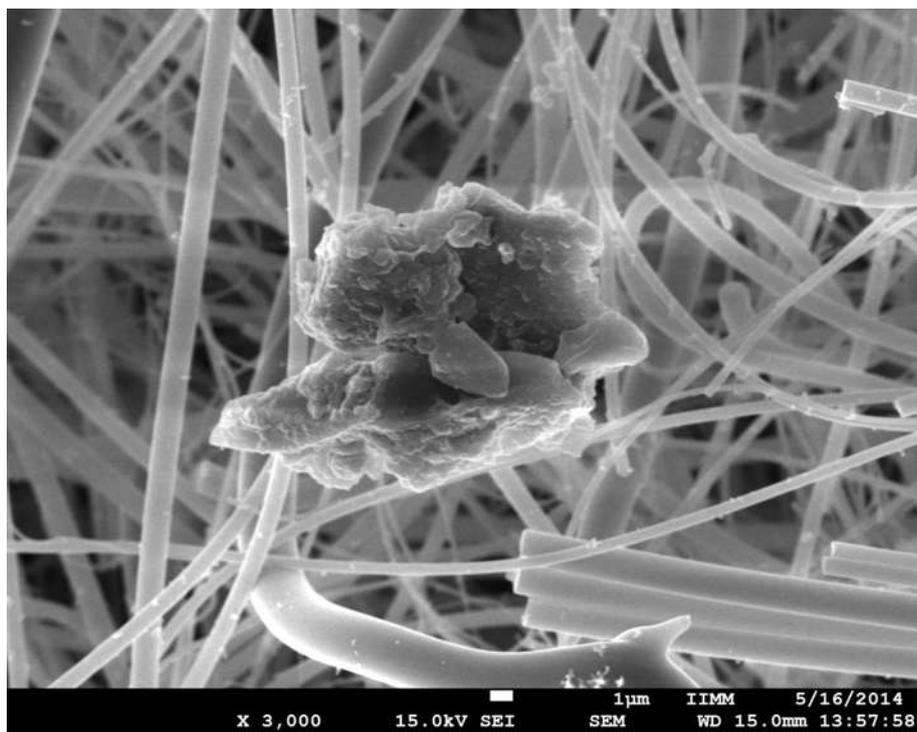


Figura 85 (r). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

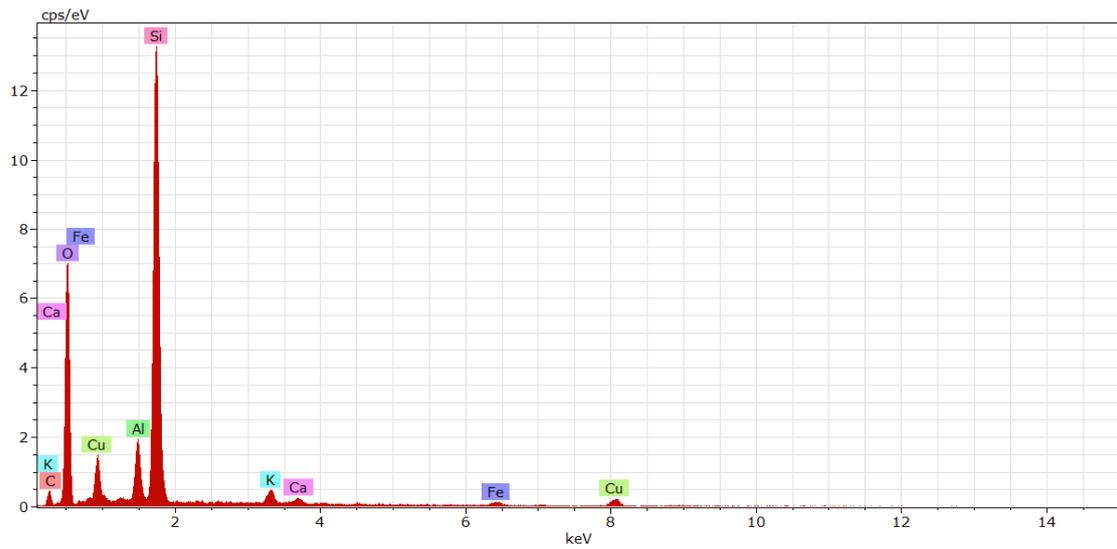


Figura 86 (r). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

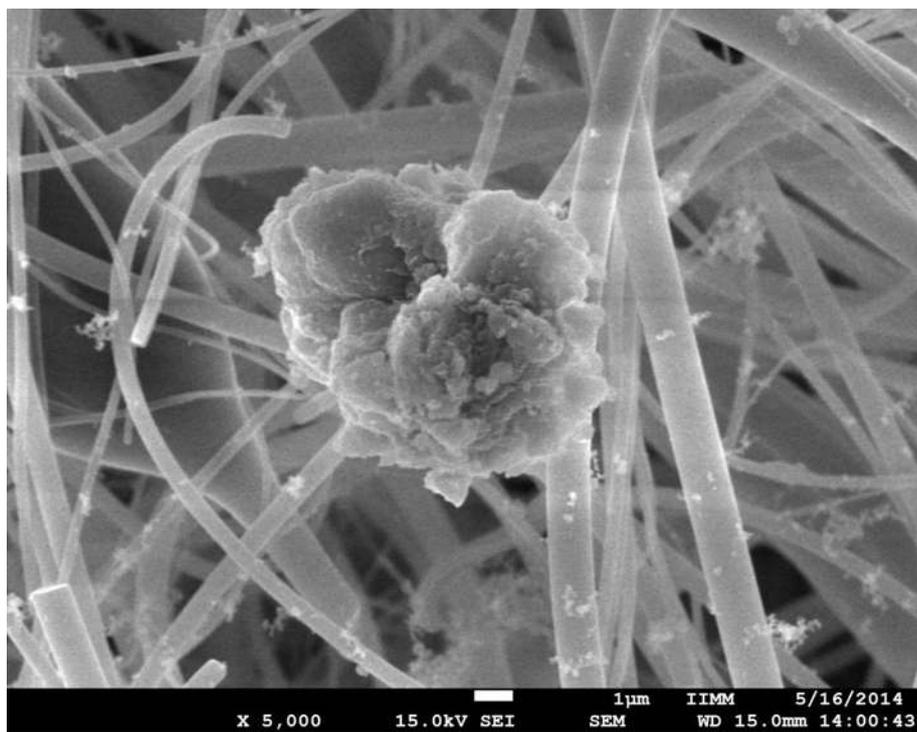


Figura 87 (s). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

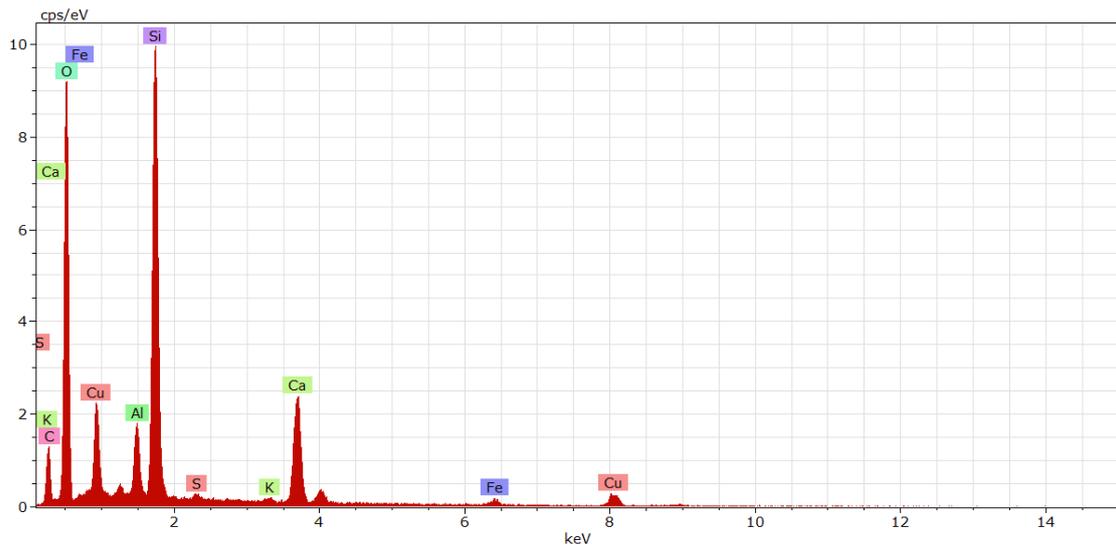


Figura 88 (s). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

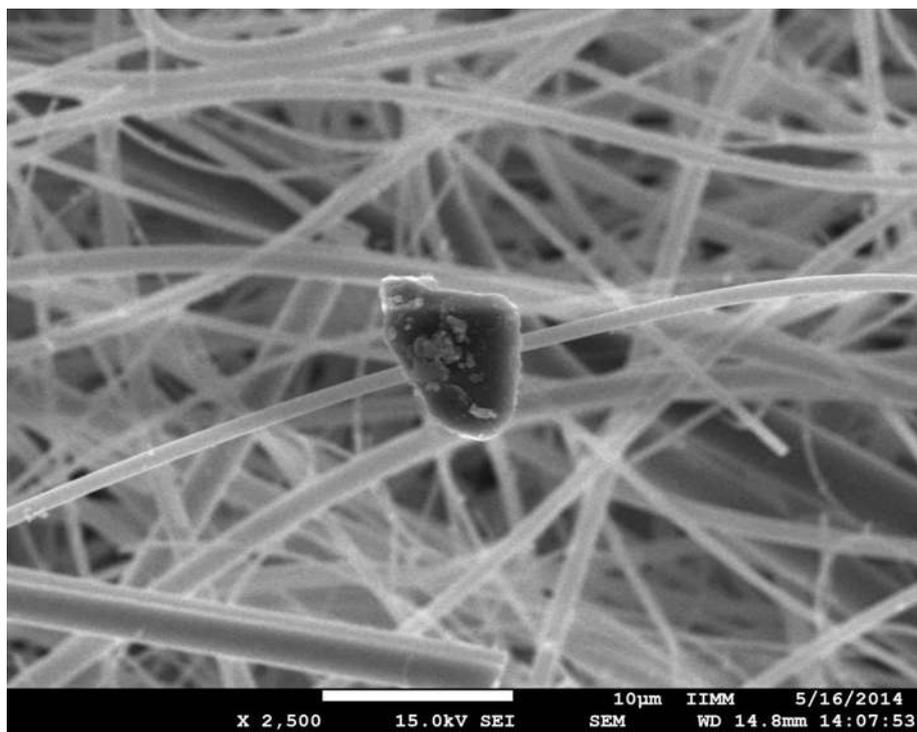


Figura 89 (t). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

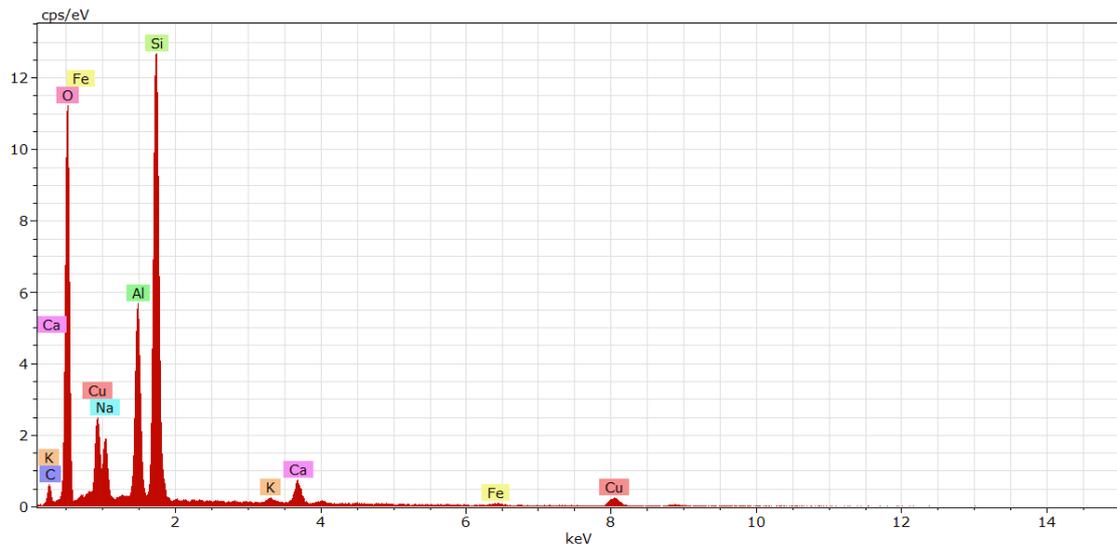


Figura 90 (t). EDS de partícula irregular mineral en el transporte colectivo “Camión”.

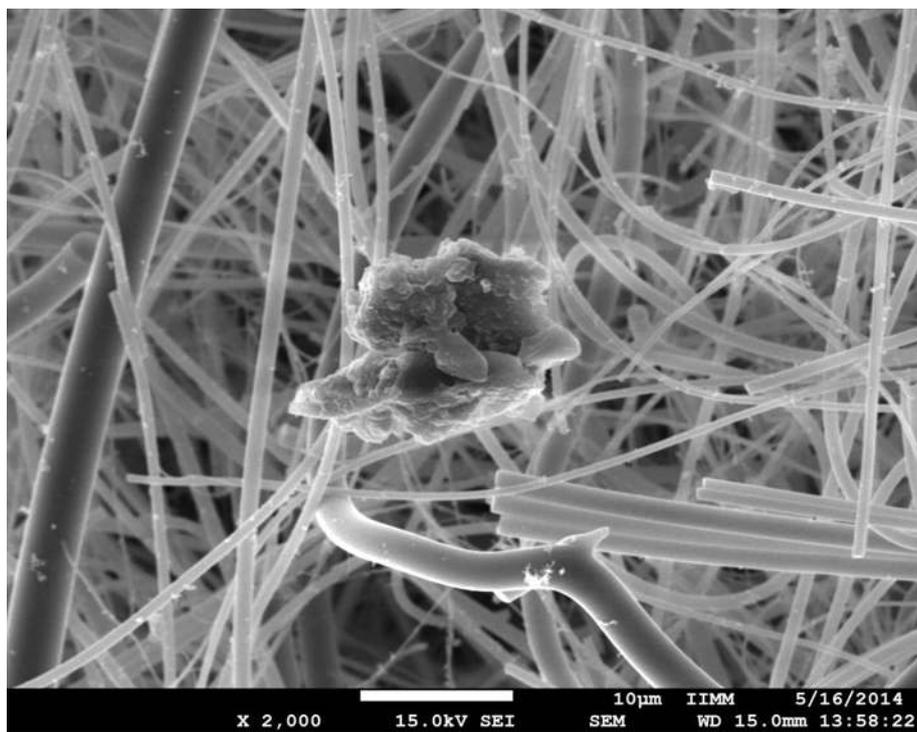


Figura 91 (u). Partícula irregular de origen mineral en el transporte colectivo “Camión”.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La hipótesis se cumple ya que la distribución del tamaño de partículas con diámetro aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$ , en el interior de los transportes públicos “Combi” y “Camión”, presenta una mayor concentración de número de partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ ; esta distribución es observada con respecto a la hora, al día y a la zona de medición.

La distribución de tamaño de partícula en el transporte colectivo “Camión” presenta en general un 5.56 % mayor concentración de número de partículas en comparación con el transporte colectivo “Combi”, esto puede deberse al tipo de combustible que usan, ya que el transporte público colectivo “Camión” utiliza diésel mientras que el transporte colectivo “Combi” usa gasolina.

Los niveles de mayor concentración de número de partículas estuvieron presentes en el horario de 7:00 a 8:00 horas, esto en comparación con los valores obtenidos con el resto de los horarios de medición; esta tendencia se presentó en ambos vehículos de transporte colectivo, “Combi” y “Camión”. La razón de que este horario presente el nivel más alto de número de partículas se atribuye al tráfico vehicular, ya que la fuente principal de emisiones de material particulado son los vehículos automotores.

De acuerdo a la zona de medición, las zonas que presentaron mayor número de partículas fueron “Refresquera Pepsi” y “Tienda de autoservicio Office Depot”; en donde en la parada “Refresquera Pepsi” se observó en general para todos los tamaños de partículas un 14.72 % mayor número de partículas en el transporte colectivo “Camión” que en el transporte colectivo “Combi”, y para la zona de medición “Tienda de autoservicio Office Depot” presentó un 0.48 % mayor cantidad de número de partículas en el transporte colectivo “Combi” con respecto al transporte colectivo “Camión”. Y de acuerdo a la distribución de tamaño de partícula respecto a su superficie y a su volumen también presentaron los valores más altos en estas paradas. La zona poniente donde se encuentra ubicada la parada “Refresquera Pepsi” es una de las vías transitadas por una gran cantidad de tráfico pesado lo cual podría ser la razón de la mayor concentración de número de partículas en esta zona, y en cuanto a

la zona oriente en donde está la parada "Office Depot", este tramo vehicular estuvo en procesos de repavimentación habiendo una gran cantidad de polvo procedente de esa parte en particular lo cual también explicaría los altos niveles de número de partícula.

La morfología de las partículas se relaciona en alto porcentaje entre partículas de hollín y mineral. Cumpliendo con sus respectivas características y composición que corresponden a una ciudad en desarrollo como la es Morelia y una avenida transitada como el Periférico. Encontrando una gran semejanza con otras investigaciones realizadas en Francia, Estados Unidos, Japón, Serbia y China. Donde se encontraron el mismo tipo de partículas en sus ciudades en desarrollo y avenidas transitadas.

No queda más que buscar alternativas para poder disminuir el tránsito de automóviles en la ciudad. Hacer consciente a la población en general y al gobierno correspondiente para que tome medidas de acción en beneficio de la población.

## 6 BIBLIOGRAFÍA.

1. García, E. M. (2013). Caracterización de material particulado atmosférico generado en reactores fotoquímicos y procedente en muestras ambientales. 292.
2. Gobierno del estado de Michoacan, S. d. (2008). Inventario de emisiones contaminantes a la atmosfera y cinco municipios.
3. Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Ciudad de México: Pretince Hall. 142-144
4. Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. (s.f.). (pág. 377). Ciudad de México: SyG Editores.
5. Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Aravaca, Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA. 453-470.
6. L.Y. Chan\*, W. L. (2002). *Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong*.
7. Lozada, H. M. (2006). *Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión: Estudio de caso: Bogota*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
8. Moffet, R. C., Desyaterik, Y., Hopkins, R. J., Tivanski, A. V., & Gilles, M. K. (2008). *Characterization of Aerosols Containing Zn, Pb, and Cl from an Industrial Region of Mexico City*.
9. Sbarato, V., & al., e. (s.f.). *Análisis y Caracterización del Material Particulado*. Ciudad de Cordoba, Argentina.
10. Seinfeld, J. H. (1986). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Pasadena: John Wiley & Sons. 23-31, 275-289.
11. Tasić, M., Đurić-Stanojević, B., Rajšić, S., Mijić, Z., & Novakovic, V. (2005). *Physico-Chemical Characterization of PM10 and PM2.5 in the Belgrade Urban Area*.
12. Yifang, Z., & Hinds, W. C. (2002). *Concentration and Size Distribution of Ultrafine Particles Near a Major Highway*.
13. Kenneth Wark, Cecil F. Warner (2008). *Contaminación del aire*. Ciudad de México: LIMUSA. 28-39, 193-218.

14. McKinney M. L., Schoch R. M (2003). *Environmental Science, Systems and Solutions*. Sudbury, Massachusetts: Jones & Bartlett Publishers. 386-392.
15. Hardoy J. E., Mitlin D., Stterthwaite (2001). *Environmental Problems in an Urbanizing World*. London, UK: EARTHSCAN. 274-280.
16. [http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_electr%C3%B3nico\\_de\\_barrido](http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido).
17. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932004000200007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932004000200007).
18. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/422/particulas.html>.
19. <http://www.michoacan.gob.mx/index.php/agricultura-naturaleza-y-medio-ambiente/121-calidad-del-aire>.
20. Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing, 2001.  
Zongbo Shi, Longyi Shao, T.P. Jones, A.G. Whittaker, Senlin Lu, K.A. Berube.
21. Maldern HV, Hoornaert S, Injuk J, Przybylowicz WJ, Pineda CA, Prozesky VM, et al. Individual particle characterization of Siberian aerosols by micro-PIXE and backscattering spectrometry. *X-ray Spectrom* 2001;30:320–9.
22. Cohen DD, Bailey GM, Kondepudi R. Elemental analysis by PIXE and other IBA techniques and their application to source fingerprinting of atmospheric fine particle pollution. *Nucl Instrum Methods Phys Res B Beam Interact Mater Atoms* 1996;109/ 110:218–26.
23. Samara, Constantini , Voutsas, Demetra (2005), Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment, *Chemosphere*, 59:1197-1206.
24. Samet, JM, Dominici F., Zeger, SL, Schwartz, J, Dockery, DW, (2000), The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part I.
25. Molina, Mario J. & Molina, Luisa T. (2004), Megacities and Atmospheric Pollution, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54:6, 644-680.
26. Mirjana Tasic, Branislava Duric-Stanojevic, Slavica Rajsic, Zoran Mijic, Velibor Novakovic. (2005), Phyco-Chemical Characterization of PM10 and PM2.5 in the Belgrade Urban Area, 53, 401-405.

27. Weisheng Yue, Xiaolin Li, Jiangfeng Liu, Yan Li, Xiaohan Yu, Biao Deng, Tianmin Wan, Guilin Zhang, Yuying Huang, Wei He, Wei Hua, Longyi Shao, Weijun Li, Shushen Yang. (2006), Characterization of PM2.5 in the ambient air of Shanghai city by analyzing individual particles, 916-925.
28. <http://almez.pntic.mec.es/~jrem0000/dpbg/1bch/tema1/micros-barr.JPG>
29. <http://ssyf.ua.es/es/formacion/documentos/cursos-programados/2012/especifica/tecnicas-instrumentales-en-el-analisis-de-superficie/26-noviembre-tecnicas-de-analisis-quimico-superficies.pdf>