

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

LICENCIATURA EN GEOQUÍMICA

PROYECTO GEOQUÍMICO II



**Caracterización química y morfológica a través de Microscopía Electrónica de partículas totales suspendidas (PTS) captadas en dos zonas del eje Charallave-Ocumare, Edo. Miranda.**

**Trabajo Especial de Grado presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela por el Br. Abraham Gregorio Burgos García como requisito de la materia Proyecto Geoquímico II y optar al Título de Licenciado en Geoquímica.**

CARACAS, OCTUBRE DE 2017.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

LICENCIATURA EN GEOQUÍMICA

PROYECTO GEOQUÍMICO II



**Caracterización química y morfológica a través de Microscopía Electrónica de partículas totales suspendidas (PTS) captadas en dos zonas del eje Charallave-Ocumare, Edo. Miranda.**

TUTORES:

PROF. BARRIOS CARLOS

PROF.<sup>a</sup> URBINA CARIBAY

PRESENTADO POR:

BR. BURGOS ABRAHAM

CARACAS, OCTUBRE DE 2017.



## ACTA

---

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA A TRAVÉS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE PARTÍCULAS TOTALES SUSPENDIDAS (PTS) EN MUESTRAS CAPTADAS EN DOS ZONAS DEL EJE CHARALLAVE-OCUMARE, EDO. MIRANDA." presentado por el Br. Abraham Gregorio Burgos García, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por esta Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciado en Geoquímica.

Prof. Caribay Urbina  
Tutora

Prof. Carlos Barrios  
Tutor

Prof. Williams Meléndez  
Jurado

Prof. Adolfo Girón  
Jurado

Caracas, octubre de 2017.



*A MI MADRE, HERMANOS Y ABUELOS;  
MI AMADA FAMILIA.  
TODO LO HAGO POR UDS.*



## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, tengo que agradecer a mi alma máter, la casa que vence las sombras, la ilustre Universidad Central de Venezuela, quien me abrió las puertas y me permitió formar parte de esta gran casa de estudios. Es un verdadero honor y estaré eternamente agradecido por la oportunidad, vivencias y aprendizajes.

Agradezco también a la Facultad de Ciencias, al ICT y a todos los profesores que formaron parte de mi educación y crecimiento, tanto personal como profesional.

De igual forma, expreso mi más sincero agradecimiento a mis tutores, los profesores Carlos Barrios y Caribay Urbina, quienes me permitieron realizar este trabajo junto a ellos, así como por todo el apoyo, comprensión y esfuerzo realizado para llevar a cabo este proyecto en tan corto tiempo. Se les aprecia y admira.

Del mismo modo, tengo palabras de agradecimiento para el Centro de Microscopía Electrónica “Dr. Mitsuo Ogura” y al Lic. Luis Errico, por la realización de los análisis y por prestar mucho más del tiempo estipulado para la ejecución de los mismos.

A la Fundación Instituto de Ingeniería por prestar los equipos de muestreo, así como a los trabajadores y directiva del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare, por permitirnos instalar el equipo de monitoreo y estar pendientes del mismo. Igualmente, al Sr. José y a la Sra. Zoraida, quienes prestaron su hogar para la instalación del equipo, y estuvieron prestando su apoyo durante todo el muestreo; encendiéndolo, apagándolo y registrando las irregularidades.

Agradezco a mis grandes amigos, que de alguna manera u otra han estado presentes durante los buenos momentos y los no tan buenos.

Por último, y de forma muy especial, agradezco a mis padres, mis abuelos y a toda mi familia, por tanta atención, cariño, enseñanzas y por todo el apoyo incondicional. No me alcanzan las palabras para agradecerles y expresarles cuanto los quiero.

*Gracias a todos...*



## RESUMEN

---

En el presente proyecto de investigación se caracterizaron partículas totales suspendidas (PTS) en función de su morfología y composición elemental, a través de Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía Dispersiva de Energía de Rayos X (SEM-EDX), en veinte (20) muestras colectadas con muestreadores de alto volumen, en filtros de fibra de vidrio, en dos zonas del eje Charallave-Ocumare del estado Miranda, específicamente en el sector Pitahaya y el Aeropuerto Metropolitano.

Se determinó que las diferentes morfologías y sus composiciones asociadas pueden ser características de los diferentes procesos de formación, según el origen con el que estén relacionados, como es el caso de las partículas esféricas y cenósferas, ambas características de la combustión.

Así mismo, se encontró que las partículas totales suspendidas que contribuyen en los puntos de muestreo, son de origen natural y antrópicos, provenientes de aerosoles marinos, la corteza terrestre, industrias, quema de desechos y biomasa, avionetas, automóviles y la vegetación.

De igual forma, se comprobó que las emisiones industriales tienen una gran influencia en la calidad del aire, ya que en la estación de Pitahaya-Charallave, ubicada en una zona industrial, las concentraciones de PTS estuvieron considerablemente por encima de las concentraciones encontradas en el aeropuerto, con una media geométrica de  $72 \mu\text{m}/\text{m}^3$  y  $51 \mu\text{m}/\text{m}^3$  respectivamente.

**Palabras clave:** Partículas atmosféricas, PTS, contaminación, atmósfera, morfología, composición elemental, microscopía electrónica, SEM, EDX, Charallave, Ocumare.



## ÍNDICE GENERAL

---

<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE APÉNDICE</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>18</b>
<b>IUSTIFICACIÓN</b>	<b>19</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>20</b>
<b>BASES TEÓRICAS</b>	<b>20</b>
ATMÓSFERA	20
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	21
MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO	21
CLASIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO	22
SEGÚN SU ORIGEN	22
SEGÚN SU PROCESO DE FORMACIÓN	24
SEGÚN SU DIÁMETRO AERODINÁMICO	26
CLASIFICACIÓN MODAL POR DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO	28
SEGÚN SU COMPOSICIÓN	34
MORFOLOGÍA DEL MATERIAL PARTICULADO SUSPENDIDO	40
EFECTOS SOBRE LA SALUD	45
EFECTOS SOBRE EL CLIMA	46
EFECTOS SOBRE ECOSISTEMAS	47
LEGISLACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN VENEZUELA	48
<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>51</b>



<b>ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>58</b>
<b>GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>59</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>61</b>
<b>NIVEL DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>61</b>
<b>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>61</b>
<b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b>	<b>61</b>
MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN (HIGH VOLUME SAMPLER)	62
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	64
ESPECTROSCOPIA DISPERSIVA DE ENERGÍA DE RAYOS X (EDS)	66
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	<b>68</b>
<b>MUESTREO</b>	<b>68</b>
PREPARACIÓN DE MUESTRAS	70
PREPARACIÓN DE MUESTRAS (ESQUEMA)	71
<b>TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS</b>	<b>72</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>74</b>
<b>CONCENTRACIÓN DE PTS</b>	<b>74</b>
<b>BLANCO</b>	<b>78</b>
<b>ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS</b>	<b>80</b>
AEROPUERTO METROPOLITANO DE OCUMARE	81
PITAHAYA-CHARALLAVE	97
COMPARACIÓN ENTRE ESTACIONES	109
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>112</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>113</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>114</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>120</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1. Clasificación de partículas atmosféricas según su diámetro aerodinámico.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2. Clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones (PTS).</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3. Límites de calidad del aire para partículas.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 4. Determinación de contaminantes en el aire.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5. Datos y concentración de PTS de la estación Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 6. Datos y concentración de PTS de la estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 7. Composición elemental del blanco en % atómico.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 8. Morfología y composición química promedio de las partículas del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 9. Resumen de características de las partículas. Estación Aeropuerto.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 10. Morfología y composición química promedio de partículas en Pitahaya-Charallave.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 11. Resumen de características de las partículas. Estación Pitahaya.</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 12. Morfologías encontradas por zonas.</i>	<i>109</i>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución modal según diámetros aerodinámicos de partículas atmosféricas con respecto al número de partículas.</i>	29
<i>Figura 2. Ejemplo de partículas vistas bajo el microscopio electrónico de barrido y clasificadas según su tamaño y proceso de formación.</i>	33
<i>Figura 3. A). Partícula de residuos de la combustión de destilado de petróleo con carbón-azufre y trazas de vanadio y níquel. B). Partícula esférica esponjiforme asociada a combustión de combustibles fósiles.</i>	41
<i>Figura 4. A) Partícula de fosfato de calcio emitida de la quema de aceite automotriz que se emplea como combustible. B) Óxido férrico.</i>	42
<i>Figura 5. A). Partícula producto de fundición de acero. B). Óxido de hierro producto de fuente fija.</i>	42
<i>Figura 6. A). Partícula irregular de cuarzo y caolinita. B). Óxido de hierro y zinc.</i>	43
<i>Figura 7. a). Estaño amorfo. B). Molibdenita amorfa.</i>	43
<i>Figura 8. A). Cristales de halita. B). Cristal de cuarzo en filtro PM<sub>10</sub>.</i>	44
<i>Figura 9. A). Granos de polen. B). Espora.</i>	45
<i>Figura 10. A) Municipios Tomás Lander y Cristóbal Rojas, Edo. Miranda. b) Aeropuerto Metropolitano. C) Pitahaya.</i>	58
<i>Figura 11. Muestreador de alto volumen.</i>	63
<i>Figura 12. Interacción del haz de electrones con la muestra</i>	65
<i>Figura 13. Producción de Rayos X característicos por bombardeo de electrones.</i>	67
<i>Figura 14. Ejemplo de un espectro obtenido por EDS en una muestra de un aluminosilicato.</i>	67
<i>Figura 15. Muestreador ubicado en Pitahaya. (Charallave)</i>	69
<i>Figura 16. Muestreador ubicado en el Aeropuerto Metropolitano. (Ocumare)</i>	69
<i>Figura 17. Esquema de metodología para la preparación de las muestras.</i>	71
<i>Figura 18. Composición elemental del blanco obtenida a través de EDX.</i>	78
<i>Figura 19. Fibras del blanco (filtro sin muestra) visto a través del microscopio electrónico de barrido a 2500 y 10000 de magnificación.</i>	79
<i>Figura 20. Distribución homogénea de PTS en filtro.</i>	80
<i>Figura 21. Agregados de partículas en muestra 17.</i>	81
<i>Figura 22. Partículas individuales en muestra 11.</i>	82



<i>Figura 23. Partículas esféricas lisas.</i>	82
<i>Figura 24. Partículas con morfologías cenósferas.</i>	83
<i>Figura 25. Partículas de morfología ovoidal.</i>	83
<i>Figura 26. Partículas cúbicas.</i>	84
<i>Figura 27. Partículas irregulares.</i>	84
<i>Figura 28. Partículas amorfas.</i>	85
<i>Figura 29. Partícula de origen biológico a 4000 de magnificación.</i>	92
<i>Figura 30. Distribución de partículas en filtro (muestra 18) .</i>	97
<i>Figura 31. Partículas esféricas lisas.</i>	98
<i>Figura 32. Partículas esféricas con relieve.</i>	99
<i>Figura 33. Partículas esféricas huecas.</i>	99
<i>Figura 34. Partículas laminares.</i>	100
<i>Figura 35. Partículas irregulares.</i>	100
<i>Figura 36. Partículas irregulares porosas.</i>	101
<i>Figura 37. Partículas tabulares.</i>	101



## ÍNDICE DE APÉNDICE

---

<i>Apéndice 1. Hoja de calibración del muestreador de Pitahaya-Charallave.</i>	<i>120</i>
<i>Apéndice 2. Hoja de calibración del muestreador del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>121</i>
<i>Apéndice 3. Curva de calibración de muestreador de Pitahaya-Charallave.</i>	<i>122</i>
<i>Apéndice 4. Curva de calibración de muestreador del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>122</i>
<i>Apéndice 5. Composición de las partículas biológicas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>123</i>
<i>Apéndice 6. Composición de las partículas cenósferas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>123</i>
<i>Apéndice 7. Composición de las partículas cúbicas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>123</i>
<i>Apéndice 8. Composición de las partículas esféricas lisas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>124</i>
<i>Apéndice 9. Composición de las partículas irregulares carbonosas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>124</i>
<i>Apéndice 10. Composición de las partículas irregulares ricas en Al. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>125</i>
<i>Apéndice 11. Composición de las partículas irregulares ricas en Ca. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>125</i>
<i>Apéndice 12. Composición de las partículas ovoidales. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>126</i>
<i>Apéndice 13. Composición de las partículas irregulares ricas en Si. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>126</i>
<i>Apéndice 14. Composición de las partículas amorfas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.</i>	<i>127</i>
<i>Apéndice 15. Composición de partículas esféricas con relieve-biológicas. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>127</i>
<i>Apéndice 16. Composición de partículas tabulares. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>127</i>
<i>Apéndice 17. Composición de partículas esféricas lisas sin C. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>128</i>



<i>Apéndice 18. Composición de partículas esféricas lisas carbonosas. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>128</i>
<i>Apéndice 19. Composición de partículas irregulares ricas en Fe-Al. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>128</i>
<i>Apéndice 20. Composición de partículas irregulares ricas en Al. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>129</i>
<i>Apéndice 21. Composición de partículas irregulares porosas. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>130</i>
<i>Apéndice 22. Composición de partículas irregulares ricas en Ca. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>130</i>
<i>Apéndice 23. Composición de partículas irregulares silicatadas. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>131</i>
<i>Apéndice 24. Composición de partículas laminares. Estación Pitahaya-Charallave.</i>	<i>132</i>



## INTRODUCCIÓN

---

El material particulado suspendido es un constituyente habitual de la atmósfera terrestre, de origen natural o antrópico, considerado en ambos casos como un contaminante, debido a que este representa la alteración de la composición original de la atmósfera, constituyendo entre un 10 y un 15% de la masa total de contaminantes en dicha geósfera (Aldabe J., 2013; García D., 2013).

A diferencia de otros contaminantes, el material particulado atmosférico no es una entidad química específica, sino que es una mezcla heterogénea de partículas de diferentes fuentes y tamaños, composición y propiedades (Baldasano M., et. al. 2003).

A escala global, las emisiones naturales, tales como el material mineral resuspendido, el aerosol marino, las partículas procedentes de la actividad volcánica y las emisiones biogénicas, son mayoritarias respecto a las emisiones antropogénicas (IPPC, 2001; Aldabe J., 2013); sin embargo, estas últimas pueden llegar a ser muy elevadas, concentrándose cerca de las fuentes de emisión, principalmente en zonas urbanas e industriales, así como en zonas distantes de la fuente, transportadas por el viento.

Entre las principales fuentes antropogénicas cabe destacar las emisiones derivadas del tráfico vehicular, las actividades domésticas, construcción de edificaciones, la actividad industrial, la generación de energía, la explotación de los recursos naturales, la agricultura, la quema de biomasa, entre otros. (García D., 2013)

Por otro lado, para estudiar el material particulado atmosférico y entender sus efectos, es común utilizar una clasificación por tamaños, basada en el diámetro aerodinámico de la partícula (Coz E., 2008). A su vez, dichos tamaños de partícula están estrechamente relacionados con sus efectos sobre la salud, donde a medida que el diámetro se hace más pequeño, aumenta su capacidad de ingresar a regiones más profundas del sistema respiratorio.

Al mismo tiempo, dichas partículas pueden contener metales pesados como Hg, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, polvo mineral, carbono elemental u orgánico, sulfatos y nitratos, dependiendo de las condiciones de formación, origen y gases atmosféricos que las rodeen.



Por consiguiente, numerosos estudios científicos ya han demostrado que el material particulado puede provocar, entre otros, graves efectos sobre la vegetación y el clima, falta de visibilidad e importantes efectos sobre la salud humana. A causa de esto, la contaminación por partículas atmosféricas está siendo objeto de gran interés en los últimos años, motivado principalmente por el gran número de estudios epidemiológicos que demuestran la relación entre concentraciones de éstas partículas y daños sobre la salud (Coz E., 2008). Por ello se hace importante tener conocimiento de las partículas que están presentes en el aire que se respira, así como también de las fuentes de emisión, y para esto, es necesario el análisis de la distribución granulométrica, morfológica y composicional de las mismas, ya que la composición química de las partículas atmosféricas que constituyen los diferentes rangos de tamaño, presenta así mismo características propias y definidas en función de los distintos procesos de formación. Resulta conveniente resaltar que la determinación de la composición química es fundamental, puesto que de un modo general se asume que los componentes químicos presentes en mayor cantidad en una muestra de material particulado, reflejan la composición de las fuentes que afectan al área de medida (Salvador P., 2005), donde al complementarlas y relacionarlas con su morfología, se puede discriminar las diferentes fuentes de emisión con mayor precisión.

Tomando en cuenta esto, en el presente proyecto de investigación llevó a cabo la caracterización química y morfológica de partículas totales suspendidas (PTS), en muestras captadas en dos zonas del eje Charallave-Ocumare, en el estado Miranda; esto con el propósito de determinar las características físicas (forma y tamaño), así como la composición elemental de las partículas y la presencia de elementos o contaminantes específicos que se puedan encontrar en las mismas. Para tal fin, se usó un microscopio electrónico de barrido, el cual puede revelar detalles de la morfología y relieve de la superficie de cualquier material con una buena resolución, la cual no puede ser obtenida con ningún otro medio. A su vez, se determinó la composición química con Espectroscopia Dispersiva de Energía de Rayos X, ya que las propiedades químicas y la morfología de las partículas atmosféricas están estrechamente relacionadas, información con la cual se puede establecer las posibles fuentes de emisión.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

La contaminación atmosférica es un fenómeno que afecta a todos los países del mundo, donde las partículas suspendidas, son el segundo problema de esta índole en las ciudades más industrializadas, después del ozono (Moreno T., et al., 2005), por lo que es importante tener conocimiento de éstas, debido a que pueden contener información sobre la composición de la fuente y productos contaminantes generados.

Actualmente, con el crecimiento de la población y con esto, las zonas urbanas, se ha evidenciado un deterioro en la calidad del aire, por el aumento de la cantidad de partículas liberadas a la atmósfera.

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera, como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre. A su vez, cualquier sustancia que altere las propiedades físicas o químicas del aire se puede considerar como un contaminante atmosférico. Entre los más comunes están; el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, hidrocarburos y oxidantes fotoquímicos (Sbarato V. et al., 1998; Visauri V., 2004).

Las partículas atmosféricas presentan una amplia diversidad y complejidad; como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas características condicionadas por la composición de los gases que las rodean (Visauri V., 2004). Cuando estas partículas están en suspensión constituyen un componente imprescindible a ser considerado al describir la calidad del aire de una localidad o región, debido a los impactos adversos que ocasionan sobre la salud humana y su influencia en los cambios del clima, tanto regional como global.

El tipo y magnitud de los impactos causados por las partículas dependerán de la distribución de su tamaño, tiempo de residencia y exposición (Herrera M., et al.



2009), a su vez, estas pueden adsorber otras especies contaminantes, transportarlas e incluso acumularlas por depositación.

Al mismo tiempo, sus concentraciones pueden ser muy elevadas en lugares próximos a la fuente de emisión, en particular en las zonas industrializadas. Igualmente, el material particulado suspendido puede ser transportado por el viento y acumulado en lugares distantes a las fuentes que las generan; estando los residentes de estas localidades permanentemente en exposición a estas partículas, donde la mayoría de las veces, no se conoce el tipo de partículas emitidas, ni su procedencia.

Venezuela no se escapa de esta condición, ya que es un país donde existen numerosos focos de emisiones de este tipo, producto de procesos industriales y urbanos, por lo que en diversas ciudades y localidades también ocurren episodios de contaminación por emisión de partículas a la atmósfera, siendo este el caso del eje Charallave-Ocumare del Edo. Miranda, caracterizado por presentar una amplia extensión de conjuntos residenciales, centros urbanos, fábricas, cementeras, construcciones e industrias en general, las cuales se encuentran en permanente actividad. Al mismo tiempo, la quema de biomasa y la quema de vertederos a cielo abierto, son comunes en la zona, principalmente en periodos de sequía; por lo que existe una amplia población expuesta a este tipo de contaminación.

Tomando en consideración lo anteriormente mencionado, se generan las siguientes interrogantes:

¿Cuáles son las características morfológicas y químicas de las partículas totales suspendidas (PTS) que se encuentran en el eje Charallave-Ocumare, Edo. Miranda? y

¿Cuál es el origen de las mismas?



## OBJETIVOS

---

### OBJETIVO GENERAL

---

Caracterizar química y morfológicamente las partículas totales suspendidas (PTS) en muestras de aire tomadas en el eje Charallave-Ocumare, Estado Miranda.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

- Cuantificar el contenido de partículas totales suspendidas (PTS) a través del método gravimétrico.
- Determinar la morfología y composición química de las partículas totales suspendidas (PTS), mediante Microscopia Electrónica de Barrido con Espectroscopía Dispersiva de Energía de Rayos X (MEB-EDS).
- Establecer una relación entre la morfología y la composición química de las partículas totales suspendidas (PTS).
- Clasificar a las partículas totales suspendidas (PTS) según su origen, en natural o antrópico.
- Identificar las posibles fuentes de PTS con mayor impacto contaminante dentro del área en estudio.



## JUSTIFICACIÓN

---

De todos los contaminantes frecuentemente encontrados en la atmósfera, las partículas totales suspendidas (PTS) representan uno de los objetos de estudio que más interés generan por la complejidad y variedad de las mismas (Sepúlveda D., 2003). Actualmente, la contaminación atmosférica por entrada en suspensión de material particulado es una constante que representa un problema a resolver. Por esta razón, el presente proyecto de investigación se llevó a cabo en dos localidades del eje Charallave-Ocumare del Tuy, ya que en esta zona se desarrolla una gran actividad industrial, con lo cual existen altas cantidades de emisiones de gases y material particulado a la atmósfera; aunado a esto, la quema de biomasa y quema de vertederos a cielo abierto son comunes en la zona, condición que ha traído como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira. Al mismo tiempo, dichas partículas (PTS) ingresan al sistema respiratorio, generando efectos adversos para la salud.

Es por ello que se hace importante conocer la composición del material particulado suspendido, ya que a través de estos conocimientos, se pueden realizar estudios posteriores, en lo que respecta a las interacciones que presentan estas partículas con diversos organismos vivos, ecosistemas y el clima; así como también, aportar datos de utilidad, con respecto a la relación que existe entre la composición elemental y la morfología de las partículas atmosféricas, para la determinación de la presencia y origen de estas partículas, y con esto tener pruebas tangibles de la influencia que tienen las industrias en la emisión de material particulado suspendido en la atmósfera.

A partir de los resultados obtenidos, se pueden identificar las posibles fuentes con mayor impacto en el área de estudio, con lo que se logra un mejor conocimiento de la calidad del aire en el entorno del eje Charallave-Ocumare, teniendo entonces un entendimiento más preciso de las características del material particulado suspendido en esta área, así como la contribución de las distintas fuentes en el contenido y composición de los PTS en la atmósfera y contribuir con los planes de gestión ambiental en esta zona.



## MARCO TEÓRICO

---

En el siguiente apartado se presentan las bases teóricas necesarias para la comprensión y ejecución de la investigación, así como algunos antecedentes relacionados con la caracterización de material particulado suspendido en la atmósfera, en las ciudades más importantes de Venezuela y el mundo.

### BASES TEÓRICAS

---

A continuación se desarrollan una serie de tópicos que son importantes para los efectos del presente proyecto de investigación:

#### ATMÓSFERA

---

La atmósfera es la capa relativamente delgada de una mezcla de gases y partículas que recubre la corteza terrestre, la cual constituye el 0,01% de la masa de la tierra. (Méndez B., 2006; Ibanez G., 2007; Lagzi I., 2013)

Los componentes principales de la atmósfera seca son; nitrógeno (78,084% en volumen), oxígeno (20,946% en volumen), argón (0,934% en volumen) y dióxido de carbono (0,031% en volumen), pero también se pueden encontrar concentraciones a nivel de trazas (por debajo de 0,002%); neón, helio, metano, criptón, óxido nitroso, hidrógeno, xenón, dióxido de azufre, ozono, dióxido de nitrógeno, amoníaco, monóxido de carbono y partículas. (Stanley E. 2001; Lagzi I., 2013)

La atmósfera se divide en varias capas sobre la base de la temperatura en; termósfera, mesósfera, estratosfera y troposfera, donde en esta última se encuentra el 90% aproximadamente de la masa de la atmósfera. Ésta va desde la superficie de la Tierra hasta unos 15Km de altura y contiene la mayor parte de las partículas, vapor de agua, las nubes y procesos atmosféricos que originan las precipitaciones y tormentas. (Méndez B., 2006; Lagzi I., 2013)



---

## CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

---

El aire puro es una mezcla gaseosa compuesta aproximadamente de un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y un 1% de gases como: dióxido de carbono, ozono, argón, xenón, radón, etc., sin embargo, el aire natural dista mucho de ser una mezcla de estos gases, sino que también posee partículas y otros gases generados por actividades naturales. Se llama contaminación atmosférica a la adición de cualquier sustancia, que altere las propiedades físicas o químicas del aire (Sbarato et al., 1998; García D., 2012), es decir, que altere la composición original de la atmósfera, cuya concentración y período de permanencia en la misma pueda originar efectos nocivos sobre la salud de las personas y el ambiente en general. (Decreto 638, 1995)

Los contaminantes atmosféricos más comunes son: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos, aerosoles, oxidantes fotoquímicos, ozono troposférico y partículas en suspensión, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre, donde dichas partículas en suspensión constituyen entre un 10 y un 15% de la masa total de contaminantes en la atmósfera (Sbarato et al., 1998; García D., 2012)

---

## MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

---

El material particulado atmosférico se define como una mezcla heterogénea de partículas sólidas presentes en suspensión y dispersas en la atmósfera bajo condiciones normales, de origen natural o antrópico, cuyos componentes pueden presentar una amplia diversidad: silicatos, metales pesados, sulfatos, hidrocarburos, entre otros. (Sbarato et al. 1998; Agirre I., et al, 2006)

A diferencia de otros contaminantes, el particulado atmosférico no es una entidad química específica, sino que es una mezcla de partículas de diferentes tamaños y propiedades. (García D., 2012)

Estas presentan una gran variabilidad de fuentes, así como de transformaciones, con lo cual, consisten en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y



composición química, ambas características condicionadas por la composición de los gases que las rodean. El término material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión, con un tamaño superior al de las moléculas simples, como las partículas sedimentables (diámetro  $> 100 \mu\text{m}$ ), donde el límite superior viene determinado por el hecho de que las partículas más grandes sedimentan rápidamente, permaneciendo muy poco tiempo en la atmosfera. (Usero J., 1985; Agirre I., et al, 2006)

---

### CLASIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

---

En vista de que el material particulado atmosférico presenta una gran diversidad de tamaños, forma, composición y orígenes, son a menudo clasificados de acuerdo a sus diferentes características, atendiendo a diversos criterios, como su origen, procesos de formación, su tamaño o diámetro aerodinámico, o en función de su composición química:

---

### CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ORIGEN

---

Atendiendo al origen del material particulado atmosférico de aquellas actividades o procesos que contribuyen a la presencia de estos en la atmósfera, pueden clasificarse en naturales o antropogénicos (García D., 2012):

#### PARTÍCULAS NATURALES

Se denominan partículas de origen natural a las que proceden de emisiones no causadas, directa o indirectamente, por actividades humanas, lo que incluye procesos mecánicos como la resuspensión, abrasión, fricción o actividades sísmicas, así como fenómenos naturales como erupciones volcánicas y geotérmicas, diseminación de partículas por el viento, incendios de zonas silvestres, aerosoles marinos y resuspensión de suelos (Aldabe S., 2011), incluyendo partículas provenientes de la biomasa ; esporas, polen, partículas de hojas, polvos generados por el desgaste de las plantas (Sbarato et al. 1998).



## PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS

Son todas aquellas cuyo origen son el producto de la actividad del hombre, con lo cual son muy variadas, donde se incluyen, entre otras, aquellas relacionadas con los procesos de combustión ligados a industrias, al tráfico o a las actividades domésticas, caracterizadas por presentarse en forma de material carbonoso. También se incluye en dicho grupo, el material mineral asociado a procesos de demolición, erosión del pavimento y quema de cualquier tipo de material. Las emisiones de origen industrial es muy variado, destacando las actividades metalúrgicas y la producción de cemento y ladrillos, entre otros. Otro grupo numeroso lo constituyen aquellas partículas formadas en la atmósfera a partir de precursores gaseosos emitidos por estas y otras fuentes antropogénicas. (Aldabe S., 2011)

Dentro de las fuentes antropogénicas se puede hacer una división más profunda, distinguiendo entre fuentes estacionarias o fijas, y fuentes móviles (García D., 2012):

- Las **fuentes estacionarias** son aquellas edificaciones o instalaciones existentes en un sitio dado, temporal o permanentemente, donde se realizan operaciones que dan origen a la emisión de contaminantes del aire. (Decreto 638, 1995)
- Las **fuentes móviles** incluyen tanto las emisiones directas de particulado como las formadas por procesos secundarios, provenientes de emisores encontrados en movimiento, como los vehículos de transporte (Hurtado J., 2010; García D., 2012), en el cual se generan contaminantes del aire, como consecuencia de los procesos u operaciones que se realizarán para producir el desplazamiento de un sitio a otro. (Decreto 638, 1995)

Cabe destacar que este tipo de partículas se distinguen de las naturales por su composición química, ya que tienden a contener elementos traza como vanadio, cromo o níquel. Además, los sulfatos prevalecen sobre los cloruros, siendo estos últimos más abundantes en las partículas de origen natural. (Galán M., 2004)



---

## CLASIFICACIÓN SEGÚN SU PROCESO DE FORMACIÓN

---

Los procesos de formación condicionan las propiedades de las partículas atmosféricas, las cuales pueden llegar directamente a la atmósfera una vez formadas, o formarse en esta por reacciones químicas. Según esto, se pueden clasificar en dos categorías:

### PARTÍCULAS PRIMARIAS

Se denominan partículas primarias a aquellas que son emitidas como tales directamente a la atmósfera desde la fuente de origen, con lo cual, no sufren ninguna transformación desde su emisión hasta que se ubican en la atmósfera. Las partículas naturales primarias principales proceden de las regiones áridas, océanos, volcanes, aerosoles marinos y fracciones minerales (Aldabe S., 2011; García D., 2012). El viento genera partículas en la superficie terrestre por efecto de la fricción y erosión de los materiales que la constituyen. Estas partículas son introducidas en la atmósfera a través de lo que se conoce como procesos de resuspensión de polvo terrestre por efecto tanto del viento, como de procesos convectivos (Salvador P., 2005). A su vez, las partículas biogénicas en suspensión (vivas o muertas) incluyendo microorganismos y fragmentos de cualquier variedad de ser vivo (IGAP-workshop. 1993, citado por Salvador P., 2005), también son constituyentes importantes de partículas primarias naturales.

Las partículas antropogénicas primarias están ligadas a las emisiones del tráfico, tanto por procesos de combustión en el motor, como por efecto de la abrasión de los neumáticos y del pavimento, así como por procesos de resuspensión de polvo del suelo al paso de los vehículos. (Salvador P., 2005; Aldabe S., 2011)

Las fuentes estacionarias antropogénicas están constituidas por actividades industriales, comerciales, residenciales, actividades asociadas a la construcción, minería o cantería, fundiciones, refinerías, actividades agrícolas incluyendo la quema de biomasa, incendios forestales, entre otros. En este tipo de procesos se emiten a la atmósfera la mayor parte de los metales en forma de partículas. (Salvador P., 2005)

En los procesos de combustión se suele producir la emisión de material particulado, como resultado de una combustión deficiente e incompleta. Este tipo de emisiones está compuesta principalmente por material carbonoso. (Salvador P., 2005)



## PARTÍCULAS SECUNDARIAS

Son aquellas que se forman en la atmósfera por reacciones químicas, las cuales pueden consistir en la interacción entre precursores gaseosos emitidos por diferentes fuentes, de origen tanto natural como antrópico, emitidos directamente o formados en la atmósfera, tales como oxígeno atmosférico ( $O_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ), óxidos de azufre ( $SO_x$ ) y/o nitrógeno ( $NO_x$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), especies reactivas como el ozono ( $O_3$ ), radicales como el hidroxilo ( $\bullet OH$ ) y compuestos gaseosos orgánicos; resultando en transformaciones por procesos de crecimiento, nucleación y condensación, entre un gas de baja presión de vapor y una partícula atmosférica ya existente, para dar lugar a un nuevo aerosol o partícula por adsorción o coagulación. Por tanto las partículas secundarias así formadas pueden ser orgánicas o inorgánicas. (Agirre I., et al, 2006; Aldabe S., 2011; García D., 2012)

Los episodios de nucleación se pueden producir bajo diferentes situaciones. La teoría clásica de la nucleación indica que este proceso se ve favorecido por descensos en la temperatura o incrementos en la humedad relativa (Curtius, J., 2006), o por sobresaturación de una serie de especies condensables.

Además, una partícula de una fuente determinada puede estar compuesta de una mezcla de componentes químicos y partículas de diferentes orígenes, estando la composición y el comportamiento de las partículas íntimamente ligadas al gas que las rodean. (García D., 2012)

Se conoce como procesos de conversión de gas a partícula la transferencia de masa desde la fase gaseosa a la condensada. Si estos procesos conducen a la formación de partículas nuevas por condensación que posteriormente crecerán por coalescencia, se hablará de **nucleación homogénea**. Si en cambio, la condensación se produce sobre partículas ya existentes, se hablará entonces de **nucleación heterogénea**. En ambos casos se producirá un aumento en la masa de las partículas por unidad de volumen, pero sólo en el caso de la nucleación homogénea se producirá un aumento en el número de partículas por unidad de volumen. (Salvador P., 2005)



## CLASIFICACIÓN SEGÚN SU DIÁMETRO AERODINÁMICO

El material particulado suspendido varía, entre otras cosas, en tamaño de partícula, y se pueden clasificar en función de su diámetro aerodinámico, las cuales se tratan como si fueran esféricas por su naturaleza irregular. El diámetro aerodinámico de éstas depende de la densidad de la partícula, y se define como el diámetro de una esfera de  $1\text{g/cm}^3$  de densidad, con la misma velocidad de sedimentación que la partícula debido a la fuerza gravitacional, en las condiciones predominantes de temperatura, presión y humedad relativa en el aire. (García D., 2012)

El diámetro aerodinámico se utiliza para describir el comportamiento de las partículas en el sistema respiratorio, y para evaluar el riesgo de inhalación de partículas tóxicas (Coz E., 2008), debido a que éste es uno de los factores principales que inciden en la peligrosidad de las mismas como contaminantes del aire (Agirre I., et al, 2006), ya que condiciona el grado de interacción con el organismo, por lo que mientras más pequeño es su diámetro, mayor es su capacidad de penetrar en el mismo.

Por otro lado, el tamaño de la fracción en el que predominan ciertas especies puede aportar información acerca de la fuente de emisión de las mismas, así como sus propiedades, efectos, posible destino y velocidad de depositación (García D., 2012). De igual forma, el tiempo de residencia en la atmósfera de las partículas está condicionada, entre otras cosas, por sus diámetros aerodinámicos.

De acuerdo con esto, se clasifican como sedimentables ( $>100\mu\text{m}$ ), partículas totales suspendidas (PTS), menores a diez micrómetros, conocidas también como partículas inhalables ( $\text{PM}_{10}$ ), partículas menores a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y partículas menores a 1 micrómetro ( $\text{PM}_1$ ) (Tabla 1).

Diversos autores suelen llamar a las partículas dentro de esta clasificación como “partículas finas” y “partículas gruesas” a las de diámetro aerodinámico inferior a  $2,5\ \mu\text{m}$  y a aquellas que corresponden a la fracción con diámetros aerodinámicos entre  $2,5$  y  $10\ \mu\text{m}$ , respectivamente.

Estas partículas difieren no solo en los mecanismos de formación y el tamaño, sino también en las fuentes, composición, y las propiedades químicas, físicas y biológicas. (García D., 2012)



Tabla 1. Clasificación de partículas atmosféricas según su diámetro aerodinámico.

Partículas	$\mu\text{m}$
Sedimentables	>100
PTS	<100
PM <sub>10</sub>	<10
PM <sub>2.5</sub>	<2.5
PM <sub>1</sub>	<1

#### PM<sub>1</sub> (< 1 $\mu\text{m}$ )

Corresponde a todo el material particulado que pasa a través de un cabezal de tamaño selectivo de un micrómetro (1  $\mu\text{m}$ ) de diámetro, con una eficiencia de 50% de ser retenido por el filtro (eficiencia de corte). (Coz E., 2008)

#### PM<sub>2.5</sub> (< 2,5 $\mu\text{m}$ )

Corresponde al material particulado que pasa a través de un tamaño de poro selectivo de dos punto cinco micrómetros (2,5  $\mu\text{m}$ ) de diámetro aerodinámico, con una eficiencia de corte del 50%. Al mismo tiempo, el 50% de las partículas de la atmósfera por debajo de 2,5 micrómetros llegan a la región alveolar del sistema respiratorio. (Coz E., 2008)

#### PM<sub>10</sub> (< 10 $\mu\text{m}$ )

El material particulado PM<sub>10</sub> son todas aquellas partículas que son recolectadas con un 50% de eficiencia mediante un muestreador de alto volumen, cuyo diámetro o punto de corte es de diez micrómetros (10  $\mu\text{m}$ ), las cuales tienen la capacidad de ingresar a la zona torácica del sistema respiratorio. (Herrera et al. 2009)

#### PTS (< 100 $\mu\text{m}$ )

Corresponde a las partículas en suspensión totales con un paso selectivo a través de poros menores a cien micrómetros (<100  $\mu\text{m}$ ) de diámetro aerodinámico. Al igual que las anteriores, tiene la capacidad de ingresar a las zonas superiores del sistema respiratorio.



## SEDIMENTABLES (> 100 $\mu\text{m}$ )

---

Son todas aquellas partículas que presentan diámetros aerodinámicos por encima de cien micrómetros (> 100  $\mu\text{m}$ ) y se depositan en condiciones normales por acción de la gravedad, por lo que permanecen poco tiempo en la atmósfera.

## CLASIFICACIÓN MODAL POR DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO

---

En función del diámetro aerodinámico de partícula se identifican diferentes distribuciones de tamaño, donde se idea un modelo el cual consta de tres distribuciones log-normal divididas en dos gamas principales de tamaño; **grueso** y **fino** (fig. 1). (Coz E., 2008; Aldabe S., 2011)

Se considera que una variable tiene una distribución log-normal cuando el logaritmo de la misma sigue una distribución Gaussiana o normal. (Salvador P., 2005)

La distribución típica del tamaño de partícula muestra tres picos o máximos relativos en la distribución, que se llaman “modas” (nucleación, condensación y gruesa), en el que la modalidad y variaciones de dichas distribuciones estarían asociadas a las diferentes fuentes de partículas y mecanismos de formación de las mismas, por lo que cada moda tiene distintas fuentes, rangos de tamaño, mecanismos de formación, composición química y vías de depositación. (Hinds, W., 1999)

En una distribución idealizada se pueden diferenciar cuatro modas diferentes (fig. 1), las cuales se agrupan en tres fracciones de tamaño para los propósitos de caracterización: partículas ultrafinas o partículas por debajo de 0,1 $\mu\text{m}$ , incluyendo la moda de nucleación y parte de la moda Aitken; partículas finas, incluyendo la nucleación, Aitken y moda de acumulación; y partículas gruesas (moda gruesa). (Coz E., 2008)

Por otro lado, las partículas finas engloban las modas nucleación, aitken y acumulación, las cuales difieren de las gruesas no solo en los mecanismos de formación y el tamaño, sino también en las fuentes, composición, y las propiedades químicas, físicas y biológicas. (García D., 2012)



De acuerdo con esto, se suele utilizar la definición de partículas finas para aquellas partículas de diámetro aerodinámico inferior a  $2,5 \mu\text{m}$  y partículas gruesas aquellas que corresponden a la fracción con diámetros aerodinámicos entre  $2,5$  y  $10$  ó superiores, considerándolas como fracción respirable, mientras que la fracción gruesa es la fracción inhalable, que incluye una gran parte que no es ni torácica ni respirable.

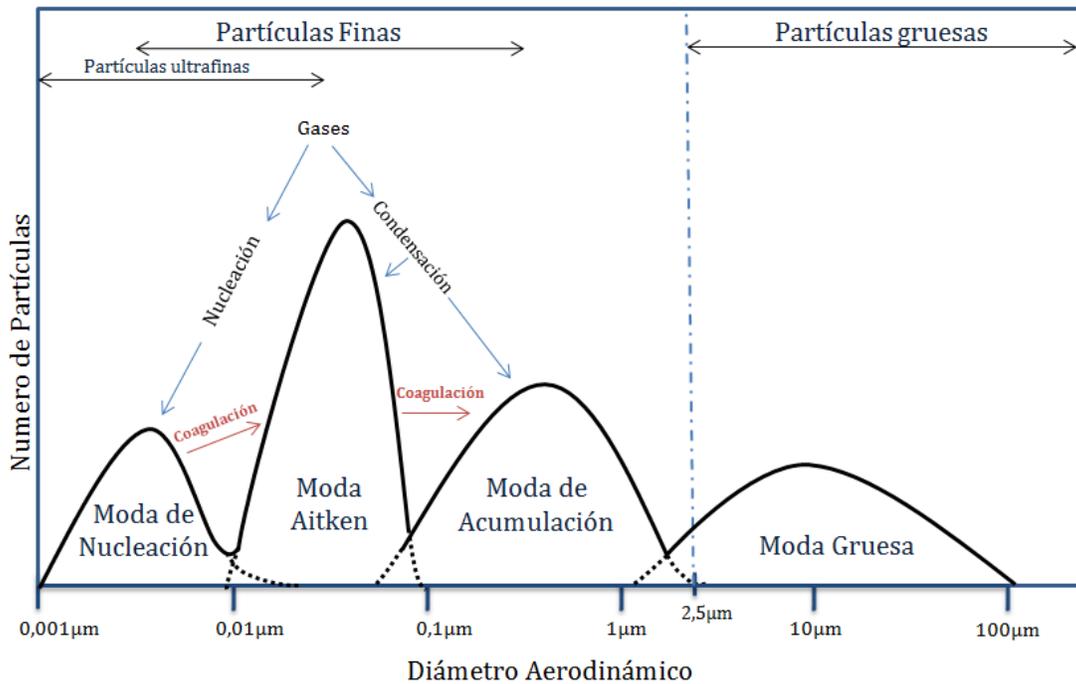


Figura 1. Distribución modal según diámetros aerodinámicos de partículas atmosféricas con respecto al número de partículas.

## MODA DE NUCLEACIÓN

En esta moda se incluyen aquellas partículas con un diámetro aerodinámico inferior a aproximadamente  $0,01 \mu\text{m}$ , también denominadas como partículas ultrafinas. El límite inferior, donde las partículas y los grupos moleculares o grandes moléculas se superponen, es todavía incierto. (Coz E., 2008)

Esta moda está compuesta por partículas de formación reciente durante eventos activos de nucleación en la atmósfera, a partir de sus precursores gaseosos, principalmente ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y compuestos orgánicos



volátiles (Aldabe S., 2011), con crecimientos posteriores por condensación durante la dilución y enfriamiento de los gases (Fernández R., 2011), por lo que son partículas secundarias.

La vida media de éstas en la atmósfera es del orden de horas, debido a que coagulan rápidamente al juntarse con líquidos o gases, aumentando así su tamaño (Aldabe S., 2011) y pueden formarse por gases emitidos a altas temperaturas, que condensan rápidamente en contacto con el aire, por lo que pueden ser frecuentes durante episodios de contaminación, por las actividades que emitan gases.

A su vez, se pueden formar por descensos en la temperatura, incrementos en la humedad relativa, por procesos de nucleación después de la reacción de gases con  $\bullet\text{OH}$  u  $\text{O}_3$ , o por la reducida dilución en el aire debido a escasa velocidad del viento, produciéndose entonces partículas en este rango de tamaño. (Fernández R., 2011; García D., 2012)

Estos procesos aumentan el tamaño de las partículas, donde el paso de un rango a otro se produce por coagulación de partículas del rango de nucleación con partículas ya existentes, lo cual se ve favorecido por la mayor área superficial de las partículas mayores, y por la gran movilidad de estas. (Salvador P., 2005)

---

### MODA AITKEN

---

La moda Aitken está constituida por partículas con diámetros aerodinámicos de entre 0,01 y 0,1  $\mu\text{m}$  y pueden ser de origen natural o antrópico, así como primarias o secundarias, siendo el resultado del crecimiento de partículas más pequeñas de la nucleación a partir de concentraciones más altas de los precursores. (Coz E., 2008)

En el caso de tratarse de partículas secundarias, éstas se forman por coagulación de las partículas presentes en la moda de nucleación o por condensación de componentes en fase líquida. Este tipo de partículas son características de zonas urbanas con influencia del tráfico rodado, constituido por material carbonoso (hollín) emitido en procesos de combustión incompleta. (Aldabe S., 2011)



## MODA DE ACUMULACIÓN

---

En esta moda se incluyen aquellas partículas con un diámetro aerodinámico que varía entre 0,1 y 1  $\mu\text{m}$ .

Las partículas de acumulación no suelen crecer en el rango de tamaño de partículas gruesas, ya que su tasa de crecimiento disminuye a medida que aumenta la acumulación, aunque el crecimiento continúa hasta que se produce la eliminación. Por ello, esta moda no se extiende más allá de unos pocos micrómetros de diámetro y permanece separado totalmente de la moda gruesa. De hecho, los rangos de tamaño de nucleación y acumulación constituyen la fracción granulométrica de las denominadas partículas finas. Sólo por la acumulación higroscópica, la partícula puede aumentar hasta solaparse con la moda gruesa. (Salvador P., 2005; Coz E., 2008)

Aunque algunas emisiones primarias pueden contribuir con el crecimiento de la masa de las partículas de la moda de acumulación, la principal contribución tiene lugar mediante procesos de condensación de gases de baja presión sobre la superficie o por la reacción con partículas pre-existentes y mediante procesos de coagulación entre partículas de la moda de nucleación, pues es en la moda de acumulación donde la superficie de la partícula es máxima (Fernández R., 2011), viéndose favorecidos entonces los procesos de formación secundarios.

En la atmósfera, las partículas de la moda Aitken crecen hasta formar parte de la moda de acumulación por medio de reacciones en fase líquida que tienen lugar en las nubes. Estas reacciones se ven favorecidas por el elevado volumen de agua y la alta velocidad de reacción dentro de las nubes. (Mészáros, 1993, citado por Aldabe S., 2011)

Las partículas que constituyen esta moda son las que presentan el mayor tiempo de residencia en la atmósfera, con un estimado de dos semanas (Fernández R., 2011), debido al área superficial disponible que estas presentan, siendo las precipitaciones de lluvia el mecanismo más importante para eliminarlas, ya que las gotas de lluvia y los cristales de hielo arrastran en su caída a partículas en suspensión presentes en la atmósfera y las transportan hasta la superficie terrestre, debido a que son demasiado pequeñas como para depositarse inmediatamente, por lo que pueden actuar como núcleos de condensación sobre los que se van a formar gotas de agua o



cristales de hielo. También pueden ser transportadas por efecto de la difusión turbulenta y/o por advección, y sedimentarse, lo que se considera como un proceso de depositación seca. (Salvador P., 2005)

## MODA GRUESA

---

La moda gruesa incluye a todas aquellas partículas con un diámetro aerodinámico superior a  $2,5 \mu\text{m}$ .

Esta moda comprende partículas formadas por procesos mecánicos de desintegración vinculados a los orígenes naturales, donde se encuentra la mayor parte de la masa del material particulado atmosférico, aunque el número de partículas presentes en esta moda es menor (fig. 1). (Coz E., 2008; Aldabe S., 2011)

La moda gruesa se compone principalmente de partículas primarias, que han sido emitidas directamente en la atmósfera por procesos mecánicos, por lo que las partículas primarias en esta moda derivan de diferentes fuentes; como polvo mineral re-suspendido, tanto de aportes locales como aquellos transportados a larga distancia, material biogénico (polen, esporas, plantas y residuos de estas), aerosol marino, partículas de combustión (cenizas, hollín y HAP), metales y partículas primarias de origen industrial o relacionadas con el tráfico, a menudo se encuentran en este grupo. (US EPA, 2004 citado por Coz E., 2008; Aldabe S., 2011)

Aunque las partículas de origen primario dominan en esta moda, también es posible encontrar partículas de origen secundario. (Aldabe S., 2011)

Las partículas gruesas no presentan un tiempo de vida extremadamente largo (de horas a días), debido a que su concentración tiende a decrecer principalmente por procesos de depositación gravimétrica favorecida por su gran tamaño, así como por su gran densidad, en el caso de algunos compuestos específicos, como la materia mineral. (Fernández R., 2011)

Las partículas de la moda acumulación como partículas de la moda gruesa, pueden solaparse en un rango de tamaño entre  $1$  y  $2,5 \mu\text{m}$ , llamada región intermodal, por lo que las partículas de  $2,5 \mu\text{m}$  muchas veces son consideradas el límite entre las partículas finas y las partículas gruesas.



En general el tamaño y la composición de las partículas de esta moda es variable, y depende de la naturaleza de la superficie y de las condiciones atmosféricas, especialmente de la velocidad del viento. (Salvador P., 2005)

A continuación, en la figura 2 se muestra un ejemplo de algunas partículas clasificadas según su diámetro aerodinámico bajo la clasificación modal, así como separadas según su proceso de formación.

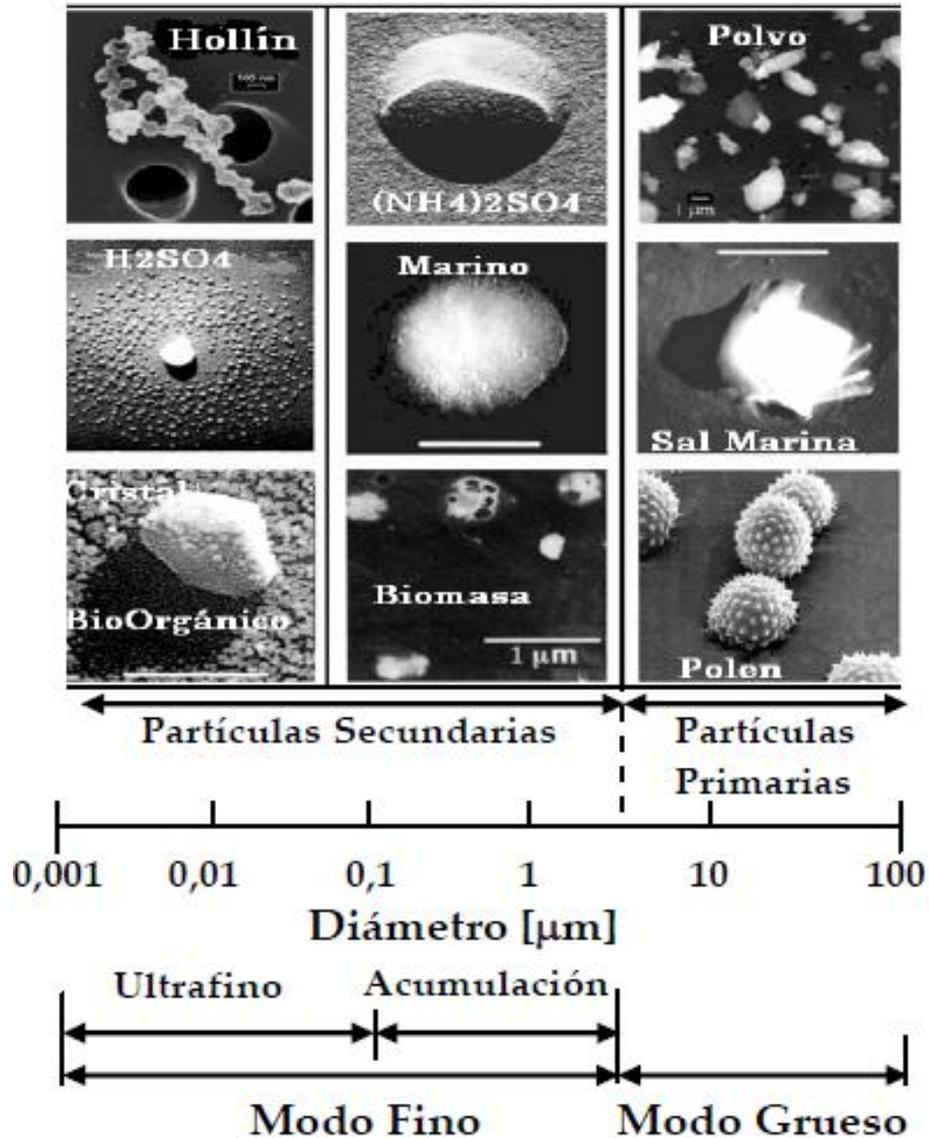


Figura 2. Ejemplo de partículas vistas bajo el microscopio electrónico de barrido y clasificadas según su tamaño y proceso de formación. (Tomado de Montilla R., 2008)



---

## CLASIFICACIÓN SEGÚN SU COMPOSICIÓN

---

El material particulado atmosférico presenta una naturaleza y una composición química muy variada, relacionada directamente con el origen de este. (Aldabe S., 2011)

Según la naturaleza química se establecen los siguientes grupos: material mineral, aerosol marino, compuestos de carbono, partículas derivadas del azufre, compuestos de nitrógeno, metales y compuestos orgánicos.

---

### MATERIAL MINERAL

---

A escala global, las emisiones de material mineral representan la fracción mayoritaria en cuanto a masa, alcanzando el 44% de las emisiones globales (IPCC, 2001) ya que la extensión espacial de sus fuentes ocupa un tercio de la superficie terrestre. (Estellés V., 2006; Esteve R., 2011)

Las partículas minerales se generan de forma primaria por la interacción mecánica del viento con la corteza terrestre, las cuales son removidas de la superficie e incorporadas a la atmósfera mediante mecanismos de convección y circulación de masas de aire, pudiendo llegar a las capas altas de la atmósfera, viajando prácticamente por todo el planeta (Estellés V., 2006; Esteve R., 2011). La mayor emisión a escala global de este tipo de partículas se produce en regiones áridas o semiáridas (Agirre I., et al, 2006), donde la abundancia de material particulado y los fuertes gradientes verticales de temperatura permiten incorporarlas a la atmósfera, y desde allí, transportarlas a grandes distancias. (Estellés V., 2006)

Los principales elementos químicos de las rocas de la corteza son el silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, potasio y otros metales de menor importancia (Coz E., 2008), por lo que la composición química y mineralógica de estas partículas varía de una región a otra, dependiendo de las características y composición de los suelos, pero fundamentalmente se trata de óxidos, como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  (feldespatos), arcillas (principalmente K, Mg, Ca y aluminosilicatos) como la caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) y algunos sulfatos como anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) (Aldabe S., 2011; Esteve R., 2011). También existen emisiones de material mineral derivadas de actividades antropogénicas,



especialmente relevantes en áreas urbanas, tales como la construcción, la minería o la fabricación de cerámicas y cementos. (Ramírez D., 2010; Aldabe S., 2011)

El tiempo de residencia en la atmósfera de las partículas minerales depende de sus diámetros aerodinámicos, donde las más grandes pueden ser retiradas directamente de la atmósfera por sedimentación gravitacional, mientras que las partículas más pequeñas son capaces de permanecer varias semanas en la atmósfera, estando entre los rangos de la moda gruesa y menores de  $0,1 \mu\text{m}$ . (Estellés V., 2006; Coz E., 2008)

Es importante mencionar que las partículas minerales presentan generalmente estructuras cristalinas de diferentes formas, estando estrechamente relacionado con propiedades como hábito y fractura. (Coz E., 2008)

#### AEROSOL MARINO

---

El aerosol marino es el segundo tipo de particulado atmosférico más importante en cuanto a masa (38% de las emisiones totales a nivel terrestre), siendo el más importante en algunas zonas bajo determinadas condiciones meteorológicas, ya que dos tercios de la superficie terrestre está cubierta por océanos. (IPCC, 2001; Estellés V., 2006; Ramírez D. 2010)

Al igual que el material particulado mineral, las partículas de aerosol marino poseen en su mayoría origen natural, y son emitidas directamente a la atmósfera, por lo que son partículas primarias. (Agirre I., et al, 2006)

Este tipo de partículas se generan en los mares y océanos, debido a la acción mecánica del viento sobre la superficie de estos, desprendiendo burbujas, que al explotar incorporan pequeñas gotas de agua a la masa de aire en movimiento. Estas gotas de agua, bajo determinadas condiciones de humedad (superior al 98%), pueden quedar en suspensión en la atmósfera, y cuando la humedad disminuye hasta la saturación salina, puede producirse una evaporación en estas pequeñas gotas, obteniendo partículas salinas sólidas (Ramírez D., 2010; Esteve R., 2011). La agitación de la superficie de los mares y océanos también genera aerosoles en suspensión. (Agirre I., et al, 2006)



La composición química de estas partículas es bastante parecida a las aguas marinas y oceánicas. Por lo tanto, serán partículas principalmente de cloruro sódico, aunque otras formas de cloruros ( $MgCl_2$ ) y sulfatos ( $Na_2SO_4$  y  $MgSO_4$ ) también se encuentran presentes. (Estellés V., 2006; Ramírez D., 2010)

El rango típico detectado para estas partículas se encuentra entre los 0.1 y 100  $\mu m$ , donde los diámetros son dependientes de la humedad relativa, dado que los iones y compuestos mencionados son solubles en agua. (Agirre I., et al, 2006; Ramírez D., 2010)

Las partículas marinas presentan morfologías diferentes; las formas cúbicas son típicas de haluros, mientras que fibrosa, granular, tabular o lenticular son estructuras típicas de sulfatos. (Coz E., 2008)

#### COMPUESTOS DE CARBONO

---

Los compuestos de carbono representan entre el 2 y el 5% de las emisiones a escala global (IPPC, 2001), los cuales aparecen como subproductos de combustión incompleta, tanto industriales como procedentes de vehículos automotor, siendo de especial importancia a nivel global, tanto los generados en la quema de grandes extensiones de biomasa forestal, como los ligados a la actividad industrial y urbana (Esteve R., 2011), siendo estos de origen primario.

A su vez, estas partículas pueden formarse por procesos secundarios, por condensación de compuestos orgánicos volátiles (también de origen natural o antrópico). (Agirre I., et al, 2006; Aldabe S., 2011)

Para su estudio, se distingue generalmente entre carbono elemental y materia orgánica, y se expresa la masa de carbono total (CT) como la suma de ambos. Algunas veces se incluye también a los carbonatos en esta subdivisión, ya que es posible encontrar cantidades limitadas de carbono atmosférico en estos últimos (principalmente  $CaCO_3$  y  $MgCO_3$ ) naturales y/o antropogénicos. (Agirre I., et al, 2006)

La emisión de compuestos orgánicos de origen natural, tales como; esporas, polen, microorganismos y hongos, se producen esencialmente a través de la vegetación, la superficie de los océanos y pueden dar lugar a partículas tanto



primarias como secundarias en la atmósfera, de composición y estructura diversa. (Agirre I., et al, 2006)

El tamaño de estas partículas varía normalmente entre 0,1 y 1  $\mu\text{m}$ , y tienen importantes implicaciones climáticas ya que es muy absorbente de la radiación visible (Ramírez D., 2010), con lo cual reducen considerablemente la visibilidad.

## PARTÍCULAS SULFUROSAS

---

Los sulfatos son la forma termodinámicamente más estable del azufre en la atmósfera (Estellés V., 2006) y generalmente se encuentran como partículas de origen secundario, ya que no son emitidos directamente a la atmósfera sino que se generan mayoritariamente como resultado de la oxidación de precursores gaseosos (principalmente  $\text{SO}_2$ ). (Agirre I., et al, 2006)

El aporte antropogénico del sulfato es mucho mayor en regiones densamente pobladas e industrializadas, donde el  $\text{SO}_2$  producido por la acción del hombre origina alrededor del 95% del total de sulfatos presentes en la atmósfera. Se producen por lo general en los procesos relacionados con los combustibles fósiles con alto contenido en azufre, quema de carbón, procesos industriales de producción de ácido sulfúrico, así como la producción y manipulación de productos minerales tales como el yeso (Agirre I., et al, 2006; Estellés V., 2006; Esteve R., 2011), llegando entonces a la atmósfera por procesos tanto primarios como secundarios.

Por otro lado, el aporte natural es principalmente biogénico (flora y organismos marinos) y, en menor proporción, yacimientos de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); mientras que los sulfatos de origen volcánico constituyen una fuente menor por su carácter esporádico. (Estellés V., 2006)

En general, los compuestos de azufre representan aproximadamente el 7-10 % de las emisiones globales. (IPCC, 2001)

El diámetro de este tipo de partículas suele ser menor a 1  $\mu\text{m}$  y actúan como núcleos de condensación, interviniendo decisivamente en la formación de nubes y dando lugar a la conocida lluvia ácida, cuya importancia reside tanto en la extensión



de sus fuentes, como en su carácter fuertemente higroscópico. (Agirre I., et al, 2006; Estellés V., 2006; Esteve R., 2011)

## COMPUESTOS DE NITRÓGENO

---

Este tipo de partículas en su mayoría son secundarias, formadas a partir de gases precursores minoritarios, emitidos por fuentes naturales o antropogénicas. (Pey B., 2007)

Estos compuestos representan aproximadamente el 2-5 % de las emisiones globales a nivel terrestre. (IPCC, 2001)

En el medio ambiente, los precursores se producen en los suelos debido a la acción biológica de las bacterias (descomposición y nitrificación), incendios forestales ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ), descargas eléctricas ( $\text{NO}$ ) y las emisiones biogénicas ( $\text{NH}_3$ ). (Agirre I., et al, 2006; Estellés V., 2006)

Por otro lado, los compuestos nitrogenados más frecuentes en la atmósfera son los derivados del  $\text{N}_2\text{O}$ , generado en los fertilizantes agrícolas, o del  $\text{NO}_2$ , generado en los procesos industriales (Esteve R., 2011). Al igual que los sulfatos, la contribución humana está relacionada con los procesos de combustión de combustibles fósiles a altas temperaturas, por lo que es un componente importante en ambientes urbanos. (Estellés V., 2006)

Los principales gases emitidos por fuentes naturales y antropogénicas son por lo tanto:  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_3$ , cuya oxidación en la atmósfera tiene como resultado más frecuente la formación de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) (Agirre I., et al). En determinadas condiciones atmosféricas la partícula de nitrato amónico ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) es estable, donde la formación de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  se encuentra en parte relacionada con la presencia de sulfatos en la atmósfera, pues el  $\text{NH}_4^+$  tiende a formar partículas con el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HSO}_4^-$  antes que con el ión  $\text{NO}_3^-$ , es decir, tiene que haber suficiente  $\text{NH}_4^+$  como para neutralizar el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HSO}_4^-$ . También pueden encontrarse otras especies de nitratos como el  $\text{NaNO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , formados por reacción en la atmósfera del aerosol marino ( $\text{NaCl}$ ) o partículas alcalinas ( $\text{CaCO}_3$ ) con  $\text{HNO}_3$ . (Pey B., 2007)

El diámetro de este grupo de partículas atmosféricas suele ser inferior a  $1\mu\text{m}$ . (Agirre I., et al, 2006; Aldabe S., 2011)



## METALES

---

Engloba a los elementos; Ni, Cu, Zn, Cd, Ti, Cr, Mn, Co, Cu, As, Se, Rb, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Hg y Pb, los cuales generalmente se encuentran en las fracciones fina ( $<1 \mu\text{m}$ ) y ultrafina ( $<0,1 \mu\text{m}$ ) como material particulado, y pueden ser emitidos por procesos naturales (erupciones volcánicas o incendios forestales), siendo su origen principal antropogénico. Elementos como V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Sn y Sb son emitidos durante procesos de combustión de combustibles fósiles, mientras que los metales Cr, Mn, Cu, Zn y As se relacionan con las procedentes de las industrias metalúrgicas. Los metales relacionados con las emisiones del tráfico vehicular son Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Sn, Sb y Ba. (Aldabe S., 2011)

Estos suelen ser denominados trazas, por su presencia en pequeña concentración. Adicionalmente son unos de los contaminantes ambientales más peligrosos debido a que no son biodegradables y por su potencial de bioacumulación en los organismos vivos. (Zuloaga M., 2008)

Entre ellos, se destacan en su toxicidad y su mayor presencia en el medio ambiente el mercurio, el cadmio y el plomo, presentes como partículas en la atmosfera.

## COMPUESTOS ORGÁNICOS

---

En las partículas se han encontrado una gran variedad de compuestos orgánicos, donde se ha constatado la presencia de hidrocarburos, tanto de cadenas lineales como ramificadas, aromáticos y particularmente hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), donde estos últimos, son los más comunes en el material particulado atmosférico, constituidos por un grupo muy numeroso de sustancias químicas diferentes, compuestas por dos o más anillos insaturados de carbono e hidrogeno. (Santana S., 2008; Aldabe S., 2011)

Los compuestos orgánicos presentan tamaños y formas muy variables, debido a que sus procesos de generación pueden ser muy diversos. (Esteve R., 2011)

Se pueden liberar durante la combustión incompleta de materiales orgánicos, tales como petróleo, madera, carbón y combustibles fósiles, y están relacionados



también, con procesos industriales, y principalmente el tráfico vehicular. (Aldabe S., 2011)

También existen fuentes naturales de emisión, como los incendios forestales, las erupciones volcánicas o la biosíntesis de microorganismos, así como los generados por conversión de los gases emitidos por la cobertura vegetal de los bosques y partículas grandes como el polen. (Esteve R., 2011)

Generalmente presentan una granulometría inferior a 3  $\mu\text{m}$  de diámetro. (Aldabe S., 2011)

---

### MORFOLOGÍA DEL MATERIAL PARTICULADO SUSPENDIDO

---

El tamaño y la morfología son factores característicos de las partículas (Galán M., 2004), donde esta última se relaciona con las propiedades físico-químicas, influye en su comportamiento en la atmósfera y en el sistema respiratorio, cambiando el tiempo de residencia, los patrones de depositación y el proceso de transporte de las mismas. (Coz E., 2008)

Además, la absorción y dispersión de la luz se modifica mediante la morfología de las partículas, así como también, se sabe que influye en la absorción de agua y en la nucleación del vapor de agua. (Coz E., 2008)

Cuando se estudia una muestra dada, a menudo se observa un rango morfológico variado y a veces complejo (Galán M., 2004), los cuales generalmente presentan las siguientes formas características:

#### CENÓSFERAS

También conocidas como espongiiformes, son partículas esféricas huecas o porosas (fig. 3), las cuales se producen como resultado de transformaciones termoquímicas de las formas originales de material carbonoso e hidrocarburos, producto de su combustión, pudiendo presentar alto contenido de azufre, plomo e hierro. (Galán M., 2004; Ramos J., 2006; Fomenko E., 2011)



Son más comunes como partículas antropogénicas, y suelen presentar una superficie que contiene una multitud de huecos que les dan una apariencia cavernosa, aunque estos huecos varían en número, tamaño y distribución. Los huecos se forman cuando se expulsa material gaseoso o líquido del interior de la partícula, debido a un aumento de la presión interna o a una depresión externa. (Galán M., 2004)

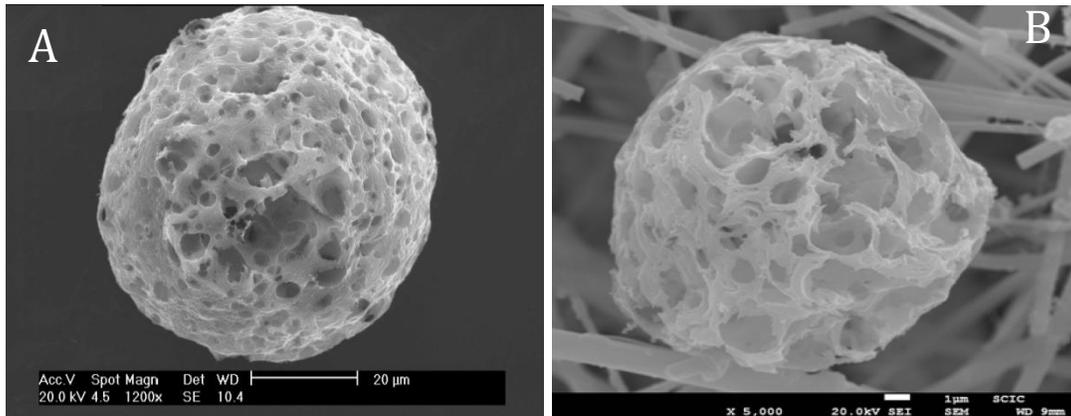


Figura 3. A). Partícula de residuos de la combustión de destilado de petróleo con carbón-azufre y trazas de vanadio y níquel (Tomado de Aragón A., 2006). B). Partícula esférica espongiiforme asociada a combustión de combustibles fósiles (Tomado de Soriano D., 2012).

### ESFÉRICAS LISAS

Las partículas que surgen de la combustión se caracterizan, en la mayoría de los casos, por una forma esférica (fig. 4), debido fundamentalmente al proceso de fusión que se produce durante su formación. Este es una proposición básica que establece una diferencia estructural entre las partículas antropogénicas, que a menudo surgen de procesos fuertemente energéticos (como combustión o fundición) y partículas naturales. (Galán M., 2004)

Las partículas carbonosas también se encuentran con estas formas. Sin embargo, las partículas carbonosas distintas del hollín, pueden presentarse con formas distintas a las esféricas, como partículas amorfas y no agregadas, igualmente con composición dominada por carbono y trazas de azufre. (Singh A. et al., 2011)

Al mismo tiempo, los óxidos metálicos pueden presentar una morfología esférica lisa. (Ramos J., 2006)

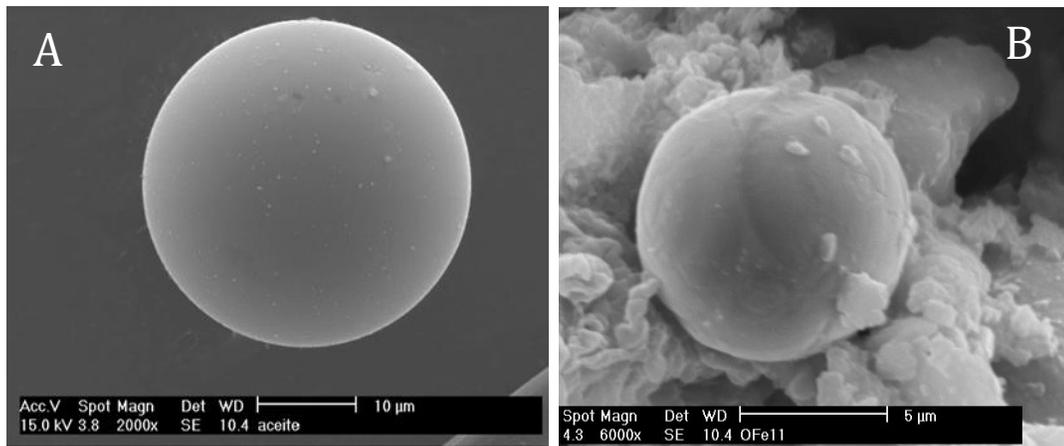


Figura 4. A) Partícula de fosfato de calcio emitida de la quema de aceite automotriz que se emplea como combustible. B) Óxido férrico. (Tomado de Aragón A., 2006)

### ESFÉRICAS RUGOSAS

Algunos elementos metálicos se presentan como partículas esféricas, con un arreglo que les da una apariencia rugosa (fig. 5). Generalmente se encuentran donde se llevan a cabo procesos de fundición de metales. (Galán M., 2004; Campos A., et al. 2007)

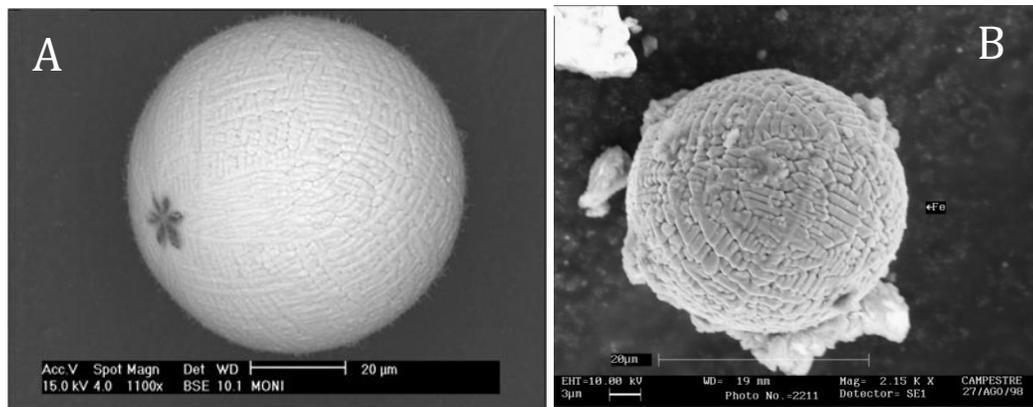


Figura 5. A). Partícula producto de fundición de acero (tomado de Aragón A., 2006). B). Óxido de hierro producto de fuente fija (Tomado de Gasca M., 2007).

### IRREGULARES

Las formas irregulares (fig. 6) son muy variables, y se derivan principalmente de fuentes naturales tales como partículas de suelos, resuspensión de polvo del pavimento y algunas otras actividades antropogénicas tales como construcción y emisiones vehiculares. (Singh A., et al. 2011)



Habitualmente presentan formas similares a fragmentos de vidrio, con picos o bordes pronunciados, y por lo general, estos vienen de la corteza, aunque a veces se pueden encontrar en algunos focos de emisión antrópicas. (Galán M., 2004)

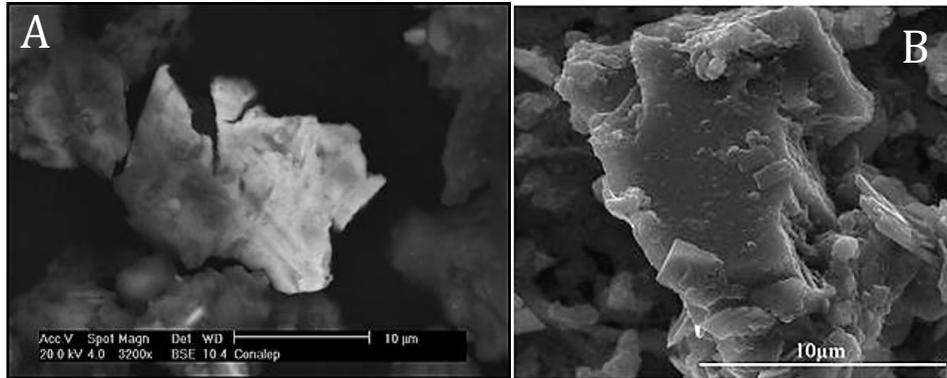


Figura 6. A). Partícula irregular de cuarzo y caolinita (Tomado de Song X., 2014). B). Óxido de hierro y zinc (Tomado de Gasca M., 2007).

## AMORFAS

Partículas sin una estructura interna definida (fig. 7). Generalmente se forman por agregaciones de otras unidades más pequeñas, por lo que presentan una composición variable dependiendo de su origen. (Galán M., 2004)

Las partículas con altos contenidos de elementos metálicos pueden presentarse como amorfas. (Campos A., et al. 2007)

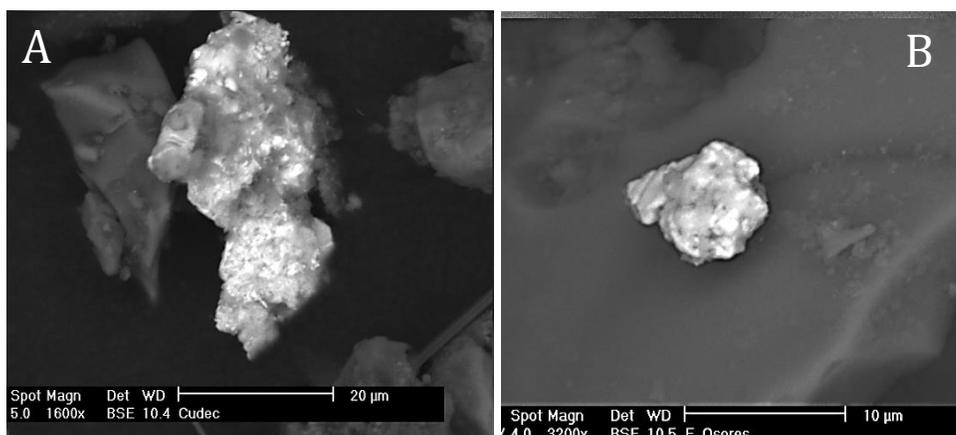


Figura 7. A). Estaño amorfo. B). Molibdenita amorfa. (Tomado de Gasca M. 2007).



## CRISTALINAS

Son partículas con estructuras regulares y simetrías definidas (fig. 8), las cuales dependen de la composición química del material. (Galán M., 2004)

Pueden surgir de sales disueltas en medios acuosos que se evaporan para formar cristales, como habitualmente son los compuestos de cloruros, con formas cúbicas y sulfatos con formas fibrosas, granulares, tabulares o lenticulares (Galán M., 2004; Coz E., 2008)

Las partículas más comunes con morfología cristalina son los minerales, los cuales generalmente terminan en diferentes formas de partículas irregulares, estrechamente conectadas a las propiedades como el hábito y la fractura. (Coz E., 2008)

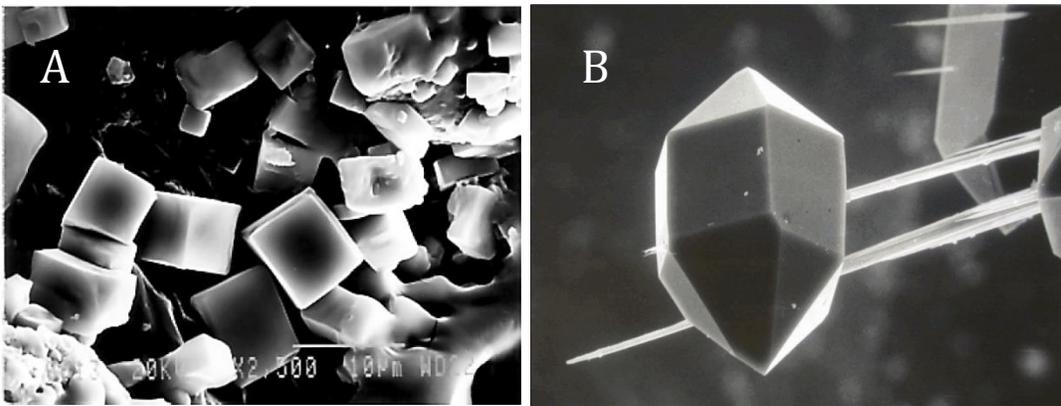


Figura 8. A). Cristales de halita (Tomado de Galán M., 2004). B). Cristal de cuarzo en filtro PM<sub>10</sub> (Tomado de Gasca M., 2007).

## BIOLÓGICAS

Son partículas altamente estructuradas, con texturas complejas y distribución regular (fig. 9), las cuales generalmente presentan estructuras compuestas por carbono, por ser derivados de la biomasa, y si son fósiles, compuestas por silicio. (Galán M., 2004)

El polen es el ejemplo más significativo por su abundancia y movilidad, existiendo una multitud de variedades morfológicas de este tipo de partícula. (Galán M., 2004)

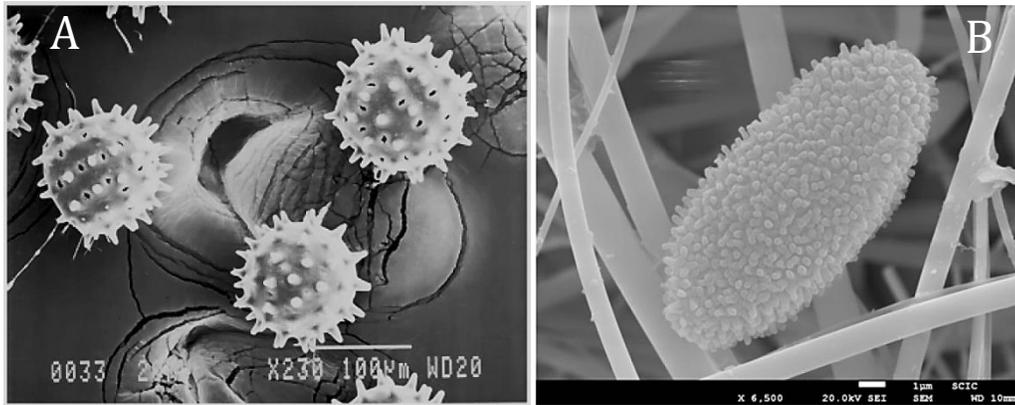


Figura 9. A). Granos de polen (Tomado de Galán M., 2004). B). Espora (Tomado de Soriano D., 2012).

---

### EFFECTOS SOBRE LA SALUD

---

Las partículas en suspensión también pueden presentar efectos adversos sobre la salud humana, los cuales varían de acuerdo a su diámetro aerodinámico, ya que como se mencionó anteriormente, este condiciona la capacidad penetrativa en el organismo. Al mismo tiempo, la composición de la partícula o la especie que tenga adsorbida, concentración, forma, densidad, granulometría, morfología y tiempo de exposición, también condicionan su influencia en la acumulación y sus efectos en el organismo, por lo que muchas veces son consideradas como un importante riesgo para la salud.

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada del material particulado en el organismo (Aldabe S., 2011), sin embargo, también se conoce que las partículas más pequeñas tienen la capacidad de penetrar a través la dermis.

Siempre que las partículas en el aire contaminado son inhaladas, son removidos por los mecanismos de defensa del cuerpo, aunque estos mecanismos son afectados por el tamaño de partícula. (Ahmady H., et al. 2015)

Aquellas partículas con un diámetro inferior a  $10\ \mu\text{m}$ , llamadas también partículas inhalables, son capaces de alcanzar la región superior (cavidad nasal, faringe y tráquea) e inferior (bronquios y pulmones), mientras que las partículas con un diámetro inferior a  $2,5\ \mu\text{m}$  conocidas como partículas respirables, pueden alcanzar a los bronquiolos, los cuales se encuentran en la profundidad de los pulmones y



terminan en aproximadamente tres millones de unidades pulmonares funcionales llamadas alvéolos, a través de cuyas membranas se produce el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono con la corriente sanguínea. (Salvador P., 2005; Aldabe S., 2011)

La fracción de esta masa que es capaz de atravesar la laringe es denominada torácica o inhalable, mientras que la que es capaz de atravesar las vías respiratorias no ciliadas pudiendo así alcanzar la región alveolar, es llamada respirable. La fracción torácica está relacionada con afecciones de las vías superiores como el asma, la bronquitis, etc. Por su parte, la respirable lo está con otras asociadas a la parte interna de los pulmones como la neumonía. (Salvador P., 2005)

El material mineral suspendido también puede tener influencia sobre la salud, por ejemplo, el sílice libre en polvo (cuarzo, tridimita y cristobalita) puede causar enfermedades pulmonares como la silicosis. (Ahmady H., et al. 2015 ).

---

### EFFECTOS SOBRE EL CLIMA

---

Las partículas suspendidas tienen una amplia variedad de efectos importantes en muchos procesos atmosféricos a nivel troposférico, como por ejemplo la difracción, absorción y dispersión de radiación solar, además participan en la formación de núcleos de condensación (García D., 2012), con lo cual, tienen un papel importante en la regulación del clima, ya que influyen en la formación de las nubes, modificando entonces de modo indirecto las características de la cobertura nubosa. (Salvador P., 2005; Aldabe S., 2011)

Para que las moléculas de vapor se condensen y lleguen a formar las masas nubosas que posteriormente originan las precipitaciones, es necesaria la presencia de partículas o aerosoles hidrófilos e higroscópicos en donde se facilite la condensación de vapor de agua sobre su superficie y se formen preferentemente las gotas de nube; por ello a estos se les denominan núcleos de condensación. Ejemplos de las mismas son las partículas de sal de origen marino o de ácido sulfúrico y nítrico, sin la presencia de las cuales serían necesarias condiciones de sobresaturación



muy por encima del 100% de humedad relativa. (Salvador P., 2005; Aldabe S., 2011)

Una vez formadas las partículas, si la nube se evapora, éstas permanecerán en suspensión. Por el contrario, si se produce la precipitación dichas partículas serán eliminadas de la atmósfera.

Los sulfatos y el material mineral son extremadamente efectivos en la dispersión de la radiación incidente, contribuyendo al enfriamiento de la superficie terrestre. Sin embargo, el carbono elemental se caracteriza por su capacidad de absorción de la radiación emitida por la superficie terrestre, por lo que, al contrario que los sulfatos, produce un calentamiento de la atmósfera. (Aldabe S., 2011)

Otro de los efectos directos producido por el material particulado atmosférico es la reducción de la visibilidad. La presencia de partículas en el aire provoca una reducción de la luz transmitida debido a los procesos de absorción y dispersión de la radiación en el espectro visible. (Salvador P., 2005; Aldabe S., 2011)

---

### EFFECTOS SOBRE ECOSISTEMAS

---

Los ecosistemas también pueden verse perturbados por los efectos de la exposición al material particulado atmosférico, donde estos efectos adversos pueden ser propiciados por las características propias de las partículas, así como por la acción de otros contaminantes adsorbidos en la superficie de las mismas.

La composición química del material particulado es muy diverso, y aunque algunos constituyentes pueden ser considerados como nutrientes (nitratos, sulfatos, etc) varios de ellos pueden ser considerados como tóxicos. (Usero J., 1985)

Cuando las partículas se depositan por vía húmeda o seca sobre la superficie terrestre, las concentraciones de metales o cualquier otra especie presente en estas pueden afectar a las características edáficas (Aldabe S., 2011). Al mismo tiempo, se pueden inhibir algunas funciones como la toma de nutrientes por parte de las plantas, o pueden ser tomadas por las mismas, integrándose en los distintos ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la tierra (Soriano D., 2012), y por ende a la cadena eutrófica. Así mismo, el depósito de material particulado atmosférico puede



contribuir a la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales, lo que a su vez puede repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas (Aldabe S., 2011). Con frecuencia la capacidad de eliminación por las plantas y el efecto de lavado en los suelos es inferior a la depositación que se realiza sobre los mismos, dando lugar a una considerable y paulatina acumulación de dichos contaminantes en suelos y plantas. (Usero J., 1985)

Por otro lado, la combinación de partículas con niebla o lluvia puede formar una gruesa costra en la superficie exterior de las hojas, interfiriendo en el proceso de fotosíntesis de la planta, impidiendo la penetración de la luz solar necesaria y perturbando el proceso de intercambio de CO<sub>2</sub> con la atmósfera. De este modo el crecimiento natural de la planta se puede inhibir. (Salvador P., 2005)

---

### LEGISLACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN VENEZUELA

---

El Decreto N° 638, puesto en vigencia el 26 de abril de 1995, tiene por objeto establecer las normas para el mejoramiento de la calidad del aire, la prevención, reducción y control de la contaminación atmosférica producida por la operación de fuentes contaminantes fijas y móviles, capaces de generar emisiones gaseosas y partículas, de manera que se asegure la calidad del aire y el bienestar de la población y demás seres vivos, así como los diversos ecosistemas, atendiendo a los parámetros establecidos en las normas que la regulan y su debido cumplimiento.

Este decreto, define al **Límite de Emisión de Contaminante del Aire** como la concentración máxima de emisión permisible de un contaminante del aire, descargado a la atmósfera a través de una chimenea o ducto, establecida para proteger la salud y el ambiente; mientras que el **Límite de Calidad de Aire** lo define como la concentración máxima de un contaminante en el aire ambiental, aceptable para proteger la salud y el ambiente, siendo el **aire ambiental** aquella porción de la atmósfera, externa a edificaciones y de libre acceso al público.

El criterio fundamental de este decreto se basa en el establecimiento de los límites de calidad del aire para los principales contaminantes de la atmósfera, tales como; dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, sulfuro de



hidrogeno, fluoruro de hidrogeno, fluoruros , cloruro de hidrogeno, cloruros, oxidantes totales expresados como ozono, plomo en partículas y partículas totales suspendidas (PTS), donde para estas últimas, el artículo 5° establece una clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones (tabla 2), calculadas en base a promedios anuales:

Tabla 2. Clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones (PTS).

Partículas $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Zona
< 75	Aire limpio
75-200	Aire moderadamente contaminado
201-300	Aire altamente contaminado
> 300	Aire muy contaminado

Al mismo tiempo, se establecen límites de emisión de contaminantes al aire, en su artículo 3°, donde se listan once (11) contaminantes, en su mayoría para gases. A continuación, en la tabla 3, se muestran los límites establecidos para las partículas en suspensión:

Tabla 3. Límites de calidad del aire para partículas.

Contaminante	Límite ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	Porcentaje excedencia en lapso de muestreo	Período de medición (horas)
Partículas totales	75	50%	24
suspendidas	150	5%	24
(PTS)	200	2%	24
	260	0,5%	24
Pb en partículas	1,5	50%	24
suspendidas	7.2	5%	24



Para la evaluación de la calidad del aire en un área determinada, el artículo 6° establece que se llevará a cabo durante lapsos de muestreo con un tiempo mínimo de cuatro (4) semanas, una cantidad mínima de veinte (20) muestras efectivas, distribuidas durante todo el lapso de muestreo, con una frecuencia mínima de captación de una (1) muestra cada tres (3) días, para estudios que se realicen en un lapso menor de seis (6) meses, y con una frecuencia mínima de una (1) muestra cada seis (6) días, para estudios efectuados en lapsos mayores a seis (6) meses, siempre considerando los tipos y características de las fuentes de emisión más importantes del sector.

En este mismo orden de ideas, para la determinación de concentración de los contaminantes en el aire, el artículo 7° establece los parámetros para los métodos de muestreo, períodos de medición y métodos analíticos (tabla 4).

Tabla 4. Determinación de contaminantes en el aire.

<b>Contaminante</b>	<b>Método de muestreo</b>	<b>Periodo de medición</b>	<b>Método analítico</b>
Partículas totales suspendidas	Alto Volumen	24 horas continuas	Gravimetría

A su vez, cualquier actividad que emitan polvo, humo u olores que provoquen molestias persistentes en la comunidad, serán consideradas como problemas de orden público y dirimidos por las autoridades locales competentes, de conformidad con las leyes y ordenanzas correspondientes, sin perjuicio de la intervención del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas en los casos en que la importancia de la afectación del ambiente por la actividad así lo requiera.



## ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

---

En el eje Charallave-Ocumare, del Estado Miranda, no se han registrado estudios en lo que respecta a la caracterización del material particulado suspendido en la atmósfera hasta el momento. Sin embargo, en las principales ciudades de Venezuela, si se han llevado a cabo diversas investigaciones; a continuación se presentan algunos de los trabajos más relevantes:

**Fernández C. y colaboradores (1991)**, determinaron la composición química de las partículas suspendidas en la atmósfera del Valle de Caracas, con la finalidad de establecer el grado de contaminación que existe en el área, donde las muestras fueron recolectadas empleando muestreadores de alto y bajo volumen con filtros de cuarzo y membrana de celulosa. El periodo de muestreo fue de enero a junio, mientras que las muestras fueron analizadas por espectrofotometría de absorción atómica con llama y con horno de grafito, donde obtuvieron como resultado, que los niveles de concentración de partículas suspendidas encontradas en el Valle de Caracas alcanzan entre 50 y 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo los máximos valores encontrados entre los meses (marzo y abril), de menor precipitación.

A su vez, destacan que los valores de Pb oscilan entre 0,05 y 4,5%, resaltando que reflejan la influencia del tráfico automotor en la calidad de las partículas atmosféricas del Valle de Caracas.

**González M. y colaboradores (2001)**, realizaron un estudio sobre los niveles de concentración de partículas inhalables ( $\text{PM}_{10}$ ) en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo-Venezuela, mediante la recolección de cincuenta y seis (56) muestras, empleando muestreadores de aire de alto volumen para partículas inhalables ( $\text{PM}_{10}$ ), equipados con un controlador automático de flujo constante. El contenido de masa de partículas lo determinaron utilizando el método gravimétrico establecido por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US-EPA).

Como resultado obtuvieron que los niveles de concentración promedio de partículas inhalables ( $\text{PM}_{10}$ ) en los sitios de muestreo no sobrepasan el estándar anual norteamericano de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , donde ninguno de los valores excede el estándar diario (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), por lo que concluyen que el aire de la ciudad de Maracaibo no se encuentra contaminado por partículas inhalables a niveles perjudiciales para la salud.



A su vez, concluyen que las partículas en la atmósfera de Maracaibo son producto mayoritariamente de las emisiones en las industrias de la región, relacionadas con la actividad petrolera y vehículos automotores.

**Escalona M. y colaboradores (2003)**, determinaron las concentraciones de partículas suspendidas ( $PM_{10}$ ), en las zonas norte y sur-este de la ciudad de Valencia, estado Carabobo-Venezuela, las cuales se caracterizan por poseer alto tráfico automotor, con algunas industrias.

Para ello utilizaron muestreadores de alto volumen, utilizando filtros de fibra de cuarzo y de fibra de vidrio, tomando muestras durante 24 horas continuas, en forma simultánea en las dos zonas. Captaron las muestras durante un tiempo aproximado de mes y medio en temporada seca y un tiempo igual en temporada de lluvia con una frecuencia interdiaria.

Como resultado obtuvieron que las concentraciones de partículas de  $PM_{10}$  se comportan en forma semejante en la zonas norte y la sur-este, con un promedio anual de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo menor que el estándar de calidad del aire establecido por la US-EPA ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), lo cual indica que la fuente de partículas en ambas zonas debe ser la misma. A su vez, observaron que en época seca el 60% de los días muestreados en la zona sur-este supera este patrón, así como el 47% de las muestras de la zona norte.

**La Rosa C. y colaboradores (2004)**, caracterizaron químicamente partículas totales suspendidas (PTS) y determinaron las concentraciones de las mismas, en la atmósfera de la ciudad de Mérida. Para ello usaron un muestreador de alto volumen y filtros de fibra de vidrio y celulosa. Entre los resultados más relevantes obtuvieron que los valores máximos de PTS alcanzan cerca de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un promedio de  $55,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando todos los valores por debajo de la norma nacional de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PTS en el aire para una muestra de 24 horas continuas de captación, con lo que concluyen que la atmósfera del área de estudio está en un nivel de aire limpio. Al mismo tiempo, obtuvieron que el Mg, Ca, Al, Pb y Mn asociados a los PTS provienen de fuentes naturales más fuentes antrópicas; mientras que el Na, Zn, K, Cu, Ni y V proceden sólo de fuentes antrópicas.



**Ramos J. (2006)**, caracterizó partículas atmosféricas ( $PM_{10}$ ) a través de su morfología y composición química, en el Silencio, Caracas, a través de Microscopía Electrónica de Barrido, para determinar la morfología, y Microsonda de Electrones para obtener la composición química, en un total de cinco (5) muestras de aire, obtenidas a través de un captador de alto volumen para  $PM_{10}$ , con filtros de fibra de cuarzo.

Como resultados obtuvo que existe una relación entre la composición química de las partículas con su morfología, con lo cual, pudo determinar el origen de estas, clasificándolas en naturales y antropogénicas, tomando en consideración el entorno donde fueron captadas las muestras, donde a su vez, propuso las fuentes de emisión.

Entre varios de sus resultados cabe destacar; las partículas conformadas por agregados cristalinos de composición Na, Cl y K son atribuidos a aerosoles marinos, las partículas rectangulares de S, Ca y O, sin emitidas en construcciones, mientras que las partículas de formas esféricas espongiiformes, con alto contenido de S, Si, Al, Ca y Fe, son atribuidos a emisiones vehiculares

**Zuloaga M. (2008)**, estudió los elementos As, Cd, Cr, Hg y Pb asociados a las partículas suspendidas ( $PM_{10}$ ) en el Valle de Caracas. En su trabajo, determinó la concentración de partículas suspendidas  $PM_{10}$  y de los elementos anteriormente mencionados. Para llevarlo a cabo recolectó un total de setenta y seis (76) muestras en seis meses, en filtros de fibra de cuarzo, donde obtuvo como resultado que existen variaciones temporales en las emisiones, ya que en los meses de sequía (abril y mayo) las concentraciones de partículas de  $PM_{10}$  son mucho mayor en comparación con los otros meses en el que se realizó el muestreo, con un promedio de  $66,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $74,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. A su vez, la autora señala, que esta diferencia se debe a las precipitaciones atmosféricas, así como a una disminución del tráfico vehicular por ser temporadas vacacionales, donde llega a la conclusión, que la fuente de emisión de estas partículas inhalables ( $PM_{10}$ ) más destacadas en los puntos de muestreo, es el tránsito automotor y las actividades industriales.

Cabe destacar, que uno de los resultados más importantes obtenidos, fue que en la ciudad de Caracas, las concentraciones de partículas suspendidas  $PM_{10}$ , están por debajo de los límites ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de concentración permitidos para la protección



pública establecidos por National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), con un promedio de  $45.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A nivel mundial, existe una mayor variedad de investigaciones de esta índole, en especial en los países con ciudades más industrializadas, donde la acumulación de estas partículas por emisión a la atmosfera es muy elevada. A continuación se presentan algunos trabajos:

**Sepúlveda D. (2003)**, realizó un estudio sobre la caracterización morfológica y química elemental de partículas  $\text{PM}_{2.5}$  en los municipios del Edo. De México, mediante Microscopía Electrónica y Microanálisis Elemental por Espectrometría de Rayos X, donde caracterizó química y morfológicamente las partículas  $\text{PM}_{2.5}$  provenientes de un muestreo intensivo, realizado durante todos los meses del 2002, de cinco (5) áreas del estado de México, en cuarenta (40) filtros de microfibra de cuarzo, así como también, determinó las variaciones de las características químicas y morfológicas de las  $\text{PM}_{2.5}$  en las temporadas seca-fría, seca-caliente y de lluvias, obteniendo que la mayor concentración para este el tamaño de partículas ( $2.5 \mu\text{m}$ ), proviene de vehículos automotores evidencia en uso durante todo el año, independientemente de las temporadas.

**Herrera J. y colaboradores (2009)**, llevaron a cabo un proyecto donde determinaron los niveles de partículas suspendidas y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia de Costa Rica, obteniendo como promedio  $48 \pm 8$  y  $31 \pm 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

Adicionalmente, midieron los niveles de sulfatos, nitratos y cloruros, donde las medias anuales resultaron no ser significativamente diferentes para dos sitios de muestreo, mientras que la concentración de dióxido de nitrógeno, presentaron valores superiores a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud como normales, para un mes de monitoreo.

**Aldabe J. (2011)**, presenta un trabajo donde caracterizó físico-químicamente material particulado atmosférico en la comunidad Foral de Navarra, España, con la captación de quinientos sesenta y un (561) muestras, a través de filtros de fibra de



cuarzo, mediante un captador de alto volumen. Al mismo tiempo, analizó CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, HAP, carbono total, mercurio y otros metales como Pb, Al, Fe, Cu, Sn, Mn, Zn, As y Sb, donde también, realizó un estudio simultáneo de la variabilidad espacial y temporal de los niveles, composición y fuentes.

Concluyó que los niveles del material particulado atmosférico registrados en Navarra, no superan las concentraciones límite establecidas por la legislación de dicho país (50µg/m<sup>3</sup>), ya que obtuvo 40 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> y 25 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2,5</sub>.

**Singh A., y colaboradores (2011)**, caracterizaron y analizaron morfológicamente material particulado atmosférico en los tamaños PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> en Agra, ubicado en el centro-norte de la India. Las muestras se recolectaron de las carreteras y zonas semirrurales, donde utilizaron Microscopía Electrónica de Barrido acoplado a un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X, para estudiar a las partículas en términos de formas, morfología y composición elemental, y vincularlos a la fuente potencial así como a la emisión.

La concentración media de PM<sub>10</sub> obtenida fue de 278,67±106,58 mg/m<sup>3</sup> y de PM<sub>2,5</sub> fue 90,16±7,21 mg/m<sup>3</sup> en el borde de la carretera, mientras que en sitio semirural fue 234,54±128,27 mg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> y 89,12±37,94 mg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2,5</sub>.

El espectro de rayos X indicó tres grupos principales de partículas; partículas ricas en C y O, partículas ricas en Si, Na y Al y partículas ricas en Mg, Ca, Fe, K, S y Co, con formas de barras irregulares, esféricas y formas cristalinas. A su vez, atribuyeron como principal fuente a las actividades vehiculares, la resuspensión del polvo de la carretera, resuspensión de material mineral y a la quema de carbón.

**García D. (2013)**, caracteriza químicamente la fracción orgánica del material particulado atmosférico en entornos urbano, industrial y suburbano, de la ciudad de La Coruña, España, a través del desarrollo y validación de métodos de análisis de los principales componentes orgánicos presentes en el material particulado atmosférico, para reducir el tratamiento de las muestras y así facilitar la identificación de fuentes de contaminación.



Entre los resultados afirma, que la fuente de las partículas están asociadas a la combustión de derivados de petróleo, actividades industriales y fuegos causados por la quema de biomasa, próximas a los puntos de muestreo.

De igual forma, observó que prácticamente la totalidad de los n-alcanos están unidos a la fracción de  $PM_{2,5}$  y solamente los n-alcanos de menor peso molecular presentan valores significativamente superiores en  $PM_{10}$ .

**Song X., y colaboradores (2014)**, determinaron la composición geoquímica y mineralógica de material particulado suspendido ( $PM_{10}$ ) en dos ciudades industriales; donde existe combustión de carbón y donde no utilizan carbón para sus procesos, en la provincia de Henan-China del norte. Colectaron once (11) muestras para la ciudad industrial de carbón y ocho (8) muestras para la ciudad industrial sin carbón, en un periodo de recolección de 24 horas, con filtros de fibra de vidrio. Utilizaron un difractor de rayos X para determinar la mineralogía y un microscopio electrónico de barrido equipado con un espectrómetro de dispersión de energía por rayos X, para determinar la morfología y composición química de las muestras. Las fases cristalinas que fueron identificadas incluyen principalmente sulfatos, como yeso, y silicatos (cuarzo y caolinita), así como una pequeña cantidad de cloruro (sal-amoniaco).

La concentración de material particulado suspendido ( $PM_{10}$ ) en la ciudad de Pingdingshan (ciudad con uso de carbón) durante el período de muestreo varió de 297,3 a 1066,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y promedió  $639,7 \pm 237,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 1,5 veces mayor que la de Zhengzhou (ciudad sin uso de carbón) con un promedio de  $421,2 \pm 138,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando estas concentraciones mucho mayor que el límite chino de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Ahmady H. y colaboradores (2015)**, investigaron la mineralogía y las propiedades físico-químicas de las partículas atmosféricas de Abadan y Urmia, en Irán, en los rangos de PTS,  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ , mediante difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de rayos X de dispersión de energía. La recolección de las muestras la realizaron durante primavera e invierno, donde la ubicación de las estaciones meteorológicas, en las cuales se colocaron los muestreadores, diferían en clima, temperatura, precipitaciones y topografía.



Una vez recolectadas las muestras y analizadas, observaron las características, tamaño, forma y tipos de partículas, así como la relación con arcillas y otros minerales. Como resultado obtuvieron un contenido anormalmente alto de calcita (hasta 60 %), por lo que concluyeron que la litología carbonática de la región tiene la mayor influencia en las partículas atmosféricas de la zona en estudio.

**Cano C. y colaboradores (2016)**, en su trabajo caracterizan material particulado suspendido ( $PM_{10}$ ) mediante la utilización de Microscopia Electrónica de Barrido y Análisis de Imágenes, en la zona del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca en Argentina, donde establecen una comparación entre las muestras tomadas con iguales condiciones meteorológicas, en el que los días laborables el 75% de las partículas del estrato ultrafino poseen tamaños menores a 0,37 micras con una concentración de  $160,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que en los días no laborables, este valor fue de 0,25 micras con una concentración de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Al mismo tiempo, encontró que en las muestras de los días laborables en diferentes condiciones meteorológicas, el total de partículas contabilizadas fue relativamente mayor.



## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a dos zonas del eje Charallave-Ocumare, los cuales pertenecen al municipio Cristóbal Rojas y Tomas Lander respectivamente, en el estado Miranda, Venezuela (Fig. 10-A). Estos limitan entre si y se caracterizan por poseer una de las zonas industriales más importantes del país.

El clima en esta región es clasificado como muy cálido y poco lluvioso, con temperaturas  $\geq 26,0$  °C y precipitaciones de 700 a 1.199 mm/año. (Silva A., 2010)

Específicamente, se estudian las partículas totales suspendidas en el Aeropuerto Metropolitano de Ocumare, en la carretera nacional Ocumare-Cúa (Fig. 10-B), mientras que la otra zona corresponde al sector Pitahaya, en Charallave (Fig. 10-C), el cual se ubica en la carretera Charallave-Ocumare, vía autopista Regional del Centro, desvío en el distribuidor de Los Totumos.

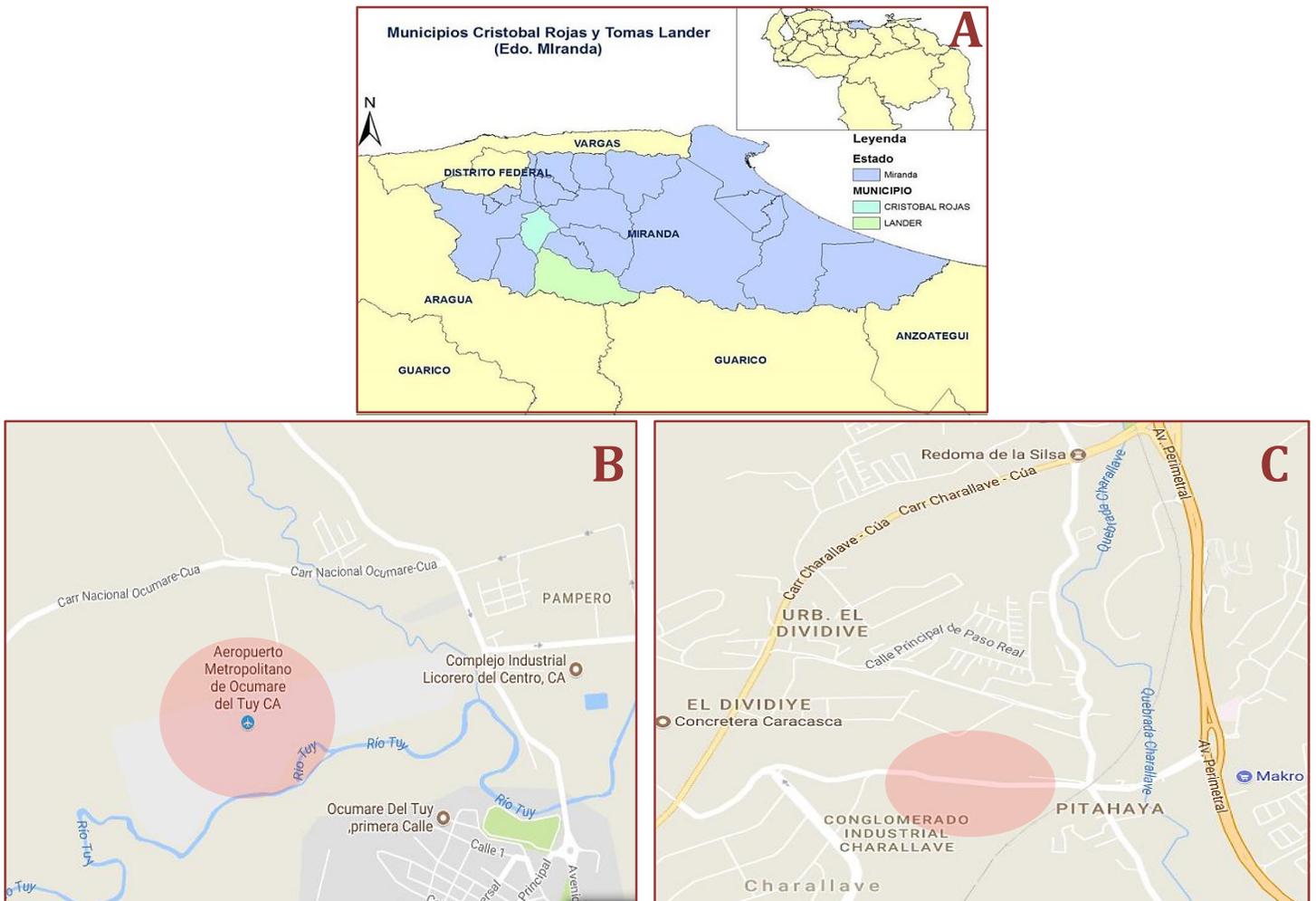


Figura 10. A) Municipios Tomás Lander y Cristóbal Rojas, Edo. Miranda. B) Aeropuerto Metropolitano (tomado de google maps. C) Pitahaya (tomado de google maps).



## GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

---

En vista de que el presente proyecto de investigación se identificará las posibles fuentes de material particulado suspendido, es importante conocer la geología del área de estudio, ya que estas pueden tener influencia como fuentes de las partículas.

La geología que circunda al área de estudio está constituida por:

### FORMACIÓN TUY

La Fm. Tuy, con 400 m de espesor, tiene su localidad tipo en la carretera Petare-Santa Teresa del Estado Miranda. (Mendoza S. 2005)

Litológicamente se compone de capas heterogéneas de gravas de 1 a 3 m de espesor y de conglomerados líticos mal consolidados con matriz limo-arcillosa abundante, y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con lutitas, arcillitas y cantidades menores de margas y arenisca. (Mendoza S. 2005)

La Fm. Tuy suprayace discordantemente a las rocas metamórficas de la región y a la Formación Siquire y está cubierta discordantemente por terrazas aluvionales.

### FORMACIÓN LAS MERCEDES

La Fm. Las Mercedes (Aguerrevere y Zuloaga, 1938 citado por Mendoza S. 2005), tiene su localidad tipo en la Urbanización Las Mercedes y Valle Arriba, Distrito Capital. Existen secciones bien expuestas en los cortes de la autopista Caracas-Valencia, tramo Hoyo de la Puerta-Charallave.

Esta formación se compone de esquistos cuarzo-muscovítico-calcítico-grafítico con intercalaciones de lentes y estructuras replegadas de mármol grafítico. (González de Juana et al., 1980). Tanto entre Santa Lucía y Caucagua como en la Quebrada Charallave, la Fm. Las Mercedes se hace hacia su parte más superior cada vez menos calcárea, más cuarzosa hasta culminar con conglomerado de cuarzo ahumado como el Conglomerado de Charallave. (González de Juana et al., 1980)



## FORMACIÓN TIARA

La Fm. Tiara tiene su localidad tipo al sur de la Fila de Loma de Hierro, al NE de Tiara, Estado Aragua y se extiende por una faja en forma discontinua de unos 60 Km de largo por los cerros de Ocumare del Tuy y Cúa, Agua Fría, Tiara, El Pao de Zárate y las cabeceras del valle del Río Tucutunemo. (González de Juana et al., 1980)

Litológicamente se componen de meta-basaltos de grano fino a porfídico, con texturas subofíticas, con meta-tobas de color negro y matriz muy fina. (Mendoza S. 2005)

## FORMACIÓN TUCUTUNEMO

La Fm. Tucutenemo se localiza en el Rio Tucutunemo y cerros adyacentes al este de Villa de Cura, Estado Aragua, con una gran extensión a través de Charallave, Estado Miranda (Shagam, 1960, citado por Mendoza S. 2005). Litológicamente se compone de filitas de color azul, carbonáceas, arenosas con mica; mármol de color gris oscuro o negro, con fuerte foliación metamórfica; meta-conglomerados con fragmentos de cuarzo de veta, plagioclasa y meta-ftanita. (Mendoza S. 2005)



## METODOLOGÍA

---

En el siguiente apartado se explicará el tipo de investigación, las técnicas y los procedimientos utilizados para llevar a cabo el proyecto de investigación:

### NIVEL DE INVESTIGACIÓN

---

El nivel de investigación en el presente proyecto es del tipo exploratoria, ya que en el eje Charallave-Ocumare hasta el momento no se han realizado trabajos donde se caractericen partículas totales suspendidas (PTS).

### DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

---

El diseño de investigación del presente proyecto para responder al problema planteado es de tipo investigativo de campo, el cual se llevó a cabo con la recolección de datos a partir de la toma de muestras directamente en la zona donde se plantea el problema y su posterior análisis en el laboratorio, para de esta manera poder llegar a la resolución del mismo a partir del cumplimiento de los objetivos propuestos.

### TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

---

Las técnicas de recolección de datos usados en el presente proyecto de investigación consistieron en el análisis de muestras a través de Microscopía Electrónica de Barrido, para la obtención de imágenes de las partículas atmosféricas, mediante un microscopio marca “FEI”, modelo FEG 205, acoplado a un equipo de análisis por dispersión de energías EDAX, con el cual se obtuvieron los espectros para la determinación de la composición elemental.

Así mismo, se analizaron las imágenes para la identificación de la morfología, y se relacionaron con las composiciones determinadas.

A continuación se especifican las técnicas e instrumentos para la recolección de datos:



---

## MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN (HIGH VOLUME SAMPLER)

---

Los muestreadores son equipos de muestreo activo, utilizados para captar muestras de partículas atmosféricas, de diferentes diámetros, para la determinación de la concentración de partículas con el método gravimétrico, así como la caracterización a través del análisis de las mismas.

Estos consisten en hacer pasar un volumen de aire conocido a través de un medio poroso, como lo es un filtro, el cual retiene a todas o sólo una fracción de las partículas suspendidas durante un periodo de tiempo determinado, donde el depósito de partículas sobre el filtro es el proceso a través del cual se obtienen las muestras apropiadas para posteriores análisis.

A partir de esto, conociendo el volumen de aire muestreado, se determina la masa del material particulado por unidad de volumen de aire (Usero J., 1985), tomando en cuenta una serie de correcciones, las cuales consideran las condiciones estándar, de calibración y de recolección de muestras, y con esto, obtener la concentración real de PTS en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , debido a que las condiciones de recolección de las muestras son diferentes a las estándar, lo que puede traer consecuencia que las concentraciones obtenidas difieran de las reales. En el apartado “técnicas de procesamientos y de recolección de datos” (pág. 72) se detallan estos parámetros.

La entrada del aire se realiza a través de un cabezal en el que se coloca el filtro, el cual está caracterizado por su eficiencia de corte del 50%, que se define como el diámetro de las partículas esféricas de una unidad de densidad que tienen una probabilidad del 50% de ser recogidas en el filtro (Salvador P., 2005). Este presenta características muy especiales y suele ser de fibra de vidrio, fibra de cuarzo o celulosa.

El Muestreador de Alto Volumen (fig. 11) consta básicamente de una bomba de vacío, un motor con turbina, marco de sujeción del filtro, una pantalla reticulada de alambres de acero (soporte para el marco porta-filtro), adaptador de marco, controlador volumétrico de flujo (que ajusta un caudal constante durante el período de toma de muestra) y un controlador temporal de muestreo, todo cubierto con una coraza de protección.

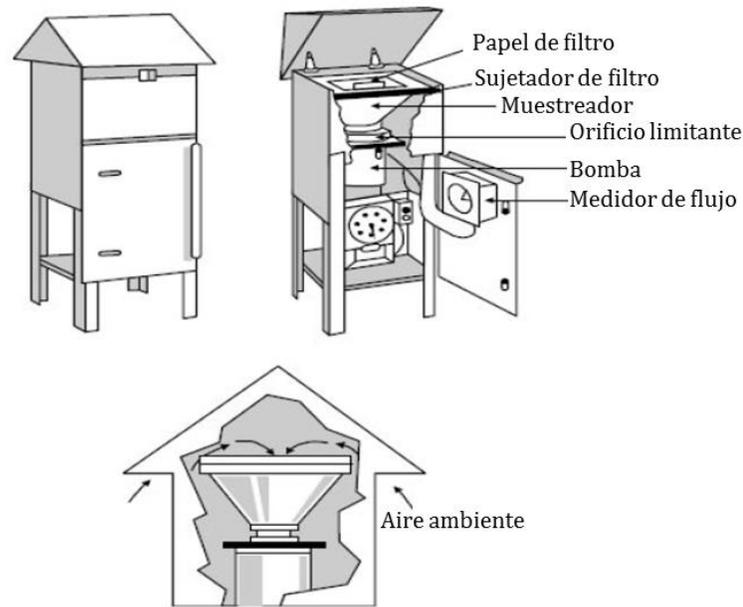


Figura 11. Muestreador de alto volumen.

Tomado de [www.estrucplan.com.ar /secciones/Producciones/entrega.asp](http://www.estrucplan.com.ar/secciones/Producciones/entrega.asp)

En este método de muestreo, el aire es obligado a pasar por un filtro de baja resistencia, con un alto volumen de flujo (aproximadamente 2000 m<sup>3</sup>/día). La entrada al ducto y el medio de colección miden aproximadamente 25-30 cm. En todos estos equipos es muy importante la calibración del dispositivo para medir el flujo y el acondicionamiento del filtro antes y después de la colección de partículas. El procedimiento de acondicionamiento consiste en equilibrarlo a condiciones estables de temperatura (menor de 30 °C) y humedad relativa (menor a 50 %) antes de pesarlos, durante 24 horas como mínimo. (Sbarato et al. 1998; Norma COVENIN 2060, 1996)

El caudal de filtrado (m<sup>3</sup>/min) es referido a condiciones estándar (760 mmHg de presión atmosférica y 25 °C de temperatura ambiente), y el equipo está diseñado de manera tal que durante la operación de muestreo el filtro está en posición horizontal, no expuesto directamente al ambiente, así el equipo incorpora flujo continuo de materia que se encuentra sólo en suspensión. (Sbarato et al. 1998)



---

## MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

---

Para tener un mejor entendimiento del desarrollo del presente proyecto de investigación, es necesario conocer los métodos utilizados para obtener la información. A continuación se explica brevemente en que consiste la Microscopía Electrónica de Barrido:

La Microscopía Electrónica de Barrido permite la observación y la caracterización de materiales heterogéneos, orgánicos e inorgánicos en una escala nanométrica (Goldstein J., et al. 2003) ya que proporciona información morfológica y del relieve de la superficie de las muestras que se van a estudiar.

Para obtener una imagen por Microscopía Electrónica de Barrido se irradia la muestra sólida con un haz de electrones finamente enfocado, haciendo un barrido sobre la superficie de ésta, o puede ser enfocada para obtener un análisis en un punto específico. (Goldstein J., et al. 2003)

En este proceso se producen varios tipos de señales (fig. 12), tales como electrones secundarios, electrones retrodispersados, y electrones Auger; fotones de diversas energías entre ellos catódoluminiscencia y rayos X característicos. En Microscopía Electrónica de Barrido se utilizan los electrones secundarios y retrodispersados; los electrones secundarios se detectan y se utilizan para construir una imagen tridimensional y mostrar el contraste topográfico y textural, mientras que los electrones retrodispersados se usan para generar una imagen que muestra un contraste composicional. Las señales de rayos X característicos se utilizan para obtener la composición elemental. (Goldstein J., et al. 2003; Reed J., 2005; Skoog, D. et al. 2008)

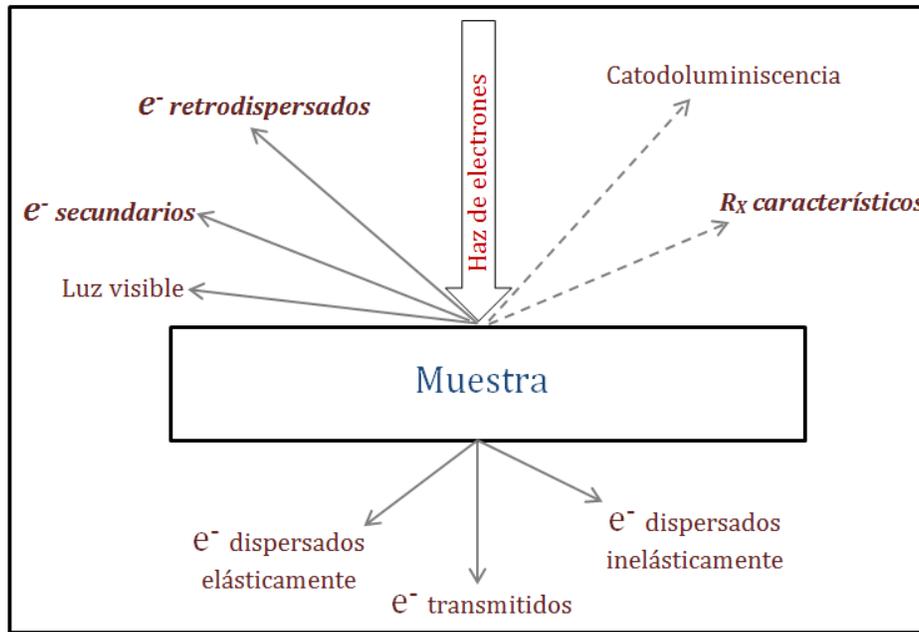


Figura 12. Interacción del haz de electrones con la muestra  
(Modificado de Skoog, D., 2008).

- **Electrones secundarios:** para formar la imagen en un microscopio electrónico de barrido se utilizan los electrones secundarios que han sido emitidos desde las primeras capas atómicas de la muestra. Se caracterizan por ser de muy baja energía, cerca de unos pocos electronvoltios (Reed J., 2005), los cuales proporcionan principalmente información sobre la topografía de la muestra, así como una óptima medición de tamaño de partícula y morfología. Estos se producen cuando un electrón incidente excita a otros electrones en la muestra, donde el electrón excitado se mueve hacia la superficie (Goldstein J., et al. 2003, Coz E., 2008).
- **Electrones retrodispersados:** son electrones del haz primario, cuyas trayectorias se modifican por la interacción con los átomos de la muestra. Si la desviación que sufren es mayor de  $90^\circ$ , estos electrones salen de la muestra. Tienen una alta dependencia con el número atómico de los elementos que componen el espécimen, por lo que a mayor  $Z$ , mayor será la desviación que sufren, lo que implica que los electrones retrodispersados proporcionan información sobre la composición de la muestra (Goldstein J., et al. 2003).



---

## ESPECTROSCOPÍA DISPERSIVA DE ENERGÍA DE RAYOS X (EDS)

---

Por otro lado, los rayos X característicos generados a partir del bombardeo de electrones, se utilizan para obtener información sobre la composición elemental. Los rayos X son una radiación electromagnética y representan una porción muy energética del espectro, que poseen longitudes de onda corta, de aproximadamente 0,1 a 1000 nm. (Coz E., 2008)

Durante el bombardeo de la muestra por el haz de electrones primarios, algunos electrones son sacados de los niveles electrónicos de las capas internas del átomo, quedando éste en estado excitado. Para que esto ocurra, la energía de los electrones que inciden sobre un átomo debe ser igual o mayor que la energía del nivel electrónico donde es sacado dicho electrón.

Cuando se produce la salida de un electrón de un nivel interno, se produce un fotón de rayos X característico quedando el átomo en un estado ionizado. (Reed J., 2005). Para volver a su estado fundamental después de la pérdida del electrón, un electrón de una capa superior pasa a ocupar la vacante. Cuando los electrones externos decaen a capas internas, emiten un fotón cuantificado "característico" del elemento, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la energía de los rayos X, siendo la energía igual a la diferencia de energía entre los dos niveles en los que se produce el salto electrónico (fig. 13).

Los rayos X característicos producidos en un microscopio electrónico pueden ser analizados mediante un detector dispersivo de energía (EDS) o un detector dispersivo de la longitud de onda (WDS). (Goldstein J., et al. 2003).

El espectro de rayos X generado contiene líneas características de los elementos presentes (fig. 14); Por lo que un análisis cualitativo es fácil de obtener identificando las líneas de sus longitudes de onda (o energías de fotones). (Reed J., 2005)

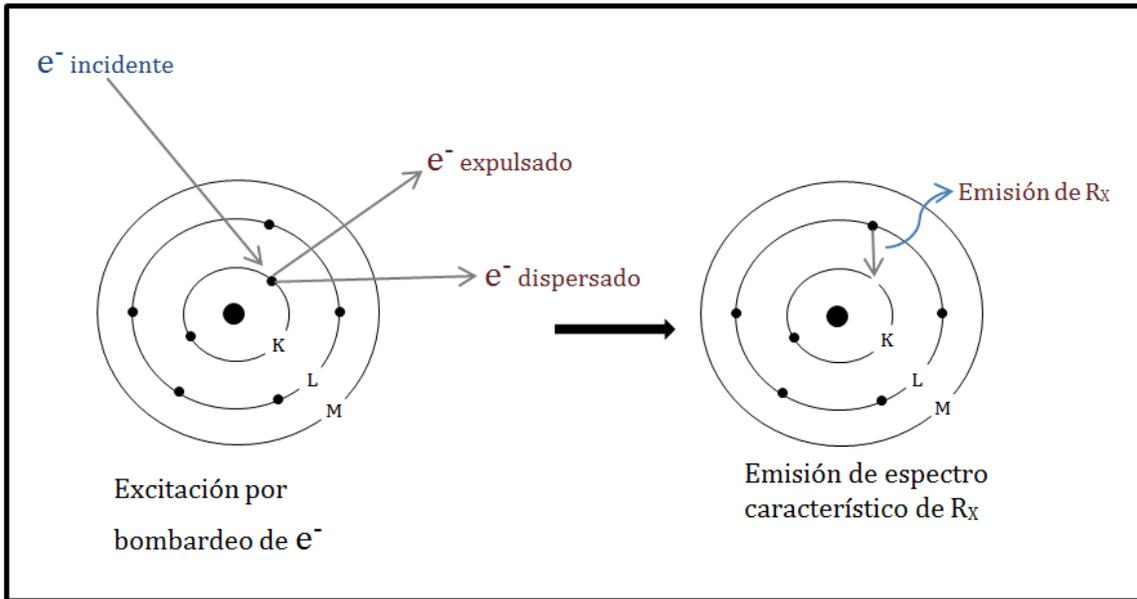


Figura 13. Producción de Rayos X característicos por bombardeo de electrones.

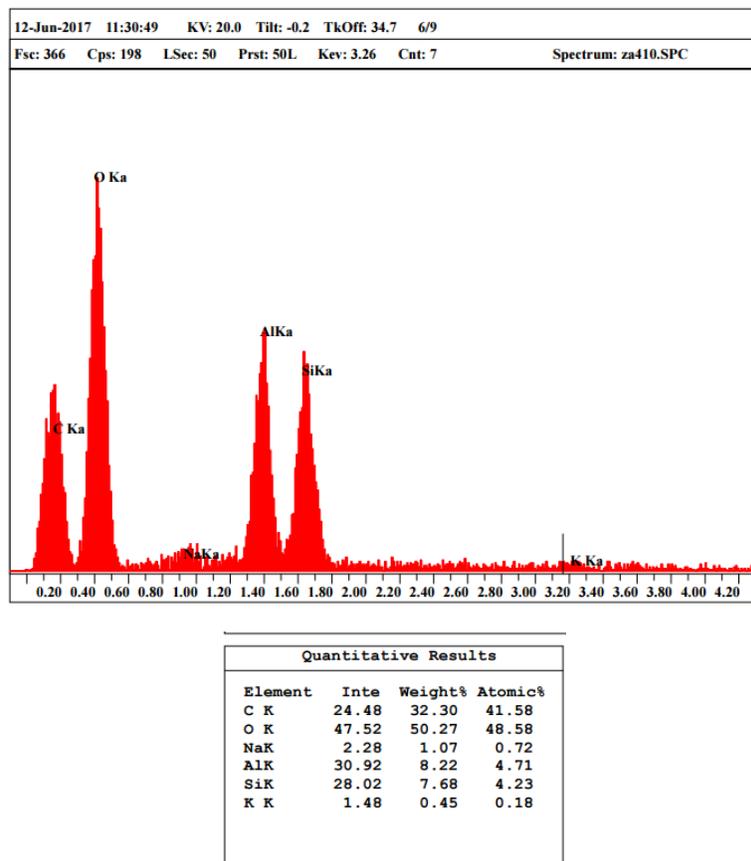


Figura 14. Ejemplo de un espectro obtenido por EDS en una muestra de un aluminosilicato.



## TIPO DE MUESTREO

---

El tipo de muestreo es activo, el cual se llevó a cabo mediante un método no probabilístico, ya que se desconoce la probabilidad que tienen los elementos de la población para integrar la muestra, donde el muestreo fue de tipo intencional u opinático. Esto debido a que por las condiciones de la zona, así como por seguridad, se seleccionaron dos puntos para colocar los equipos muestreadores, ubicados en áreas específicas y características de la localidad en estudio, para garantizar la representatividad de las muestras tomadas.

## MUESTREO

---

La recolección de las muestras se llevó a cabo mediante el uso de dos muestreadores de partículas de alto volumen marca Andersen Instruments, modelo G28A, equipados con filtros de fibra de vidrio, los cuales se llevaron a peso constante antes y después de captar la muestra.

Se estableció un programa de muestreo simultáneo en dos sitios, uno frente a la industria Aliven (Pitahaya-Charallave), de coordenadas  $10^{\circ} 8' 3''\text{N}$  y  $66^{\circ} 47' 16''\text{W}$ , y el otro en las instalaciones del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare ( $10^{\circ} 11' 59''\text{N}$ ,  $66^{\circ} 51' 47''\text{W}$ ), ambos con un tiempo de recolección de 24 horas continuas con una frecuencia de cada tres días, siguiendo las recomendaciones de la normativa establecida por el decreto 638.

El muestreador ubicado frente a Alieven se ubicó a una altura de dos metros aproximadamente (fig. 15), mientras que el muestreador del aeropuerto estuvo al ras del suelo, en el engramado de la pista de aterrizaje (fig. 16). La altura de éste último fue condicionada por seguridad, ya que a aproximadamente cuarenta metros hay un helipuerto.



Figura 15. Muestreador ubicado en Pitahaya.  
(Charallave)



Figura 16. Muestreador ubicado en el Aeropuerto  
Metropolitano. (Ocumare)

El equipo presentó un flujo promedio de  $40 \text{ m}^3/\text{min}$  en Pitahaya-Charallave y  $60 \text{ m}^3/\text{min}$  en el Aeropuerto Metropolitano de Ocumare. Los filtros fueron pesados en el laboratorio de suelos del Instituto de Ciencias de la Tierra (ICT)-UCV en un entorno controlado antes de su uso, transportados al lugar de medida y colocados en el cabezal del equipo, donde estuvieron expuestos al flujo de aire durante un periodo de 24h continuas, para posteriormente ser pesados de nuevo en el laboratorio con las partículas recolectadas. Por último se prepararon las muestras según la metodología planteada en la pág. 70 y se analizaron en el Centro de Microscopía Electrónica “Dr. Mitsuo Ogura” de la Facultad de Ciencias, UCV.



## PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para analizar las muestras por Microscopia Electrónica de Barrido es necesario que la muestra sea conductora, de no ser así, ésta se debe recubrir con una película conductora, generalmente oro o grafito. Esto debido a que la observación de muestras no conductoras produce acumulación de carga en su superficie, lo cual trae como consecuencia efectos como sobrebrillo, astigmatismo y hasta pérdida de material, lo que dificulta la óptima observación de las imágenes. (Soriano D. 2012)

Las partículas se analizaron directamente en el filtro, cuyo procedimiento de preparación de las muestras para analizarlas en el microscopio electrónico de barrido se presenta a continuación:

1. Preparación del blanco: Se recortó una porción de un filtro sin muestra seleccionado aleatoriamente, en tamaños de aproximadamente 0,5x0,5cm.
2. Se colocó una cinta de doble cara adhesiva sobre un portamuestras.
3. Posteriormente, se adhirieron las porciones del filtro sobre el adhesivo en el portamuestras.
4. A continuación, se agregó una pequeña cantidad de pintura de grafito, de manera que se hizo contacto con las esquinas del filtro, el adhesivo y el portamuestras metálico.
5. Preparación de muestras: Se recortaron tres porciones diferentes de un mismo filtro, en partes de 0,5cm aproximadamente.
6. Una vez realizado el paso dos, se colocaron las tres porciones de filtro sobre el adhesivo del portamuestras.
7. Por último, se repitió el paso cuatro.
8. El procedimiento repitió para cada una de las muestras colectadas.

En la figura 17 se muestra esquemáticamente la metodología llevada a cabo para la preparación de las muestras.

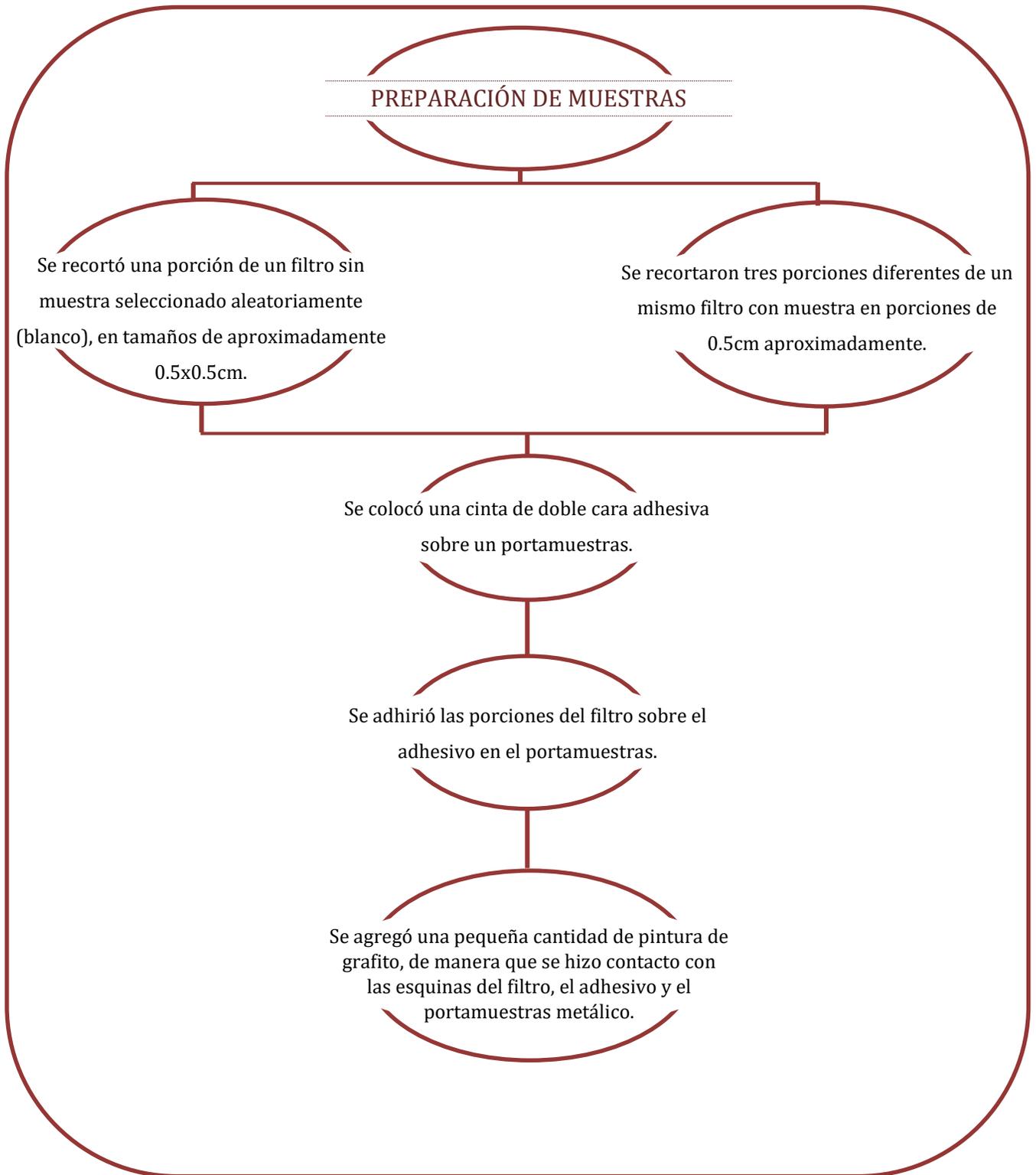


Figura 17. Esquema de metodología para la preparación de las muestras.



## TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Una vez recolectados los filtros con las muestras y acondicionados en el laboratorio, se obtuvo la masa de las partículas a través del método gravimétrico, y con éste, la concentración de PTS (ec. 4), de acuerdo a la Norma Venezolana COVENIN 2060. Para ello, inicialmente se obtuvo el flujo de aire corregido en las condiciones de medición ( $Q_{cm}$ ), mediante la ecuación 1:

Ecuación 1. Flujo corregido en las condiciones de medición

$$Q_{cm} = Q_{cf} * \left( \frac{T_{cc}}{T_{cf}} * \frac{P_{cf}}{P_{cc}} \right)^{1/2}$$

Dónde:

- $Q_{cf}$  es el flujo a condiciones de fabricación del calibrador, en  $m^3/min$ , el cual se calculó a través de la curva de calibración y de los datos obtenidos en condiciones de calibración (Apéndices 1-4).
- $T_{cc}$  es la temperatura a condiciones de calibración, en K.
- $T_{cf}$  es la temperatura a condiciones de fabricación del calibrador, en K.
- $P_{cf}$  es la presión a condiciones de fabricación del calibrador, en mmHg.
- $P_{cc}$  es la presión a condiciones de fabricación, en mmHg.

Posteriormente, se determinó el flujo de aire en condiciones estándar ( $Q_{est}$ ), a través de la ecuación 2:

Ecuación 2. Flujo de aire en condiciones estándar.

$$Q_{est} = Q_{cm} * \left( \frac{T_{est}}{T_{cc}} * \frac{P_{cc}}{P_{est}} \right)$$

- $T_{est}$  es la temperatura en condiciones estándar (298 K).
- $T_{cc}$  es la temperatura en condiciones de calibración en K.
- $P_{est}$  es la presión en condiciones estándar (760 mmHg).
- $P_{cc}$  es la presión en condiciones de medición, en mmHg.



Una vez obtenido  $Q_{est}$ , se multiplicó por el tiempo de recolección (ec. 3), para finalmente determinar la concentración de PTS (ec. 4).

Ecuación 3. Volumen de aire corregido en condiciones estándar.

$$V_{est} = Q_{est} * t$$

Ecuación 4. Concentración de partículas en el aire

$$PTS = \frac{g \text{ filtro con muestra} - g \text{ papel de filtro}}{V_{est}} * 10^{-6} = \frac{\mu g}{m^3}$$



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos una vez colectadas las muestras y analizadas en el laboratorio:

### CONCENTRACIÓN DE PTS

La concentración de PTS obtenidas por el método gravimétrico (según la norma COVENIN 2060) para los dos puntos de muestreo, se presentan en las tablas 5 y 6:

Muestra	Fecha de muestreo	Tiempo de muestreo (h)	Peso de filtro (g)		Peso de partículas ( $\mu\text{g}$ )	Flujo promedio de aire ( $\text{pie}^3/\text{m}$ )	Qest ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	Vest ( $\text{m}^3$ )	PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
			Inicial	Final					
PTSM1	09/03/2017	23	2,83	2,96	125.400	60	1,84	2543,58	<b>49</b>
PTSM3	10/03/2017	16	2,84	2,94	97.500	59	1,81	1736,54	<b>56</b>
PTSM5	15/03/2017	23	2,85	3,04	188.500	60	1,84	2543,58	<b>74</b>
PTSM7	18/03/2017	23	2,82	2,95	125.900	60	1,84	2543,58	<b>49</b>
PTSM9	21/03/2017	20	2,83	2,98	150.100	62	1,91	2294,07	<b>65</b>
PTSM11	25/03/2017	21	2,83	2,88	48.800	63	1,95	2451,96	<b>20</b>
PTSM13	28/03/2017	23	2,82	2,90	82.600	61	1,88	2590,88	<b>32</b>
PTSM15	01/04/2017	23	2,83	2,98	153.000	59	1,81	2496,27	<b>61</b>
PTSM17	05/04/2017	23	2,85	3,08	227.900	59	1,81	2496,27	<b>91</b>
PTSM19	08/04/2017	23	2,81	2,95	140.000	61	1,88	2590,88	<b>54</b>
								<b>Media geométrica</b>	<b>51</b>

El máximo valor de concentración diario conseguido durante el periodo de monitoreo correspondiente a la estación ubicada en el Aeropuerto Metropolitano de Ocumare, fue de  $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; mientras que el mínimo valor obtenido fue  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tabla 5).



**Tabla 6. Datos y concentración de PTS de la estación Pitahaya-Charallave**

Muestra	Fecha de muestreo	Tiempo de muestreo (h)	Peso de filtro (g)		Peso de partículas ( $\mu\text{g}$ )	Flujo promedio de aire ( $\text{pie}^3/\text{m}$ )	Qest ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	Vest ( $\text{m}^3$ )	PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
			Inicial	Final					
<b>PTSM2</b>	10/03/2017	24	2,84	2,95	114.100	40	1,39	2004	<b>57</b>
<b>PTSM4</b>	13/03/2017	24	2,88	3,00	122.000	41	1,42	2046	<b>60</b>
<b>PTSM6</b>	16/03/2017	24	2,83	2,90	74.300	41	1,42	2046	<b>36</b>
<b>PTSM8</b>	18/03/2017	24	2,82	2,93	102.400	41	1,42	2046	<b>50</b>
<b>PTSM10</b>	21/03/2017	24	2,83	3,02	192.500	40	1,39	2004	<b>96</b>
<b>PTSM12</b>	25/03/2017	24	2,82	2,99	169.500	42	1,45	2088	<b>81</b>
<b>PTSM14</b>	28/03/2017	24	2,82	2,91	96.500	41	1,42	2046	<b>47</b>
<b>PTSM16</b>	01/04/2017	24	2,83	3,04	212.600	40	1,39	2004	<b>106</b>
<b>PTSM18</b>	05/04/2017	24	2,83	3,08	245.900	41	1,42	2046	<b>120</b>
<b>PTSM20</b>	08/04/2017	24	2,73	3,00	276.900	40	1,39	2004	<b>138</b>
								<b>Media geométrica</b>	<b>72</b>

Por otro lado, la localidad de Pitahaya-Charallave presentó un máximo de concentración de  $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo de  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tabla 6), donde se evidencia una importante diferencia en la concentración de PTS entre ambas estaciones (gráfico 1), estando los valores de la estación de Charallave muy por encima de los obtenidos en el aeropuerto.

En general, la estación de Pitahaya-Charallave reportó la mayor media geométrica de concentración de PTS con  $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tabla 6). En cambio, la estación del Aeropuerto presentó una media de concentración de  $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tabla 5), donde para el periodo de recolección de muestras (marzo-abril), no es posible clasificar las zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones de PTS (tabla 2), ya que estos se calculan en base a promedios anuales, según el artículo 5° del decreto 638.

Sin embargo, al evaluar los porcentajes de excedencia en el lapso de muestreo con un periodo de medición de 24h (tabla 3), las concentraciones de PTS diarias en la estación de monitoreo de Pitahaya-Charallave, superaron en cinco oportunidades el valor límite ( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) establecido en el artículo 3 del decreto 638, siendo los días; 21 y 25 de marzo; 1, 5 y 8 de abril (Tabla 6) los que sobrepasan dicho valor de



concentración, presentando entonces un porcentaje de excedencia de 50%. Por otro lado, la estación ubicada en el aeropuerto supera el valor establecido por la normativa ( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) solo en una oportunidad (tabla 5), por lo que no se alcanza el límite del porcentaje de excedencia (tabla 3), al solo presentar 10%.

La estación ubicada en Pitahaya se encuentra rodeada de industrias, razón por la cual se evidencia una mayor concentración de PTS, ya que estas actúan como fuentes de emisión, a diferencia del punto de muestreo del aeropuerto, el cual se encuentra en un área mucho más despejada.

Por esta razón, las medidas de concentración de PTS para ambas zonas resultaron ser significativamente diferentes entre sí (gráfico 1), debido al hecho de que el punto de muestreo situado en Pitahaya-Charallave recibe un mayor impacto de las emisiones industriales y vehiculares, al estar ubicado en una zona industrial.

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado, se puede decir que los niveles de concentración de PTS en la atmósfera de las dos zonas de estudio, están influenciadas en gran medida, por las actividades humanas.

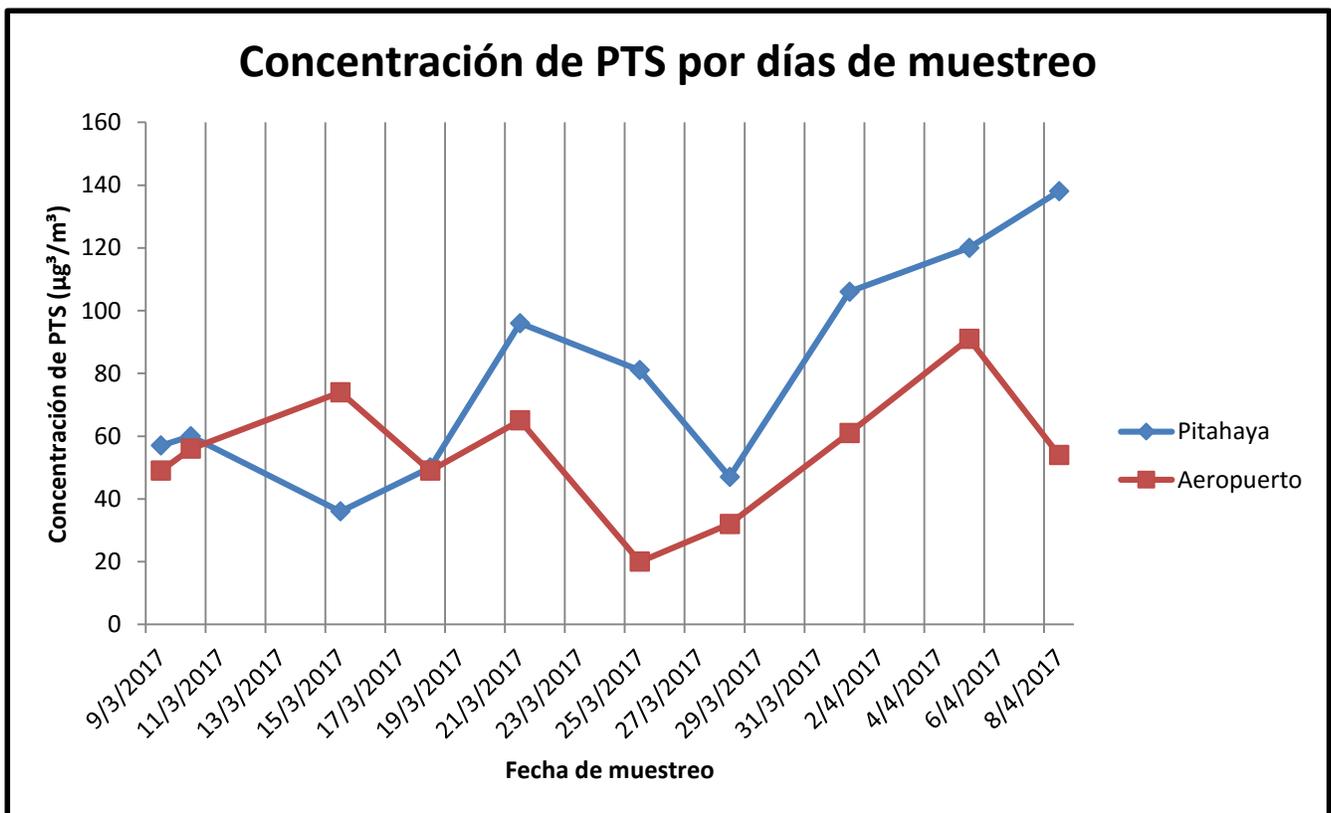


Gráfico 1. Concentración de PTS por días de muestreo.



Se presume que las variaciones diarias encontradas en las concentraciones de la localidad de Pitahaya-Charallave, se debe a que probablemente la fábrica ubicada frente la estación de monitoreo estuvo llevando a cabo procesos donde la emisión de partículas a la atmósfera fue mayor, días en los cuales se observan los máximos de concentración, mientras que los mínimos pudieron ser generados por el cese de las actividades industriales durante algunos días determinados. De igual manera, dichos mínimos reportados pudieron verse ocasionados por las fallas eléctricas que regularmente se registraron en dicha localidad, lo cual ocasionó el apagado del equipo de muestreo.

Es importante mencionar, que las horas de muestreo durante las fallas eléctricas fueron compensadas prolongando el muestreo durante el mismo tiempo que el equipo estuvo desactivado por dichas las fallas, de manera que el tiempo de recolección siempre fue de 24h. Por otro lado, durante la recolección de las muestras en la estación del Aeropuerto, las horas de muestreo no pudieron ser compensadas durante los apagones, por lo que en este caso, si se observan variaciones en las horas de recolección.

También vale la pena indicar, que durante el lapso de muestreo se estaba en periodo de sequía, por lo que no se registraron precipitaciones atmosféricas, con lo cual se descarta la posibilidad de depositación húmeda para explicar los mínimos de concentración.

Una vez realizado el cálculo de las concentraciones de partículas totales suspendidas (PTS), se llevó a cabo la metodología planteada en las páginas 70 y 71, para posteriormente realizar los análisis por MEB-EDX.

De igual forma, se llevó a cabo el análisis de un blanco, el cual se muestra a continuación:



## BLANCO

Para realizar el análisis del blanco se tomó de manera aleatoria un filtro sin usar, del mismo empaque de los filtros utilizados para muestrear, del cual se recortó una pequeña porción.

Del análisis se obtuvo la composición química elemental (fig. 18), constituido por silicio y oxígeno principalmente, y en menor proporción sodio, aluminio, zinc, bario y calcio, cuyos promedios (en porcentaje atómico) se muestran en la tabla 7.

Igualmente se pudo observar la disposición de las microfibras que constituyen el filtro (fig. 19), las cuales presentan diámetros entre 1 y 3,5  $\mu\text{m}$ .

Debido a que los átomos de la microfibra de los filtros siempre emiten señales de Rayos X característicos durante el bombardeo de electrones, todos los análisis químicos realizados en las diferentes muestras siempre están presentes el silicio, oxígeno, sodio, etc., sin poder diferenciar en algunos casos, si las partículas contienen en su composición dichos elementos en determinados porcentajes.

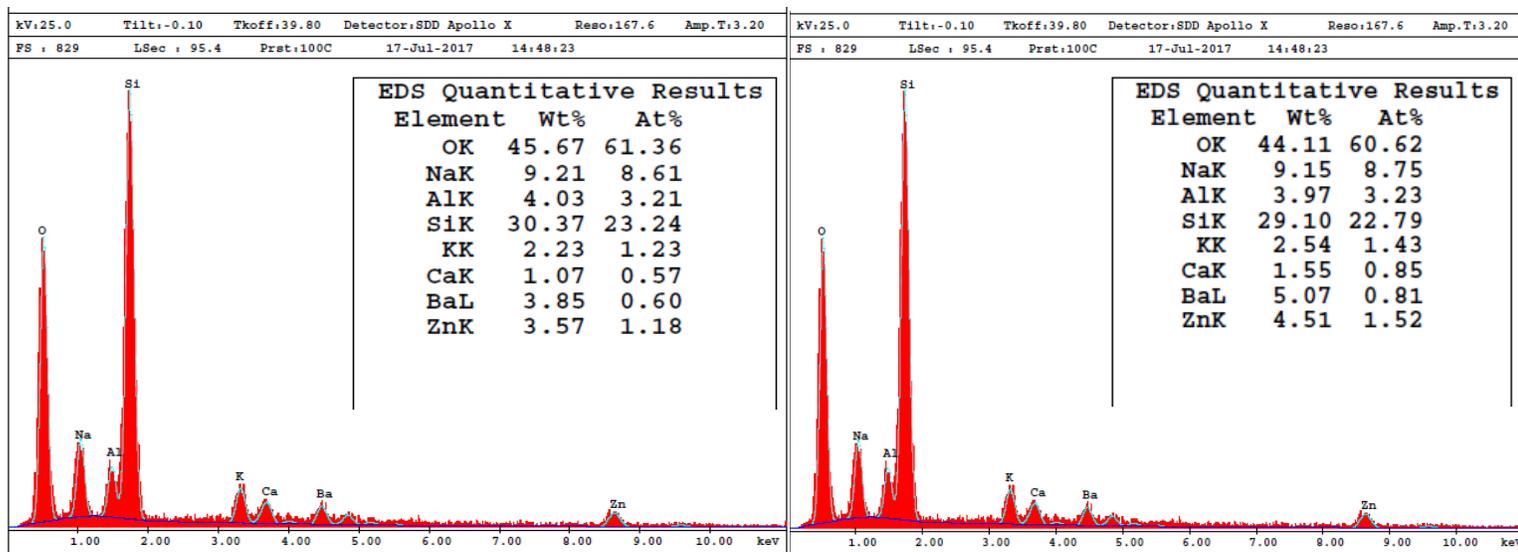


Figura 18. Composición elemental del blanco obtenida a través de EDX.



Tabla 7. Composición elemental del blanco en % atómico.

Réplica	O	Na	Al	Si	K	Ca	Ba	Zn
R1	61,36	8,61	3,21	23,24	1,23	0,57	0,6	1,18
R2	60,62	8,75	3,23	22,79	1,43	0,85	0,81	1,52
Promedio	<b>60,99</b>	<b>8,68</b>	<b>3,22</b>	<b>23,02</b>	<b>1,33</b>	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>	<b>1,35</b>

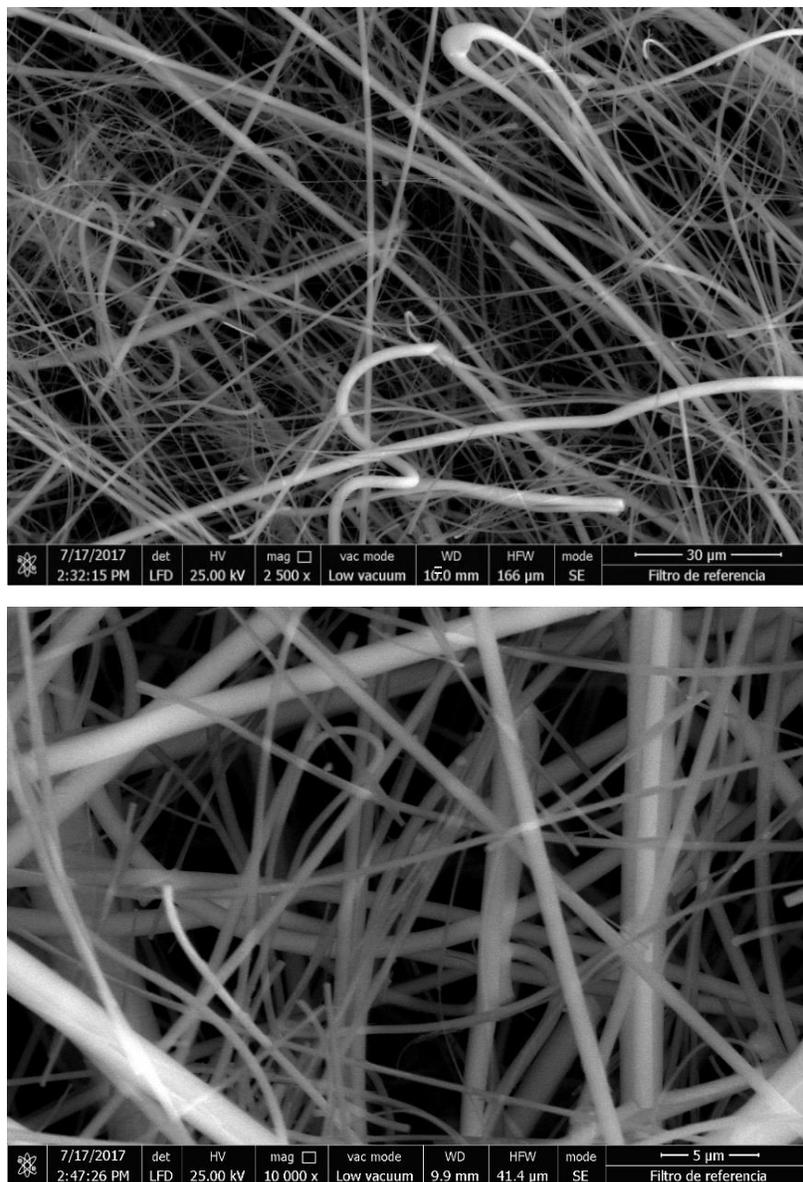


Figura 19. Fibras del blanco (filtro sin muestra) visto a través del microscopio electrónico de barrido a 2500 y 10000 de magnificación.



## ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Una vez analizados los blancos, se procedió a analizar las muestras directamente en el filtro, donde se observó la presencia de partículas sin necesidad de separarlas del mismo.

Se analizaron tres muestras de PTS por cada filtro; siendo 10 filtros para la Zona de Pitahaya-Charallave y 10 filtros en el Aeropuerto Metropolitano de Ocumare, dando un total de 20 filtros analizados para ambas zonas.

A partir de los análisis realizados por MEB-EDX se pudo observar que la distribución de partículas en el filtro es bastante homogénea (fig. 20), existiendo una importante variedad de morfologías. Igualmente, de los análisis químicos realizados a 181 partículas individuales, se determinó la presencia de los elementos que las constituyen, información que permitió agruparlas según su morfología y sus composiciones asociadas, en función de la zona de muestreo, las cuales se muestran en los siguientes apartados.

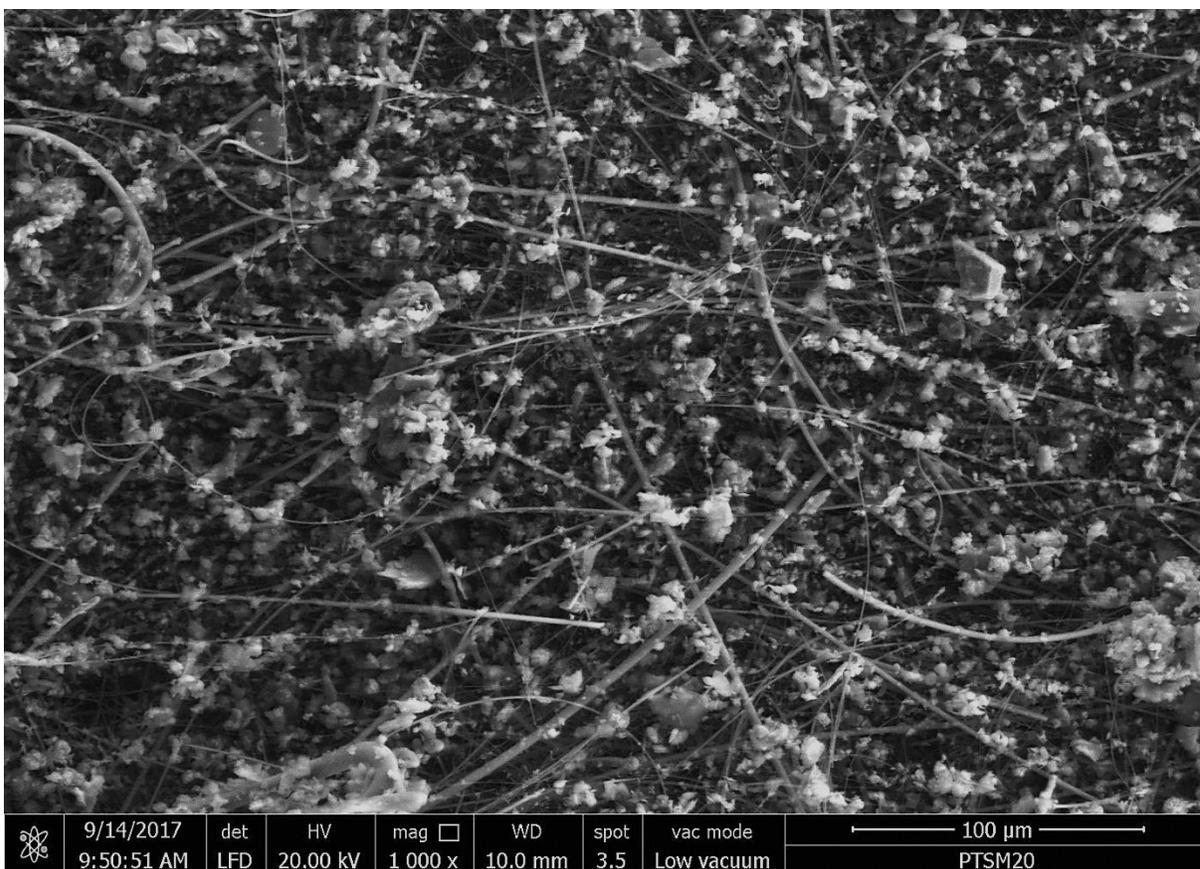


Figura 20. Distribución homogénea de PTS en filtro.



## AEROPUERTO METROPOLITANO DE OCUMARE

Del análisis de las muestras por MEB-EDX se obtuvo una serie de morfologías con una composición química asociada, las cuales se muestran a continuación:

### MORFOLOGÍA

En esta estación de monitoreo se encontraron partículas de morfologías esféricas lisas, cenósferas, ovoidales, cúbicas, irregulares y amorfas, todas estas generalmente formando parte de agregados.

Así mismo, se evidenció que la densidad de los agregados es proporcional a la concentración de PTS, ya que mientras mayor es la concentración, mayor es la densidad de partículas formando parte de agregados. En la figura 21 se muestra un ejemplo del filtro que presentó la mayor concentración de PTS en este punto de muestreo (muestra 17), en el cual se observa que las partículas de diferentes morfologías aparecen como agregados, mientras que en la figura 22, se observa que las partículas escasamente están presentes de forma individual, por tratarse de la muestra que presentó la menor concentración de PTS (muestra 11).

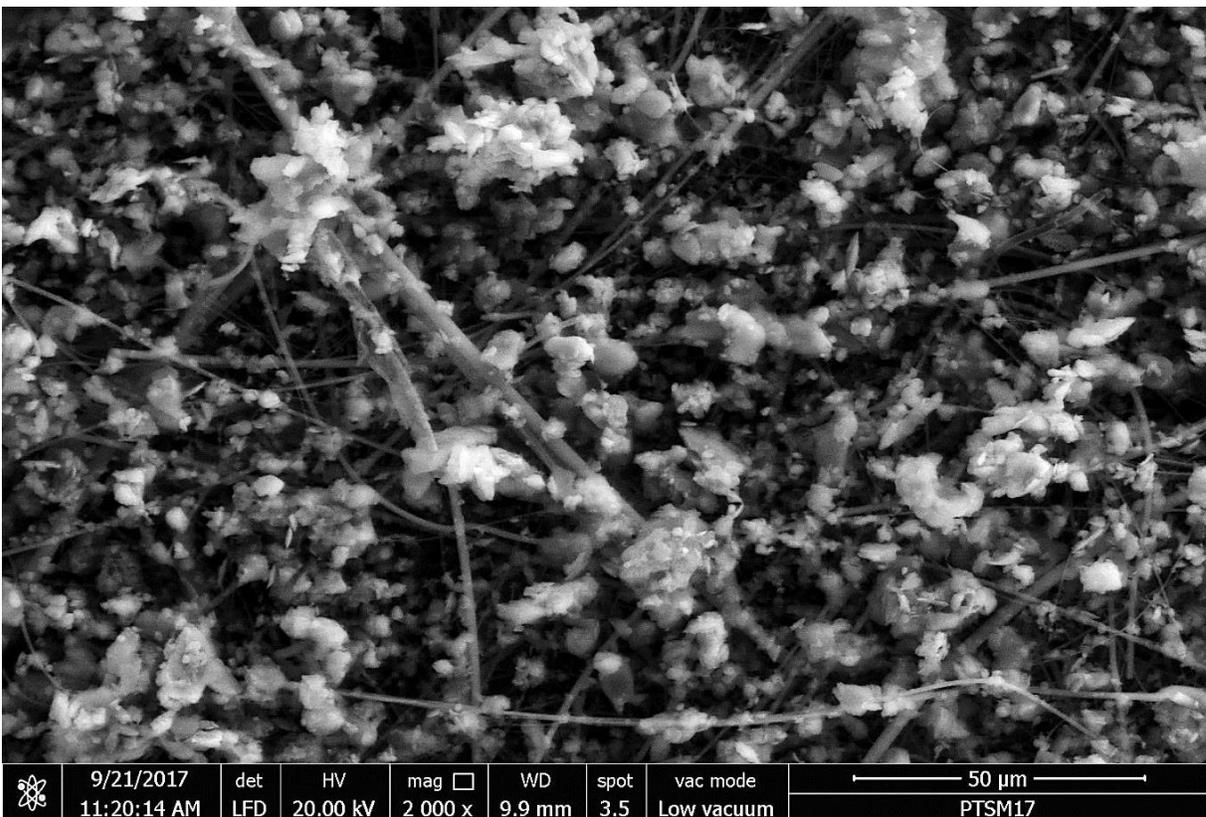


Figura 21. Agregados de partículas en muestra 17.

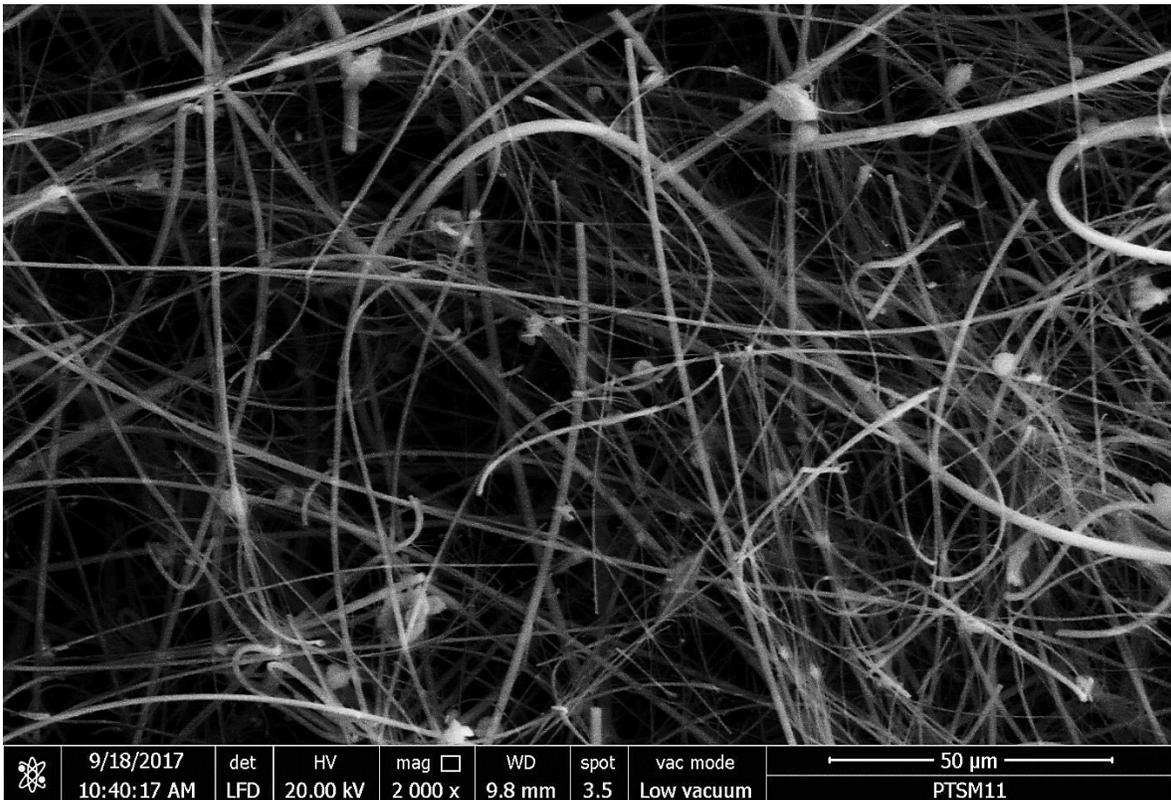


Figura 22. Partículas individuales en muestra 11.

### ESFÉRICAS LISAS

Estas partículas mostraron una morfología esferoidal (fig. 23), de diámetros entre 10 y 30  $\mu\text{m}$ , con superficies aparentemente lisas. Generalmente estuvieron presentes formando parte de agregados, y algunas veces con partículas más pequeñas sobre su superficie.

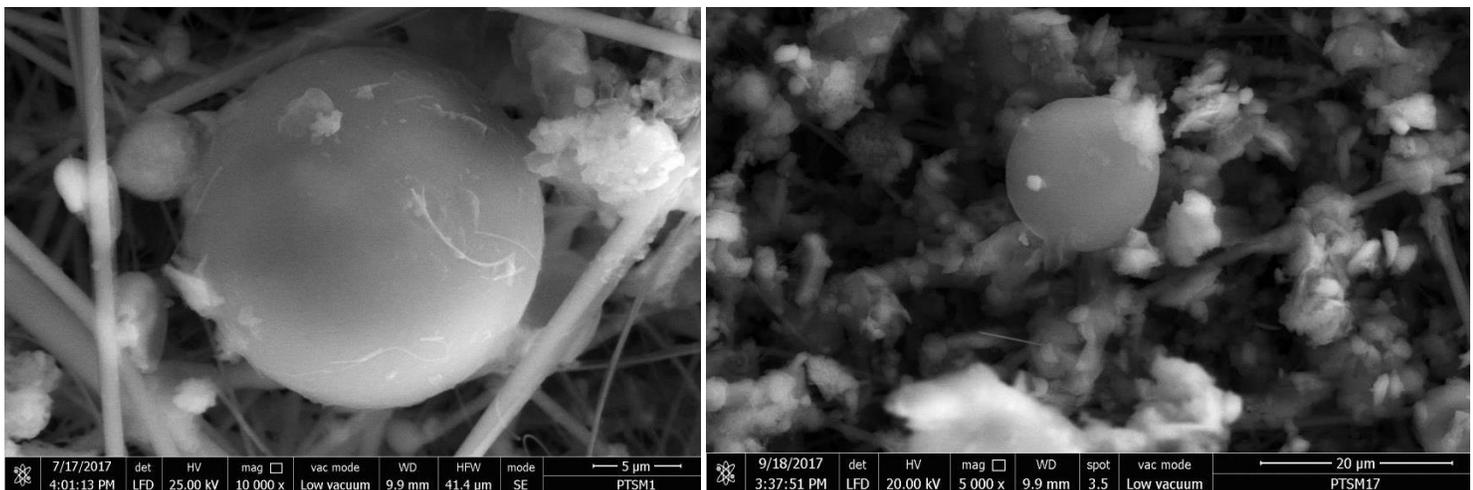


Figura 23. Partículas esféricas lisas.



## CENÓSFERAS

Las partículas cenósferas exhiben una morfología esférica, con una apariencia cavernosa, presentando agujeros en la totalidad de su superficie (fig. 24). Estas muestran diámetros menores o iguales a  $5\ \mu\text{m}$  y ocasionalmente, aparecieron agrupadas con otras partículas de igual morfología.



Figura 24. Partículas con morfologías cenósferas.

## OVOIDES

Estas partículas estuvieron presentes en muy poca abundancia, exhibiendo diámetros entre  $5$  y  $16\ \mu\text{m}$  aproximadamente, todas con una superficie aparentemente lisa (fig. 25).

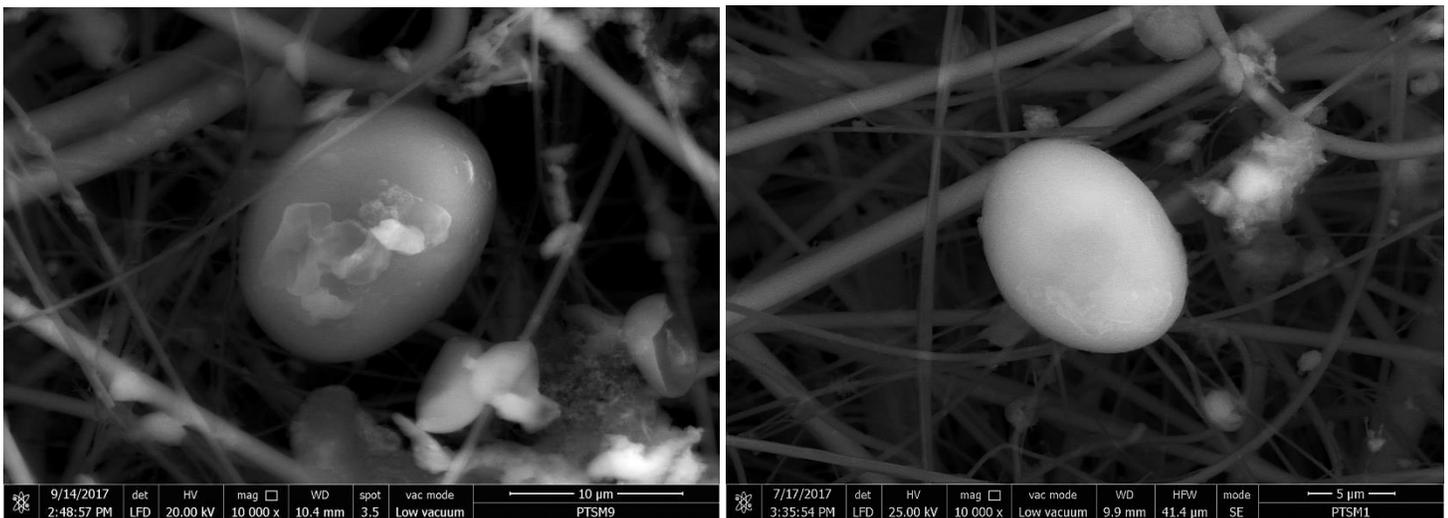


Figura 25. Partículas de morfología ovoidal.



## CÚBICAS

Partículas cristalinas de gran simetría, con una morfología cúbica bien definida y con una superficie lisa (Fig. 26). Generalmente con tamaños entre 1 y 5  $\mu\text{m}$ .

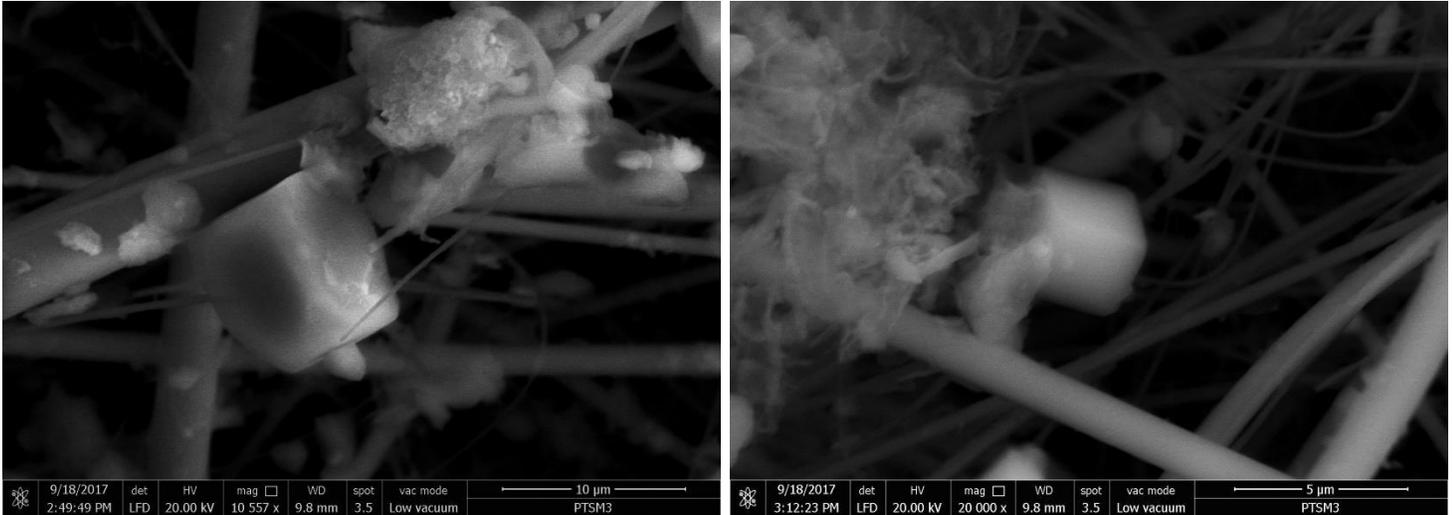


Figura 26. Partículas cúbicas.

## IRREGULARES

Las partículas irregulares (fig. 27) fueron abundantes, las cuales presentaron tamaños variables, que van desde 1  $\mu\text{m}$  hasta más de 60  $\mu\text{m}$ , algunas con bordes pronunciados, y mayormente formando parte de agregados.

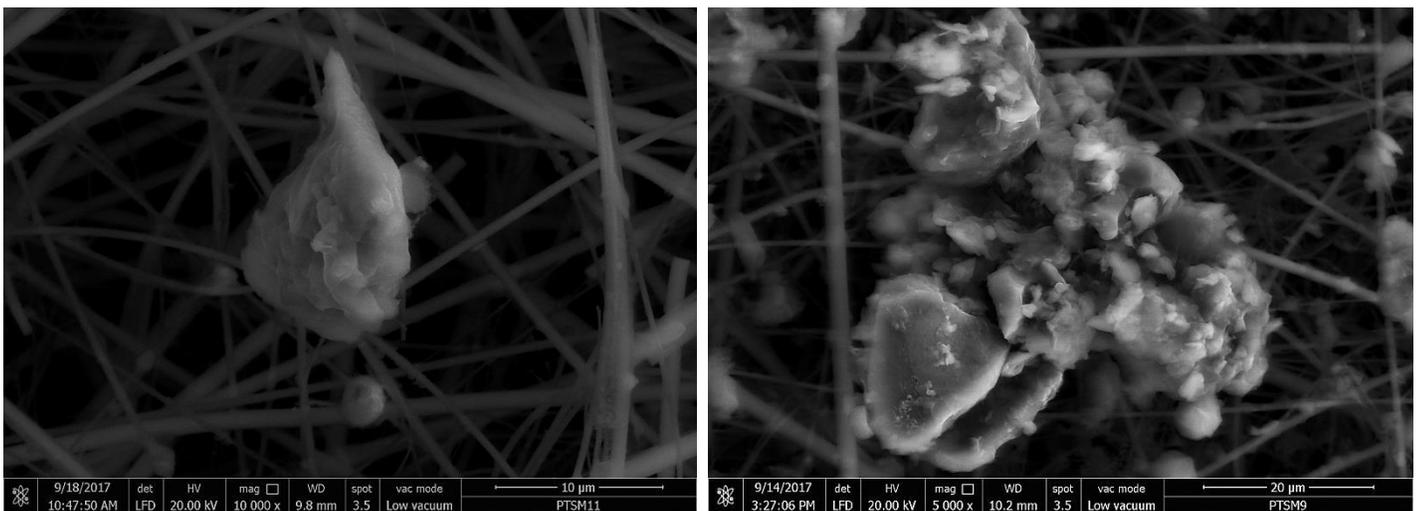


Figura 27. Partículas irregulares.



## AMORFAS

Partículas sin una forma reconocible, con ausencia de bordes o fracturas, generalmente de superficie lisa y tamaños de 10  $\mu\text{m}$  (fig. 28). Ocasionalmente presentaron agujeros.

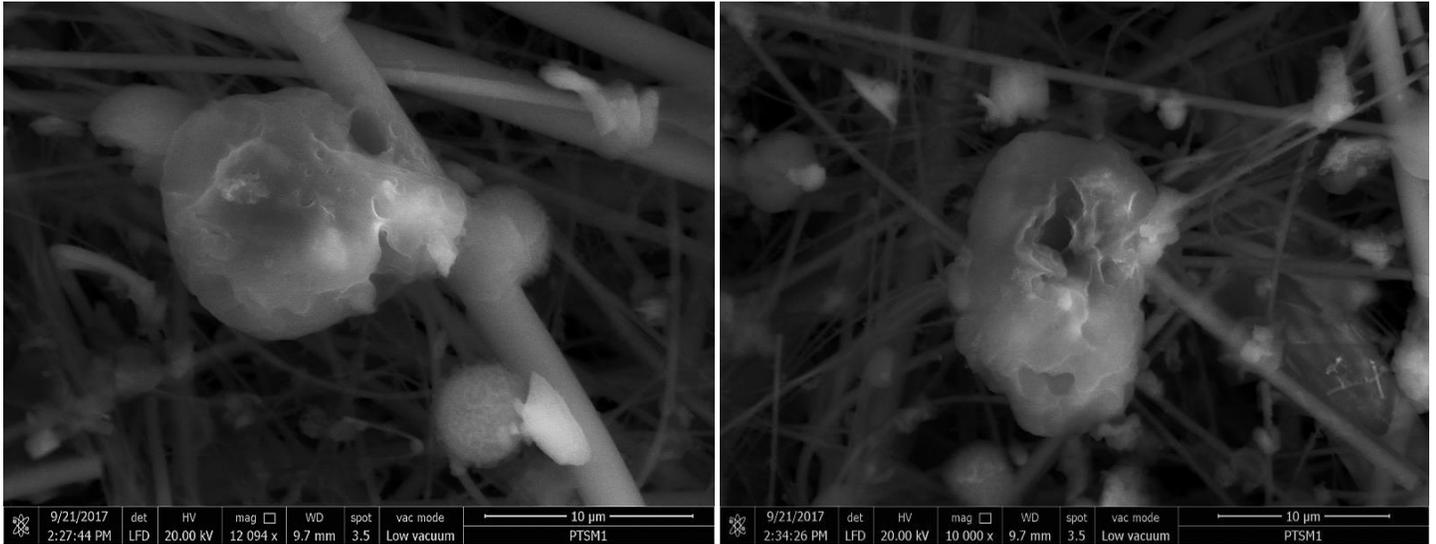


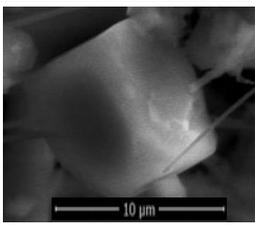
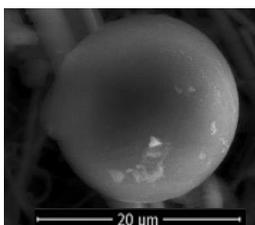
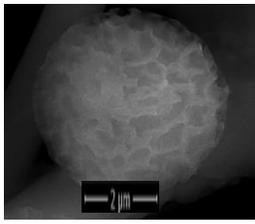
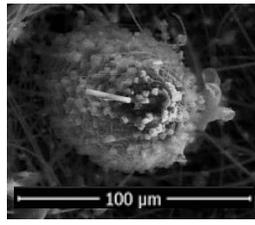
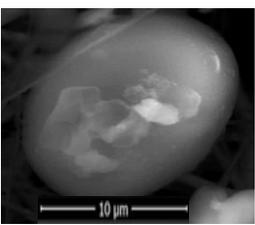
Figura 28. Partículas amorfas.



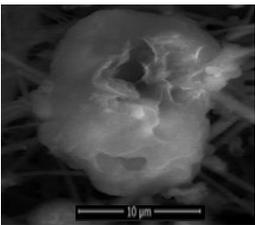
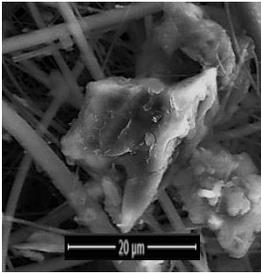
## COMPOSICIÓN QUÍMICA ASOCIADA A CADA MORFOLOGÍA

A continuación, en la tabla 8 se muestran las composiciones elementales obtenidas para cada tipo de morfología identificado en la estación del aeropuerto.

Tabla 8. Morfología y composición química promedio de las partículas del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Morfología	Características	Composición (%)													
		C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti	Fe
	Cúbico	15,2	18,4	25,7						28,9					
	Esféricas Lisas	63,5	28,9	2,6			2,5		0,3						
	Cenósferas	45,8	36,8	5,4	0,6	0,9	6,3	0,4	0,2	2,0	0,5	0,7			
	Bilógicas	60,9	31,4	1,9		0,5	3,3	0,3	0,2	0,4	0,6				
	Ovoides	39,6	35,1			1,8	10,1				1,4	2,9			



Morfología	Características	Composición (%)													
		C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti	Fe
	Amorfas	49,0	33,9	2,9		1,3	6,6		0,4	1,3	3,1				
		20,7	49,0	3,7		2,8	19,5			1,7	1,6	0,8			
		22,5	55,1	2,5		1,7	4,7				0,6	11,4			
		15,1	53,9	2,5	1,0	8,3	15,1			1,1	1,6	1,2			1,1
	Irregulares	49,3	35,1	3,7	0,5	1,1	7,7		0,2	1,3	0,5				
		Carbonosas													
		Ricas en Al													
		Ricas en Ca													



La totalidad de las partículas analizadas presentaron altas concentraciones de carbono y oxígeno (tabla 8. Apéndices de 5 al 14).

Por otra parte, las partículas irregulares presentaron una gran variedad en composición, lo que permitió agruparlas según sus elementos dominantes y característicos.

La composición química y la morfología de las partículas están directamente relacionadas con el origen, por lo que la interpretación de la composición elemental obtenida para cada morfología, se detallará en el siguiente apartado.

## ORIGEN Y POSIBLES FUENTES DE EMISIÓN

---

Una vez clasificadas las morfologías según sus diferentes composiciones, se puede establecer la relación que existe entre ambas y proponer sus orígenes y posibles fuentes de emisión.

Los resultados anteriormente expuestos mostraron la presencia de elementos considerados como típicos marcadores antropogénicos (carbono, azufre, potasio, cloro, silicio y fósforo), asociados a partículas esféricas y partículas porosas, morfologías las cuales, pueden atribuirse a fuentes antrópicas.

De igual forma, se observaron partículas con relaciones estequiométricas y morfologías características de partículas de origen natural, como lo son las partículas cúbicas de cloruro de sodio.



## PARTÍCULAS ESFÉRICAS LISAS CARBONOSAS

Las partículas con morfologías esféricas se les atribuye un origen antrópico, ya que las partículas que surgen de la combustión u otro proceso realizado a altas temperaturas, se caracterizan en la mayoría de los casos, por presentar una forma esférica, debido fundamentalmente al proceso de fusión que se produce durante su formación. (Galán M., 2004; Zhu Y., et al., 2004)

Los compuestos de carbono con estas formas aparecen como subproductos de combustión incompleta, tanto industriales como procedentes de vehículos automotor, quema de biomasa y actividades urbanas. (Esteve R., 2011)

Se observa una gran similitud en la composición y tamaño de las partículas esféricas lisas anteriormente mencionadas, con las reseñadas en trabajos como los de Galán M., et al. 2004; Ramos J., 2006; Gasca M., 2007 y Coz E., 2008, asociadas a orígenes antrópicos, producto de procesos industriales y urbanos, por lo que se puede proponer que estas también están asociadas a actividades humanas.

## PARTÍCULAS CÚBICAS DE CLORURO DE SODIO

Durante el análisis de las muestras, fue común la presencia de partículas cristalinas de cloruro de sodio, con un hábito cúbico bien definido (tabla 8. Fig. 26).

Las cristalizaciones naturales también siguen algunas tendencias características y suelen tener estructuras básicas y regulares, que dependen de la composición química del material. El origen de tales partículas es generalmente marino y éstas se componen fundamentalmente de cloruros y cantidades más pequeñas de sulfatos. Es común encontrar estos sistemas contaminados por otros elementos que están muy extendidos en el medio ambiente, como el calcio o el silicio. (Galán M., 2004)

Tomando en cuenta lo anteriormente dicho, se puede proponer que las partículas cúbicas muestreadas pudieron surgir de sales disueltas en medios acuosos,



específicamente de aerosoles marinos, que se evaporan para formar cristales (Galán M., 2004; Coz E., 2008), por lo que se les atribuye un origen natural.

Este tipo de partículas se generan en los mares y océanos por la agitación y acción mecánica del viento sobre la superficie de estos, desprendiendo burbujas, que al explotar incorporan pequeñas gotas de agua a la masa de aire en movimiento. Estas gotas de agua, bajo determinadas condiciones de humedad (superior al 98%), pueden quedar en suspensión en la atmósfera, y cuando la humedad disminuye hasta la saturación salina, puede producirse una evaporación en estas pequeñas gotas, obteniendo partículas salinas sólidas (Agirre I., et al, 2006; Ramírez D., 2010; Esteve R., 2011).

En trabajos anteriores, se ha reportado que las partículas de aerosoles marinos pueden viajar grandes distancias. Por ejemplo, Ramos J. (2006), determinó la presencia de partículas cúbicas de cloruro de sodio, asociado a un origen natural, provenientes de aerosoles marinos, en El Silencio y Cementerio del municipio Libertador en Caracas.

Otros trabajos, como los de García D., (2013) y Aldabe S., (2011), comprobaron que las partículas atmosféricas pueden provenir de fuentes regionales, clasificándolas según las masas de aire, proviniendo del océano Atlántico, África y Europa central, siendo transportadas desde zonas lejanas hasta el punto de muestreo (Navarra y La Coruña, España).

Tomando en consideración lo anteriormente dicho, se establece la posibilidad del arrastre de aerosoles marinos por los vientos, ya que por la ubicación geográfica del estado Miranda, recibe la influencia marina desde las costas al Norte y Este.



## PARTÍCULAS CENÓSFERAS CARBONOSAS

Se determinó la presencia de partículas cenósferas, tanto individuales, como formando parte de agregados, todas de aproximadamente  $5\mu\text{m}$  (Tabla 9 y fig. 24).

Esta morfología es característica de partículas antropogénicas, las cuales se forman como resultado de transformaciones termoquímicas de las formas originales de material carbonoso e hidrocarburos, producto de su combustión, cuando se expulsa material gaseoso o líquido del interior de la partícula, debido a un aumento de la presión interna o a una depresión externa (Galán M., 2004; Ramos J., 2006; Fomenko E., 2011).

Las partículas esféricas porosas o cenósferas procedentes de la combustión, usualmente de gasolina, presentan una matriz carbonácea, alto contenido de azufre y dependiendo del tamaño, pueden contener metales traza característicos como níquel y vanadio. (Galán M., 2004; Gasca M., 2007)

Se propone que las fuentes más cercanas de este tipo de partículas son las avionetas y helicópteros que operan en el aeropuerto, las cuales utilizan como combustible queroseno para su funcionamiento, lo que explicaría el bajo contenido de azufre en las partículas generadas durante el uso de dicho combustible.



## PARTÍCULAS BIOLÓGICAS

Se encontraron partículas con estructuras muy complejas y simétricas (fig. 29), cuya morfología no se agrupó en las clasificaciones anteriores por su forma tan complicada. Sin embargo, el alto porcentaje de carbono (tabla 8) y sus morfologías tan exclusivas, indica que son biológicas. Estas presentaron tamaños hasta más de 30 micrómetros.

En trabajos como los de Galán M., (2004) y Coz E. (2008) se encontraron partículas con morfologías muy complejas, altos contenidos de carbono y tamaños mayores de 10 $\mu$ m, las cuales fueron identificadas como polen y/o esporas.

En esta estación, este tipo de partículas fue muy poco abundante, cuya composición y morfología sugiere que proviene la biomasa, por lo que son de origen natural.



Figura 29. Partícula de origen biológico a 4000 de magnificación.



## PARTÍCULAS OVOIDALES

Por otro lado, se detectó la presencia de partículas con formas ovoidales, cuyo promedio de concentración se muestran en la tabla 9 y apéndice 12, información con la cual se pueden comparar con las partículas características de fuentes antrópicas, mostrando un contenido relativamente alto de Si, y una forma poco característica de productos de actividades humanas.

El alto contenido de carbono, se puede asociar a otras sustancias carbonosas adheridas sobre la superficie estas partículas, ya que todas las partículas caracterizadas en esta zona presentan altos contenidos de dicho elemento, siendo el caso más llamativo el de las partículas cúbicas, las cuales presentan un hábito característico de la halita acompañado de una relación estequiometría: Na:Cl 1:1, por lo que se asume que el alto contenido de C y O puede estar asociado a otra sustancia ajena a la partícula en estudio.

Las partículas naturales y antropogénicas presentan algunas características morfológicas que pueden utilizarse para discriminar entre ellas (Galán M., 2004).

La estructura y composición de las partículas naturales puede ser muy diversa, y a menudo se encuentra que estas partículas tienen bordes muy acentuados, causando líneas de fractura de su estado primitivo (Galán M., 2004), pero en el caso de partículas que sufren procesos de erosión y transporte, tienden a adquirir esfericidad y redondez, conformándose a formas de ovoides, por lo que se puede aventurar que estas partículas provienen de fuentes naturales, cuyas morfologías fueron adquiridas por procesos de transporte, a través del viento.

Los principales elementos químicos de las rocas de la corteza son el silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, potasio y otros metales (Coz E., 2008), por lo que las partículas de origen geológico provenientes principalmente de la erosión del suelo están compuestas primordialmente de carbonatos de calcio y magnesio ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ), sílice, feldspatos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) y arcillas ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) (Paoletti et al., 2003; Gasca M., 2007), generadas de forma primaria por la interacción mecánica del viento con la corteza terrestre, las cuales son removidas de la superficie e incorporadas a la



atmósfera mediante mecanismos de convección y circulación de masas de aire (Estellés V., 2006; Esteve R., 2011).

## PARTÍCULAS IRREGULARES

Las partículas irregulares resultaron ser las más difíciles de caracterizar al no mostrar características definidas, siendo algunas ricas en Si (20%) y O (40%) (Tabla 8. Apéndice 13) las que mostraron atributos característicos de minerales, como fracturas concoideas. Lo que permite inferir que se trata de partículas cuarzo.

Es posible que partículas de origen mineral estén presentes en el aire debido a la intervención de alguna actividad humana, en estos casos el criterio para determinar si se designa como antrópico a estas partículas, es la abundancia relativa. Si la abundancia relativa de partículas minerales es muy elevada, la razón de su presencia en el aire puede ser la intervención de una determinada actividad humana (probablemente emisiones fugitivas de minerales utilizados como materia prima). (Gasca M., 2007)

Tomando en consideración lo anteriormente expuesto, se puede establecer que las partículas irregulares de cuarzo, provienen de fuentes antrópicas, ya que las mismas fueron las más abundantes y no presentaron formas características de haber sufrido erosión y transporte. Adicionalmente, se conoce que existe una gran cantidad de construcciones y cementeras en la zona de estudio.

El resto de las partículas irregulares no mostraron características de ser de origen natural, sin embargo, no es posible establecer una asociación de este tipo de partículas a una fuente emisora en específico.



## PARTÍCULAS CARBONOSAS AMORFAS

Las partículas antropogénicas muestran diferentes niveles de oxidación, dependiendo del proceso del que proceden (por ejemplo, combustión, fundición, calcinación). En las partículas formadas por la combustión, el carbono, el aluminio, el silicio y el azufre son los elementos principales y son a menudo acompañados de metales traza (Gasca M., 2007).

Las partículas carbonosas distintas del hollín, procedentes de la combustión, pueden presentarse con formas distintas a las esféricas, como partículas amorfas y no agregadas, igualmente con composición dominada por carbono. (Singh A. et al., 2011)

Por esto, bajo la base de la composición de las partículas amorfas, dominada por O-C, y marcadores antropogénicos cuando están en menor proporción, como lo son el Cl, Si y S (tabla 8), posiblemente se generaron a partir de procesos energéticos, cuya ausencia de forma pudo ser consecuencia de un enfriamiento rápido que no permitió la formación de una morfología esférica. Igualmente, algunas de estas partículas presentan agujeros que sugieren el escape de gases, por lo que se propone que se formaron durante la combustión de desechos o quema de biomasa, ya que en las adyacencias del aeropuerto, es habitual la quema de dichos materiales.

Toda la información anteriormente expuesta, se resume en la tabla 9.



Tabla 9. Resumen de características de las partículas. Estación Aeropuerto.

Morfología	Composición	Origen	Fuentes de emisión
Cúbicas	Cl, Na	Natural	Aerosoles marinos
Ovoides	C, O, Ca	Natural	Geología
Cenósferas	C, O, Al	Antrópico	Fuentes móviles
Biológicas	C, O, P, S	Natural	Vegetación
Irregulares	Si, O, Al, Ca, C	Natural-indefinido	Construcciones-indefinido
Esféricas lisas	C, O	Antrópico	Industrias
Amorfas	C, O, Si, Cl	Antrópico	Quema de desechos-biomasa.



## PITAHAYA-CHARALLAVE

Las partículas atmosféricas recolectadas y caracterizadas mediante MEB-EDX mostraron una gran variedad de morfologías y composiciones. Siempre distribuidas uniformemente en los filtros y generalmente formando parte agregados (fig. 30), siendo esta una característica común para todas las muestras de esta estación, la cual mostró concentraciones de PTS relativamente altas.

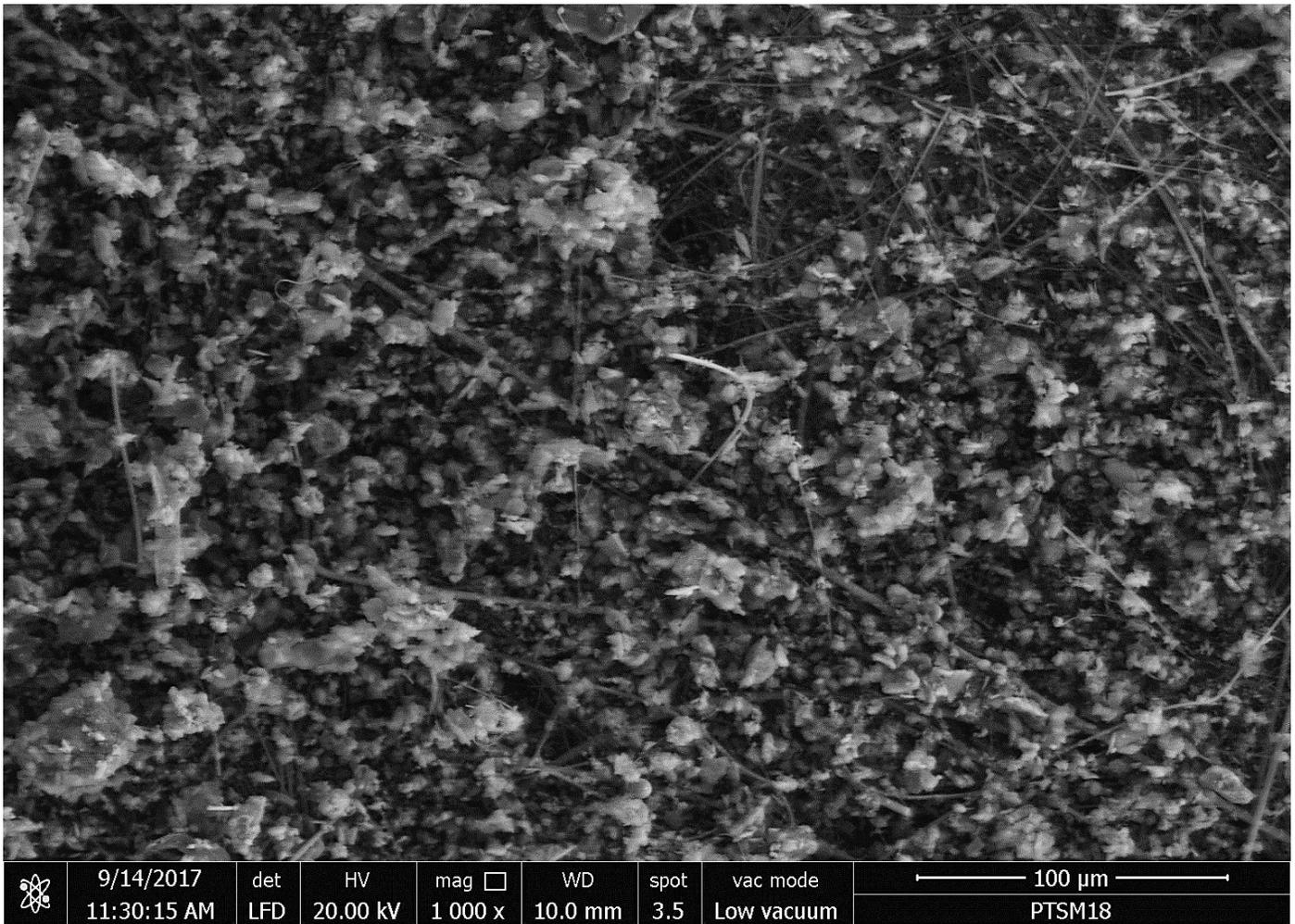


Figura 30. Distribución de partículas en filtro (muestra 18) a una magnificación de 1000.



## MORFOLOGÍA

En esta estación las partículas se vieron dominadas por morfologías esféricas lisas, esféricas con relieve, semiesferas huecas, laminares, irregulares, irregulares porosas y tabulares.

### ESFÉRICAS LISAS

Las partículas con estas morfologías presentaron diámetros entre 10 y 30  $\mu\text{m}$  aproximadamente y superficies lisas. Algunas con partículas más pequeñas en su superficie (fig. 31), todas de características muy similares a las encontradas en la estación del aeropuerto.

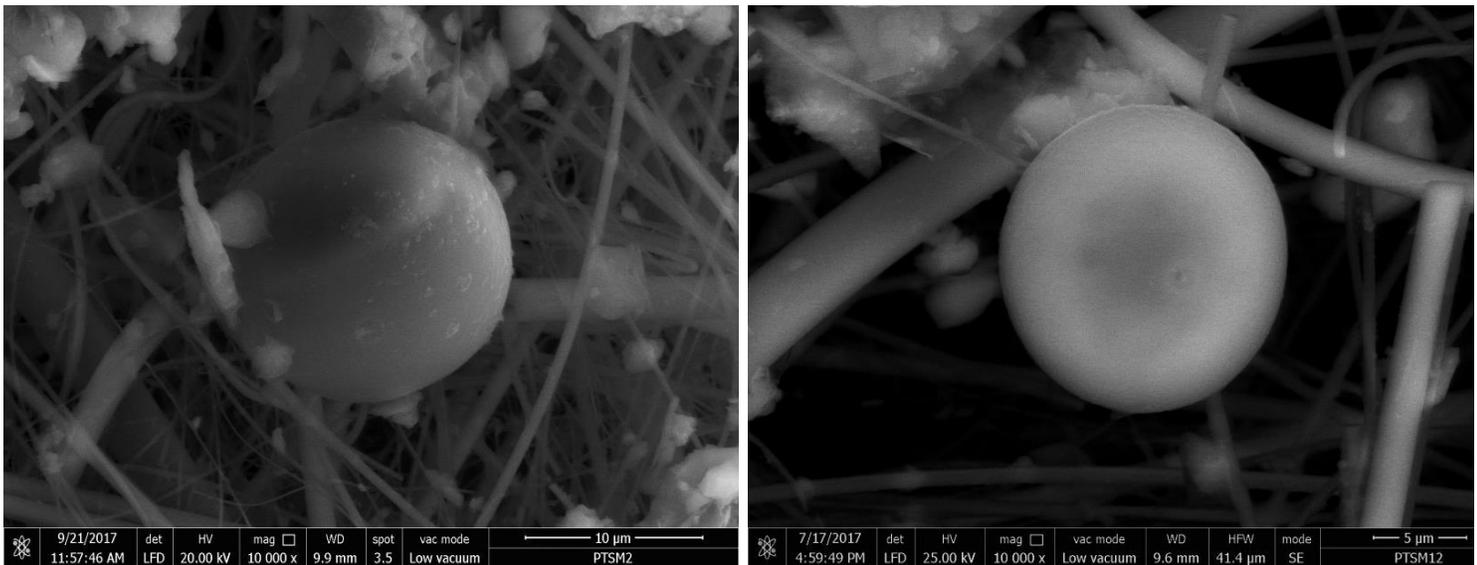


Figura 31. Partículas esféricas lisas.



### ESFÉRICAS CON RELIEVE

Estas partículas presentaron una morfología un poco más compleja (fig. 32) y se observaron en menor proporción. Presentaron diámetros entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ , con superficies de apariencia rugosa y agrietada, y otras con relieves mucho más sobresalientes.

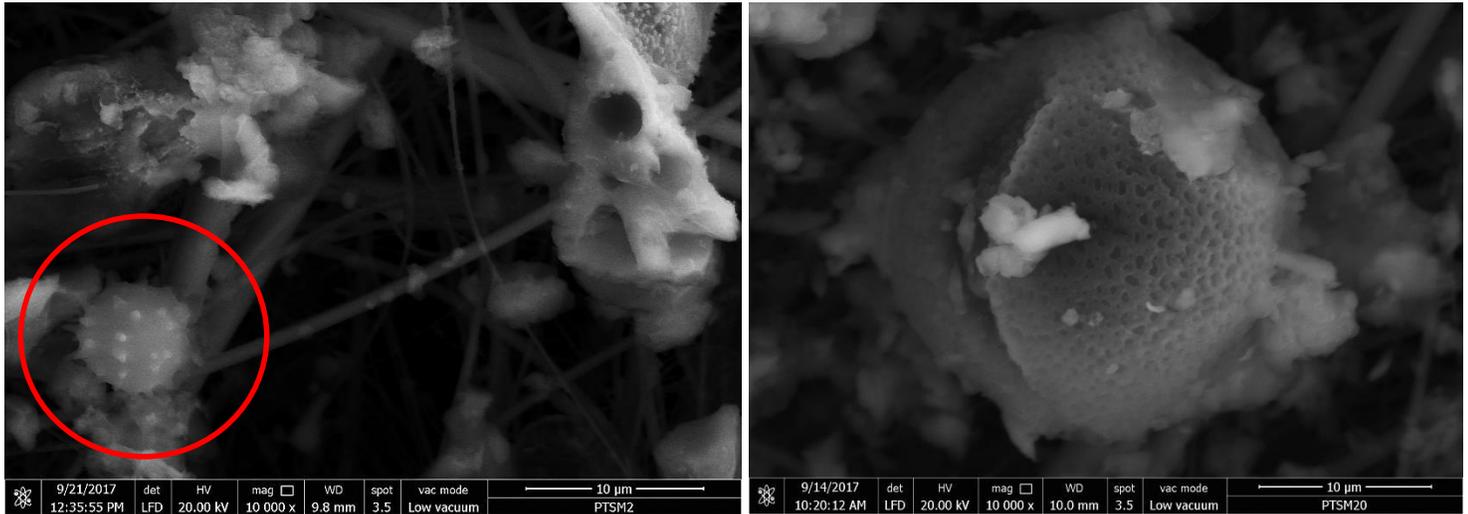


Figura 32. Partículas esféricas con relieve.

### SEMIESFERAS HUECAS

Estas partículas presentaron diámetros de 5  $\mu\text{m}$ , con superficies irregulares (fig. 33) y al igual que las esféricas con relieve, fueron poco abundantes.

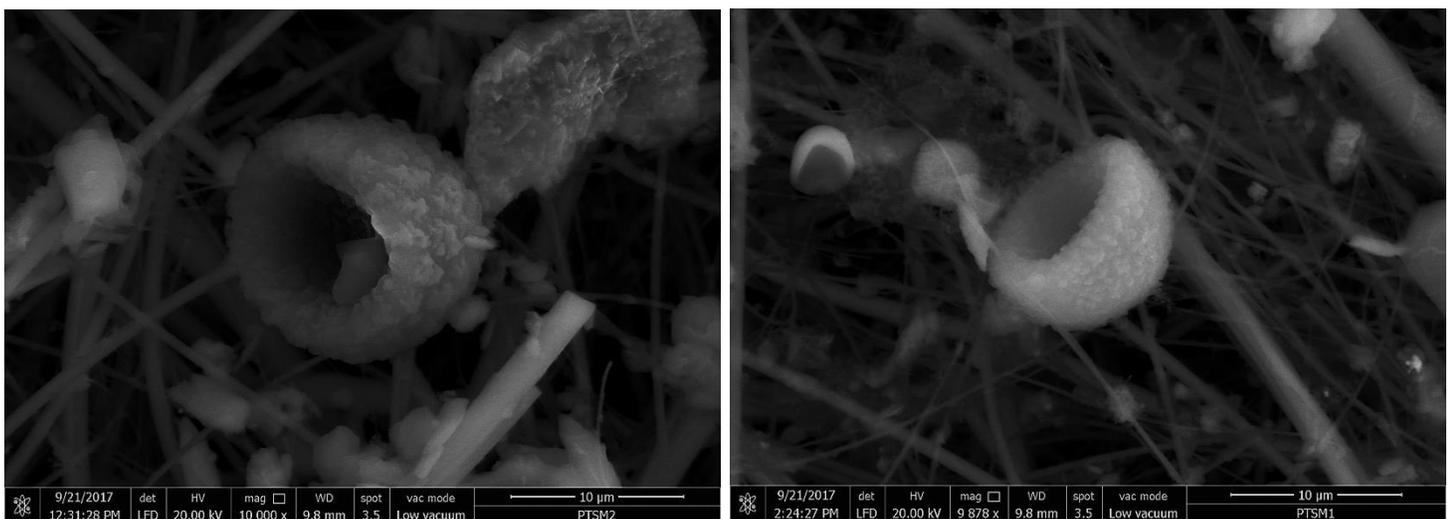


Figura 33. Partículas esféricas huecas.



## LAMINARES

Las partículas con este tipo de morfologías mostraron diámetros entre 10 y 40  $\mu\text{m}$ , generalmente con bordes y fracturas pronunciadas (fig. 34).

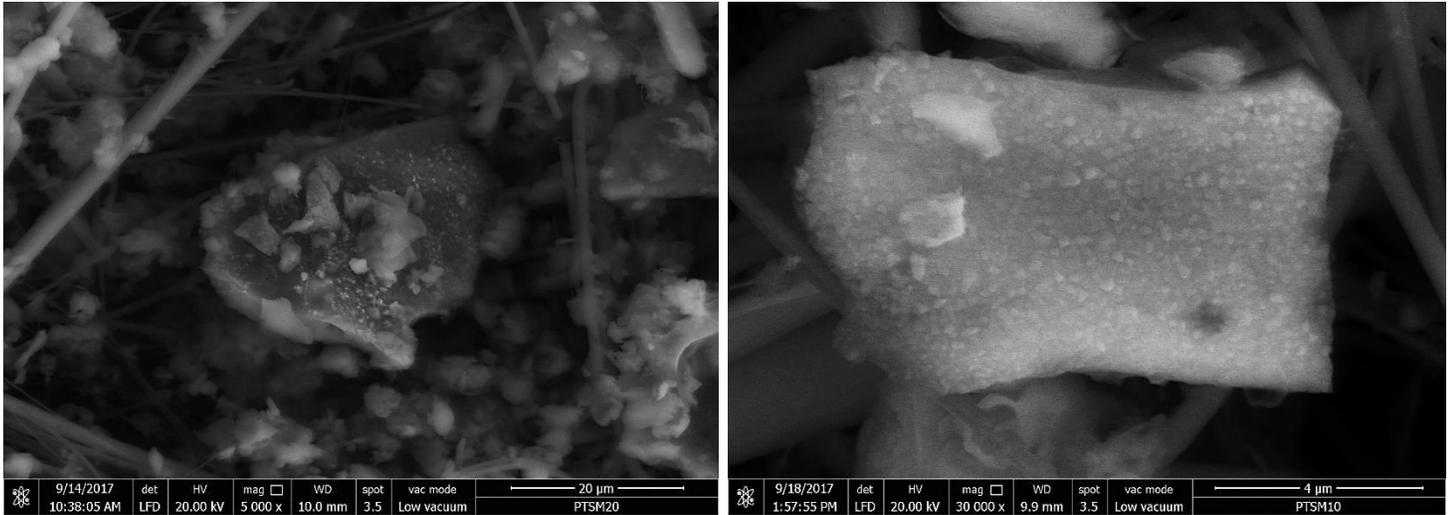


Figura 34. Partículas laminares.

## IRREGULARES

Las partículas irregulares (fig. 35) fueron muy abundantes y comunes para ambas zonas de muestreo. Presentaron diámetros variables, que van desde 1  $\mu\text{m}$  hasta más de 60  $\mu\text{m}$ , algunas con bordes pronunciados y otras con bordes redondeados, generalmente como agregados.

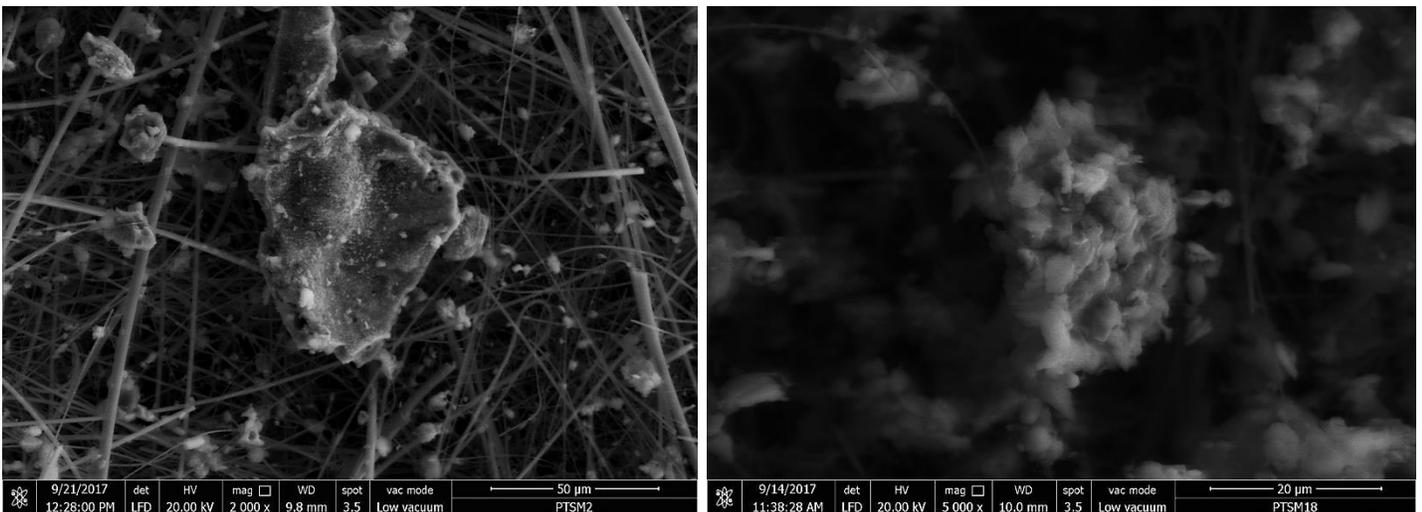


Figura 35. Partículas irregulares.



## IRREGULARES POROSAS

Las partículas con esta morfología fueron características de la estación de Pitahaya, las cuales presentaron diámetros que van desde 10 $\mu$ m hasta mas de 60 $\mu$ m, con una estructura compuesta por una gran diversidad de agujeros (fig. 36).

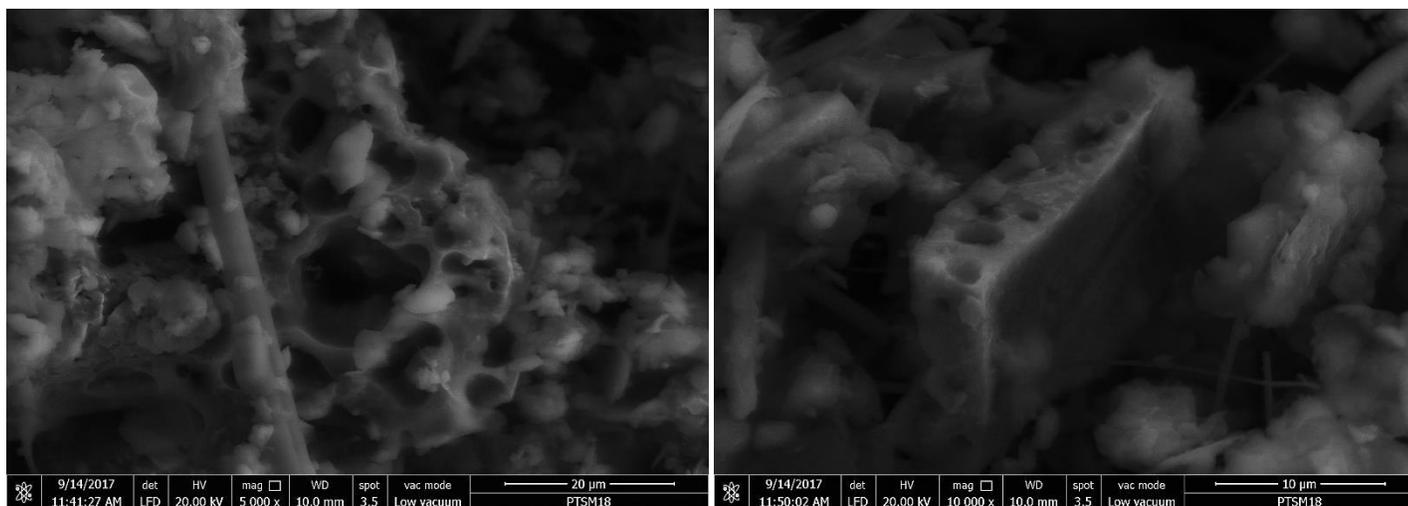


Figura 36. Partículas irregulares porosas.

## TABULARES

Partículas cristalinas con gran simetría y diámetros de 10  $\mu$ m (fig. 37).  
Estuvieron presentes en poca abundancia.

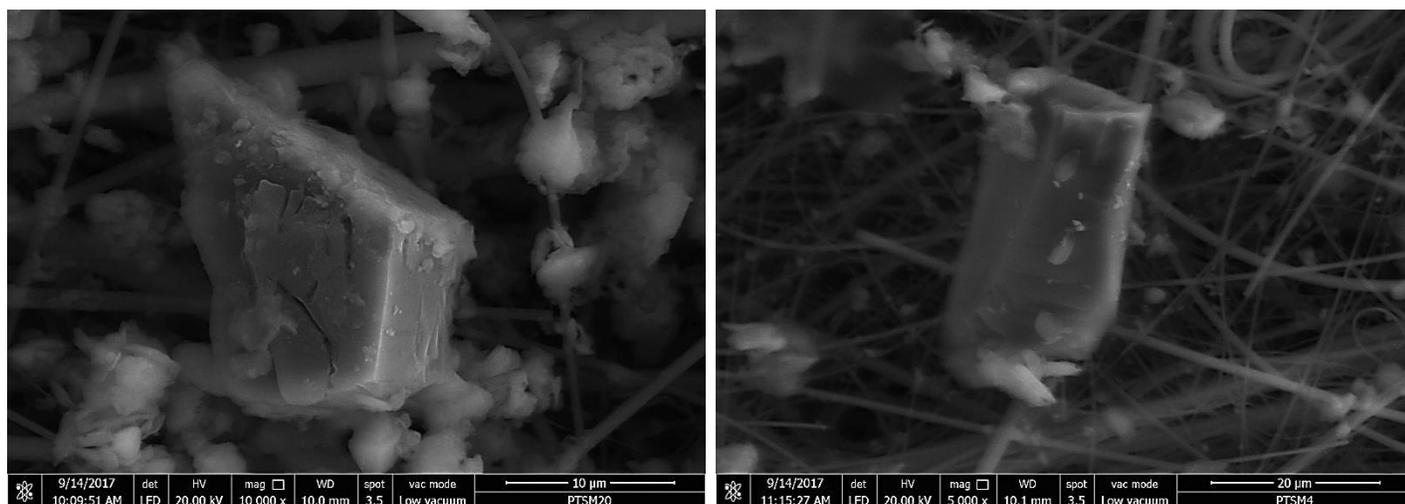


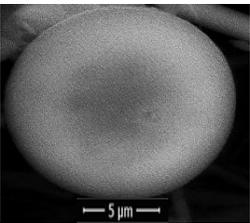
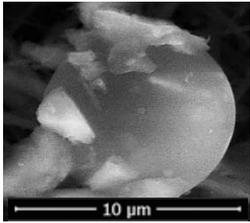
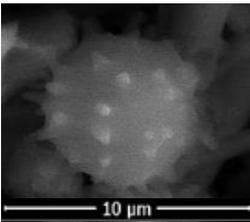
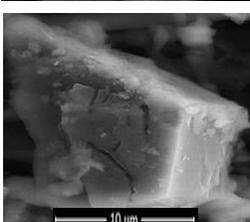
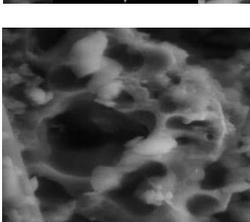
Figura 37. Partículas tabulares.



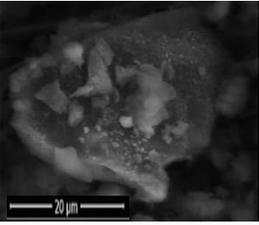
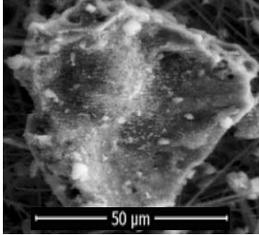
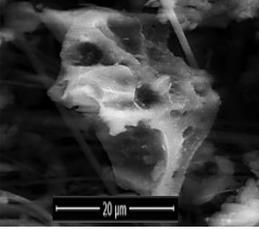
## COMPOSICIÓN QUÍMICA ASOCIADA A CADA MORFOLOGÍA

En la tabla 10 se muestran las composiciones elementales obtenidas para cada tipo de morfología identificado en las partículas de la estación de Pitahaya-Charallave. En algunos casos, iguales morfologías exhiben diferentes composiciones, así como diferentes morfologías presentan igual composición.

Tabla 10. Morfología y composición química promedio de partículas en Pitahaya-Charallave.

Morfología	características	Composición (%)																
		C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti	Fe			
 	Esféricas lisas	Carbonosas	57,3	32,8	2,9	0,3	0,8	3,8			0,3	1,0	0,3	0,5				
		Sin carbono		61,6	1,9	2,5	9,1	18,8				0,8	0,6		1,1	3,7		
	Esféricas con relieve-Biológicas		50,9	36,4	4,3	0,8	0,9	3,2		0,2	0,2	1,7	0,4	0,8			0,2	
	Tabulares			54,8	3,5	3,8	7,1	22,1					0,8	0,7			1,5	
	Irregulares	Porosas		50,7	3,1	3,3	12,8	15,3					1,1	0,9			1,1	3,0



Morfología	características	Composición														
		C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti	Fe	
	Laminares															
		51,5	3,0	1,4	8,0	27,3					0,9	1,5				2,8
	Irregulares	Ricas en Ca	10,4	16,6	2,3	3,8				0,8	0,7	18,2				
		Ricas en Al-Fe	10,4	16,6	2,3	3,8	12,7	14,8				2,1	2,4		1,0	
	Silicatadas	Ricas el Al	10,4	53,7	2,3	1,3	9,0	19,0			1,8					1,9
		15,3	52,1	2,7	0,6	3,6	21,2				0,9	1,4				1,2



## ORIGEN Y POSIBLES FUENTES DE EMISIÓN

---

La composición química de las partículas asociadas a cada tipo de morfología, está directamente relacionado con el origen de las mismas, cuyas proposiciones se muestran a continuación:

### PARTÍCULAS ESFÉRICAS LISAS CARBONOSAS

A través del análisis químico de las partículas esféricas lisas, se determinó que estas presentan un alto contenido de carbono (tabla 10. Apéndice 18), las cuales son consideradas como antropogénicas, ya que las partículas que surgen de la combustión se caracterizan, en la mayoría de los casos, por presentar una forma esférica, debido fundamentalmente al proceso de fusión que se produce durante su formación (Galán M., 2004).

Igualmente, las partículas carbonosas encontradas con esta forma, puede ser atribuidas a procesos similares, pero bajo combustión incompleta, cuya composición es característica al presentar una composición dominada por carbono y azufre como trazas.

Sin embargo, también hay partículas de origen antrópico que no presentan forma esférica, aunque hayan sido sometidas a un proceso térmico (Galán M., 2004), como es el caso de las partículas porosas irregulares que se muestran a continuación.

### PARTÍCULAS IRREGULARES POROSAS Y ESFÉRICAS LISAS

En esta estación de monitoreo, fue cuantiosa la presencia de partículas irregulares porosas y esféricas lisas (Fig. 31 y 36) de igual composición (tabla 10. Apéndices 17 y 21), las cuales se les atribuye como fuente de emisión la industria Aliven, debido a que esta se encuentra frente dicho punto de muestreo, así como también, las composiciones de estas partículas coinciden con los productos generados por dicha



industria (C, O, Si, P, S, Na, K, Mg, Ca, Ba, Fe, Zn, Al y Cl), por lo que las partículas con esta morfología son de origen antrópico.

Las industrias de agregados livianos como Aliven, utilizan como materia prima arcillas expansivas, calizas y un material llamado en la industria como “escoria”, la cual es una mezcla constituida por sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ), álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ); y en menor proporción azufre, manganeso e hierro. También pueden estar presentes pequeñas cantidades de compuestos de titanio, bario, boro, fósforo, entre otros. (Cubaud D., y Muhat M., 1968; Cruz, G. et al., 2003; Idoyaga D. et al. 2013; Yagual D. et al., 2015)

Al mismo tiempo, es común el uso de cloruros como aditivos. (Cruz, G. et al., 2003; Idoyaga D. et al., 2013)

Una vez pulverizado y procesado el material, se hace pasar por grandes hornos giratorios a temperaturas de hasta  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ , donde llegan al punto de fusión, generándose partículas; que, por efecto de la tensión superficial, toman una forma esférica, donde algunos glóbulos se enfrían con suficiente rapidez al entrar en contacto con gotas de agua, como para adquirir en su superficie una estructura vítrea no porosa. (Cruz, G. et al., 2003)

Una fracción de estos gránulos, por efecto del rápido enfriamiento de su superficie, conservan gases en su interior, y al entrar en contacto con gotas de agua, estallan, disgregándose en partículas más finas. (Cruz, G. et al., 2003)

Igualmente, las estructuras porosas se generan cuando al agregar una cantidad limitada de agua en forma de rocío a la masa fundida, y es agitada rápidamente, ocurre la formación de vapor y posterior escape de los gases generados de las masas piroclásticas viscosas, endureciendo de forma porosa (Yagual D. et al., 2015).

La forma esférica no es general y se producen gránulos de diferentes formas y tamaños (Cubaud D., y Muhat M., 1968). Es posible encontrar partículas que tienen el mismo origen, pero que han sufrido modificaciones diferentes como resultado de acciones físico-químicas, dentro o fuera del foco de la fuente. (Galán M., 2004)



De igual forma, durante el calentamiento también ocurre un proceso llamado sinterización, el cual se produce cuando las partículas son acumuladas para integrar otras partículas de mayor tamaño. (Ramos R., 1970)

También existe la posibilidad de que la temperatura de los procesos sea determinante en las características de esfericidad y tamaño de la partícula. (Galán M., 2004)

### PARTÍCULAS LAMINARES SILICATADAS

Las partículas con estas morfologías y composición (Si, Al, O, K, Fe, Mg) (tabla 10. Apéndice 29), permiten establecer que se trata de minerales de arcilla, con un hábito característico de filosilicatos, que al presentarse de manera tan abundante, la fuente más probable es la industria Aliven, la cual trabaja con arcillas expansivas, por lo que este tipo de partículas provienen de una fuente antrópica.

### PARTÍCULAS CARBONOSAS ESFÉRICAS CON RELIEVE Y SEMIESFERAS HUECAS

Las partículas con estas morfologías complejas (fig. 32-33) y alto contenido de carbono (tabla 10. Apéndice 15), indican que son de origen natural, específicamente, de la biomasa, cuyas fuentes corresponden a la vegetación que rodea al punto de muestreo.

Al comparar la composición con otras partículas biológicas encontradas en el aeropuerto, los porcentajes se aproximan considerablemente, aunque presentan morfologías muy diferentes.

Gasca M., (2007) determinó que las partículas naturales de origen biológico, presentan morfologías esféricas o redondeadas características y son ricas en carbono orgánico, potasio, sodio y calcio.



Igualmente, Bernabé J. y colaboradores (2005), determinaron la presencia de semiesferas huecas de  $10\mu\text{m}$ , con una superficie irregular, constituida mayoritariamente por carbono. Indicando que son granos de polen.

### PARTÍCULAS TABULARES SILICATADAS

Las partículas de morfología tabular, cristalina y de gran simetría, fueron poco abundantes, cuya composición rica en Si, O, Al, K, Ca (tabla 10. Apéndice 16) permite inferir que se trata de minerales como los feldespatos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), siendo estos minerales uno de los constituyentes más habituales de la corteza terrestre, puestos en suspensión por la acción mecánica del viento. Por lo que es probable que estas partículas sean de origen natural.

### PARTÍCULAS IRREGULARES

Dentro de las partículas irregulares no porosas analizadas, se observaron cuatro tendencias, información con la cual se agruparon en; ricas en hierro y aluminio, ricas en aluminio, ricas en calcio y las que están constituidas casi en su totalidad por silicio y oxígeno (tabla 10. Apéndices 19, 20, 22 y 23), siendo estas clasificadas de acuerdo al elemento o elementos de mayor abundancia.

Sin embargo, a pesar de ser agrupadas por sus componentes mayoritarios, presentan similitudes en otros elementos. Los porcentajes de carbono se encuentran entre 10 y 17%, mientras que los porcentajes de oxígeno se encuentran entre 40 y 60%, estando siempre el sodio entre 2 y 3 % para todas ellas, mostrando las diferencias más pronunciadas en los metales (Fe y Al). Aunado a esto, en la mayoría de los casos se encontraron formando parte de agregados, por lo que se puede aventurar que estas presentan alguna relación.



Al encontrarse en proporciones tan grandes se descarta la posibilidad de que sean de origen natural, donde en la mayoría de los casos mostraron bordes redondeados, lo cual sugiere un proceso a temperaturas elevadas, probablemente un proceso de sinterizado (Gasca M., 2007), lo que explicaría que la mayoría de estas partículas se encuentran como aglomerados.

A partir de lo anteriormente expuesto, se puede proponer que estas partículas son de origen antrópico, cuya fuente más probable es la industria Aliven, ya que las chimeneas y hornos al estar a escasos 70 metros del equipo de muestreo, es de esperarse que tenga la mayor influencia en las partículas colectadas.

En la tabla 11 se resume todo lo anteriormente expuesto:

Morfología	Composición	Origen	Fuentes de emisión
Esféricas lisas	(C, Si, O) y (Si, O, Al)	Antrópico	Industrias
Semiesferas huecas	C, O	Natural	Vegetación
Esféricas con relieve	C, O	Natural	Vegetación
Irregulares porosas	Si, O, Al	Antrópico	Industrias
Irregulares	Si, O, Ca, Al, Fe	Antrópico	Industrias
Laminares	Si, O, Al, K, Fe	Natural	Industrial
Tabulares	Si, O, Al, K	Natural	Geología



## COMPARACIÓN ENTRE ESTACIONES

Para las dos estaciones de monitoreo, se evidencia la influencia de las actividades antropogénicas sobre la calidad del aire, ya que este tipo de partículas corresponde al 63% del total de las partículas caracterizadas por MEB-EDX.

Para las dos zonas de muestreo se observaron diferencias en cuanto a la morfología encontrada (tabla 12), algunas estando presentes solo en una de las dos estaciones.

Tabla 12. Morfologías encontradas por zonas.

Zona de monitoreo	Pitahaya-Charallave	Aeropuerto M. de Ocumare
<b>Morfología</b>	Esféricas lisas	Esféricas lisas
	Esféricas con relieve	Cenósferas
	Semiesferas huecas	Ovoidales
	Irregulares	Irregulares
	Irregulares porosas	Cúbicas
	Laminares	Amorfas
	Tabulares	Biológicas

Las partículas irregulares destacaron por su abundancia, las cuales presentan una marcada diferencia entre las estaciones de monitoreo, estando dominadas por Si, O, Ca, Al y Fe en la estación de Pitahaya y C, Ca y Al en el Aeropuerto. Esta variedad en composición, permitió agruparlas según sus elementos dominantes.



Igualmente, los agregados de partículas son comunes en ambos puntos de muestreo, aunque estos representan multitudes de partículas individuales agrupadas, con morfologías y composiciones diferentes.

En cuanto a las partículas de morfología esférica lisa, fueron comunes en ambos puntos de muestreo, algunas de igual composición. Sin embargo, en la estación de Pitahaya-Charallave, se encontraron partículas con esta morfología sin la presencia de carbono (tabla 10. Apéndice 17).

Con respecto a las partículas esféricas carbonosas observadas en ambas estaciones, presentaron una composición muy similar, con un promedio de 63% de carbono y 29% de oxígeno para el Aeropuerto, y 57% de carbono 32% de oxígeno para Pitahaya (tabla 9 y 10), con tamaños de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

En general, para la Zona de Pitahaya-Charallave, los niveles de Fe resultaron ser mucho mayores con respecto a los niveles que se presentan en el Aeropuerto Metropolitano de Ocumare, estando solo presentes en este último en partículas de morfología irregular ricas en aluminio.

Es importante recalcar, que en la estación del aeropuerto la totalidad de las partículas caracterizadas mostraron altos porcentajes de carbono y oxígeno (Apéndices del 5 al 14), incluso en partículas no características de fuentes antrópicas como las de halita, por lo que se puede decir que las partículas caracterizadas estaban “contaminadas”, probablemente con compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Se sabe que en las adyacencias del aeropuerto es frecuente la quema de desechos y biomasa, por lo que es de esperarse que exista un alto contenido de compuestos en la atmósfera producto de la combustión, los cuales pueden ser adsorbidos en la superficie de las partículas, e incluso, pudiendo llegar a formar parte de estas.

En trabajos anteriores, como los de Santana S., (2008), Aldabe S., (2011) y García D., (2013), se han encontrado una gran variedad de compuestos orgánicos en partículas atmosféricas, donde se ha constatado la presencia de hidrocarburos, tanto de cadenas lineales como ramificadas, aromáticos y particularmente hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), donde estos últimos, son los más comunes en el



material particulado atmosférico, constituidos por un grupo muy numeroso de sustancias químicas diferentes.

Por último, se puede decir que las fuentes de emisión con un mayor impacto en ambas zonas, no presentan relación alguna.

De igual forma, cabe destacar que en el presente proyecto de investigación no se realizaron caracterizaciones de fuentes fijas y móviles, ni de cualquier otra fuente (sean antrópicas o naturales), para obtener trazadores que permiten realizar una comparación con las obtenidas en los puntos de monitoreo, por lo que no es posible con este estudio, establecer con total seguridad las fuentes de emisión.



## CONCLUSIONES

---

- El Aeropuerto Metropolitano de Ocumare no sobrepasa el porcentaje de excedencia durante el periodo de recolección de muestras, ya que solo presenta un 10%; mientras que la zona de Pitahaya-Charallave presenta un porcentaje de excedencia de 50%, existiendo una marcada variación en las concentraciones de PTS entre las dos zonas de estudio.
- Las variaciones en los niveles de concentración están relacionados con las actividades de las fuentes antrópicas.
- Los PTS que afectan las zonas de estudio provienen de fuentes móviles (avionetas y vehículos), fuentes fijas (sector industrial, cementeras), quema de vertederos a cielo abierto, aerosoles marinos, emisiones de origen vegetal y la geología local.
- Se presume que la principal fuente emisora de partículas en la estación de Pitahaya es la industria Aliven, mientras que en el aeropuerto las fuentes son variables, donde las fuentes de emisión que contribuyen en ambas zonas de estudio no presentan relación alguna.
- Las partículas consideradas como antropogénicas presentan morfologías esféricas lisas, cenósferas, irregulares porosas y amorfas, estando la composición condicionada por la fuente de emisión, notándose la presencia de elementos como Cl, Si, Fe y Ti, asociados a procesos industriales, mientras que las partículas de origen natural, presentan morfologías simétricas y características, como lo son las partículas cúbicas, tabulares y las biológicas.
- La quema de desechos y biomasa en las adyacencias del aeropuerto condicionan el contenido de carbono en las partículas, pudiendo deberse a compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).
- La caracterización de PTS basada en su morfología y composición química a través de MEB-EDX resultó ser un método apropiado y confiable para el estudio de partículas atmosféricas, ya que permite obtener valiosa información para establecer el origen de las partículas.



## RECOMENDACIONES

---

- Prolongar el periodo de muestreo en las zonas evaluadas, considerando las épocas de sequía y de lluvia y monitorear las  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  con filtros diferentes a los de fibra de vidrio.
- Es recomendable colocar más de un equipo de monitoreo, para determinar con más precisión las concentraciones de PTS, y con esto, el nivel de contaminación de la atmósfera en este sector y las contribuciones de las diferentes fuentes.
- Es recomendable evaluar las partículas atmosféricas junto con una estación meteorológica.
- Realizar estudios relacionados con otros compuestos asociados a las partículas atmosféricas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Agirre I., Sánchez L., Eugenia M. y Menéndez M. (2006). *Estudio de los niveles de PM10 y PM2.5 en un área urbana con influencia industrial siderometalúrgica (basauri, vizcaya)*. Servicio de Geocronología y Geoquímica Isotópica. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- Ahmady H., Mirnejad H., Feiznia S. y McQueen G.(2015). Mineralogy and geochemistry of atmospheric particulates in Western Iran. *Atmospheric Environment*, 119, 62-272.
- Aldabe J. (2011). *Caracterización Físico-Química Del Material Particulado En La Comunidad Foral De Navarra* (Tesis Doctoral). Universidad de Navarra. España.
- Andrews D., G. (2010). *An Introduction to Atmospheric Physics*. First edition. Cambridge University.
- Aragón A., Campos A., Leyva R., Hernández M., Miranda N., Y Luszczewski K. (2006). Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22 (1). 5-19.
- Baldasano M.; Valera E.; Jiménez P. (2003). Air quality data from large cities. *The Science of the total Environment*, 307, 141-165.
- Bernabé J., Carretero M., y Galán E. (2005). Mineralogy and origin of atmospheric particles in the industrial area of Huelva (SW Spain). *Atmospheric Environment*. 39, 6777-6789.
- Campos A., Alcaraz G., Herrera E., Sosa M., Jiménez J., Delgado M., Ramírez E., y Puga S. (2007). Análisis temporal de las concentraciones, distribución de tamaño y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micras en la ciudad de Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 3(1). 44-51.
- Cano, C., Lucchi, L. y Pereyra, M. (2016). Caracterización de material particulado PM10 mediante microscopía electrónica de barrido (sem). *4° Congreso de la Asociación Argentina de Microscopía (SAMIC 2016)*
- Cerezo-Moreno, A., Salazar C., L., González L., C., González-Macías, M. (1999). Comportamiento de las partículas suspendidas y polen en la atmósfera de la región norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 43. 155-164.



- Coz E. (2008). *Caracterización Química y Morfológica del Aerosol Ambiental en las Fracciones PM10 y PM2.5 mediante Microscopía Electrónica de Barrido en Episodios de Contaminación Atmosférica de Origen Diverso* (Tesis Doctoral). Universidad Carlos III De Madrid. España.
- Cruz G., Buncuga V., Cahuapé M., Forgione F., y Navarrete A. (2003). Hormigones con agregados livianos. Universidad Nacional de Rosario. Argentina.
- Cubaud C., y Muhat M. (1968). Fabricación industrial de arcilla expandida. *Silicates Indusfriefts*. 5 (19), 145-152.
- Curtius, J., 2006. Nucleation of atmospheric aerosol particles. *C.R. Physique*, 7, 1027-1045.
- Escalona M., Ríos O., Medina F. (2003). *Material Particulado Como PM10 En El Aire De La Ciudad De Valencia – Venezuela*. Universidad de Carabobo.
- Estellés V. (2006). *Caracterización de los aerosoles atmosféricos En valencia mediante fotometría solar*. (Tesis Doctoral). Universidad De Valencia.
- Esteve R. (2011). *Estudio de los aerosoles atmosféricos en valencia mediante medidas del nefelómetro de integración*. (Tesis Doctoral). Universidad De Valencia.
- Fernández, C. A.; Fraile, R.; Ramírez, A.; Benzo, Z.; Loreto, D.; Carrión, N.; (1991). Composición química de las partículas suspendidas en la atmósfera del valle de Caracas. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*.
- Fernández R. (2011). *Origen y características de las partículas finas y ultrafinas en el aire ambiente de Huelva*. (Tesis Doctoral). Departamento de Física Aplicada. Universidad de Huelva. España.
- Fomenko E., Anshits N., Pankova M., Solovyov L., and Anshits A. (2011). Fly Ash Cenospheres: Composition, Morphology, Structure, and Helium Permeability. *World of Coal Ash (WOCA)*. Denver. USA.
- Galán, M., y Martín R.(2004). Characterization of atmospheric particles: analysis of particles in the Campo de Gibraltar. *Atmósfera*. 191-206.



- García, D. (2013). *Caracterización química de la fracción orgánica de la materia particulada atmosférica (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) en entornos urbano, industrial y suburbano.* (Tesis Doctoral). Universidad de A Coruña. España.
- Gasca M. (2007). *Caracterización por SEM-EDS de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable en la ciudad de Querétaro y su relación con fuentes contaminantes.* (Tesis de maestría). Universidad autónoma de Querétaro. México.
- Goldstein J., Newbury E., Echlin P., Joy C., Lyman E., Lifshin E., Sawyer L., Michael R. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.* Third Edition. Kluwer Academic.
- González De Juana; De Arozena, J.; Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas.* (Tomo I y II). Ediciones Funinves. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- González M., Morales J., Sosa B., Velásquez H., Reyes R. Y Briceño M. (2001). Estudio sobre los niveles de concentración de partículas inhalables (PM<sub>10</sub>) en la atmósfera en la ciudad de Maracaibo, Venezuela. *Scientific Journal From The Experimental Faculty Of Sciences*, 9(1).
- Herrera, M., Rodríguez R. y Solís D. (2009). Determinación de los niveles de partículas PM<sub>10</sub> y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia, Costa Rica: año 2005-2006. *Tecnología en Marcha*, 22(4). P. 18-27.
- Hinds, W., (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles.* John Wiley & Sons, UK.
- Hurtado J. (2010). *Evaluación de la calidad del aire en los alrededores de la población minera de tiara empleando líquenes como biomonitores de metales.* (Tesis de pregrado) Facultad de ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Ibanez G., Hernández M., Serrano C., Infante A. (2007). *Environmental Chemistry Fundamentals. Mexican Microscale Chemistry Center.* Universidad Iberoamericana. Mexico
- Idoyaga D., Cantero G., Bellassai R. y Pospischill W. (2013). *Uso de la arcilla expandida como agregado para mezclas asfálticas.* Universidad Católica Nuestra Señora De La Asunción. Paraguay.



- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University.
- Lagzi I., Mészáros R., Györgyi G., Leelőssy Á. (2013). *Atmospheric Chemistry*. Eötvös Loránd University. Faculty of Science. Institute of Geography and Earth Science.
- La Rosa C., Andressen R., Contreras A. y Fernández R. (2004). Concentraciones de partículas totales en Suspensión (PTS) y su caracterización química, durante el primer período lluvioso del año 2004, en la atmósfera de la ciudad de Mérida, Venezuela. *Terra*. 45. 55-81.
- Martínez A. (2000). *Partículas suspendidas totales y contenido de nitrato, cloruro y sulfato en el aire de dos zonas de valencia*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Medina B., Urdaneta. y García N.(1996).Contenido de Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb, Na, V y Zn en el agua de lluvia de algunas zonas de la ciudad de Maracaibo, Venezuela, año 1987.*Boletín del centro de investigaciones biológicas*.30.(1).77-88
- Medina, L. (2011).*Caracterización Morfológica y Química del residuo insoluble asociado al Mármol Dolomítico de Guacuripia, estado Bolívar, mediante técnicas de Difracción de rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido*.(Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Méndez B. (2006). *Geología Física*. PDVSA-Universidad Central de Venezuela.
- Mendoza S. (2005). *Geología de Venezuela*. (Tomo I y II). Universidad de Oriente. Venezuela.
- Montilla R. (2008). *Determinación de las propiedades de absorción de los aerosoles atmosféricos: Aplicación en la zona Sub-Ártica de Noruega*. (Tesis doctoral). Universidad de Valladolid.
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Castillo, S. (2008). *Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) across Spain 1999-2005*. Atmospheric Environment 42, 3964-3979.
- Normas sobre calidad de aire y control de la contaminación atmosférica*. (Decreto No. 638). (1995). Gaceta Oficial de la República de Venezuela. Abril 26, 1995. Caracas, Venezuela.



- Norma Venezolana COVENIN 2060. (1996). *Determinación de la concentración de partículas totales suspendidas en la atmósfera (PTS)*.
- Paoletti L., De Berardis B., Arrizza L., Passacantando M., Inglessis M., y Mosca M. (2003). Seasonal effects on the physico-chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Rome: a study by SEM and XPS. *Atmospheric Environment*. 37, 4869–4879.
- Pey B. (2007). *Caracterización físico-química de los aerosoles atmosféricos en el mediterráneo occidental*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Catalunya.
- Ramírez, D. (2010). *Caracterización del aerosol atmosférico en la ciudad de Granada mediante Fotometría solar y estelar*. Universidad de Granada
- Ramos, J. (2006). *Caracterización morfológica y química de partículas atmosféricas (PM<sub>10</sub>), en el Silencio; Caracas, Venezuela*. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Ramos R. (1970). Fabricación de Agregados Artificiales Livianos. *Boletín IMME*. 8 (29-30).
- Reed J. (2005). *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Second edition. University of Cambridge.
- Salvador, P. (2005). *Caracterización de la contaminación atmosférica producidas por partículas en suspensión en Madrid*. (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid. España.
- Santana, S. (2008). *El aerosol particulado en Telde, gran canaria (España), durante 2002/03*. (Tesis Doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Sbarato, V., Sbarato, D. y Basan, R.(1998). *Análisis y Caracterización del Material Particulado Atmosférico*. Integración Regional del Centro de Estudios Avanzados de la (UNC). Ciudad de Córdoba, Argentina.
- Sepúlveda, J. (2003) *Caracterización morfológica y química elemental de partículas pm<sub>2.5</sub> en los municipios del edo. De México: ecatepec, tlalnepantla y nezahualcóyotl, y de las delegaciones Cuauhtmoc y Benito Juárez del distrito federal, mediante microscopía electrónica y microanálisis elemental por espectrometría de rayos x*. Instituto nacional de ecología-Centro nacional de investigación y capacitación ambiental. México.



- Silva A. (2010). *Tipos y subtipos climáticos de Venezuela*. (Trabajo de asenso). Universidad de los andes. Venezuela.
- Singh A., Kulshrestha A. Taneja A.(2011). Characterization and morphological analysis of airborne PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Agra located in north central India. *Atmospheric Environment*. 45. 3621-3630
- Skoog D., Holler F., y Crouch R. (2008). *Principios de análisis instrumental*. Editorial Cengage Learning.
- Song X., Shao L., Zheng Q., Yang S. (2014). Mineralogical and geochemical composition of particulate matter (PM<sub>10</sub>) in coal and non-coal industrial cities of Henan Province, North China. *Atmospheric Research*. 143. 462–472.
- Soriano D. (2012). *Contaminantes atmosféricos particulados: evaluación de las fuentes de origen y de su contribución a la contaminación atmosférica en el cluster cerámico de Castellón*. (Tesis Doctoral). Universidad Jaume de Castellón.
- Stanley E. (2001). *Fundamentals of Environmental Chemistry*. Third Edition. CRC Press.
- Usero J. (1985). *Estudio de la contaminación atmosférica del campo de Gibraltar por partículas*. (Tesis Doctoral). Universidad de Sevilla. España.
- Yagual D., y Villacís D. (2015). *Hormigón liviano de alto desempeño con arcilla expandida*. (Tesis de pregrado). Universidad Estatal Península De Santa Elena. Ecuador.
- Zhu Y., Hinds W., Krudysz M., Kuhn T., Froines J., y Sioutas C. (2004). Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. *Journal Aerosol Science*. 36.303-322.
- Zuloaga, M. (2008). *Estudio de los elementos As, Cd, Cr, Hg, Pb, asociados a las partículas inhalables PM<sub>10</sub>, en el Valle de Caracas, Venezuela*. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela. Caracas.



## APÉNDICE

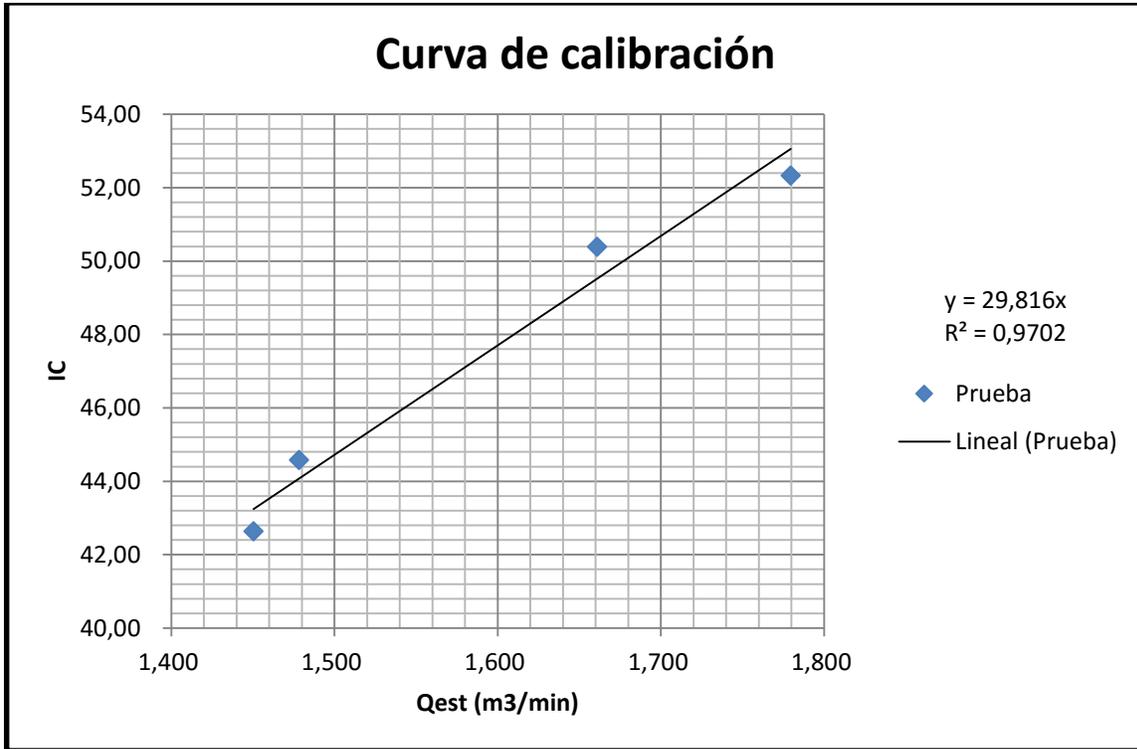
Apéndice 1. Hoja de calibración del muestreador de Pitahaya-Charallave.

Universidad Central de Venezuela Calibración del muestreador de alto volumen Registro de los datos de campo					
Lugar	<u>Pitahaya (Aliven)</u>		Ciudad	<u>Charallave</u>	
Estado	<u>Miranda</u>		Fecha	<u>10/03/2017</u>	
CONDICIONES					
Elevación del equipo (Pies)	<u>1.050</u>		Presión corregida (mm Hg)	<u>705</u>	
Presión a nivel del mar (mmHg)	<u>28,79</u>		Temperatura ambiente (deg K)	<u>306</u>	
Temperatura ambiente (°C)	<u>32,6</u>		Presión promedio corregida (mm Hg)	<u>-27</u>	
			Temperatura promedio (deg K)	<u>255</u>	
ORIFICIO DE CALIBRACIÓN					
Marca	<u>Andersen Instrumets</u>		Qstd pendiente	<u>1,53370</u>	
Modelo	<u>G28A</u>		Qstd Intercepto	<u>-0,05769</u>	
Serial#	<u>1115</u>		Date Certified	<u>16/02/1999</u>	
CALIBRACIÓN					
N° prueba	H <sub>2</sub> O (in)	Qstd (m <sup>3</sup> /min)	I (carta)	IC (corregida)	
1	7,60	<b>1,779</b>	54,0	<b>52,33</b>	<b><u>Regresión lineal</u></b> Pendiente <u>29,1747</u> Intercepto <u>1,0286</u> Corr. coeff. <u>0,9852</u>
2	6,60	<b>1,661</b>	52,0	<b>50,39</b>	
3	5,20	<b>1,478</b>	46,0	<b>44,58</b>	
4	5,00	<b>1,450</b>	44,0	<b>42,68</b>	

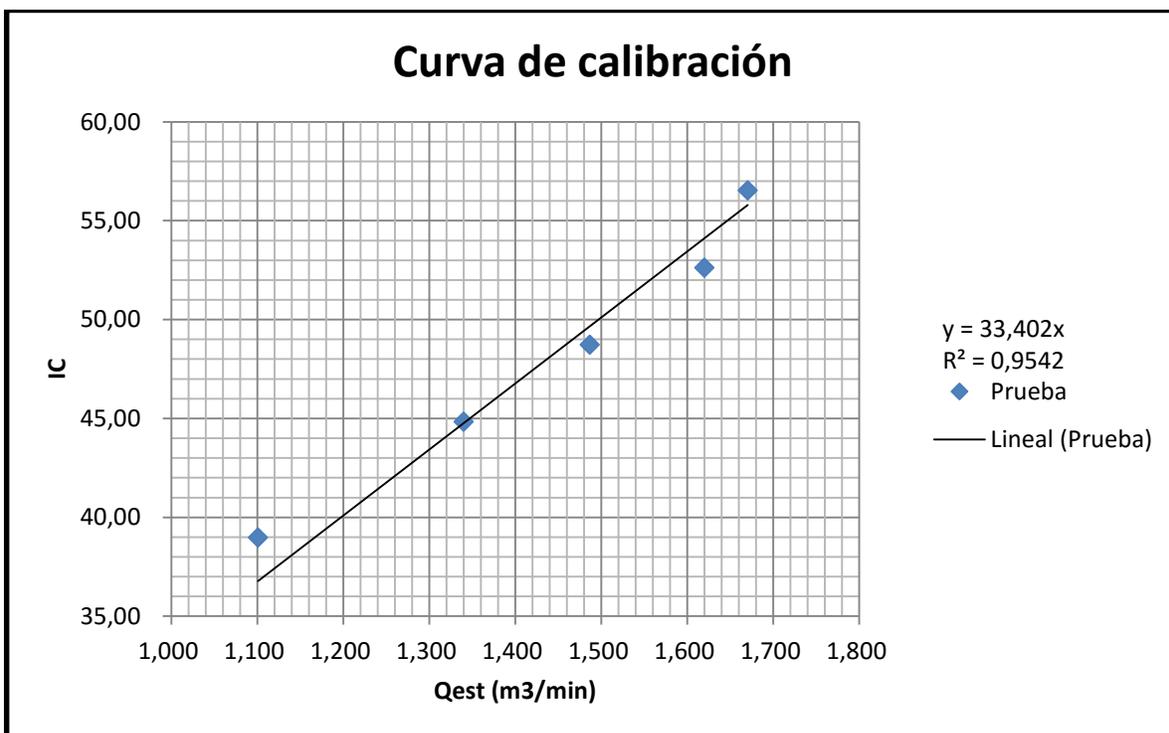


Apéndice 2. Hoja de calibración del muestreador del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Universidad Central de Venezuela Calibración del muestreador de alto volumen Registro de los datos de campo					
Lugar	<u>Aeropuerto Metropolitano de Ocumare</u>			Ciudad	<u>Ocumare</u>
Estado	<u>Miranda</u>			Fecha	<u>10/03/2017</u>
CONDICIONES					
Presión a nivel del mar (mmHg)	<u>29,25</u>			Presión corregida (mm Hg)	<u>743</u>
Temperatura ambiente (°C)	<u>33,5</u>			Temperatura ambiente (deg K)	<u>306</u>
				Temperatura promedio (deg K)	<u>273,2</u>
ORIFICIO DE CALIBRACIÓN					
Marca	<u>Andersen Instrumets</u>			Qstd pendiente	<u>1,53370</u>
Modelo	<u>G28A</u>			Qstd Intercepto	<u>-0,05769</u>
Serial#	<u>1115</u>			Date Certified	<u>16/02/1999</u>
CALIBRACIÓN					
N° prueba	H <sub>2</sub> O (in)	Qstd (m <sup>3</sup> /min)	I (carta)	IC (corregida)	<b>Regresión lineal</b>
1	2,80	1,101	40	38,99	Pendiente <u>29,1739</u>
2	4,20	1,340	46	44,84	Intercepto <u>6,2279</u>
3	5,20	1,487	50	48,73	Corr. coeff. <u>0,9875</u>
4	6,20	1,620	54	52,63	
5	6,60	1,670	58	56,53	



Apéndice 3. Curva de calibración de muestreador de Pitahaya-Charallave.



Apéndice 4. Curva de calibración de muestreador del Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.



Apéndice 5. Composición de las partículas biológicas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K
PTSM9_001	64,11	30,82	1,56	0,13	0,18	1,05	0,65	0,29	0,46	0,75
PTSM9_002	57,71	31,93	2,23	0,23	0,75	5,51	-	0,14	0,35	0,53
<b>Promedio</b>	<b>60,91</b>	<b>31,375</b>	<b>1,895</b>	<b>0,18</b>	<b>0,465</b>	<b>3,28</b>	<b>0,325</b>	<b>0,215</b>	<b>0,405</b>	<b>0,64</b>

Apéndice 6. Composición de las partículas cenósferas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ba	Ti
PTSM1_016	43,13	39,44	4,44	0,78	1,03	7,83	0,29	0,08	1,11	0,65	0,9	0,32	-
PTSM1_010	49,53	35,91	3,83	-	0,8	5,59	-	-	1,78	0,6	1,96	-	-
PTSM1_005	49,87	37,49	2,68	-	0,94	6,1	-	-	0,73	0,51	1,41	-	0,27
PTSM11_001	49,14	30,85	7,97	1,01	0,63	3,82	0,43	0,44	4,42	0,38	-	-	0,13
PTSM11_003	41,52	39,67	6	0,84	0,86	7,18	0,5	0,23	1,44	0,59	0,42	0,3	-
PTSM11_004	49,2	32,13	7,09	0,87	0,73	3,87	0,3	0,41	4,41	0,46	0,52	-	-
PTSM11_005	32,25	44,11	7,39	0,66	1,31	9,67	0,48	0,21	2,02	0,75	0,76	0,4	-
PTSM11_008	52,4	34,84	3,23	0,36	0,73	6,28	0,53	0,29	0,54	0,16	0,2	-	-
PTSM3_002	45,51	36,83	5,54	0,95	1,36	6,19	0,65	0,32	1,65	0,53	0,3	-	0,17
<b>Promedio</b>	<b>45,84</b>	<b>36,81</b>	<b>5,35</b>	<b>0,61</b>	<b>0,93</b>	<b>6,28</b>	<b>0,35</b>	<b>0,22</b>	<b>2,01</b>	<b>0,51</b>	<b>0,72</b>	<b>0,11</b>	<b>0,06</b>

Apéndice 7. Composición de las partículas cúbicas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Al	Si	Cl	K
PTSM1_003	20,59	15,95	20,58	-	8,69	32,94	1,25
PTSM1_004	18,96	24,02	23,68	1,84	14,31	11,7	2
PTSM3_001	13,63	7,27	32,95	-	3	43,16	-
PTSM19_004	10,34	21,12	25,55	1,19	4,05	30,86	-
PTSM3_005	12,62	23,62	25,86	1,38	9,33	26,06	1,12
<b>Promedio</b>	<b>15,23</b>	<b>18,40</b>	<b>25,72</b>	<b>0,88</b>	<b>7,88</b>	<b>28,94</b>	<b>0,87</b>



Apéndice 8. Composición de las partículas esféricas lisas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K
PTSM1_012	68,16	24,01	2,95	0,34	1,74	0,36	0,19	1,63	0,27	0,35
PTSM3_004	65,96	29,91	1,36	-	0,31	2,19	0,05	-	0,08	0,16
PTSM1_014	62,04	29,01	2,92	-	0,48	3,18	-	-	1,39	0,37
PTSM9_004	56,16	33,22	2,78	0,28	0,77	4,92	0,38	0,21	0,55	0,54
PTSM9_005	62,14	30,15	2,81	-	0,43	2,9	0,17	0,17	0,65	0,34
PTSM9_007	66,42	26,02	3,94	-	-	1,55	0,4	0,13	1,18	0,36
PTSM17_002	63,41	29,97	1,11	0,31	1,14	2,7	-	0,13	0,39	0,27
<b>Promedio</b>	<b>63,47</b>	<b>28,90</b>	<b>2,55</b>	<b>0,13</b>	<b>0,70</b>	<b>2,54</b>	<b>0,20</b>	<b>0,32</b>	<b>0,64</b>	<b>0,34</b>

Apéndice 9. Composición de las partículas irregulares carbonosas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K
PTSM3_006	54,35	34,6	2,83	0,9	0,91	4,71	0,27	1,03	0,4
PTSM3_007	45,76	37,57	3,37	0,66	1,16	10,18	-	0,91	0,4
PTSM9_008	55,46	32,92	2,86	0,22	0,9	6,24	0,19	0,54	0,52
PTSM9_009	49,21	34,6	3,49	0,27	1,3	8,83	0,14	0,54	0,82
PTSM11_001	39,83	36,77	3,92	0,7	1,76	13,97	0,56	0,79	0,71
PTSM1_010	51,19	34,06	5,72	0	0,52	2,25	0,29	3,79	0,41
<b>Promedio</b>	<b>49,30</b>	<b>35,09</b>	<b>3,70</b>	<b>0,46</b>	<b>1,09</b>	<b>7,70</b>	<b>0,24</b>	<b>1,27</b>	<b>0,54</b>



Apéndice 10. Composición de las partículas irregulares ricas en Al. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
PTSM1_008	16,27	58,68	2,08	-	15,2	3,71	2,97	0,38	0,7	-
PTSM17_005	18,97	51,17	2	0,49	9	12,2	1,34	0,5	1,14	1,57
PTSM17_010	13,45	51,4	1,15	0,5	12,68	17,14	0,98	0,6	0,51	0,95
PTSM17_011	10,03	51,63	1,26	0,31	7,91	21,91	0,68	5,75	-	0,52
PTSM17_012	10,86	52,41	5,42	-	8,2	20,64	0,64	0,73	0,39	0,71
PTSM3_003	18,06	53,41	3,74	0,34	6,28	14,57	0,79	1,4	0,35	0,78
PTSM17_004	17,83	52,85	2,29	2,58	6,54	13,64	1,3	1,36	0,25	1,35
PTSM17_001	28,85	47,55	0,85	1,19	5,79	12,59	0,62	0,93	0,39	1,25
PTSM3_008	24,17	47,79	3,61	1,73	5,33	10,4	1,94	0,93	3	1,11
PTSM19_010	9,69	61,61	3,03	0,48	9,03	13,01	1,05	0,61	0,37	0,87
PTSM17_012	-	61,45	1,66	1,2	9,71	19,24	-	-	4,94	1,8
PTSM19_006	14,19	49,71	4,36	1,36	7,85	16,58	0,71	1	2,45	0,96
PTSM19_009	5,36	59,08	2,23	1,35	6,04	15,98	0,77	1,64	0,39	1,56
PTSM19_007	8,85	56,06	1,41	0,48	7,1	19,95	0,57	4,48	0,21	0,52
<b>Promedio</b>	<b>15,12</b>	<b>53,91</b>	<b>2,51</b>	<b>1,00</b>	<b>8,33</b>	<b>15,11</b>	<b>1,10</b>	<b>1,56</b>	<b>1,16</b>	<b>1,07</b>

Apéndice 11. Composición de las partículas irregulares ricas en Ca. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
PTSM1_007	21,78	45,97	2,75	-	1	3,06	0,87	0,54	23,79
PTSM1_011	41,2	44,96	2,68	-	0,75	2,72	1,37	0,51	5,67
PTSM11_004	18,93	50,21	5,72	0,65	2,32	11,59	2,26	0,87	5,43
PTSM19_001	20,89	57,94	1,07	0,73	0,97	1,66	0,34	-	16,4
PTSM19_002	19,67	62,22	1,58	0,61	1,32	2,42	0,57	-	11,62
PTSM19_003	19,4	63,27	1,86	0,52	1,26	3,67	0,36	0,34	9,31
PTSM19_005	15,35	60,82	1,72	0,78	4,47	8,07	0,41	-	7,57
<b>Promedio</b>	<b>22,46</b>	<b>55,06</b>	<b>2,48</b>	<b>0,66</b>	<b>1,73</b>	<b>4,74</b>	<b>0,88</b>	<b>0,57</b>	<b>11,40</b>



Apéndice 12. Composición de las partículas ovoidales. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Al	Si	Cl	K	Ca
PTSM1_002	35,03	36,45	5,47	1,91	14,91	2,03	1,61	1,81
PTSM1_007	43,21	34,68	4,88	0,28	6,42	4,31	1,17	3,69
PTSM1_009	45,46	32,53	5,37	0,93	5,9	5,07	1,18	3,57
PTSM17_006	34,8	36,66	2,57	4,11	13,13	1,05	1,49	2,47
<b>Promedio</b>	<b>39,63</b>	<b>35,08</b>	<b>4,57</b>	<b>1,81</b>	<b>10,09</b>	<b>3,12</b>	<b>1,36</b>	<b>2,89</b>

Apéndice 13. Composición de las partículas irregulares ricas en Si. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Al	Si	Cl	K	Ca
PTSM1_005	41,52	37,72	5,3	1,5	7,1	4,95	0,72	1,18
PTSM1_008	41,83	34,65	6,23	1,45	10,05	2,61	0,82	0,98
PTSM9_010	31,17	46,43	2,83	0,72	17,01	0,6	0,53	0,36
PTSM9_011	9,71	56,55	0,55	0,61	32,58	-	-	-
PTSM11_007	8,58	56,25	7,39	2,83	21,02	-	1,29	0,65
PTSM17_001	13,81	55,04	3,35	4,34	19,93	0,62	1,11	0,61
PTSM17_002	13,34	48,92	2,17	3,84	26,34	0,53	0,97	1,23
PTSM17_003	12,87	58,52	0,81	1,59	25,65	0,56	-	-
PTSM17_004	23,59	40,97	1,36	6,44	19,65	0,76	5,66	0,99
PTSM19_008	10,77	54,99	7,28	4,96	15,37	3,29	1,27	0,66
<b>Promedio</b>	<b>20,72</b>	<b>49,00</b>	<b>3,73</b>	<b>2,83</b>	<b>19,47</b>	<b>1,74</b>	<b>1,55</b>	<b>0,83</b>



Apéndice 14. Composición de las partículas amorfas. Aeropuerto Metropolitano de Ocumare.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
PTSM1_004	73,79	19,26	0,8	-	0,28	1,9	-	-	0,55	0,16	3,15	0,1
PTSM1_009	29,48	42,65	3,97	-	1,62	10	-	1,28	2,08	1,09	7,28	0,55
PTSM1_015	47,8	37,45	3,67	0,93	0,81	5,62	0,41	0,22	1,58	0,41	0,86	-
PTSM17_009	44,9	36,29	3	0,66	2,3	8,79	0,38	-	1,12	0,82	0,9	0,41
<b>Promedio</b>	<b>48,99</b>	<b>33,91</b>	<b>2,86</b>	<b>0,40</b>	<b>1,25</b>	<b>6,58</b>	<b>0,26</b>	<b>0,38</b>	<b>1,33</b>	<b>0,62</b>	<b>3,05</b>	<b>0,27</b>

Apéndice 15. Composición de partículas esféricas con relieve-biológicas. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
PTSM1_005	55,19	33,88	5,39	-	0,37	2,43	-	-	1,66	0,46	0,46	0
PTSM2_006	45,69	40,44	5,4	1,19	0,55	1,94	0,34	-	2,6	0,37	1,2	0,28
PTSM2_017	45,88	39,54	3,34	1,26	1,3	4,54	-	0,58	1,39	0,42	1,46	0,29
PTSM10_011	46,67	40,14	2,59	0,62	1,74	5,46	-	0,26	0,65	0,53	0,8	0,39
PTSM20_005	56,33	29,93	6,13	0,72	0,47	1,23	0,34	0,29	3,06	0,38	0,6	-
PTSM20_011	55,78	34,43	2,84	0,34	0,81	3,27	0,21	0,31	0,85	0,34	0,47	0,23
<b>Promedio</b>	<b>50,92</b>	<b>36,39</b>	<b>4,28</b>	<b>0,83</b>	<b>0,87</b>	<b>3,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,24</b>	<b>1,70</b>	<b>0,42</b>	<b>0,83</b>	<b>0,20</b>

Apéndice 16. Composición de partículas tabulares. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
PTSM2_009	-	55,4	2,4	2,16	7,72	28,35	0,3	1	0,87	1,4
PTSM10_006	14,74	53,47	2,29	2,17	7,12	16,57	-	0,76	0,62	1,9
PTSM10_009	13,17	58,17	2,69	1,31	6,41	13,73	0,55	0,96	0,75	2,26
PTSM20_003	-	52,05	6,54	9,55	-	29,8	0,39	0,56	0,52	0,58
<b>Promedio</b>	<b>6,98</b>	<b>54,77</b>	<b>3,48</b>	<b>3,80</b>	<b>7,08</b>	<b>22,11</b>	<b>0,41</b>	<b>0,82</b>	<b>0,69</b>	<b>1,54</b>



Apéndice 17. Composición de partículas esféricas lisas sin C. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
PTSM4_003	62,13	1,47	2,26	8,59	18,79	0,75	0,61	1,8	3,6
PTSM4_004	60,96	2,24	2,69	9,66	18,87	0,77	0,61	0,38	3,82
<b>Promedio</b>	<b>61,545</b>	<b>1,855</b>	<b>2,475</b>	<b>9,125</b>	<b>18,83</b>	<b>0,76</b>	<b>0,61</b>	<b>1,09</b>	<b>3,71</b>

Apéndice 18. Composición de partículas esféricas lisas carbonosas. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca
PTSM2_006	58,02	31,06	5,48	0,37	0,24	2,03	-	1,63	0,42	0,75
PTSM10_001	46,85	39,49	2,82	0,55	1,39	6,48	-	0,65	0,46	0,89
PTSM10_004	58,22	32,92	2,18	0,22	0,95	4,22	0,36	0,19	0,31	0,27
PTSM12_006	54,36	36,04	2,73	0,2	0,99	4,76	0,03	0,22	0,35	0,23
PTSM18_009	62,9	30,45	0,96	0,16	1,08	3,26	0,35	0,31	0,21	-
PTSM20_008	63,69	26,76	2,93	0,19	0,38	1,76	0,27	2,69	0,27	0,41
<b>Promedio</b>	<b>57,34</b>	<b>32,79</b>	<b>2,85</b>	<b>0,28</b>	<b>0,84</b>	<b>3,75</b>	<b>0,25</b>	<b>0,95</b>	<b>0,34</b>	<b>0,51</b>

Apéndice 19. Composición de partículas irregulares ricas en Fe-Al. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe
PTSM 2_014	-	56,4	2,32	2,74	8,83	19,2	-	0,95	1,19	-	8,36
PTSM 4_001	46,23	1,7	2,41	10,58	27,69	-	-	1,71	2,3	0,86	6,52
PTSM 18_015	9,8	44,89	2,37	1,06	6,88	18,5	0,93	2,71	3,21	1,48	8,15
PTSM 18_016	10,4	36,18	1,9	0,87	7,49	21,4	0,65	3,19	2,8	1,71	13,41
<b>Promedio</b>	<b>16,61</b>	<b>34,79</b>	<b>2,25</b>	<b>3,81</b>	<b>12,72</b>	<b>14,78</b>	<b>0,79</b>	<b>2,14</b>	<b>2,38</b>	<b>1,01</b>	<b>9,11</b>



Apéndice 20. Composición de partículas irregulares ricas en Al. Estación Pitahaya-Charallave.

<b>Muestra</b>	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>K</b>	<b>Fe</b>
<b>PTSM2_004</b>	6,47	54,57	2,51	1,82	9,18	20,87	1,15	3,44
<b>PTSM2_005</b>	6,08	59,21	2,35	0,49	6,74	20,45	4,18	0,26
<b>PTSM2_013</b>	12,66	52,99	1,9	1	11,19	16,09	1,37	1,05
<b>PTSM2_018</b>	12	57,39	1,92	1,21	6,62	17,4	0,66	2,09
<b>PTSM4_009</b>	0	55,04	2,3	2,77	9,75	23,78	1,04	3,81
<b>PTS10_007</b>	16	52,84	2,84	1,04	10,75	14,59	1,22	0,72
<b>PTS12_008</b>	9,3	56,43	3,73	0,87	8,55	16,67	2,12	0,73
<b>PTS18_001</b>	5,32	55,27	0,41	2,07	11,29	19,33	4,63	1,68
<b>PTS18_002</b>	6,01	57,43	1,58	0,96	8,69	21,45	1,15	1,57
<b>PTS18_004</b>	-	63,18	1,46	1,59	11,35	17,93	1,32	1,92
<b>PTS18_006</b>	7,89	54,78	2,46	1,08	9,77	19,14	1,99	1,59
<b>PTS18_010</b>	14,74	51,74	2,04	0,66	10,66	16,57	1,61	1,06
<b>PTS18_013</b>	5,61	53,82	2,93	1,4	8,38	21,76	1,15	2,76
<b>PTS18_014</b>	6,56	41,94	1,89	1,84	8,37	30,8	1,42	4,31
<b>PTS20_007</b>	40,3	37,6	5,09	0,66	2,98	7,07	0,7	0,66
<b>PTS20_008</b>	6,83	55,46	1,12	1,66	9,21	19,62	2,37	3,36
<b>Promedio</b>	<b>10,38</b>	<b>53,73</b>	<b>2,28</b>	<b>1,32</b>	<b>8,97</b>	<b>18,97</b>	<b>1,76</b>	<b>1,94</b>



Apéndice 21. Composición de partículas irregulares porosas. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe
PTSM2_005	57,71	3,22	4,23	10,58	20,77	-	0,8	-	-	2,69
PTSM2_008	62,45	4,29	2,63	21,06	-	1,14	0,81	0,65	0,31	0,56
PTSM2_010	60,34	4,58	2,2	7,9	19,82	0,48	1,16	0,86	0,38	2,28
PTSM2_011	51,38	2,71	1,22	8,71	25,27	0,38	1,94	3,16	0,8	4,11
PTSM2_016	55,19	3,98	1,5	8,83	22,09	0,58	1,67	1,41	0,81	3,92
PTSM4_002	2,91	1,52	9,53	27,01	-	-	1,47	1,28	0,52	3,32
PTSM18_005	52,23	2,82	2,28	12,71	24,3	0,43	0,8	-	0,37	4,08
PTSM18_007	63,29	1,67	3,03	5,56	10,33	0,31	0,49	-	5,82	3,39
<b>Promedio</b>	<b>50,69</b>	<b>3,10</b>	<b>3,33</b>	<b>12,80</b>	<b>15,32</b>	<b>0,42</b>	<b>1,14</b>	<b>0,92</b>	<b>1,13</b>	<b>3,04</b>

Apéndice 22. Composición de partículas irregulares ricas en Ca. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	C	O	Na	Si	Cl	K	Ca	Fe
PTSM2_002	13,83	58,86	1,65	2,44	0,64	0,45	21,72	0,42
PTSM20_006	7,05	60,68	1,5	6,38	0,91	0,89	14,68	0,77
<b>Promedio</b>	<b>10,44</b>	<b>59,77</b>	<b>1,575</b>	<b>4,41</b>	<b>0,775</b>	<b>0,67</b>	<b>18,2</b>	<b>0,595</b>



Apéndice 23. Composición de partículas irregulares silicatadas. Estación Pitahaya-Charallave.

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
PTSM4_005	-	57,16	1,02	0,33	1,68	38,15	-	0,44	0,44	0,61
PTSM4_008	-	42,46	1,55	-	1,59	54,4	-	-	-	-
PTSM4_010	24,92	46,66	4,61	0,81	3,33	13,19	2,01	0,9	1,72	1,03
PTSM4_011	12,59	57,1	4,38	0,91	4,9	12,51	2,61	0,73	1,94	1,25
PTSM10_002	21,14	48,86	2,46	1,83	5,84	14,6	0,49	0,88	1,49	2,03
PTSM10_005	18,85	42,83	3,11	0,75	5,49	16,53	0,56	1,11	6,67	3,12
PTSM10_008	15,05	57,18	1,58	-	1,78	23,37	-	0,44	-	0,6
PTSM10_012	12,87	52,07	1,29	-	2,01	29,35	-	0,64	0,76	0,67
PTSM12_003	-	68,52	0,19	-	3,61	21,17	-	1,14	1,33	3,39
PTSM12_008	38,73	43,44	4,42	0,39	1,36	8,77	1,19	0,58	0,9	0,44
PTSM18_003	-	63,04	0,93	0,28	2,74	31,73	0,49	0,35	-	-
PTSM18_008	29,2	47,87	2,33	0,96	5,88	10,12	1,09	0,99	-	1,01
PTSM18_017	6,36	58,77	2,02	0,5	4,58	23,94	-	0,99	0,89	1,03
PTSM20_001	-	65,38	4,87	-	4,79	15,7	0,58	2,09	5,48	1,48
PTSM20_002	2,02	62,15	1,36	0,52	1,9	31,35	0,23	0,46	-	-
PTSM20_003	7,69	52,52	1,61	0,21	1,54	35,53	0,35	0,55	-	-
PTSM20_004	12,67	50,08	4,9	0,69	4,87	17,49	1,15	1,43	1,72	2,56
PTSM20_005	39,09	36,72	5,71	1,14	1,23	5,89	7,24	0,97	2	-
PTSM20_008	15,83	53,5	3,21	1,27	6,31	15,24	1,08	0,91	0,61	1,62
PTSM20_009	35,99	36,95	3,24	0,52	3,68	10,88	1,76	1,27	1,23	1,66
PTSM20_010	13,23	51,74	2,75	0,85	5,49	14,85	1,01	1,78	2,01	3,46
<b>Promedio</b>	<b>15,31</b>	<b>52,14</b>	<b>2,74</b>	<b>0,63</b>	<b>3,55</b>	<b>21,18</b>	<b>1,04</b>	<b>0,93</b>	<b>1,39</b>	<b>1,24</b>



Apéndice 24. Composición de partículas laminares. Estación Pitahaya-Charallave.

<b>Muestra</b>	<b>O</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>
<b>PTSM4_006</b>	47,4	2,51	2,96	10,56	25,87	1,23	3,12	5,64
<b>PTSM4_007</b>	50,14	6,9	-	10,33	32,62	-	-	-
<b>PTSM10_003</b>	53,29	2,97	1,97	7,84	17,72	1,06	0,99	2,96
<b>PTSM12_002</b>	54,63	1,79	-	1,32	42,26	-	-	-
<b>PTSM20_005</b>	48,13	2,12	0,98	5,73	28,44	1,66	0,8	3,17
<b>PTSM20_009</b>	39,71	2,17	3,04	12,55	31,17	1,83	2,28	6,48
<b>PTSM20_010</b>	66,93	2,51	1,05	7,45	12,97	0,6	3	1,25
<b>Promedio</b>	<b>51,46</b>	<b>3,00</b>	<b>1,43</b>	<b>7,97</b>	<b>27,29</b>	<b>0,91</b>	<b>1,46</b>	<b>2,79</b>