



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA**

**CARACTERIZACIÓN POR SEM-EDS DE AEROPARTÍCULAS ANTRÓPICAS DE LA
FRACCIÓN RESPIRABLE EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO Y SU RELACIÓN CON
FUENTES CONTAMINANTES**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

I.Q. JUAN MANUEL GASCA TIERRAFRÍA

Querétaro, Qro., Noviembre de 2007



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
Facultad de Química
Maestría en Ciencias Ambientales

**CARACTERIZACIÓN POR SEM-EDS DE AEROPARTÍCULAS ANTRÓPICAS DE LA FRACCIÓN
RESPIRABLE EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO Y SU RELACIÓN CON FUENTES
CONTAMINANTES**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

I.Q. Juan Manuel Gasca Tierrafría

Dirigido por:

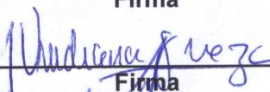
Dr. Antonio Aragón Piña

SINODALES

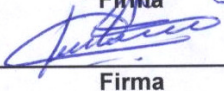
Dr. Antonio Aragón Piña.
Presidente


Firma

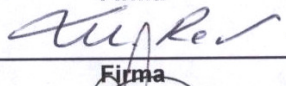
Dra. J. Viridiana García Meza.
Secretario


Firma

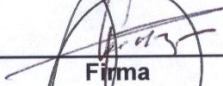
M.A. Antonio Aranda Regalado.
Vocal

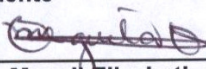

Firma

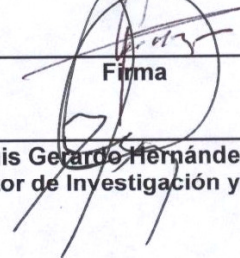
Dr. Miguel Ángel Rea López
Suplente


Firma

M.C. Gustavo Pedraza Aboytes.
Suplente


Firma


Q.B. Magali-Elizabeth Aguilar Ortiz.
Directora de la Facultad


Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

El presente trabajo de investigación se realizó en dos etapas, la primera fue el monitoreo de Partículas Suspendidas Totales, el cual se llevó a cabo por personal del Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental de la Universidad Autónoma de Querétaro, la segunda etapa correspondió al análisis por SEM-EDS, el cual se llevó a cabo en el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo la dirección del Dr. Antonio Aragón Piña.

Resumen

En el presente estudio de caracterización de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) acoplada a la Espectrometría por Energía Dispersa (EDS), se determinaron las características de composición química, morfología y tamaño de partículas atmosféricas de la Ciudad de Querétaro, determinando así un probable origen de las mismas, esto permite contribuir a la toma de medidas correctivas y/o de prevención de la contaminación del aire por fuentes de contaminación. Además del conocimiento de la calidad del aire respecto a partículas respirables (PM_{10}), debido a los daños que ocasionan a la salud. La Ciudad de Querétaro es un sitio interesante debido al comportamiento de los niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST) durante el año 2005, los cuales sobrepasan el límite máximo permisible por día. El estudio comprendió un monitoreo de PST en dos zonas de la Ciudad de Querétaro (Zona Industrial y Zona Centro), durante el periodo de julio de 2005 a junio de 2006. A las muestras obtenidas de PST les fue dado un tratamiento para realizar su análisis por SEM-EDS. Para la asociación a fuentes contaminantes, se realizó una comparación de los resultados obtenidos con estudios previos, realizados en la Ciudad de San Luis Potosí y en la Zona Metropolitana del Valle de México. Los resultados muestran que las dos zonas de estudio de la Ciudad de Querétaro presentan el mismo tipo de aeropartículas antrópicas, esto para los grupos mayoritarios, las cuales están compuestas principalmente por cobre, carbono elemental, bario, hierro, zinc, plomo y níquel. Entre las posibles fuentes emisoras identificadas destacan industrias de fundición, de vidrio, de pigmentos y acereras, así como aquellas que consideran procesos de quema de combustóleo, soldadura y emisiones fugitivas de industrias metálicas básicas. La influencia del tránsito vehicular puede ser debido al desgaste mecánico de autopartes. La gran mayoría de las aeropartículas analizadas presentaron formas esféricas y tamaños menores a $10\ \mu m$. Finalmente, se realizó un estudio de dirección de vientos, en el cual se concluye que la Zona Industrial afecta a la Zona Centro con aeropartículas antrópicas de tamaño menor o igual a $10\ \mu m$.

Palabras Clave: PST, PM_{10} , SEM-EDS, partículas antrópicas.

Summary

In the present study of characterization of the breathable fraction of anthropogenic airborne particles by Scanning Electron Microscopy (SEM) connected to Energy Dispersive Spectrometry (EDS), the characteristics of chemical composition, morphology and size of atmospheric particles of individual form were determined, so that, we could establish a probable origin of anthropogenic airborne particles, and therefore contribute to the taking of corrective and/or preventive measures of contamination in the air by polluting sources, as well as the knowledge about the quality of air as far as breathable particles (PM₁₀), which damage health. The City of Querétaro was chosen because of its daily excess of Total Suspended Particles (TSP) maximum permissible limit in the 2005 period. A monitoring of TSP was made in two different zones of the city (Industrial and Downtown Zones), it was done from July 2005 to June 2006. A treatment was given to the obtained TSP samples, with the purpose of its later analysis by SEM-EDS. For the association to polluting sources, a comparison of the results with previous studies made in the City of San Luis Potosí and the Metropolitan Zone of the México Valley was made. The results showed that both zones in the City of Querétaro have the same kind of anthropogenic particles but only for the principal particle groups, which are made mainly of copper, elementary carbon, barium, iron, zinc, lead and nickel. Among the principal identified emission sources, smelting, glass, pigments and steel industries, as well as heavy fuel oil combustion, welding processes and fugitive emissions of metal-mechanic industries were distinguished. The influence of the vehicular traffic may be due to the mechanical wear of vehicular parts. The majority of the analyzed airborne particles have spherical forms and sizes below 10 µm. Finally, a wind direction study was carried out and it was concluded that the Industrial Zone affects the Downtown Zone directly with airborne particles of 10 µm of size and lower.

Key words: TSP, PM₁₀, SEM-EDS, anthropogenic particles.

Agradecimientos

A mis Padres y hermanos, ya que por su apoyo logré finalizar este trabajo de tesis.

Al Dr. Antonio Aragón Piña, por su apoyo en la dirección de este trabajo.

Al M.A. Antonio Aranda Regalado y al personal de monitoreo atmosférico del CEACA, por su apoyo en la recolección de muestras de PST.

A la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro, por el acceso a datos meteorológicos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca número 188908.

A mis compañeros y amigos del CEACA-UAQ y del IM-UASLP, por su apoyo y entusiasmo en los buenos y malos momentos de mi estancia en Querétaro y San Luis Potosí.

A todos aquellos que participaron de forma directa o indirecta en la realización de este proyecto.

A todos ellos gracias!

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Índice de Cuadros	vi
Índice de Figuras	vii
I. Introducción	1
II. Revisión de literatura	3
2.1 Generalidades sobre contaminación atmosférica	3
2.2 Contaminantes del aire	5
2.3 Material Particulado (PM)	6
2.3.1 Conceptos básicos	
2.3.1.1 Diámetros de partícula	8
2.3.1.2 Distribución de tamaños de partícula	9
2.3.2 Influencia del Material Particulado en la salud	14
2.3.2.1 Características fisicoquímicas del PM causantes de impacto en la salud	14
2.3.3 Efectos ecológicos del Material Particulado	20
2.3.3.1 Deposición de PM	20
2.3.3.2 Deposición seca	22
2.3.3.3 Deposición oculta	25
2.3.3.4 Deposición húmeda	25
2.4 Conceptos fundamentales	25
2.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido	26
2.4.2 Espectrometría por Energía Dispersa	29
2.4.3 Características fisicoquímicas de las partículas naturales y antrópicas	30
2.4.4 Estudios de caracterización de partículas del polvo atmosférico por SEM-EDS	33
2.5 Antecedentes Generales	34
2.5.1 Situación actual sobre PM en México	34
2.5.2 La Ciudad de Querétaro	36
2.5.3 Monitoreo y niveles de PST en la Ciudad de Querétaro	38
2.5.4 Dirección predominante de vientos	41
2.6 Hipótesis y Objetivos	43
III. Metodología	44
3.1 Determinación de los niveles de PST en la Ciudad de Querétaro	44
3.2 Determinación por SEM-EDS de composición química, morfología y tamaño de aeropartículas de la fracción respirable recolectadas en la Ciudad de Querétaro	46

3.3	Clasificación de aeropartículas antrópicas en función de su composición química, morfología y tamaño	48
3.4	Establecer posibles asociaciones entre las clases de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable y las actividades dominantes de tipo industrial y de tránsito vehicular	49
3.5	Determinar la dirección predominante de los vientos en la Ciudad de Querétaro	50
IV.	Resultados y discusión	51
4.1	Niveles de PST en el periodo de estudio y dirección de vientos dominantes	51
4.2	Clasificación general de aeropartículas antrópicas	54
4.3	Descripción de los grupos mayoritarios de aeropartículas antrópicas	64
4.3.1	Partículas ricas en cobre	64
4.3.2	Partículas ricas en carbono elemental	67
4.3.3	Partículas ricas en bario	71
4.3.4	Partículas ricas en hierro	74
4.3.5	Partículas ricas en zinc	77
4.3.6	Partículas ricas en plomo	80
4.3.7	Partículas ricas en níquel	82
4.4	Descripción de los grupos minoritarios de aeropartículas antrópicas	85
V.	Conclusiones y recomendaciones	92
5.1	Conclusiones	92
5.2	Recomendaciones	93
	Referencias	94
	Apéndices	101
	Apéndice A	102
	Apéndice B	126

Índice de Cuadros

Cuadro		Página
2.1	Límites máximos permitidos de contaminantes criterio (EPA, 2007)	5
2.2	Límites máximos permitidos de contaminantes criterio (OMS, 2005)	5
2.3	Tipos de aeropartículas en función de su tamaño (EPA, 2006a)	7
2.4	Bienes y servicios ambientales generados por los ecosistemas (Grantz <i>et al.</i> , 2003)	21
2.5	Propiedades de los sistemas ecológicos sujetas a impacto por PM (Grantz <i>et al.</i> , 2003)	21
2.6	Tipo y determinantes de deposición de partículas y su impacto en la vegetación (Grantz <i>et al.</i> , 2003)	24
2.7	Límites máximos permitidos de contaminantes criterio en México	35
2.8	Principales Sectores Industriales de la Ciudad de Querétaro (SIDECAP, 2005)	37
3.1	Condiciones del SEM para microanálisis químico y morfológico	47
4.1	Partículas identificadas en la Zona Industrial	56
4.2	Tamaño de partículas de la Zona Industrial	58
4.3	Partículas identificadas en la Zona Centro	60
4.4	Tamaño de partículas de la Zona Centro	62
4.5	Grupos minoritarios de partículas antrópicas	85

Índice de Figuras

Figura		Página
2.1	Tipos de partículas atmosféricas (EPA, 2006b)	8
2.2	a) Distribuciones de tamaño de partículas para tres características: A) número, B) área superficial y C) volumen (EPA, 2004). b) Modos y mecanismos de transformación de partículas vehiculares: nucleación, condensación y coagulación (EPA, 2004).	11
2.3	a) Distribución modal de partículas modo fino (EPA, 2004), b) distribución idealizada del material particulado atmosférico (EPA, 2004).	13
2.4	a) Penetración de aeropartículas en el sistema respiratorio (Querol <i>et al.</i> , 2004), b) porcentajes de penetración de aeropartículas en el sistema respiratorio (EPA, 2004).	18
2.5	Relación entre velocidad de deposición y diámetro de partícula (Tomado y modificado de Grantz <i>et al.</i> , 2003)	23
2.6	(a) Principio del SEM (Klesel, 2000), (b) Señales generadas por el haz de electrones incidente (Tomado y modificado de Jeol AST)	27
2.7	Penetración y retrodispersión de electrones en el material de estudio (Tomado y modificado de Jeol AST)	28
2.8	Principio de fluorescencia de rayos X	30
2.9	Micrografías de a) SiO ₂ natural (Mineral spectroscopy server, 2007), b) SiO ₂ antrópico (UMSICHT, 2005), c) Fe ₃ O ₄ natural (magnetita) (Mineralogiche e Petrologiche, 2002), d) Ferrita antrópica (Labrada, 2006), e) carbono orgánico (Labrada, 2006), f) carbono elemental (Labrada, 2006).	32
2.10	Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, 2004	34
2.11	Distribución de la población del estado de Querétaro (INEGI, 2006b)	37
2.12	Red Manual de Monitoreo Atmosférico de la Cd. de Querétaro, (1) Félix Osores, (2) Conalep, (3) R. Flores Magón, (4) Nicolás Campa, (5) Cudec, (6) Bellas Artes y (7) Colegio Washington	39
2.13	Niveles de Partículas Suspendidas Totales durante 2005	40
2.14	Red de Monitoreo de Condiciones Meteorológicas, (1) Félix Osores, (2) Tlaloc, (3) Centro, (4) Estadio	42
3.1	Puntos de monitoreo de PST de la Ciudad de Querétaro	44
3.2	(a) Equipo <i>Hi-Vol</i> , (b) filtro después de 24 hr de monitoreo	45
3.3	Microscopio Electrónico de Barrido acoplado a un Espectrómetro por Energía Dispersa	46
3.4	Diagrama esquemático de la preparación de muestras	47
4.1	Niveles de PST en el periodo de estudio. (1), (2) Zona Industrial y (5) Zona Centro	52

4.2	Rosas de vientos anuales, (1) Félix Osores, (2) Tlaloc, (3) Centro y (4) Estadio, durante 2004 y 2005 respectivamente.	53
4.3	(a) Grupos mayoritarios de partículas antrópicas, (b) distribución de tamaño del total de partículas identificadas	55
4.4	Micrografías de partículas de (a), (b) CuS identificadas en Qro, (c) CuS en ZMVM, (d) cobre metálico en Qro, (e) cobre metálico en SLP, (f) cobre metálico en ZMVM, (g) Cu-Ni en Qro, (h) Cu-Ni en ZMVM, (i) Cu-Ni en SLP, (j) Cu-Zn en Qro, (k) Cu-Zn en SLP, (l) Cu-Zn en ZMVM, (m) y (n) cobre nativo en Qro, (ñ) cobre nativo en SLP, (o) distribución de tamaño de partículas ricas en cobre.	66
4.5	Micrografías de partículas de (a), (b) y (c) C-S-V-Ni identificadas en Qro, (d) C-S en SLP, (e) C-S en ZMVM, (f) C-S en España, (g) carbono elemental en Qro, (h) carbono elemental en Beijing, (i) carbono elemental en ZMVM, (j) y (k) agregados de carbono elemental en Shanghai.	69
4.6	(a) Distribución de tamaño de partículas de C-S-V-Ni, (b) distribución de tamaño de partículas de carbono elemental.	70
4.7	Micrografías de partículas de (a) Barita ($BaSO_4$) identificadas en Qro, (b) barita en ZMVM, (c) barita en SLP, (d) $(Ba,Sr)SO_4$ en Qro y (e) en SLP, (f) y (g) barita incrustada en carbono esférico en Qro, (h) barita esférica en Qro. (i), (j) Ba-O-Zn esférico en ZMVM, (k) $BaCO_3$ en Qro, (l) $BaCO_3$ en SLP, (m) distribución de tamaño de partículas ricas en bario.	73
4.8	Micrografías de partículas de (a), (b) y (c) Fe-O en Qro, (d) Fe-O en SLP, (e) Fe-O en ZMVM, (f) Fe-O en fuente fija, (g) y (h) Fe-O-Cr-Ni en Qro, (i) Fe-O-Cr-Ni en ZMVM, (j) Fe-O-Cr-Ni irregular en Qro, (k) Fe metálico irregular en Qro, (l) Fe metálico irregular en ZMVM. (m) y (n) Fe-O-Zn esférico en Qro, (ñ) Fe-O-Zn esférico en SLP, (o) distribución de tamaño de partículas ricas en hierro.	76
4.9	Micrografías de partículas de (a) ZnO redondeado en Qro, (b) agregados de ZnO en Qro, (c) agregados de $ZnNb_2O_6$ en China. (d), (e), (f), (g) y (h) óxido de zinc acicular en Qro., (i) óxido de zinc acicular en EE.UU., (j) y (k) óxido de zinc esférico en Qro., (l) óxido de zinc esférico en ZMVM, (m) distribución de tamaño de partículas ricas en zinc.	79
4.10	Micrografías de partículas de (a), (b) PbS irregular en Qro, (c) PbS mineral en Qro, (d) Pb metálico en Qro, (e) Pb metálico en SLP, (f) Pb metálico en ZMVM, (g) $PbSO_4$ en Qro, (h), (i) $PbSO_4$ en SLP, (j) y (k) PbO facetado en Qro, (l) PbO facetado en SLP. (m) y (n) cromato de plomo en Qro, (ñ) cromato de plomo en ZMVM, (o) distribución de tamaño de partículas ricas en plomo.	81
4.11	Micrografías de partículas de (a) Ni-V en Qro, (b) Ni-V en ZMVM, (c) Ni-V en Tokio. (d), (e) níquel-cobre en Qro, (f)	84

- níquel metálico en Qro. (g), (h), (i) níquel metálico irregular en Qro, (j) distribución de tamaño de partículas ricas en níquel.
- 4.12 Micrografías de partículas de (a), (b) Cd-O-Fe-S en Qro, (c) esfalerita con trazas de cadmio en SLP, (d), (e) vanadioníquel en Qro, (f) óxido de estaño esférico. (g) Sn irregular asociado a S-Pb-Cu-Fe en Qro, (h) Ce-Fe-O esférico en Qro, (i) Ce-Fe-O irregular en Qro, (j) Ce-La-O esférico en ZMVM, (k) Ce-La-O irregular en ZMVM, (l) Molibdenita en Qro, (m) W en Qro, (n) W en ZMVM, (ñ) ZrSiO₄ en Qro, (o) Zr-Ce-O en Qro, (p) fosfato de calcio en Qro, (q) fosfato de calcio en SLP. 88
- 4.13 Micrografías de partículas de (a) trióxido de arsénico en Qro, (b), (c) trióxido de arsénico en SLP, (d) pirolusita en Qro, (e) óxido de manganeso en SLP, (f) y (g) HgS en Qro, (h) Bismutina en Qro, (i) ilmenita en ZMVM, (j) óxido de titanio en ZMVM, (k) carbonato de estroncio en Qro. 91

I. Introducción

La contaminación del aire por partículas es una problemática creciente en ciudades con actividades generadoras de emisiones a la atmósfera; estas actividades son principalmente industriales y vehiculares, ampliamente desarrolladas en las grandes ciudades de diferentes países. La población expuesta a este tipo de emisiones contaminantes puede presentar efectos dañinos en su salud, dependiendo de diversas características fisicoquímicas de las partículas, como composición química, tamaño y solubilidad. El tamaño de partícula es la principal característica que se ha estudiado en cuanto a daños a la salud, debido a que las partículas pueden penetrar al organismo humano vía respiratoria y alojarse en diversos órganos o torrente sanguíneo en función de su tamaño, generando o agravando enfermedades respiratorias y cardiovasculares como asma, enfisema, bronquitis, silicosis y cáncer de pulmón. Actualmente existe una clasificación de las partículas en función de su tamaño, aquellas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}), corresponden mayoritariamente a partículas de la fracción respirable, dentro de esta clasificación existen dos subclasificaciones más en función del diámetro aerodinámico de las partículas, estas son $\text{PM}_{2.5}$ y $\text{PM}_{0.1}$. El tamaño de partícula es entonces la característica más estudiada en cuanto a clasificación y daños a la salud. Sin embargo, si se consideraran otras características como la composición química de la partícula, el riesgo de afectaciones a la salud sería probablemente mayor.

Surge así la necesidad de conocer la calidad del aire respecto a partículas y establecer medidas para la reducción en la emisión de las mismas por fuentes antrópicas. Existen técnicas globales de análisis químico como la Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), Emisión de rayos X Inducidos por Protones (PIXE), Plasma inductivamente Acoplado (ICP), Espectroscopia Foelectrónica de rayos X (XPS), etc. Sin embargo, estas técnicas no proporcionan información que indique el posible origen de las partículas. La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) acoplada a la Espectrometría por Energía Dispersa (EDS) proporciona información fisicoquímica a nivel partícula, como la composición química,

morfología y tamaño, pudiendo así establecer posibles asociaciones a fuentes emisoras, mediante una comparación con estudios realizados a fuentes fijas.

La caracterización de partículas atmosféricas por SEM-EDS es un área poco explorada en México. Los estudios realizados recientemente en esta área, corresponden a la Ciudad de San Luis Potosí y Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En estos sitios se han logrado establecer medidas preventivas y correctivas encaminadas a la reducción de emisiones contaminantes y a la mejora de la calidad del aire.

La Ciudad de Querétaro es una ciudad densamente poblada e industrializada, debido a esto es probable que presente contaminación del aire por partículas provenientes de fuentes fijas. Este estudio pretende determinar las características fisicoquímicas (composición química, morfología y tamaño) de partículas atmosféricas en la Ciudad de Querétaro y así establecer asociaciones con fuentes emisoras de partículas, empleando información de estudios previos reportados en la literatura.

II. Revisión de literatura

2.1 Generalidades sobre contaminación atmosférica

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea a la Tierra. Está compuesta por nitrógeno (78,1%) y oxígeno (20,94%), con pequeñas cantidades de argón (0,93%), dióxido de carbono (0,035%), vapor de agua, neón (0,00182%), helio (0,000524%), criptón (0,000114%), hidrógeno (0,00005%) y ozono (0,00116%). La atmósfera tiene una masa de 5.1×10^{18} kg y está dividida en 4 capas que son: tropósfera (de 0 a 8-16km), estratósfera (8-16km a 50km), mesósfera (50 a 80-85 km), termósfera o ionósfera (80-85km a 500km) y exósfera (500 a 1500-2000km). Las divisiones entre capas se denominan tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa, respectivamente. La presión y la temperatura de la atmósfera varían respecto a la altura.

El aire contenido en la tropósfera es el aire respirable por los seres vivos, la composición del aire puede verse alterada por compuestos en cantidades tales que podría considerarse un factor de riesgo para las personas, animales y plantas (Chong *et al.*, 2002; Grantz *et al.*, 2003). Dichos compuestos son comúnmente emitidos al aire por dos tipos de fuentes, naturales y antrópicas. Posiblemente el problema de la contaminación del aire haya iniciado con las fuentes naturales, debido a los volcanes, los incendios forestales, la suspensión de polvo provocada por el viento, y en menor proporción restos de materia orgánica como polen, esporas, partes de insectos y restos de piel humana (Noll *et al.*, 1990). La contaminación del aire debido a fuentes antrópicas probablemente haya iniciado desde la invención y uso del fuego por el hombre. Hacia el siglo XIV, Brimblecombe registró el primer decreto real de regulación de la contaminación del aire en Inglaterra, al reducir el uso de carbón, debido a las altas correlaciones entre humo negro emanado por chimeneas con la reducción de la visibilidad, depósitos negros sobre construcciones y problemas respiratorios; aunque muchas de las afectaciones a la salud pudieron ser causadas por el bióxido de azufre (SO₂), la decisión tomada fue correcta. A mediados del siglo XX, muchas de las regulaciones sobre contaminación ambiental se basaban en observaciones visuales. Ciudades de Estados Unidos (EE.UU.) como San Luis, MO., controlaban

el humo negro emanado de chimeneas industriales, así como emisiones provenientes de autos a gasolina y diesel basándose en observaciones visuales como la opacidad. Sin embargo, no necesariamente se tenía una conciencia de protección al ambiente; las chimeneas de industrias que emitían gruesas columnas de humo se consideraban en las décadas de los años 1930 y 1940 como un signo de prosperidad. Posteriormente, en Inglaterra, la absorción de luz fue adoptada como medición de contaminación por partículas; en EE.UU. el principio de absorción de luz por partículas fue establecido como coeficiente de opacidad. Sin embargo, esta técnica no contemplaba a las partículas que no absorbían luz. En 1885 se realizó por primera vez la medición de la masa de las partículas suspendidas en el aire haciendo pasar aire a través de un papel filtro. Esta técnica fue desarrollada completamente hasta finales de 1940, con la invención de los equipos *high-volume* (hi-vol) para monitorear el aire después de pruebas de armas nucleares (Chow, 1995). Niveles elevados de concentraciones en el aire son causantes de graves daños a la salud; en 1952, en Londres, murieron más de 4000 personas debido a las concentraciones de humo negro, las cuales excedían los $1600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto debido al uso de carbón como combustible (Harrison y Yin, 2000).

Actualmente la contaminación del aire se considera un problema serio en las ciudades con gran actividad industrial y tránsito vehicular (Karue *et al.*, 1992), porque las actividades de una ciudad implican la combustión de combustibles fósiles para la generación de calor, energía eléctrica o movimiento. En México, las emisiones anuales de contaminantes son superiores a 16 millones de toneladas, de las cuales el 65% son de origen vehicular. En la Ciudad de México se genera el 23.6% de dichas emisiones, en Guadalajara el 3.5% y en Monterrey el 3%. Los otros centros industriales del país generan el 70% restante (Raga *et al.*, 2001). Los contaminantes emitidos con mayor frecuencia por el sector industrial son los óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y material particulado.

2.2 Contaminantes del aire

Los contaminantes del aire se han clasificado en dos categorías, contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son aquellos que son emitidos al aire por fuentes fijas, este tipo de fuente se divide a su vez en fuentes naturales y antrópicas. Los contaminantes secundarios son aquellos producidos en la atmósfera por reacciones fotoquímicas.

Con la aprobación en 1970 de la ley de aire limpio en Estados Unidos, surge el término “contaminante criterio” para designar a los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), plomo (Pb), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM). Desde entonces diversas organizaciones se encargan de regular dichos contaminantes, tal es el caso de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (**Cuadro 2.1**) y la Organización Mundial de la Salud (**Cuadro 2.2**).

Cuadro 2.1. Límites máximos permitidos de contaminantes criterio (EPA, 2007).

Contaminante	Exposición aguda	Exposición crónica
	Concentración - frecuencia	Concentración - frecuencia
SO ₂	0.5 ppm - 3 hr 0.14 ppm - 24 hr	0.03 ppm - 1 año
NO ₂	*	0.053 ppm - 1 año
O ₃	0.12 ppm - 1 hr 0.08 ppm - 8 hr	*
Pb	*	1.5 µg/m ³ - 3 meses
CO	35 ppm - 1 hr 9 ppm - 8 hr	*
PM ₁₀	150 µg/m ³ - 24 hr	(50 µg/m ³) ** - 1 año
PM _{2.5}	35 µg/m ³ - 24 hr	15 µg/m ³ - 1 año
PST	*	*

* No aplica

** No aplica desde 17 de Diciembre de 2006.

Cuadro 2.2. Límites máximos permitidos de contaminantes criterio (OMS, 2005).

Contaminante	Exposición aguda	Exposición crónica
	Concentración - frecuencia	Concentración - frecuencia
SO ₂	500 µg/m ³ - 10 min	20 µg/m ³ - 24 hr
NO ₂	200 µg/m ³ - 1 hr	40 µg/m ³ - 1 año
O ₃	100 µg/m ³ - 8 hr	*
PM ₁₀	50 µg/m ³ - 24 hr	20 µg/m ³ - 1 año
PM _{2.5}	25 µg/m ³ - 24 hr	10 µg/m ³ - 1 año
PST	*	*

* No aplica

Debido al contenido en azufre de los combustibles fósiles, los dióxidos de azufre (SO_2) se asocian a la combustión del gasoleo y carbón en las centrales térmicas, a determinados procesos industriales y a las calefacciones domésticas. El monóxido de carbono (CO) procede tanto de fuentes naturales (océanos, suelos, vegetación e incendios forestales) como antrópicas. En éstas últimas, el CO está relacionado con la combustión incompleta de la materia orgánica de manera que en la atmósfera urbana las principales fuentes de emisión son los vehículos de gasolina. Los óxidos de nitrógeno se forman por oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión y son emitidos mayoritariamente en forma de monóxido de nitrógeno (NO) que rápidamente se oxida en la atmósfera para dar dióxido de nitrógeno (NO_2). La mayor parte de las emisiones de NO_2 corresponden al tránsito de vehículos y, en menor medida, a las centrales térmicas y actividades industriales. El ozono, compuesto esencial en la estratósfera, es un contaminante de la tropósfera. Las principales fuentes del ozono troposférico son el intercambio con la estratósfera y su producción por reacción de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos (Menéndez *et al.*, 2003).

2.3 Material particulado (PM)

Con el término material particulado se ha designado a las partículas sólidas, líquidas y combinación de éstas, presentes en el aire. Dichas partículas pueden ser emitidas por fuentes naturales o antrópicas (primarias) o formarse en la atmósfera debido a condensación de vapores o reacciones fotoquímicas (secundarias) (Krueger *et al.*, 2003; Samara *et al.*, 2003). El material particulado no es una entidad química en si, sino una mezcla de partículas de diferentes tamaños y de composición química muy variada. Tradicionalmente, el material particulado se ha definido únicamente en función del tamaño de partícula, sin considerar otras características como la composición química.

El término Partículas Suspensas Totales (PST) se originó con la invención de equipos para recolectar partículas suspendidas en el aire, estos equipos fueron denominados Hi-Vol. Las PST incluyen a partículas de diferentes tamaños que van desde 0.3 hasta 100 μm (Harrison y Yin, 2000). Debido a que gran parte de las PST corresponden a partículas no inhalables, los efectos adversos a la salud

asociados a niveles de PST son menores que los asociados a partículas inhalables PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{0.1} (Querol *et al.*, 2001). Por lo tanto, las partículas que representan especial interés para la salud son las de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm, ya que por su tamaño pueden penetrar fácilmente al organismo humano a través de la vía respiratoria y, en función de su tamaño, alojarse en órganos y torrente sanguíneo (Raga *et al.*, 2001).

La clasificación del material particulado (PM) en función de su diámetro aerodinámico (Da) se muestra en el **Cuadro 2.3**.

Cuadro 2.3. Tipos de aeropartículas en función de su tamaño (EPA, 2006a)

Descripción	Tamaño de partícula
Extra-gruesas	Da > 10µm
Gruesas (PM _{2.5-10})	2.5µm < Da ≤ 10µm
Finas (PM _{0.1-2.5})	0.1µm < Da ≤ 2.5µm
Ultra-finas (PM _{0.1})	≤ 0.1µm

Las partículas con diámetros aerodinámicos mayores a 10 µm no están incluidas en los criterios de calidad del aire en EE.UU. Sin embargo, este tipo de partículas continúa considerándose como criterio de calidad del aire en muchos países.

La composición química del material particulado inhalable (PM₁₀) suspendido en la atmósfera es geográficamente variable y dependiente del tipo de actividad local. Tal es el caso de la costa este y oeste de EE.UU., donde los sulfatos y nitratos (respectivamente) predominan en el material particulado atmosférico (Harrison y Yin, 2000). Una mezcla típica de PM contiene sulfatos (de amonio y calcio), nitratos (principalmente amonio), cloruros (principalmente de sodio), carbono orgánico y elemental (especialmente relacionado con el tránsito vehicular), material biológico y otros compuestos orgánicos, compuestos de hierro, metales traza y minerales derivados de rocas, suelo y construcción, entre otros compuestos orgánicos e inorgánicos (Moreno *et al.*, 2003).

Las partículas que se encuentran suspendidas en el aire se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo a su origen, las de origen antrópico, que contienen generalmente metales pesados como Cd, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn, y las de origen terrestre natural, que generalmente contienen Al, Ca, Si, Fe y O. Se ha

demostrado que el material suspendido de origen natural llega a representar de 15 a 50% del total de partículas suspendidas en la atmósfera de grandes zonas urbanas (Noll *et al.*, 1990).

2.3.1 Conceptos básicos

2.3.1.1 Diámetros de partícula

El diámetro de una partícula puede determinarse por diversas técnicas incluyendo microscopía electrónica, teoría de Mie, movilidad eléctrica o por su comportamiento aerodinámico. Sin embargo, no todas las partículas son esféricas (**Figura 2.1**), por esta razón se estableció el término “diámetro aerodinámico equivalente”, es decir, el diámetro de una esfera que presenta el mismo comportamiento aerodinámico que la partícula irregular en cuestión. Diferentes tipos de diámetros aerodinámicos son utilizados dependiendo del tipo de proceso que domine el comportamiento de la partícula. Para partículas finas, la difusión es el proceso dominante y el diámetro de Stokes es generalmente utilizado. Para partículas gruesas, la acción gravitacional es el proceso dominante y el diámetro aerodinámico equivalente es el más utilizado.

	Esfera sólida
	Esfera hueca
	Sólido irregular
	Hojuela
	Fibra
	Flóculos condensados
	Agregados

Figura 2.1. Tipos de partículas atmosféricas (EPA, 2006b).

El diámetro de Stokes describe el tamaño de partícula considerando la fuerza de arrastre impartida sobre ésta cuando la velocidad difiere de la del fluido que la rodea. Para una partícula esférica, el diámetro de Stokes representa el diámetro físico de la partícula, para partículas irregulares, el diámetro de Stokes es el diámetro de una esfera equivalente que presente la misma resistencia

aerodinámica que la partícula irregular en cuestión. El diámetro de Stokes es independiente de la densidad.

El diámetro aerodinámico equivalente depende de la densidad de la partícula, este se define como el diámetro de una partícula esférica de densidad 1 g/cm³ que presente la misma velocidad de sedimentación que la partícula irregular en cuestión. Los equipos de monitoreo de partículas de tipo “impactador de cascada”, separan partículas basándose en el diámetro aerodinámico equivalente. De igual forma, las definiciones de las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} se basan en los diámetros aerodinámicos equivalentes.

De forma general, el diámetro aerodinámico equivalente se utiliza para tamaños de partícula mayores a 0.5 µm. Para partículas de menor tamaño, el diámetro de Stokes es mayoritariamente utilizado. La relación entre el diámetro de Stokes (D_p) y el diámetro aerodinámico equivalente (D_a) esta dada por la siguiente ecuación:

$$D_a = D_p \left(\frac{\rho C_p}{C_a} \right)^{1/2}$$

ρ : densidad de partícula.

donde : C_p : Factor de deslizamiento de Cunningham evaluado para D_p

C_a : Factor de deslizamiento de Cunningham evaluado para D_a

El tamaño de partícula, definido por su diámetro aerodinámico equivalente o de Stokes, es un factor importante en la determinación de las propiedades, efectos y destino en la atmósfera de una partícula. La tasa de deposición de las partículas, el tiempo de residencia en la atmósfera, así como la deposición de éstas en el sistema respiratorio, son funciones dependientes del diámetro aerodinámico equivalente y de Stokes (EPA, 2004).

2.3.1.2 Distribución de tamaños de partícula

El efecto de las partículas atmosféricas en visibilidad, balance radiativo y climático, están influenciadas por la distribución de tamaños de partícula, por tal razón, la distribución de tamaños de partícula es un parámetro físico importante en la determinación de su comportamiento.

La distribución de tamaños de partícula se expresa generalmente en términos de logaritmo de diámetro de partícula en el eje X, y en el eje Y en términos de la concentración diferencial $\Delta N / \Delta(\log D_p)$, es decir, el número de partículas por cm^3 de aire, con diámetros dentro del intervalo $\log D_p$ a $\log(D_p + \Delta D_p)$. Debido a que los logaritmos son adimensionales, el logaritmo del diámetro aerodinámico ($\log D_p$) se expresa como $\log(D_p / D_{p0})$, donde $D_{p0} = 1\mu\text{m}$. Las distribuciones de partícula se expresan también como distribuciones de superficie, volumen y masa.

Un estudio de aproximadamente 1000 distribuciones de tamaños de partícula en función del número, área superficial y volumen de las partículas en diversas zonas de EE.UU. (EPA, 2004), mostró tres picos característicos en las diferentes distribuciones de tamaño de partículas (**Figura 2.2a**), a los cuales se les llamó “modos”. La distribución completa de tamaños de partícula puede ser descrita como un modelo trimodal consistente de tres distribuciones lognormales aditivas. El pico localizado entre 5 y 30 μm , se refiere al “modo grueso”, el cual es característico de procesos mecánicos. El pico localizado entre 0.15 y 0.5 μm , formado por procesos de condensación y coagulación, se refiere al “modo acumulación”. El pico localizado entre 0.015 y 0.04, formado por procesos de nucleación, así como de condensación y coagulación, se define como el “modo núcleo”. Estudios posteriores de distribuciones de tamaños de partícula, mostraron los modos y mecanismos de formación de las partículas provenientes del tránsito vehicular (**Figura 2.2b**). Diversos estudios realizados sobre distribución modal de tamaños de partículas ultrafinas, muestran que a diferencia de otras partículas, éstas tienen una distribución trimodal (**Figura 2.3a**).

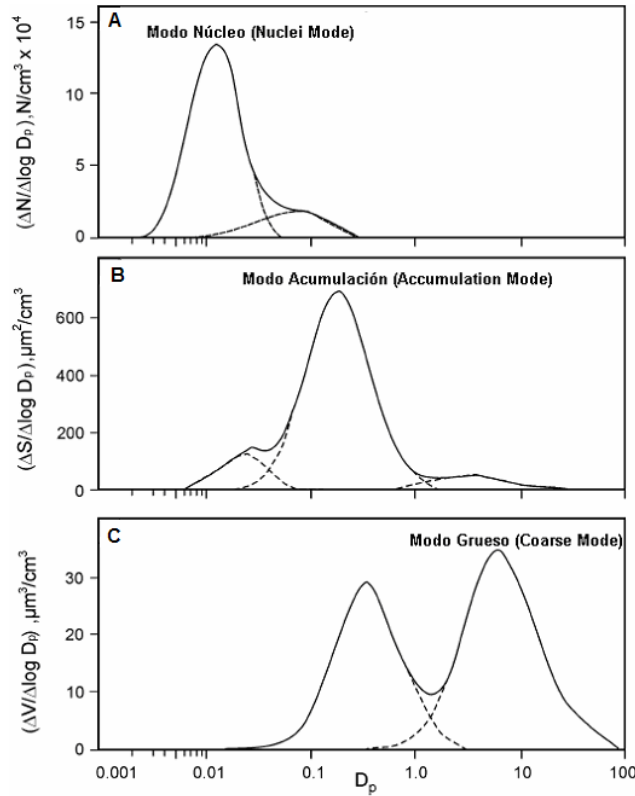
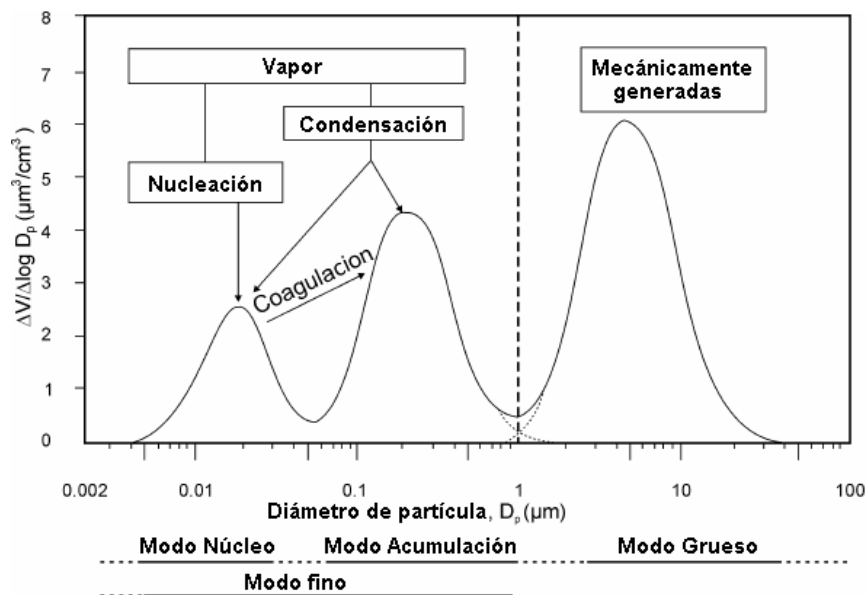
a**b**

Figura 2.2. a) Distribuciones de tamaño de partículas para tres características: A) número, B) área superficial y C) volumen (EPA, 2004). b) Modos y mecanismos de transformación de partículas vehiculares: nucleación, condensación y coagulación (EPA, 2004).

Por lo tanto, la clasificación modal idealizada de la distribución de tamaños de partícula es actualmente tetramodal: nucleación, aitken, acumulación y grueso.

El *modo nucleación* representa el proceso de formación de partículas menores a 10 nm. El *modo aitken* corresponde a partículas con diámetros entre 10 y 100 nm, este tipo de modo resulta por la coagulación de pequeñas partículas o por la nucleación de altas concentraciones de precursores. El *modo acumulación* corresponde a la porción del modo fino con diámetros mayores a 0.1 μm . Las partículas finas se forman por coagulación (combinación de dos partículas para formar una) o por condensación (condensación de moléculas gaseosas para formar una partícula, debido a bajas presiones de vapor en equilibrio). Mientras el tamaño de partícula aumenta, la coagulación y condensación disminuye, acumulándose así las partículas en este modo. El *modo grueso* representa a partículas de mayor tamaño que los modos anteriores en las distribuciones modales de masa y volumen, el modo grueso inicia generalmente entre 1 y 3 μm .

Los modos se definen por el mecanismo de formación de las partículas. Es decir, los modos difieren dependiendo de la fuente de emisión, composición, transporte, destino en la atmósfera, así como del tamaño de partícula. Esta última característica puede ocasionar confusión entre los modos fino y grueso con las partículas $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} y PST (**Figura 2.3b**), para ilustrar la diferencia se sugiere observar las **Figuras 2.2b y 2.3b**.

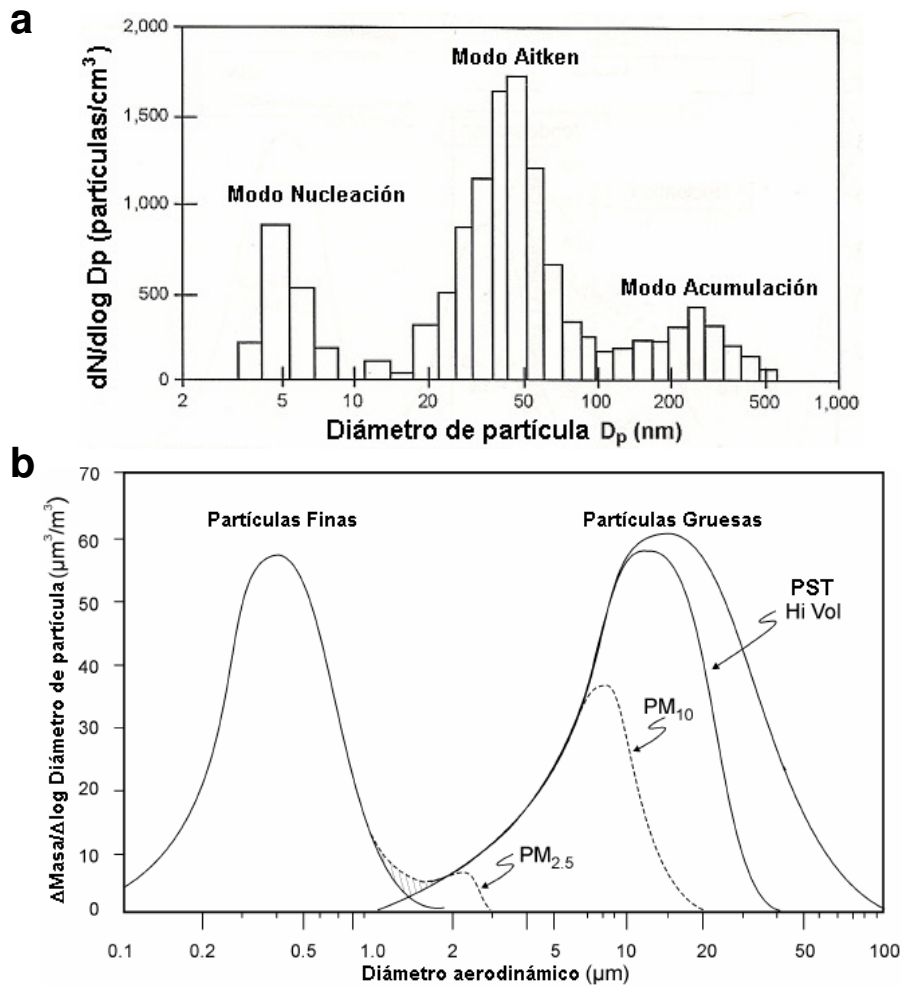


Figura 2.3. a) Distribución modal de partículas modo fino (EPA, 2004), b) distribución idealizada del material particulado atmosférico (EPA, 2004).

2.3.2 Influencia del Material Particulado en la salud

El material particulado de tamaño menor a 10 μm se ha vinculado con diversos daños a la salud. Puede provocar o agravar enfermedades como asma, enfisema, bronquitis, silicosis, cáncer de pulmón y enfermedades cardiovasculares, además de afectar la presión sanguínea sistólica de personas mayores (Harrabi *et al.*, 2006; Donaldson *et al.*, 2000; Zamorano *et al.*, 2003; Xie *et al.*, 2005). Las posibles causas de estos efectos incluyen la composición química (metales de transición como cobre, hierro, vanadio, níquel o zinc), la acidez y los tamaños de partícula, principalmente tamaños de la fracción fina y ultra-fina. Las partículas PM_{10} se han relacionado también con problemas de reducción de visibilidad y de olores desagradables (Xie *et al.*, 2005). Se han propuesto diversos mecanismos de acción para explicar los efectos del material particulado sobre la salud humana (Donaldson *et al.*, 1998), sin embargo aún no es claro que factor o factores son los determinantes para su efecto. Sin embargo, existe una gran aceptación a la hipótesis que relaciona las afectaciones a la salud con factores como la composición química de las partículas y su capacidad de transportar sustancias tóxicas (e.g. ácidos, sulfatos, elementos pesados) adsorbidas en su superficie (Harrison y Yin, 2000; Paoletti *et al.*, 2003).

2.3.2.1 Características fisicoquímicas del material particulado causantes de efectos en la salud

Las características del material particulado que resultan de interés para la salud, así como para la asociación a fuentes emisoras y para la modelación de la calidad del aire, se muestran a continuación (EPA, 2004).

- Número de partículas
- Área superficial
- Distribución de tamaños de partícula
- Masa de material particulado
- Contenido de iones (sulfato, nitrato y amonio)
- Contenido de ácidos fuertes
- Carbono elemental

- Carbono orgánico (total, no volátil, semivolátil, grupos funcionales y especies individuales)
- Contenido de metales de transición (solubilidad en agua, bio-disponibilidad, generación de especies oxidantes)
- Elementos tóxicos específicos y compuestos orgánicos
- Elementos crustales
- Bioaerosoles
- Índice de refracción de la partícula (real e imaginario)
- Densidad de partícula
- Cambios en el tamaño de partícula con cambios en la humedad relativa (coagulación)

A continuación se describen de forma global, algunas características del material particulado causantes de toxicidad.

1. Composición química de partícula

La mayoría de los estudios epidemiológicos determinan la relación entre efectos a la salud y la exposición a PM₁₀, sin considerar la diferencia de composición química del material particulado. Sin embargo, existe una similitud entre resultados de estudios realizados en diferentes países acerca de los efectos a la salud causados por PM₁₀ (Analitis *et al.*, 2006; Jusot *et al.*, 2006; Palmer, 2005; Simpson *et al.*, 2005; O'Neill *et al.*, 2004; Know *et al.*, 2002). Resulta difícil asegurar que la composición química no es un factor determinante en los resultados de esos estudios, dada la variabilidad de composición química de las partículas PM₁₀ estudiadas. Éstas pueden estar compuestas por sustancias altamente solubles como sulfatos, nitrato de amonio y cloruro de sodio, adsorbidos en partículas de carbono (mayoritariamente carbono elemental). Los compuestos solubles en agua (adsorbidos en partículas menores a 1 µm) pueden disolverse rápidamente en fluidos del sistema respiratorio, pudiendo así ejercer efectos fisiológicos considerables (Adamson *et al.*, 1999).

La composición química de las muestras de polvo atmosférico de diversas partes del mundo, muestran una composición similar respecto a los compuestos de mayor abundancia, aunque en proporciones variables de acuerdo a la zona de

estudio. Básicamente, los compuestos de mayor abundancia son sulfatos, nitratos, amonio, cloruros, carbono orgánico y elemental, material cristal y material biológico (Harrison y Yin, 2000).

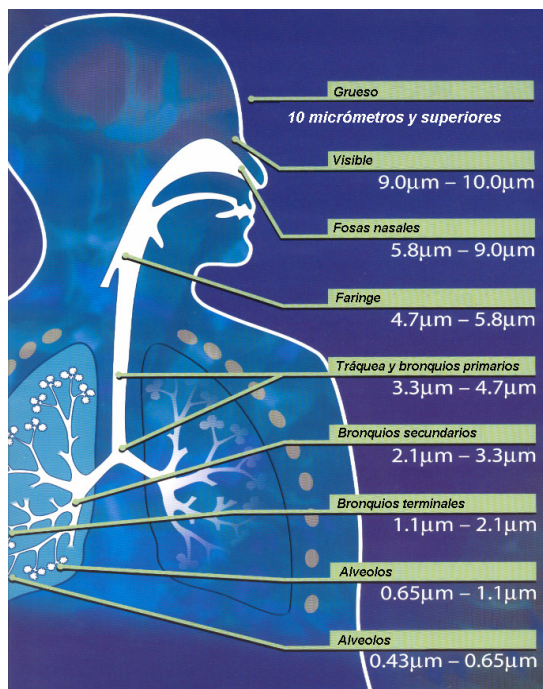
2. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es la característica del material particulado que más se ha estudiado. La mayoría de los estudios epidemiológicos estudian exposición a partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, las cuales se definen en función de su tamaño. El tamaño de partícula es un factor crítico causante de toxicidad, debido a que en función de su tamaño pueden penetrar al organismo humano vía respiratoria, para luego alojarse en diversos órganos y torrente sanguíneo (**Figura 2.4**). Las partículas mayores de 10 μm son mayoritariamente removidas en la boca o nariz. Las partículas de diámetro aerodinámico entre 1-10 μm , penetran en la zona nasal y parte de la traquea, donde se depositan. Las partículas con diámetros aerodinámicos entre 0.01-1.0 μm logran penetrar por la traquea hasta los pulmones (zona alveolar). Del 10-60% de las partículas PM_{10} que penetran hasta la traquea, se pueden depositar en los pulmones (Chow, 1995).

Estudios toxicológicos han concluido que las partículas finas ($PM_{2.5}$) y ultra-finas ($PM_{0.1}$) presentan un incremento en su toxicidad por unidad de masa, además de que la toxicidad incrementa al disminuir el tamaño de partícula (Donaldson *et al.*, 1998). Esto puede ser explicado debido a que las partículas finas y ultra-finas tienen un área superficial por unidad de masa mayor que las partículas gruesas, además de poseer la habilidad de penetrar el tejido intersticial pulmonar, induciendo así un proceso inflamatorio que estimula la producción de factores coagulantes de la sangre, agravando así enfermedades isquémicas del corazón. La mayoría de estudios realizados con partículas PM_{10} , asocian incrementos generalmente de 10 $\mu g/m^3$ de PM_{10} con efectos adversos a la salud, como incremento en la tasa de mortalidad en un 0.6% (Know *et al.*, 2002), 3% los síntomas de asma (Donaldson *et al.*, 2000), el índice de mortalidad postneonatal en un 6% (Kaiser *et al.*, 2004), por enfermedades respiratorias en un 24% y en un 16% el síndrome SIDS (Síndrome de muerte repentina en infantes) en infantes

con peso normal promedio. Sin embargo, las partículas de la fracción gruesa son causantes también de efectos adversos a la salud e incrementos en la tasa de mortalidad (Castillejos *et al.*, 2000). Ambas fracciones (fina y gruesa) presentan toxicidad *in vitro* en relación a su composición fisicoquímica, provocando disminución de la viabilidad celular e incrementan la liberación de óxido nitroso, un agente inflamatorio. El estrés oxidativo inducido por el material particulado sobre las membranas celulares es debido principalmente a la interacción entre la superficie de la partícula y la membrana celular. La fracción fina es más efectiva en causar dichos efectos, debido a su gran número de partículas por unidad de volumen y a su extremadamente alto cociente de área superficial/volumen. Ese sería el caso aún si su presencia en la atmósfera fuera muy baja en concentración. Una razón más de la efectividad de este tipo de partículas en la inducción de efectos biológicos es su naturaleza fisicoquímica, cuya composición principal es carbono y azufre, las cuales son transportadoras de diversas sustancias adsorbidas en su superficie (Diociaiuti *et al.*, 2001).

a



b

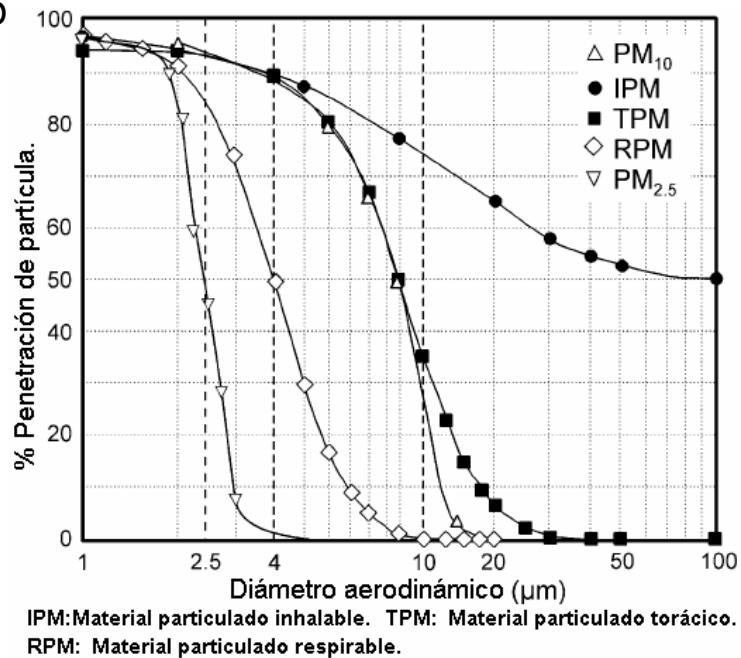


Figura 2.4. a) Penetración de aeropartículas en el sistema respiratorio (Querol *et al.*, 2004), b) porcentajes de penetración de aeropartículas en el sistema respiratorio (EPA, 2004).

3. Contenido de elementos pesados

Algunos elementos pesados como plomo, cadmio y mercurio, son altamente tóxicos en determinadas dosis. Sin embargo, la exposición a estos elementos vía inhalación de PM, probablemente no sea suficiente para inducir efectos tóxicos mediante los mecanismos clásicos de toxicidad. Sin embargo, un estudio reciente sugiere que los metales de transición, en particular el hierro, pueden ocasionar efectos adversos en la salud mediante mecanismos no clásicos de toxicidad, incluyendo la producción de radicales hidroxilo, mediante la reacción de Fenton. Un punto importante a considerar para la mayoría de los elementos traza es que su especiación química, y por lo tanto su biodisponibilidad y potencialidad para participar en reacciones químicas específicas como la reacción de Fenton, varía significativamente de acuerdo a su fuente emisora (Harrison y Yin, 2000).

4. Contenido de ácidos fuertes

Los nitratos y sulfatos formados en la atmósfera por oxidación de dióxido nitroso y dióxido de azufre respectivamente, se presentan en forma de sus ácidos fuertes, ácido nítrico y ácido sulfúrico. El ácido nítrico puede incorporarse a las partículas atmosféricas mediante dos procesos, desplazamiento de ácido clorhídrico de partículas de sal marina, para formar nitrato de sodio, y neutralización de amonio para formar nitrato de amonio. Para el caso del ácido sulfúrico, una vez formado es incorporado de forma inmediata a las partículas atmosféricas, el cual puede ser neutralizado únicamente por el amonio atmosférico. Así pues, en un ambiente con bajo contenido de amonio, es probable que las partículas atmosféricas contengan concentraciones apreciables de ácido sulfúrico (Harrison y Yin, 2000).

5. Contenido de sulfatos

Los sulfatos son unos de los principales componentes del PM, aunque la composición del PM varía respecto al sitio. Estudios realizados en EE.UU. relacionan la tasa de mortalidad diaria con concentraciones atmosféricas de sulfatos. De igual forma, diferentes estudios de series de tiempo sobre mortalidad diaria con relación a partículas PM₁₀, PM_{2.5} y sulfatos, muestran una mayor

asociación entre la tasa de mortalidad y la concentración atmosférica de PM_{2.5}. (Harrison y Yin, 2000).

2.3.3 Efectos ecológicos del Material Particulado

La mayoría de los estudios realizados acerca de los efectos del PM se enfocan a evaluar daños en la salud humana. Sin embargo, poco se ha estudiado sobre los daños causados a los ecosistemas. Posiblemente el mayor impacto que podría causar el PM sea la reducción de biodiversidad y la pérdida o daño de bienes y servicios ambientales (**Cuadro 2.4**). De forma similar, en el **Cuadro 2.5** se muestran las propiedades de los sistemas ecológicos sujetos a impacto por PM, tales impactos pueden ocurrir vía superficie vegetal, suelo o ambos. Sin embargo, de acuerdo a la mayoría de datos disponibles, el mayor impacto de PM ocurre vía suelo. A continuación se realiza una descripción de los componentes necesarios para una evaluación del riesgo ecológico causado por PM.

2.3.3.1 Deposición de PM

La deposición atmosférica de partículas a los ecosistemas se lleva a cabo vía procesos secos y húmedos, esto mayoritariamente a través de tres rutas: deposición seca, deposición húmeda y deposición oculta. Los tres tipos de deposición deben considerarse de importancia similar en los ecosistemas, ya que cada uno de ellos puede ser crítico en determinados intervalos de tiempo y espacio.

La topografía y vegetación son determinantes para los diferentes tipos de deposición (**Cuadro 2.6**). La distribución de la deposición seca, húmeda y oculta de constituyentes individuales y del total de PM, varía substancialmente entre sitios.

Cuadro 2.4. Bienes y servicios ambientales generados por los ecosistemas (Grantz *et al.*, 2003).

Ecosistema	Bienes	Servicios
Agroecosistemas	Cultivos Alimenticios Cultivos fibrosos Recursos genéticos	Mantenimiento limitado de las funciones de cuencas (infiltración, control de flujo, protección parcial de suelo) Proveen hábitat para aves, polinizadores y organismos del suelo Captura de carbono atmosférico
Ecosistemas costeros	Peces y mariscos Peces (como alimento) Algas marinas Sal Recursos genéticos	Moderar impactos de tormentas (manglares e islas) Proveen fauna silvestre (marina y terrestre), hábitat y áreas de Reproducción Mantenimiento de biodiversidad Diluir y tratar desechos Proveen puertos y rutas de transporte Proveen hábitat humano y silvestre Proveen recreación y estética
Bosques	Madera para construcción Madera como combustible Agua de beber y para irrigación Pastizales Productos no maderables (bambú, hojas) Alimentos (miel, hongos y demás productos comestibles) Recursos genéticos	Remover contaminantes atmosféricos, emitir oxígeno Ciclo de nutrientes Mantenimiento ordenado de la funcionalidad de cuencas (infiltración, purificación, control de flujo y estabilización de suelo) Mantenimiento de biodiversidad Captura de carbono atmosférico Moderar climas extremos Generación de suelo Proveen hábitat humano y silvestre Proveen recreación y estética
Agua dulce	Agua de beber y para irrigación Peces Hidroelectricidad Recursos genéticos	Reducir flujos de agua (tiempo y volumen) Diluir y transportar desechos Ciclo de nutrientes Mantenimiento de biodiversidad Proveer hábitat acuático Proveer corredor de transporte Proveen recreación y estética Mantenimiento ordenado de la funcionalidad de cuencas (infiltración, purificación, control de flujo y estabilización de suelo) Ciclo de nutrientes Remover contaminantes atmosféricos, emitir oxígeno Mantenimiento de biodiversidad Generación de suelo Captura de carbono atmosférico Proveen hábitat humano y silvestre Proveen recreación y estética

Cuadro 2.5. Propiedades de los sistemas ecológicos sujetas a impacto por PM (Grantz *et al.*, 2003).

Nivel de organización biológico	Propiedad estructural	Propiedad Funcional
Organismo	Hoja	Fotosíntesis
	Morfología de ramas	Respiración
	Morfología de raíz	Adquisición de nutrientes del suelo
	Biomasa individual	Lixiviado de nutrientes del follaje
Población		Fijación de carbono
	Distribución de tamaño	Mortalidad individual
	Densidad de población	Vigor competitivo Bonanza reproductiva

Cuadro 2.5. Propiedades de los sistemas ecológicos sujetas a impacto por PM.

Nivel de organización biológico	Propiedad estructural	Propiedad Funcional
Comunidad	Distribución de población	Productividad de biomasa
	Dispersión de población	Redundancia y resiliencia
	Diversidad genética	
	Diversidad de especies	
	Balance de niveles tróficos	Sucesión
	Dosel	Estabilización de suelo
Ecosistema	Distribución de raíz	Productividad
	Biomasa	
	Tamaño de estanques	Ciclo de nutrientes
	Tipo de suelo	Ciclo hidrológico
		Flujo de energía

2.3.3.2 Deposición seca

La deposición seca de partículas atmosféricas a plantas y suelo es un proceso mucho más lento que la deposición húmeda u oculta. Sin embargo, ocurre de forma continua y afecta a todas las superficies expuestas. Los tamaños de partícula, tipo de dosel, así como la gran cantidad de compuestos químicos de PM, disminuyen la predicción y medición de la deposición seca de partícula. Las características que influyen el control del proceso de deposición seca son principalmente la estabilidad atmosférica, diámetro y características de superficie de las partículas.

Grantz *et al.* (2003) describe los experimentos realizados por Little y Weiffen (1977) y Peters y Eiden (1992). Los primeros realizaron mediciones de velocidad de deposición de diversos tamaños de partícula para determinar la relación entre diámetro de partícula y velocidad de deposición, este estudio se realizó sobre césped dentro de túneles de viento a una velocidad de viento de 2.5 m/s. Los segundos realizaron un estudio similar en una zona forestal, los resultados obtenidos en ambos estudios se muestran en la **Figura 2.5**, en esta figura se muestra también la ley de Stokes, la cual se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar.

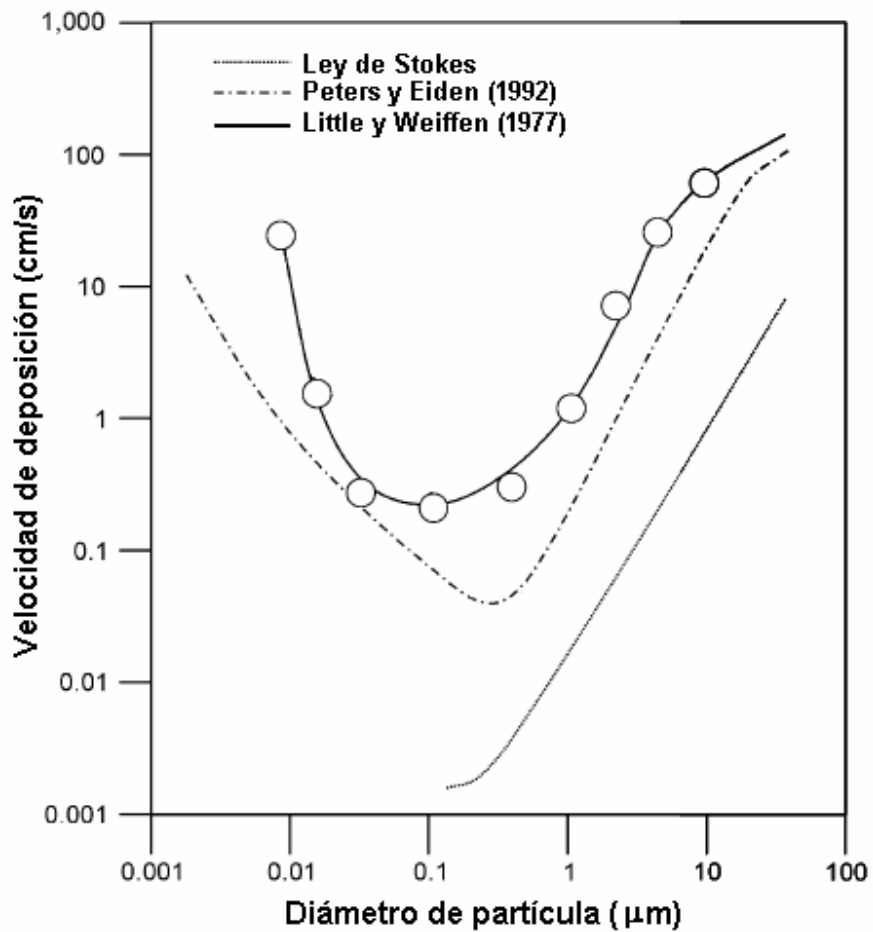


Figura 2.5. Relación entre velocidad de deposición y diámetro de partícula (Tomado y modificado de Grantz *et al.*, 2003).

En general, la deposición seca de PM es más efectiva para partículas de la fracción gruesa y la deposición húmeda es más efectiva para partículas de la fracción fina. La magnitud de cada tipo de deposición varía respecto al ecosistema, ubicación, elevación y concentración de contaminante en la atmósfera (Grantz *et al.*, 2003).

Cuadro 2.6. Tipo y determinantes de deposición de partículas y su impacto en la vegetación (Grantz *et al.*, 2003).

Tipo de deposición	Determinante de deposición	Factores cuantificables
Deposición seca	Concentración ambiental	Distancia a la fuente Tasa de emisión
	Condiciones atmosféricas	Velocidad del viento Estabilidad Altura de mezclado Temperatura Humedad Formación de rocío
	Propiedades de aerosol	Reactividad química Solubilidad de partícula Diámetro aerodinámico Disponibilidad biológica Higroscopicidad
	Superficie rugosa	Discontinuidad de terreno Pubescencia de hojas Forma de la hoja Densidad de la planta Espaciamiento entre ramas Flexibilidad de tejido
	Condición vegetal	Humedad de superficie Exudación de sales Exudación orgánica Residuos de insectos
Deposición húmeda	Concentración ambiental	Distancia a la fuente Tasa de emisión Altura de mezclado Tiempo de precipitación Intensidad de precipitación Duración de precipitación Reactividad química Solubilidad de partícula Disponibilidad biológica Discontinuidad de terreno Pubescencia de hojas Área superficial de hojas Naturaleza de exposición Corteza y tronco
Deposición oculta	Todos los anteriores	Factores anteriores

2.3.3.3 Deposición oculta

La deposición oculta se refiere a la disolución de partículas o especies gaseosas en gotas de agua o en niebla, previamente puede ocurrir un proceso de condensación sobre las partículas, esta fase en equilibrio puede coexistir o disolverse en gotas de agua o en niebla. La deposición oculta por niebla o gotas de agua se lleva a cabo por impacto, por gravedad y por el tamaño de las gotas. Este tipo de deposición es común a grandes elevaciones, principalmente en la base de algunas nubes.

2.3.3.4 Deposición húmeda

La deposición húmeda resulta de la incorporación de partículas atmosféricas y gases, a gotas de agua en el interior de la nube por nucleación, así como su posterior precipitación en forma de lluvia o nieve. Además también resulta del arrastre por impacto de gotas de agua o nieve con partículas presentes debajo de las nubes (lavado). Este tipo de lavado incluye tanto a partículas como a gases. Sin embargo, la distinción entre gas-partícula es muy limitada, debido a que la deposición húmeda se determina con análisis químico del precipitado. La magnitud de la deposición húmeda depende de la precipitación en forma de gotas o nieve, y de la concentración de contaminantes. La precipitación pluvial que da lugar a la deposición húmeda resulta ser beneficiosa para la vegetación, ya que remueven partículas potencialmente dañinas previamente depositadas en forma seca sobre la parte superior de plantas y árboles, los cuales pudieran ser dañinos sobre la superficie de éstos. Sin embargo, este proceso altera la composición del agua que llega al suelo.

2.4 Conceptos fundamentales

La Microscopía Electrónica de Barrido acoplada a la Espectrometría por Energía Dispersa, es una técnica que permite determinar características fisicoquímicas de las partículas atmosféricas de forma individual. Esta información es útil para la asociación de partículas atmosféricas a fuentes emisoras de contaminación, permitiendo establecer medidas preventivas y/o correctivas para la

prevención y/o control de la contaminación atmosférica. A continuación se describe el fundamento de esta técnica, así como sus aplicaciones en diversos estudios ambientales.

2.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido

La microscopía electrónica de barrido pertenece a la segunda generación de microscopías, la primera generación corresponde a la microscopía óptica, la segunda corresponde a la microscopía electrónica de barrido (SEM) y de transmisión (TEM), y finalmente la microscopía de barrido por sonda (SPM), ésta presenta una variedad muy amplia de microscopios: AFM (Microscopio de fuerza atómica), SThM (Microscopio térmico de barrido), EFM (Microscopio de fuerza electrostática), MFM (Microscopio de fuerza magnética), MRFM (Microscopio de resonancia magnética), NSOM (Microscopio óptico de barrido en campo cercano), PSTM (Microscopio de efecto túnel de fotones), ESTM (Microscopio de efecto túnel en medio electroquímico), SECM (Microscopio electroquímico de barrido), SCM (Microscopio de barrido de capacitancia), SICM (Microscopio de barrido de conductancia iónica), SVM (Microscopio de barrido de voltaje), entre otros. Cada uno de ellos posee características que los hacen adecuados para el análisis de muestras con características diferentes.

La microscopía electrónica de barrido se basa en el uso de un haz de electrones que incide sobre una muestra sólida (**Figura 2.6a**), el haz de electrones se transmite a vacío y es impulsado por un voltaje de aceleración. Al momento que incide el haz de electrones sobre la muestra, se emiten diferentes tipos de señales (**Figura 2.6b**). Cada uno de las señales anteriores provee información acerca del material estudiado. Para el caso de la caracterización de partículas, se utilizan tres tipos de señales, que son: electrones secundarios, electrones retro-dispersados y rayos X característicos, las dos primeras señales se utilizan para la obtención de imagen, la información de rayos X característicos se utiliza para el microanálisis químico.

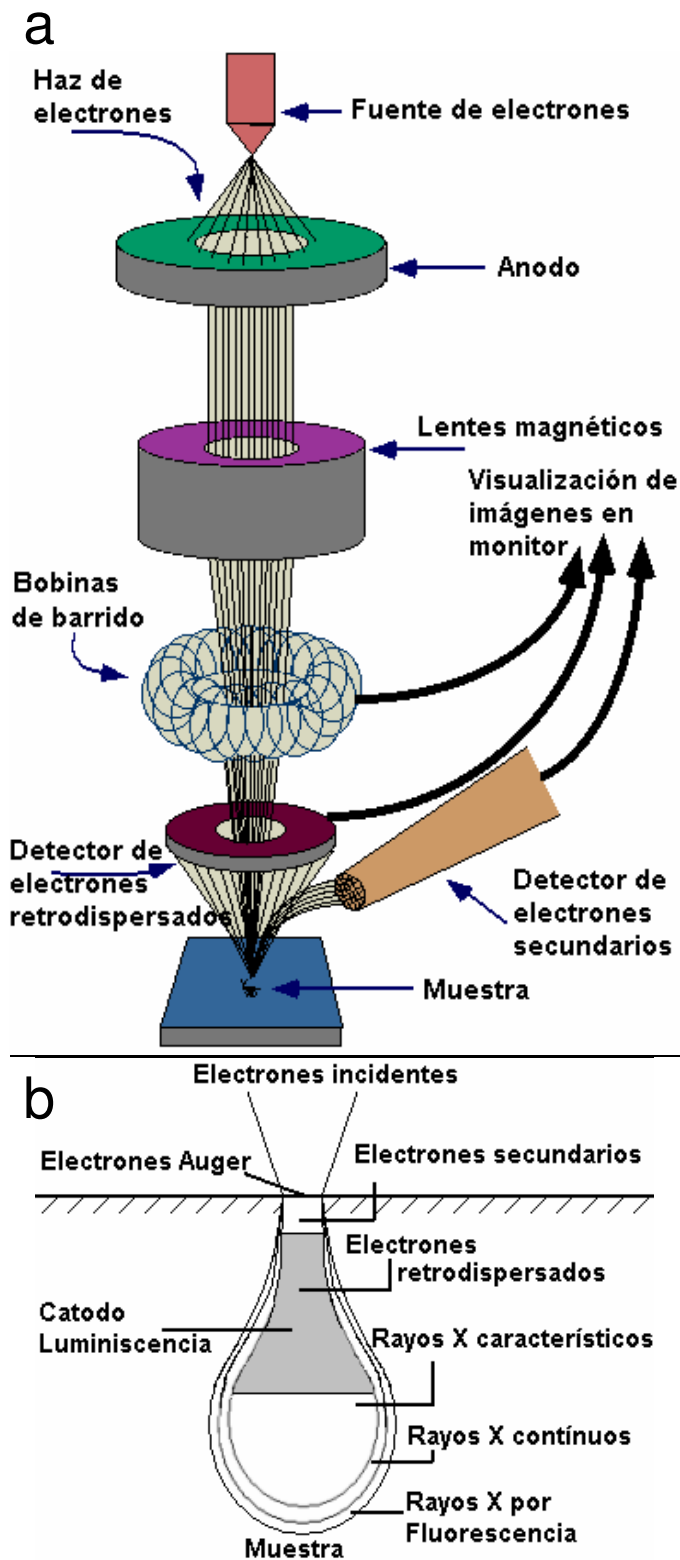


Figura 2.6. (a) Principio del SEM (Klesel, 2000), (b) Señales generadas por el haz de electrones incidente (Tomado y modificado de Jeol AST).

a) Electrones secundarios. Son originados en el sólido estudiado y emitidos como el resultado de excitación atómica por el haz primario y se caracterizan por tener un espectro de energías comparativamente bajo con relación al haz inicial. La emisión de los electrones secundarios depende tanto de la topografía como de la densidad del sólido, y el tipo de imágenes que se obtienen resalta el relieve topográfico del sólido. Los electrones secundarios se utilizan para la obtención de micrografías de las partículas atmosféricas.

b) Electrones retrodispersados. Son aquellos que se desvían del haz hacia atrás debido a la dispersión elástica por los átomos del material; por tanto, su energía está muy cercana a la del haz incidente. Además de proveer una información topográfica superficial de la muestra, también permiten detectar zonas de diferente composición. Estas diferencias de composición son detectadas debido a que la intensidad del haz retrodispersado aumenta cuando se incrementa el número atómico de los elementos. El voltaje de aceleración del haz incidente juega un papel fundamental en la retrodispersión de electrones, a mayor voltaje de aceleración y mayor número atómico promedio de la muestra, mayor será la retrodispersión de electrones (**Figura 2.7**).

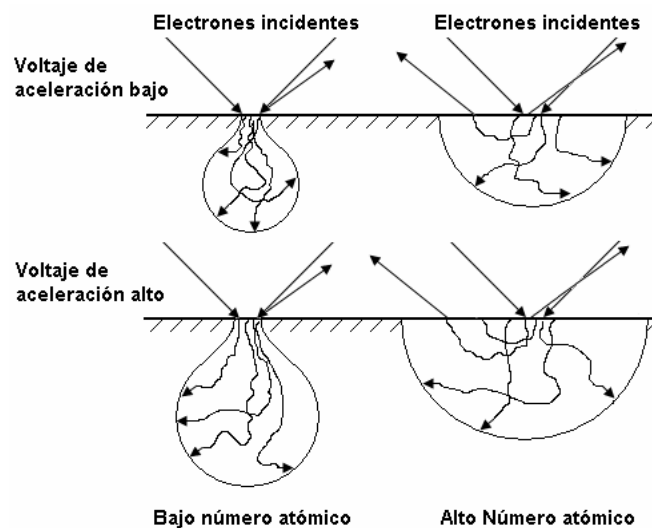


Figura 2.7. Penetración y retrodispersión de electrones en el material de estudio (Tomado y modificado de Jeol AST).

c) Rayos X característicos. Es de esperarse que se emitan rayos X característicos debido a las transiciones de los electrones excitados por el haz primario. Estas señales pueden ser detectadas por un espectrómetro de fluorescencia de rayos X como los que reciben la energía dispersa (EDS), de tal manera que a partir de estas señales, se puede construir un perfil de intensidades y conocer tanto los elementos que componen la muestra, así como su concentración (Aragón, 1999).

Solamente muestras conductoras pueden ser observadas al microscopio electrónico de barrido, por esta razón las muestras no conductoras deben recubrirse con una capa de oro o carbón conductor, el primero se utiliza si la obtención de imagen es primordial sobre el análisis químico, debido a que el oro ocasiona traslape de picos al analizar determinados elementos (e.g. Mo, S, Pb, Bi, Fe y Mn), el segundo (carbón conductor) se utiliza tanto para la obtención de imágenes como para el microanálisis químico.

2.4.2 Espectrometría por Energía Dispersa

El EDS se utiliza para el microanálisis químico a nivel partícula, el principio de fluorescencia se basa en la emisión de fotones de alta energía al momento de incidir los electrones primarios sobre la muestra (**Figura 2.8**). Así pues, se generarán rayos X de cada elemento que esté presente en la muestra, presentándose de esta manera una gran diversidad de rayos X característicos, los cuales poseen una longitud de onda y dispersión específica, estos son detectados por la microsonda de fluorescencia de rayos X, además de otros tipos de señales generadas como electrones secundarios y retrodispersados, sin embargo estos se utilizan para el análisis morfológico y de contraste de fases, descrito anteriormente.

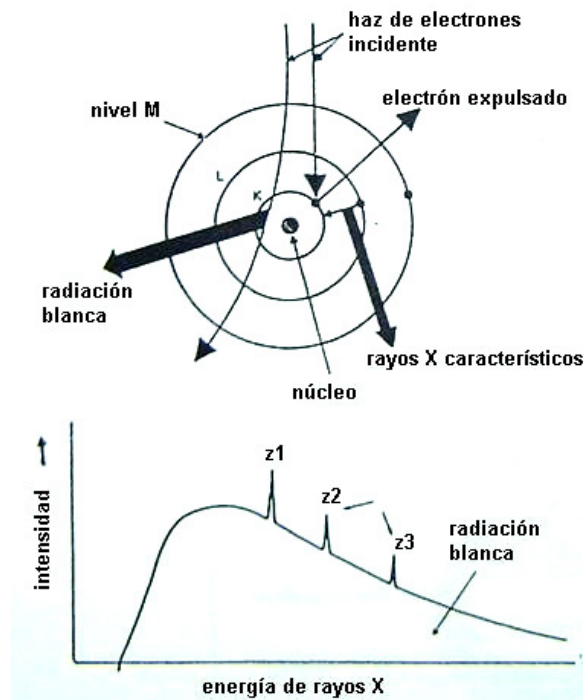


Figura 2.8. Principio de fluorescencia de rayos X.

2.4.3 Características fisicoquímicas de las partículas naturales y antrópicas

Las partículas se clasifican de acuerdo a su origen en tres grupos: geológico-natural, natural y antrópicas. Las partículas de origen geológico-natural provenientes principalmente de la erosión del suelo o de materiales de construcción, están compuestas principalmente de carbonatos de calcio y magnesio, sílice, feldespatos (Si, Al, Ca o Si, Al, K), arcillas (Si, Al o Sí, Al, Fe) y silicatos de los materiales de construcción (Si, Al, Ca, Fe o Si, Ca, Fe o Si, Ca o Si, Fe), poseen una morfología característica. (Paoletti *et al.*, 2003). Las partículas naturales de origen biológico, presentan morfologías esféricas o redondeadas características y son ricas en carbono orgánico, potasio, sodio y calcio. Las partículas ricas en carbono elemental generalmente son de origen antrópico y son generadas principalmente por la quema de combustóleo en algunos procesos industriales y por el tránsito vehicular, presentan una morfología esferoidal, textura compacta y/o porosa, y su composición química corresponde a carbono y azufre, pero además pueden contener elementos traza como níquel y vanadio. Las partículas antrópicas ricas en elementos pesados pueden presentar morfologías

irregulares, esféricas o de aglomerados de pequeñas partículas esféricas y su composición química es muy variable. En contraste, las partículas minerales metálicas son de origen natural, presentan una morfología característica con ángulos y clivajes bien definidos, además de una composición estequiométrica que se puede asociar a una fase mineral en particular.

La composición química de las partículas mostradas en la **Figura 2.9a** y **2.9b**, es óxido de silicio (SiO_2). Sin embargo la morfología es diferente. La primera presenta clivajes y ángulos definidos característicos de fases minerales, la segunda presenta morfología esférica, característica de procesos antrópicos.

Las partículas mostradas en las **Figuras 2.9c** y **2.9d** son ricas en hierro. Sin embargo la de origen mineral (**Figura 2.9c**) presenta clivajes y ángulos definidos, mientras que la de origen antrópico (**Figura 2.9d**) presenta una morfología esférica, característica de procesos de alta temperatura.

Las partículas mostradas en las **Figuras 2.9e** y **2.9f** son ricas en carbono, sin embargo el carbono de la partícula de origen natural (**Figura 2.9e**) no está asociado a elementos pesados, además este tipo de partículas presentan degradación al haz de electrones al momento de realizar el microanálisis, esto se debe a su composición orgánica y a su baja temperatura de descomposición. El carbono de la partícula antrópica (**Figura 2.9f**) esta asociado a azufre, níquel y vanadio, además de poseer una morfología esférica porosa, característica de procesos de quema de combustóleo.

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 mineral o 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 determinada actividad humana (probablemente emisiones fugitivas de minerales utilizados como materia prima), y deberá designarse como antrópicas a dichas partículas, aunque no lo sean *per se*.

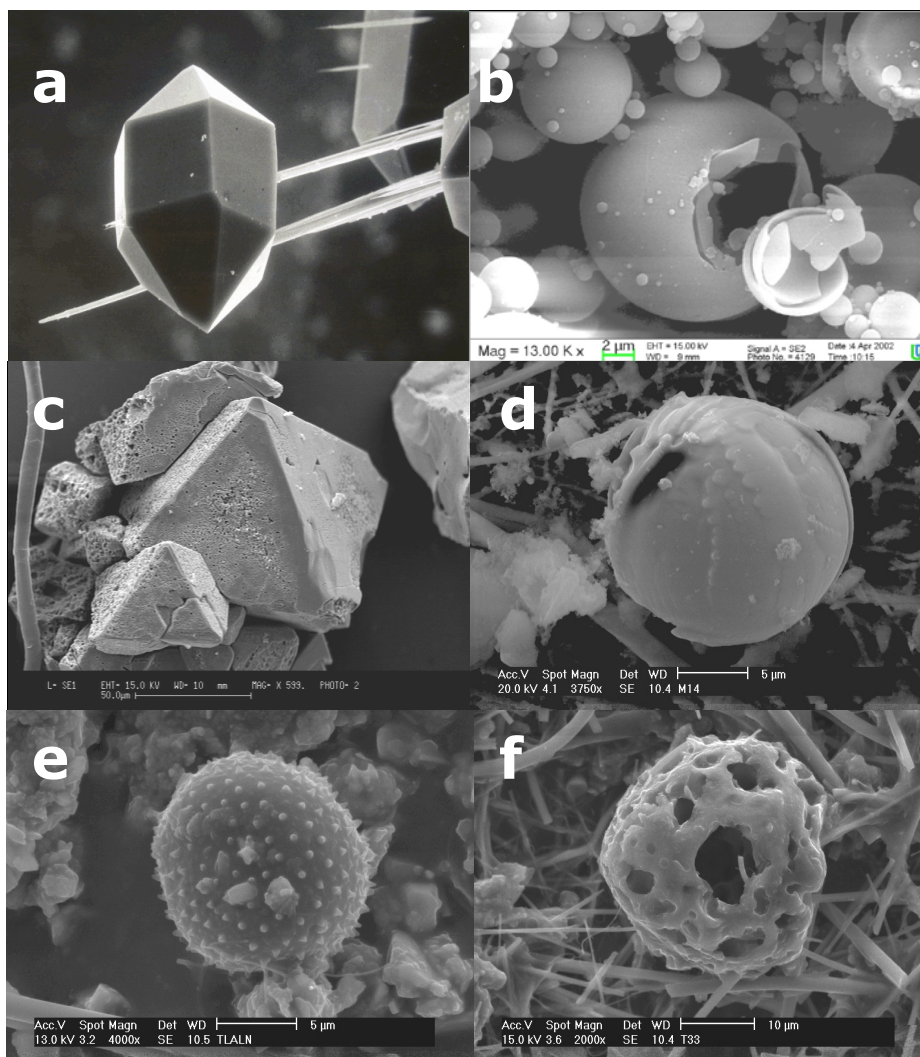


Figura 2.9. Micrografías de a) SiO_2 natural (Mineral spectroscopy server, 2007), b) SiO_2 antrópico (UMSICHT, 2005), c) Fe_3O_4 natural (magnetita) (Mineralogiche e Petrologiche, 2002), d) Ferrita antrópica (Labrada, 2006), e) carbono orgánico (Labrada, 2006), f) carbono elemental (Labrada, 2006).

2.4.4 Estudios de caracterización de partículas del polvo atmosférico por SEM-EDS

Esta técnica se ha utilizado en diversos estudios de caracterización de partículas del polvo atmosférico en México, incluyendo estudios realizados en la Ciudad de San Luis Potosí (Aragón *et al.*, 2000; Campos, 2005) y Zona Metropolitana del Valle de México (Labrada, 2006). En estos estudios se encontraron niveles elevados de partículas de tamaño menor o igual a 10 y 2.5 μm , compuestas principalmente por metales pesados, cuyo origen se asoció a diversas fuentes emisoras, entre las que destacan las refinerías de cobre y zinc, industrias acereras, así como industrias fundidoras en general.

En la Ciudad de Roma se han caracterizado partículas PM_{10} (Paoletti *et al.*, 1999) y $\text{PM}_{2.1}$ (Paoletti *et al.*, 2003) para determinar su tendencia estacional. Se han caracterizado también partículas provenientes del tránsito vehicular dentro túneles de autopistas, donde la contaminación por partículas podría estar más concentrada. Los resultados mostraron abundantes partículas ricas en cloro, sodio y potasio, principales componentes del material usado para el mantenimiento de autopistas (Paoletti *et al.*, 1999). En Inglaterra se caracterizaron partículas producidas por la quema de diesel, los resultados mostraron que el 89.5% de las partículas analizadas poseían tamaños de entre 0.1 y 2.0 μm , además de estar compuestas por Si, P, S, Cl y por metales como Ti, Mn Fe, Zn y Cr (Bérubé *et al.*, 1998). Se han caracterizado también partículas $\text{PM}_{2.5-10}$ y $\text{PM}_{2.5}$ de zonas urbanas y rurales (Moreno *et al.*, 2003) así como estudios de toxicidad *in vitro* de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ (Diociaiuti *et al.*, 2001). En Buenos Aires se realizó un estudio de caracterización de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ y su relación con las concentraciones de CO, el cual es emitido principalmente por automóviles, los resultados mostraron incrementos de $\text{PM}_{2.5}$ correlacionados con incrementos de CO, no así para las PM_{10} (Bogo *et al.*, 2002). En Detroit se caracterizaron partículas finas y ultra finas de la zona urbana, con especial énfasis en partículas compuestas por metales pesados, los resultados mostraron que el porcentaje más alto de partículas compuestas por elementos traza (Pb, As, La, Ce, Sr, Zn, Cr, Se, Sn, Y, Zr, Au y Ag) se encontraba dentro del intervalo de 0.01-1.0 μm (Utsunomiya *et al.*, 2004).

En Tennessee se realizó un estudio de caracterización de partículas provenientes de procesos de incineración en actividades agrícolas, los resultados mostraron partículas ricas en Al, Ca, Si, Na, Cl, S y O, la mayoría de las partículas correspondían a la fracción gruesa (Chong *et al.*, 2002).

2.5 Antecedentes Generales

2.5.1 Situación actual sobre PM en México

En México, la contaminación del aire por gases y partículas es un problema que aqueja a ciudades mediana o altamente industrializadas. Debido a esto, es necesario conocer los niveles de gases contaminantes y de partículas suspendidas en el aire para tomar medidas correctivas a corto plazo. Para esto, el Instituto Nacional de Ecología (INE) ha establecido el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), el cual recopila información de redes de monitoreo de diferentes ciudades casi en tiempo real. Las ciudades pertenecientes al SINAICA se muestran en la **Figura 2.10**.



Figura 2.10. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, 2004.

Los datos recabados, en la mayoría de las estaciones, son de contaminantes criterio: O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5} y PST (INE, 2004). Las partículas PST no forman parte del criterio de calidad del aire en países como Estados Unidos, debido a que la mayoría de las partículas PST corresponden a la fracción no respirable. Sin embargo en México se sigue utilizando este criterio para la evaluación de la calidad del aire en algunas ciudades, tal es el caso de las ciudades de Querétaro y San Luis Potosí.

Los límites máximos permitidos de contaminantes criterio para la determinación de la calidad del aire, se muestran en el **Cuadro 2.7**.

Cuadro 2.7. Límites máximos permitidos de contaminantes criterio en México.

Contaminante	Norma	Exposición aguda	Exposición crónica
		Concentración - frecuencia	Concentración - frecuencia
PM ₁₀	NOM-025-SSA1-1993	120 µg/m ³ - 24 hr	50 µg/m ³ - 1 año
PM _{2.5}	NOM-025-SSA1-1993	65 µg/m ³ - 24 hr	15 µg/m ³ - 1 año
PST	NOM-025-SSA1-1993	210 µg/m ³ - 24 hr	*
O ₃	NOM-020-SSA1-1993	0.11 ppm - 1 hr (1 vez al año)	*
	NOM-020-SSA1-1993	0.08 ppm - 8 hr (5to máximo en 1 año)	*
CO	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm - 8 hr (1 vez al año)	*
SO ₂	NOM-022-SSA1-1993	0.13 ppm - 24 hr (1 vez al año)	0.03 ppm - 1 año
NO ₂	NOM-023-SSA1-1993	0.21 ppm - 1 hr (1 vez al año)	*
Pb	NOM-026-SSA1-1993	*	1.5 µg/m ³ - 3 meses

* No aplica

La caracterización fisicoquímica del polvo atmosférico a nivel partícula, es un área poco explorada en México. Los estudios más completos realizados en esta área comprenden a las ciudades de San Luis Potosí (Aragón, 1999; Aragón *et al.*, 2000; Campos, 2005) y la Zona Metropolitana del Valle de México (Labrada, 2006). Este tipo de estudios proporcionan información valiosa acerca de las características fisicoquímicas del polvo atmosférico a nivel partícula, incluyendo composición química, morfología y tamaño. Esa información puede utilizarse posteriormente para asociar el tipo de partícula con la fuente de contaminación, lo que ayudaría en gran medida a la toma de decisiones que conlleven a la disminución de los niveles de aeropartículas respirables presentes en el aire.

Sin embargo, en la mayoría de las ciudades pertenecientes al SINAICA, solamente se realizan análisis granulométricos para la determinación de los

niveles de PST, PM₁₀ o PM_{2.5}, así como análisis químicos globales para la determinación de elementos pesados. Desafortunadamente esa información no es suficiente para la asociación a fuentes de contaminación. Es necesario hacer de este tipo de estudios una prioridad para las ciudades con problemas de contaminación del aire por fuentes antrópicas.

2.5.2 La Ciudad de Querétaro

El Estado de Querétaro Arteaga colinda al Norte con Guanajuato y San Luis Potosí; al Sur con Hidalgo, México y Michoacán de Ocampo; al Este con San Luis Potosí e Hidalgo y al Oeste con Guanajuato. Presenta tres regiones con diferente orografía, el Eje Neovolcánico, la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental. Las diferencias de altitud y clima, que van desde seco-templado a cálido-húmedo, permiten la coexistencia de diferentes tipos de vegetación: matorral xerófilo, bosque de coníferas, bosque de latifoliadas y bosque tropical caducifolio (SEDESU, 2006).

La Ciudad de Querétaro (Santiago de Querétaro) es la capital del estado de Querétaro Arteaga, se ubica al suroeste del territorio estatal en las coordenadas 20° 36' latitud Norte, 100° 24' longitud Oeste, 1820 msnm (INEGI, 2006a), y está considerada como una de las ciudades más importantes de la República por su gran tradición histórica y cultural, además de ser el centro urbano e industrial más grande del estado. La Ciudad de Querétaro cuenta con 734,100 habitantes, lo cual representa el 45.9% de la población estatal. La población en el estado de Querétaro no se distribuye de forma uniforme, sino que tiende a concentrarse en las principales localidades urbanas (**Figura 2.11**).

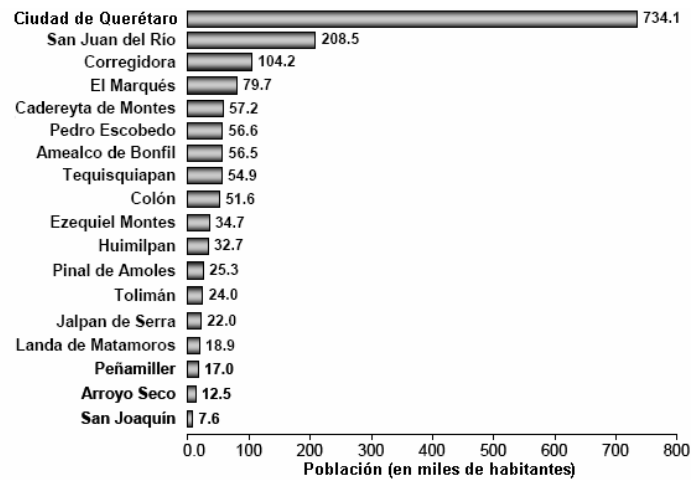


Figura 2.11. Distribución de la población del estado de Querétaro (INEGI, 2006b).

La Ciudad de Querétaro ha tenido un crecimiento industrial importante en los últimos 10 años, lo que ha dado lugar a una diversidad de sectores industriales instalados en la ciudad (**Cuadro 2.8**).

Cuadro 2.8. Principales Sectores Industriales de la Ciudad de Querétaro (SIDECAP, 2005).

Sectores Industriales	% del total
Metal-Mecánica y Autopartes	27.2
Servicios Industriales	16.1
Química, Caucho y Plásticos	15.7
Papel, Imprentas y Editoriales	6.8
Alimentos, Bebidas y Tabaco	6.8
Servicios Generales	6.2
Metal Básica	5.5
Eléctrica y Electrónica	5.5
Textiles y Ropa	3.6

En la Ciudad de Querétaro se localizan 5 parques industriales en operación, estos son:

1. Ciudad Industrial Benito Juárez, ubicado en la carretera federal 57, km 229.
2. Parque industrial Jurica, ubicado en la autopista México-San Luis Potosí, km 230.5; se caracteriza por que ahí se asientan importantes centros de investigación privados y empresas de alta tecnología.
3. Parque industrial Querétaro, ubicado sobre la carretera Querétaro-San Luis Potosí, km 28.

4. Fraccionamiento Industrial San Pedrito, ubicado en la carretera federal 57, km 2.
5. Fraccionamiento industrial La Montaña, ubicado en Av. Epigmenio González 98, Zona Industrial Querétaro.

Existen 11 parques industriales más ubicados en otros municipios como El Marqués, San Juan del Río y Corregidora (SEDESU, 2006).

Debido al crecimiento industrial y urbano que ha presentado en los últimos años, se ha originado un incremento en el parque vehicular local y de paso, tan solo en el año 2004 sumaron 381,264 unidades (SEDESU, 2006). Las emisiones a la atmósfera provenientes del parque vehicular son un grave problema de emisiones de contaminantes, se han realizado una serie de análisis y cálculos para determinar las toneladas de contaminantes que son arrojadas a la atmósfera por estas unidades. En un estudio realizado en el estado de Querétaro, se tomaron datos estadísticos de los recorridos promedios anuales de una muestra de 80,000 automóviles, posteriormente se aplicó un factor de emisiones por vehículo, de acuerdo a cada tipo de combustible, y de esta manera se determinó la cantidad de contaminantes emitidos por los vehículos registrados en el estado, el resultado fue de 284,351 toneladas por año (SEDESU, 2006).

La Ciudad de Querétaro presenta problemas de contaminación del aire debido a las actividades de tipo industrial y de tránsito vehicular.

2.5.3 Monitoreo y niveles de PST en la Ciudad de Querétaro

La contaminación del aire debido a partículas, se evalúa mediante el monitoreo de los niveles de PST. La Red Manual de Monitoreo Atmosférico (RMMA) de la calidad del aire de la Ciudad de Querétaro, cuenta con siete estaciones ubicadas en diferentes zonas de la ciudad (**Figura 2.12**).

El 24 de Octubre del año 2000 se puso en operación la Unidad Móvil de Monitoreo Atmosférico (UMMA), que permite monitorear de manera constante y automática la concentración de los siguientes contaminantes atmosféricos: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas PM₁₀, partículas de carbono y monóxido de carbono (CO).

En la **Figura 2.13** se presentan los niveles de PST correspondientes al periodo Enero-Diciembre de 2005, para cada una de las siete estaciones de monitoreo. El límite máximo permitido de PST en el aire establecido en la norma NOM-025-SSA1-1993 es $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un periodo de 24 horas.

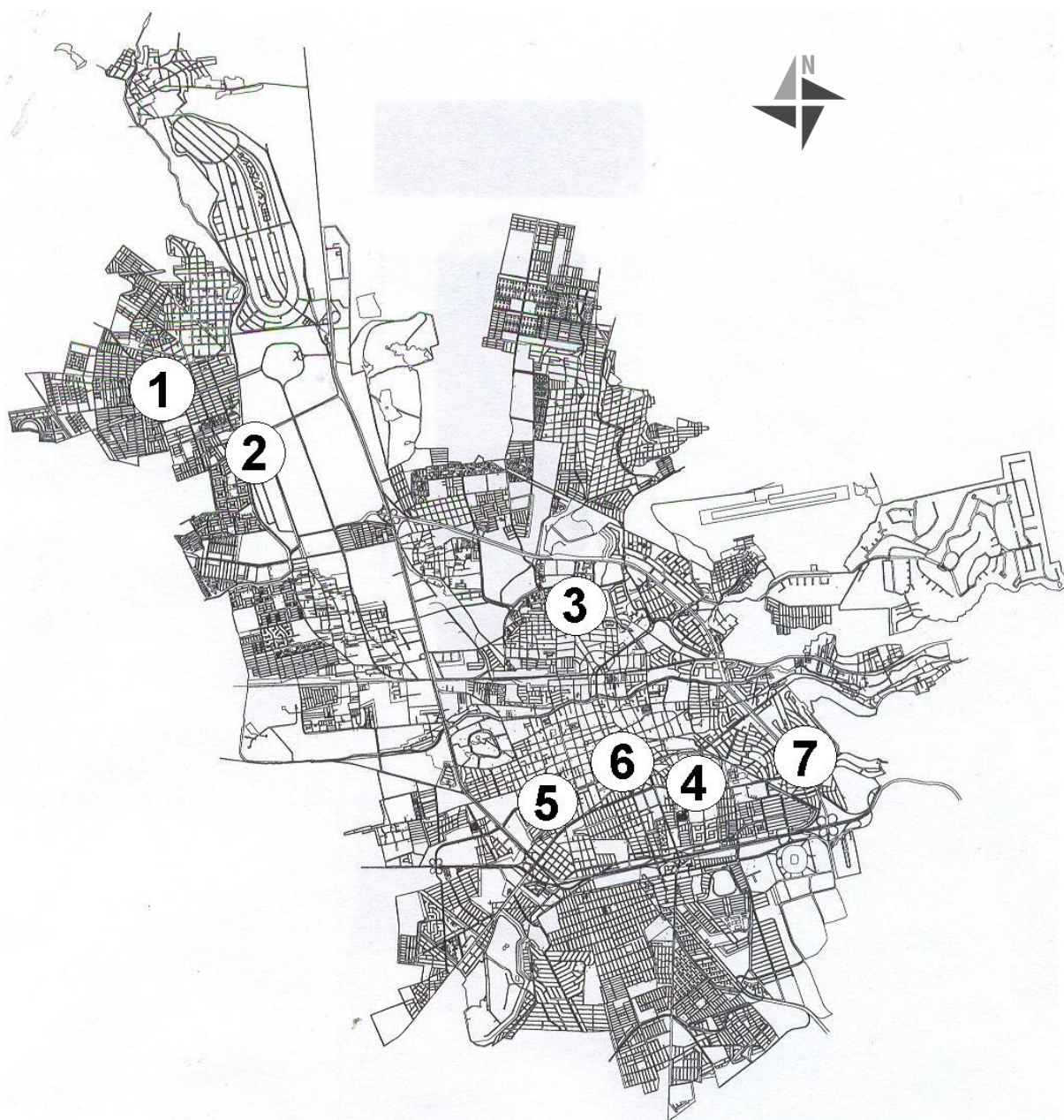


Figura 2.12. Red Manual de Monitoreo Atmosférico de la Cd. de Querétaro, (1) Félix Osores, (2) Conalep, (3) R. Flores Magón, (4) Nicolás Campa, (5) Cudec, (6) Bellas Artes y (7) Colegio Washington.

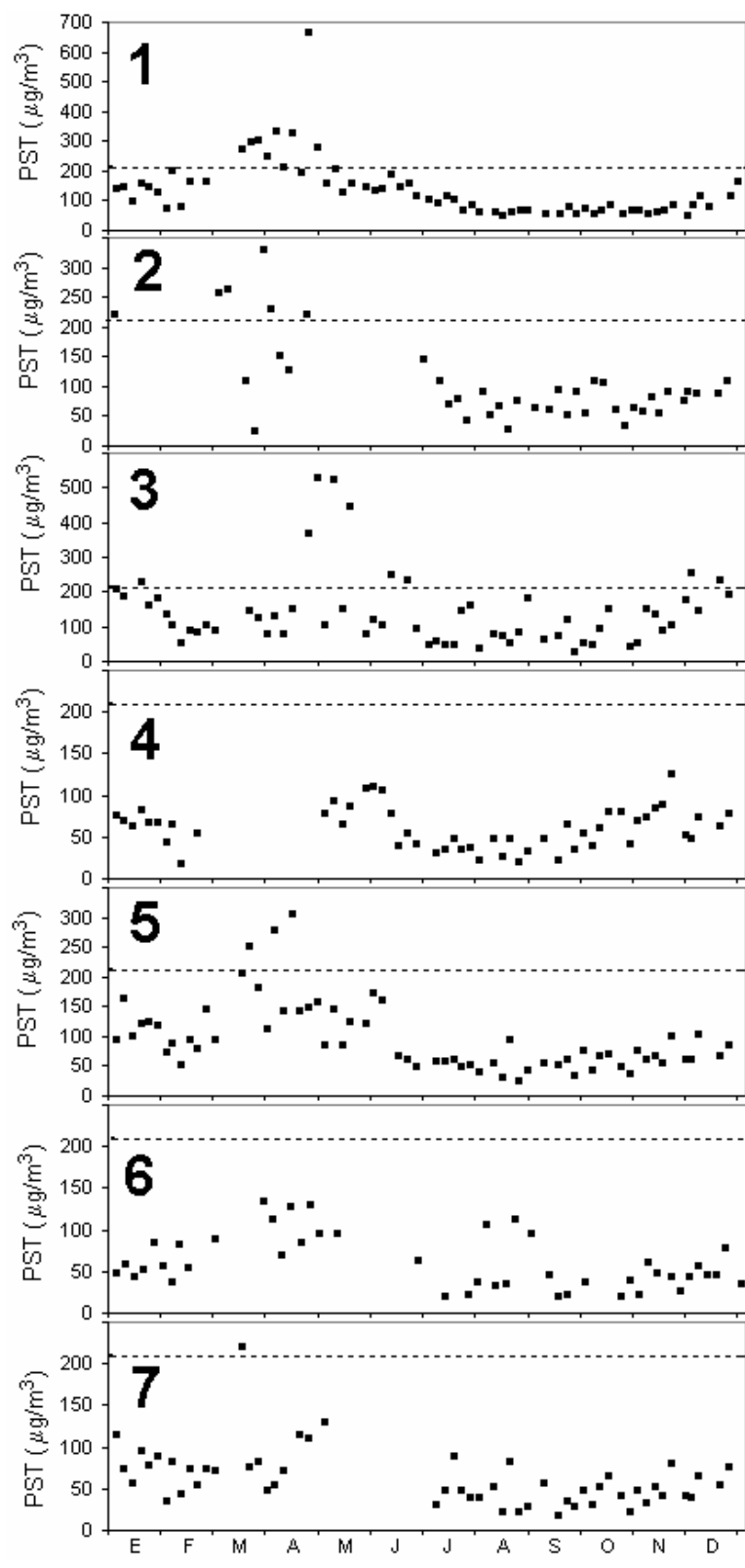


Figura 2.13. Niveles de Partículas Suspensas Totales durante 2005 (A. Aranda, com. pers.).

De acuerdo a la **Figura 2.13**, cuatro estaciones de monitoreo, en algunos días de monitoreo, sobrepasaron los límites máximos permitidos de PST en el aire ($210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas). Estas estaciones son Félix Osores, Conalep, Cudec y Flores Magón. Las dos primeras estaciones se encuentran ubicadas cerca de la Zona Industrial, por esto son adecuadas para observar partículas provenientes principalmente del sector industrial. La estación Cudec se encuentra ubicada en el centro de la Ciudad de Querétaro, su ubicación es adecuada para observar partículas provenientes principalmente de fuentes móviles, esto debido a que esta estación se encuentra ubicada entre dos avenidas en las cuales el tránsito vehicular es intenso, estas avenidas son Zaragoza y Constituyentes, además de que en ciertas horas del día se intensifica la afluencia vehicular, debido a que el equipo de monitoreo esta ubicado en una universidad. La estación Flores Magón presentó los niveles más elevados de PST, sin embargo es cuestionable si estos niveles de PST son representativos de partículas provenientes de industrias o de automóviles, debido al desarrollo de una obra de construcción a gran escala cerca de la estación Flores Magón, la construcción de esta obra provocó gran suspensión de polvo en el aire de la zona, lo que podría ser posiblemente la causa de que los niveles de PST en dicha estación se hayan incrementado. El resto del periodo de monitoreo, esta estación presentó niveles de PST muy por debajo de los valores obtenidos durante el periodo de la construcción de la obra.

2.5.4 Dirección predominante de vientos

Es de gran importancia el conocimiento de la dirección predominante de los vientos, ya que es en esta dirección donde ocurre la dispersión de los contaminantes, con esta información es posible ubicar de forma adecuada a los centros industriales generadores de emisiones a la atmósfera, así como puntos de monitoreo de contaminantes atmosféricos. De acuerdo a un estudio realizado en 1987 por la SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología), hoy SEMARNAT, la dirección de los vientos en la Ciudad de Querétaro es SE-NO. Sin embargo, estudios recientes han determinado que la dirección predominante de

los vientos podría ser diferente. Esta situación amerita un estudio para determinar la actual dirección predominante de los vientos en la Ciudad de Querétaro.

La Ciudad de Querétaro cuenta con una Red de Monitoreo de Condiciones Meteorológicas (**Figura 2.14**), la cual cuenta con cuatro estaciones ubicadas a lo largo de la ciudad. Esta red permite recabar información de dirección y velocidad de vientos, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y precipitación pluvial.

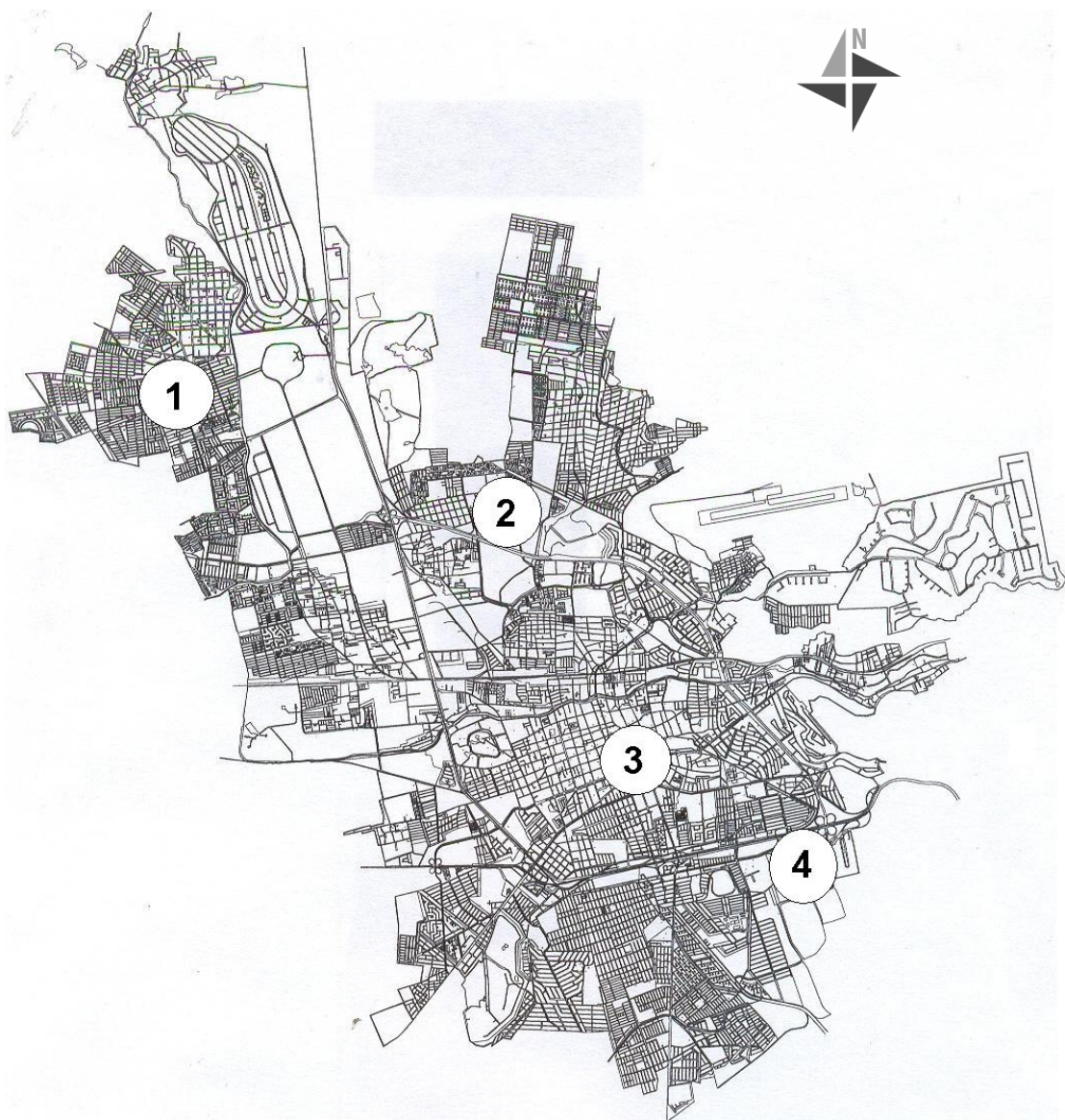


Figura 2.14. Red de Monitoreo de Condiciones Meteorológicas, (1) Félix Osores, (2) Tlaloc, (3) Centro, (4) Estadio.

2.6 Hipótesis y Objetivos

Hipótesis

El aire de la Ciudad de Querétaro contiene aeropartículas antrópicas pertenecientes a la fracción respirable compuestas principalmente por fases con elementos pesados y carbono, debido a las actividades dominantes de tipo industrial y de tránsito vehicular.

Objetivo General

Caracterizar por SEM-EDS aeropartículas antrópicas de la fracción respirable recolectadas en la Ciudad de Querétaro para crear un inventario con datos de composición química, morfología y tamaño de partícula y así establecer posibles asociaciones con los tipos de fuentes antrópicas dominantes de tipo industrial y de tránsito vehicular.

Objetivos Particulares

1. Determinar los niveles de PST en la Ciudad de Querétaro
2. Determinar por SEM-EDS la composición química, morfología y tamaño de aeropartículas de la fracción respirable recolectadas en la Ciudad de Querétaro
3. Clasificar las aeropartículas antrópicas en función de su composición química, morfología y tamaño
4. Establecer posibles asociaciones entre las clases de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable y las actividades dominantes de tipo industrial y de tránsito vehicular
5. Determinar la dirección predominante de los vientos en la Ciudad de Querétaro

III. Metodología

3.1 Determinación de los niveles de PST en la Ciudad de Querétaro

Los niveles de PST de la Ciudad de Querétaro se evaluaron utilizando la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (RMMA) que cuenta con siete estaciones ubicadas en diferentes zonas de la ciudad (**Figura 3.1**). Las estaciones de monitoreo seleccionadas para este estudio fueron las estaciones: Félix Osores (1) y Conalep (2), localizadas en la Zona Industrial Benito Juárez, y la estación Cudec (5) localizada en la Zona Centro.

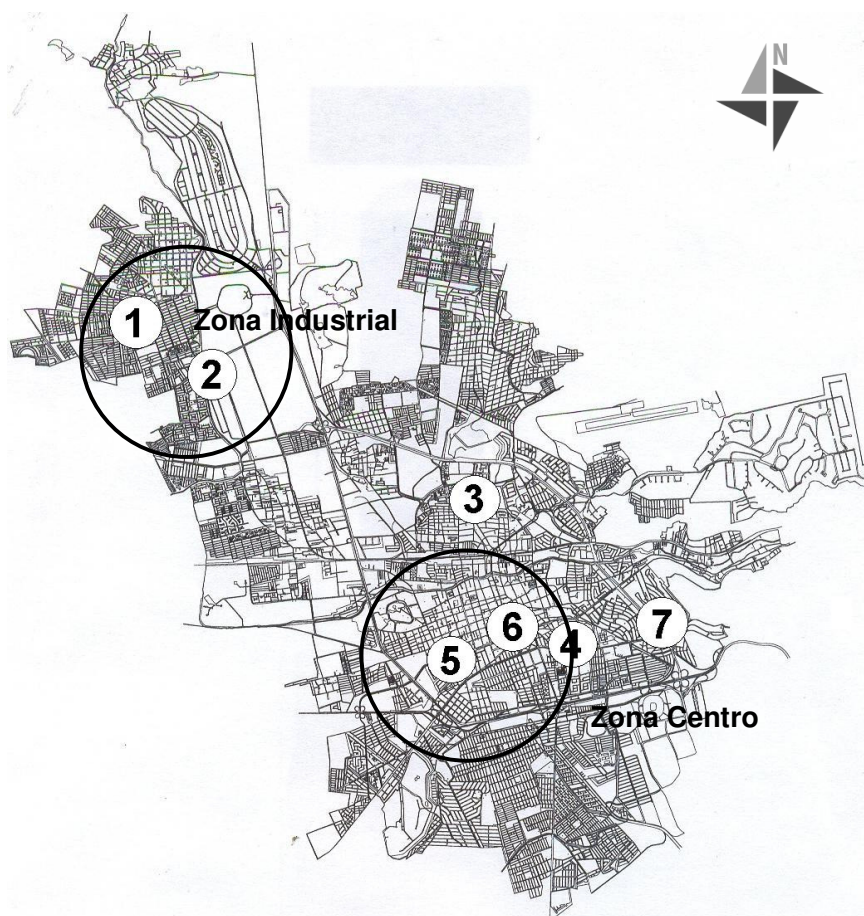


Figura 3.1. Puntos de monitoreo de PST de la Ciudad de Querétaro.

En la Zona Industrial Noreste de la Ciudad de Querétaro se ubican dos de los principales parques industriales de la ciudad (Benito Juárez y Jurica). Estos parques industriales son los más importantes en cuanto a número de industrias.

La Zona Centro de la Ciudad de Querétaro cuenta con dos avenidas principales (Zaragoza y Constituyentes) con tránsito vehicular intenso, principalmente por transporte urbano. La estación 5 se localiza entre éstas avenidas y por esto nos proporcionó información representativa respecto a la composición de partículas generadas por el tránsito vehicular.

Se obtuvieron muestras de PST durante el periodo julio de 2005 a junio de 2006, empleando la metodología descrita en la norma NOM-035-SEMARNAT-1993. Se utilizaron filtros de fibra de vidrio (99% de eficiencia en colección de partículas mayores a $0.3 \mu\text{m}$) pesados y desecados por 24 horas (25°C) antes y después del muestreo. Las partículas se recolectaron empleando equipos *Hi-Vol* (**Figura 3.2a**) por un periodo de 24 horas a un flujo de $1.1 \text{ m}^3/\text{min}$. Los equipos de muestreo estuvieron sujetos a un programa de mantenimiento mensual. Para las tres estaciones de monitoreo consideradas, se recolectaron un total de 100 muestras de PST.

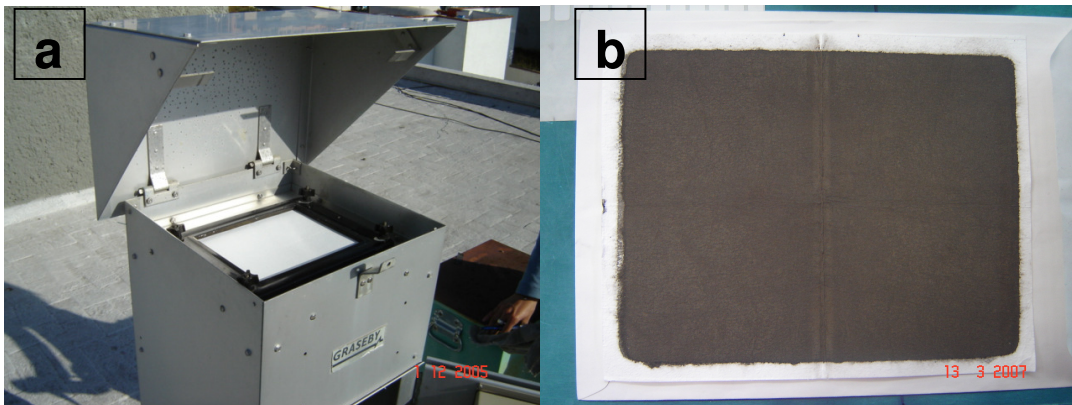


Figura 3.2. (a) Equipo *Hi-Vol*, (b) filtro después de 24 hr de monitoreo.

Después de 24 horas de recolección (**Figura 3.2b**), los filtros se desecaron y la cantidad de partículas se determinó gravimétricamente por diferencia considerando el peso inicial. La concentración de partículas en el aire muestreado se determinó empleando el volumen de aire calculado a condiciones estándar.

3.2 Determinación por SEM-EDS de composición química, morfología y tamaño de aeropartículas de la fracción respirable recolectadas en la Ciudad de Querétaro

Se utilizó la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con microanálisis acoplado de Espectrometría por Energía Dispersa (EDS) para el análisis individual de partículas antrópicas, es decir aquellas que contuvieran elementos pesados o carbono y cuyas características físicas coincidieran con las reportadas en estudios previos realizados en fuentes fijas.

Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido marca Phillips, modelo XL30 (**Figura 3.3**) acoplado a un Espectrómetro por Energía Dispersa marca EDAX, modelo DX4 (límite de detección de 0.5%).



Figura 3.3. Microscopio Electrónico de Barrido acoplado a un Espectrómetro por Energía Dispersa.

Una vez obtenido el filtro de PST (**Figura 3.4a**), se cortó $\frac{1}{4}$ del mismo, el cual fue colocado de forma vertical dentro de un vaso de precipitados. Las partículas en el filtro se arrastraron con alcohol etílico (**Figura 3.4b**). La suspensión resultante se colocó en viales Eppendorf (**Figura 3.4c**), en donde

sedimentaron, para luego evaporar y secar las partículas en un horno a una temperatura de 30°C durante 12 hr (**Figura 3.4d**). Las partículas se montaron directamente sobre un portamuestra de aluminio, previamente cubierto con una película de carbón conductor y adhesivo en ambas caras, en cuya superficie se fijaron las partículas (**Figura 3.4e**). El montaje directo tuvo la finalidad de no alterar la morfología de las partículas. Finalmente las partículas se recubrieron con carbón mediante un equipo Spi-Carbon Coater (**Figura 3.4f**) con la finalidad de dar conductividad a las muestras. Finalmente las muestras fueron observadas al SEM-EDS (**Figura 3.4g**), para identificar partículas con características de tipo antrópico.

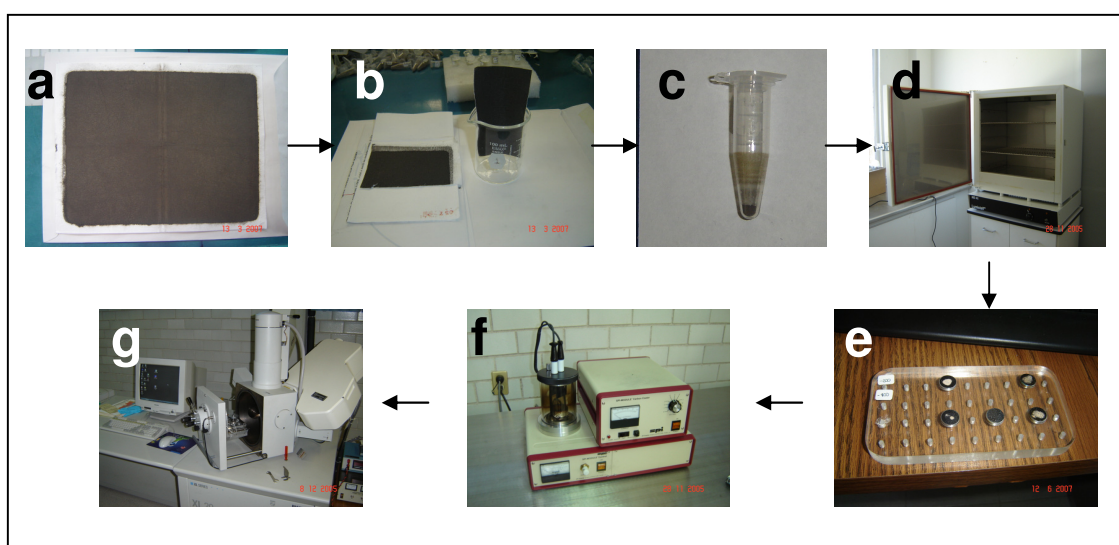


Figura 3.4. Diagrama esquemático de la preparación de muestras.

Las muestras fueron analizadas por SEM-EDS para el microanálisis químico y morfológico de aeropartículas con características de tipo antrópico, empleando las condiciones mostradas en el **Cuadro 3.1**.

Cuadro 3.1. Condiciones del SEM para microanálisis químico y morfológico.

Variables	Microanálisis químico	Micrografía
	Valor	Valor
Voltaje de aceleración	*10-20 kV	*15-20 kV
Detector	SE/BSE	SE/BSE
Distancia de trabajo	10.4	**
Magnificaciones	1000x-9600x	1000x-9600x

* El valor de la variable es menor para partículas orgánicas

** Cualquier distancia de enfoque

Se realizó un barrido por la muestra en la búsqueda de partículas con características de tipo antrópico (ver 3.3), es decir partículas cuya composición sea principalmente de elementos pesados y de formas generalmente esféricas. Cada partícula de interés fue analizada con la microsonda EDS para determinar su composición química de forma cualitativa y semicuantitativa (análisis puntual y superficial). El microanálisis químico se realizó sobre la superficie de la partícula lo mas lisa posible, esto para evitar el desvío de electrones y de rayos X por superficies irregulares. Se analizaron un total de 8077 partículas pertenecientes mayoritariamente a la fracción respirable. Se recabaron datos de composición química, morfología y tamaño del total de las partículas analizadas de forma individual.

Las variables consideradas para la operación del EDS fueron *cuentas por segundo* (CPS), cuyo valor debe ajustarse entre 1000 y 2000 CPS, y *tiempo muerto* (%DT), cuyo valor se ajusta entre 20 y 30%.

3.3 Clasificación de aeropartículas antrópicas en función de su composición química, morfología y tamaño

Se realizó una clasificación del total de aeropartículas analizadas, considerando a la composición química como primer elemento de clasificación, seguido de la morfología y tamaño.

- **Clasificación respecto a la composición química de la partícula.** Las partículas fueron clasificadas en grupos de acuerdo al elemento de mayor abundancia, seguido de una subclasificación en base a los elementos asociados o traza.
- **Clasificación respecto a la morfología de la partícula.** Los grupos clasificados respecto a la composición química de la partícula fueron a su vez clasificados respecto a la morfología de la partícula. Se consideraron los siguientes grupos de partículas: esféricas, esféricas porosas, aglomerados esféricos, irregulares, aciculares, redondeadas, dendríticas, laminares, facetadas, cúbicas, y formas minerales.

- **Clasificación respecto a su origen.** La clasificación de partículas respecto a su origen se basó en las clasificaciones anteriores de composición química y morfología. Se consideraron dos grupos: Mineral y Antrópico. La clasificación mineral se refiere a partículas de composición química y morfología definidas y reportadas en la literatura. La clasificación antrópica se refiere a partículas de composición química definida principalmente por elementos pesados y morfologías esféricas e irregulares. Existe una diversidad de partículas antrópicas definidas y reportadas en estudios previos realizados a fuentes fijas (Aragón, 1999; Campos, 2005).
- **Clasificación respecto a su tamaño.** Finalmente las partículas fueron clasificadas respecto a su tamaño en los grupos siguientes: $\leq 2.5\mu\text{m}$, $>2.5\mu\text{m}$ y $\leq 5\mu\text{m}$, $>5\mu\text{m}$ y $\leq 10\mu\text{m}$, $>10\mu\text{m}$.

3.4 Establecer posibles asociaciones entre las clases de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable y las actividades dominantes de tipo industrial y de tránsito vehicular

La asociación a fuentes emisoras se realizó tomando como base estudios previos disponibles y realizados en la Ciudad de San Luis Potosí (Aragón *et al.*, 2000; Aragón, 1999; Campos, 2005) y Zona Metropolitana del Valle de México (Labrada, 2006). De igual forma se consideraron estudios previos realizados en otros sitios (Yue *et al.*, 2007; Okuda *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2007; Schauer *et al.*, 2006; Di Marco *et al.*, 2006; Alastuey *et al.*, 2005; Shi *et al.*, 2003; Flores *et al.*, 2002; Vázquez *et al.*, 2002). Se compararon características de composición química, morfología y tamaño de las aeropartículas antrópicas de la Ciudad de Querétaro, con las caracterizadas en fuentes fijas, considerando un grupo de partículas asociado a una fuente, al coincidir las tres características fisicoquímicas antes mencionadas. La comparación se realizó por cada grupo de partículas.

3.5 Determinar la dirección predominante de los vientos en la Ciudad de Querétaro

Se determinaron las rosas de vientos mensuales y anuales para cada una de las estaciones meteorológicas de la Ciudad de Querétaro (**Figura 2.14**). Los datos meteorológicos de los años 2004 y 2005 fueron proporcionados por la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU) del Estado de Querétaro. Se utilizó el software “*WRPLOT View 5.2.1*”, para el procesamiento de los datos meteorológicos. Los datos procesados para la obtención de las rosas de vientos fueron: año, mes, día, dirección y velocidad de vientos, así como precipitación pluvial.

IV. Resultados y discusión

4.1 Niveles de PST en el periodo de estudio y dirección de vientos dominantes

Durante el periodo de estudio, los tres puntos de monitoreo de PST sobrepasaron el límite máximo permitido de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Figura 4.1**). Sin embargo, solamente en la estación seca (enero, febrero, marzo y abril) se sobrepasó el límite de PST, esto debido a que en la estación húmeda, las precipitaciones pluviales provocan el lavado troposférico, el cual probablemente conduce a una disminución de los niveles de PST, tal efecto de lavado se ha determinado en estudios previos en la Ciudad de México (SMA, 2006). Además en la estación seca pueden verse favorecidas reacciones fotoquímicas en la atmósfera, las cuales conllevan a la generación de partículas secundarias (Querol *et al.*, 2004).

De acuerdo a la estación meteorológica número 1, localizada en la Zona Industrial, la dirección predominante de los vientos es NO-SE (**Figura 4.2**). En las estaciones meteorológicas 2, 3 y 4, la dirección predominante de los vientos es SO-NE (**Figura 4.2**), la estación meteorológica número 3 se localiza en la Zona Centro de la ciudad. Considerando la dirección predominante de los vientos de la Zona Industrial (NO-SE) se establece la posibilidad del arrastre de partículas PST desde la Zona Industrial hasta la Zona Centro (ver **Figura 3.1**). De igual forma, al considerar el resto de las direcciones de viento en la Zona Centro (SO-NE), se establece la posibilidad del arrastre y distribución de partículas PST desde la Zona Centro hacia el resto de la ciudad. Ahora, las rosas de vientos mensuales para la estación meteorológica número 1 (**Apéndice B**) muestran que la dirección de los vientos es SE-NO para los meses pertenecientes a la estación seca. Es en este periodo donde se presenta una mayor concentración de PST en el aire de la Ciudad de Querétaro, por lo tanto la afectación de la Zona Centro con partículas provenientes de la Zona Industrial no debiera ser tan severa. Sin embargo, los niveles de PST de la Zona Centro sobrepasan el límite máximo permitido de $210 \mu\text{m}/\text{m}^3$ durante la estación seca (**Figura 4.1**). Probablemente los vientos de menor frecuencia son suficientes para provocar el arrastre de partículas desde la Zona Industrial hasta la Zona Centro durante la estación seca.

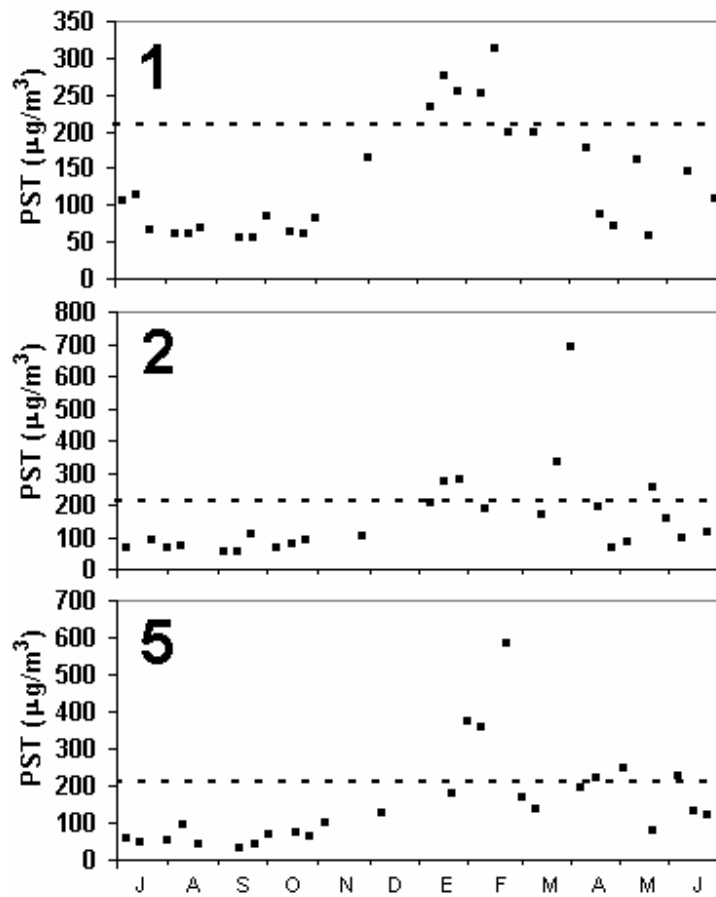


Figura 4.1. Niveles de PST en el periodo de estudio. (1), (2) Zona Industrial y (5) Zona Centro.

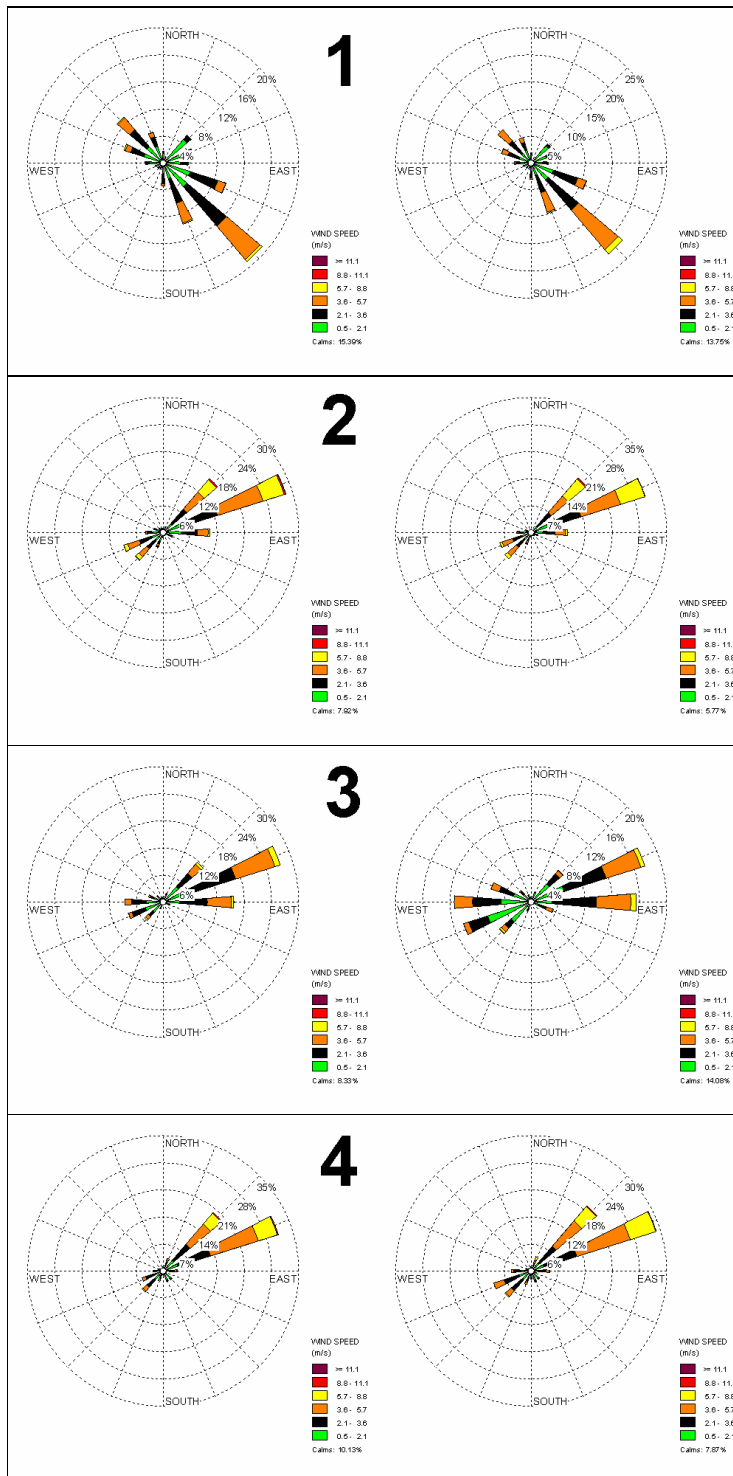


Figura 4.2. Rosas de vientos anuales, (1) Félix Osores, (2) Tlaloc, (3) Centro y (4) Estadio, durante 2004 y 2005 respectivamente.

4.2 Clasificación general de aeropartículas antrópicas

Se analizaron 67 muestras de PST para la Zona Industrial y 33 para la Zona Centro, dando un total de 100 muestras de PST analizadas para ambas zonas. Se analizaron y clasificaron un total de 6021 partículas antrópicas para la Zona Industrial y 2056 para la Zona Centro, dando un total de 8077 partículas clasificadas para las dos zonas de estudio. Se obtuvieron datos de composición química, morfología y tamaño para el total de partículas analizadas de forma individual, empleando la técnica SEM-EDS.

La Ciudad de Querétaro presenta los mismos grupos mayoritarios de partículas antrópicas en ambas zonas de estudio (**Figura 4.3a**). Estas similitudes entre los grupos de partículas de ambas zonas permiten confirmar la afectación de la Zona Centro con partículas antrópicas provenientes de la Zona Industrial (ver 4.1).

En ambas zonas de estudio la gran mayoría de las partículas identificadas presentaron tamaños menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$, 73.24% para la Zona Industrial y 60.8% para la Zona Centro (**Figura 4.3b**). De la totalidad de partículas menores a $10\ \mu\text{m}$, el 44.7% y 32.73% corresponden a partículas de tamaño menor o igual a $2.5\ \mu\text{m}$, para las Zonas Industrial y Centro respectivamente. Estos tipos de partículas son de especial interés para la salud, debido a que por su tamaño pueden penetrar al organismo humano vía respiratoria y ser un factor crítico causante de toxicidad. Las partículas de tamaño menor o igual a $2.5\ \mu\text{m}$ son más efectivas en causar efectos adversos a la salud (ver 2.3.2.1, tamaño de partícula). Ahora, si se considera la composición química de estas partículas (**Figura 4.3a**), el riesgo de afectaciones a la salud sería probablemente mayor.

La descripción de los grupos de partículas identificados en las Zonas Industrial y Centro, se muestra en los **Cuadros 4.1** y **4.3**, respectivamente. La distribución de tamaño de cada grupo de partículas se muestra en los **Cuadros 4.2** y **4.4**, para las Zonas Industrial y Centro respectivamente.

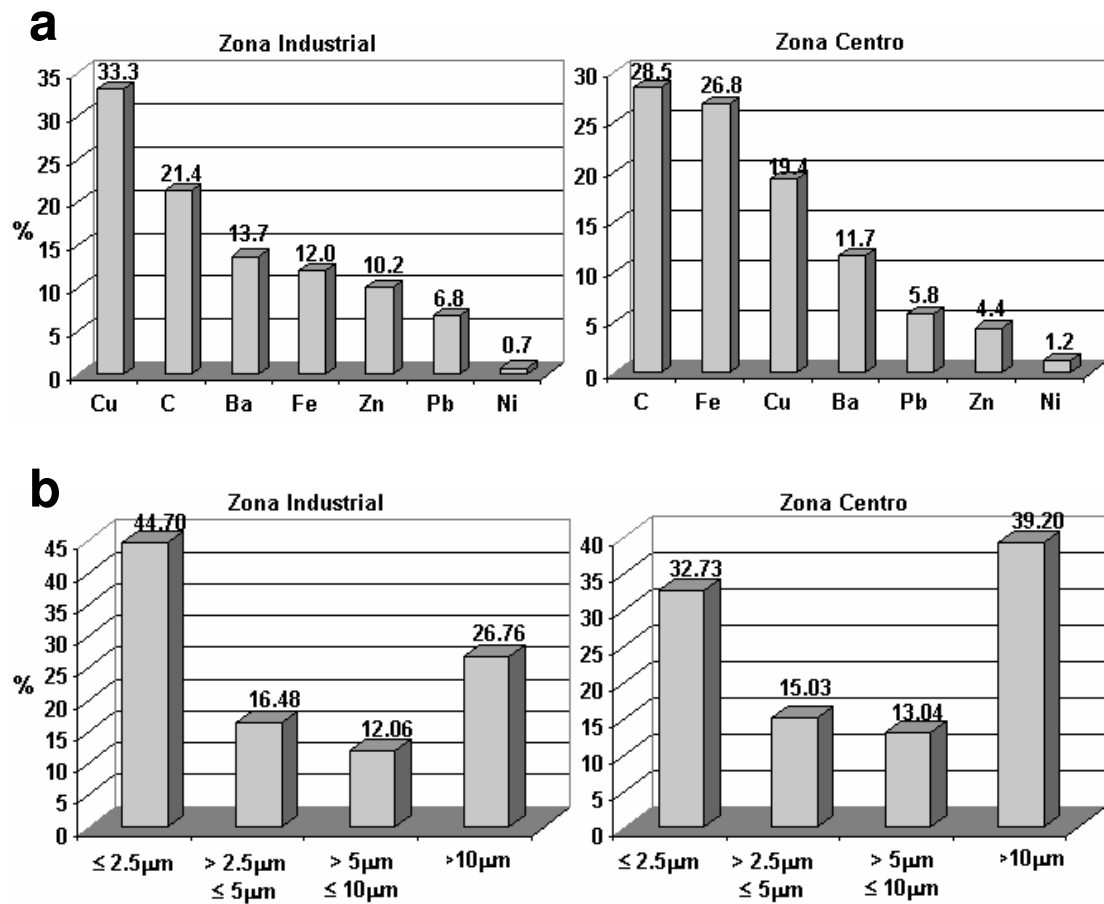


Figura 4.3. (a) Grupos mayoritarios de partículas antrópicas, (b) distribución de tamaño del total de partículas identificadas.

Cuadro 4.1. Partículas identificadas en la Zona Industrial.

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	PARTÍCULAS ANALIZADAS	% DEL TOTAL	Micrografía en Apéndice A
Partículas ricas en Cu 33.3%	----	Esférica	Antrópico	745	12.4	1.2
	Ni	Esférica	Antrópico	163	2.7	1.3
	S	Esférica	Antrópico	144	2.4	----
	Cl	Esférica	Antrópico	1	0.0	----
	----	Dendrítico	Mineral	42	0.7	----
	----	Irregular	Antrópico	75	1.2	----
	Zn	Irregular	Antrópico	47	0.8	----
Partículas ricas en C elemental 21.4%	S	Estructura laminar	Mineral (CuS)	768	12.8	1.1
	Pb-Sn-O	Irregular	Antrópico	17	0.3	----
Partículas ricas en Ba 13.7%	S-V-Ni	Esférica porosa	Antrópico	1240	20.6	2.1
	----	Aglomerados esféricos	Antrópico	46	0.8	2.2
Partículas ricas en Fe 12.0%	S-O	Mineral	Mineral (BaSO ₄)	813	13.5	3.1
	S-O	Esférica	Antrópico	5	0.1	3.3
	C-O	Mineral	Mineral (BaCO ₃)	8	0.1	3.2
Partículas ricas en Zn 10.2%	----	Esférica	Antrópico	68	1.1	----
	O	Esférica	Antrópico	362	6.0	4.2
	Cr-Ni-O	Esférica	Antrópico	169	2.8	4.3
	Zn-O	Esférica	Antrópico	6	0.1	4.4
	----	Irregular	Antrópico	95	1.6	4.5
	O	Irregular	Antrópico	15	0.2	4.6
Partículas ricas en Ni 0.7%	Cr-Ni-O	Irregular	Antrópico	10	0.2	4.7
	O	Redondeadas	Antrópico	251	4.2	5.1
	O	Agregados aciculares	Antrópico	211	3.5	5.2
	O	Esférica	Antrópico	152	2.5	5.3
	O	Esférica	Antrópico	4	0.1	----
	S-O	Esférica	Antrópico	2	0.0	6.8
	Cu-Fe-O	Esférica	Antrópico	1	0.0	6.9
	S	Irregular	Antrópico	160	2.7	6.1
	O	Irregular	Antrópico	111	1.8	6.2
	S-Sn-Sb-Cu-Fe-O	Irregular	Antrópico	58	1.0	----
Partículas ricas en V (0.4%) 0.38%	S-O	Irregular	Antrópico	33	0.5	6.4
	S	Mineral	Mineral (PbS)	19	0.3	6.7
	----	Irregular	Antrópico	10	0.2	6.3
	O	Facetada	Antrópico	6	0.1	6.5
	Cr-O	Agregados aciculares	Antrópico	6	0.1	6.6
	----	Cúbica	Antrópico	1	0.0	----
	V-Cu	Esférica	Antrópico	26	0.4	7.1-7.2
Partículas ricas en Ce 0.22%	----	Esférica	Antrópico	12	0.2	7.3
	----	Irregular	Antrópico	6	0.1	----
Partículas ricas en Sn 0.38%	Cu	Irregular	Antrópico	1	0.0	7.4
	Ni-O	Esférica	Antrópico	23	0.35	----
	Ni-O	Irregular	Antrópico	3	0.05	8.2
Partículas ricas en Pb 6.8%	O	Esférica	Antrópico	4	0.07	8.3.1
	O	Irregular	Mineral (SnO ₂)	15	0.25	8.3
	S-O	Irregular	Antrópico	1	0.02	----
	Pb-Cu-O	Irregular	Antrópico	3	0.05	8.3.2
Partículas ricas en Fe 0.22%	Fe-O	Esférica	Antrópico	6	0.10	8.4
	Fe-O	Irregular	Antrópico	7	0.12	8.4.1

Cuadro 4.1. Partículas identificadas en la Zona Industrial. Continuación

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	PARTÍCULAS ANALIZADAS	% DEL TOTAL	Micrografía en Apéndice A
Partículas ricas en W 0.17%	----	Irregular	Antrópico	10	0.17	8.5
Partículas ricas en Zr 0.13%	O Ce-O	Irregular Irregular	Antrópico Antrópico	7 1	0.11 0.02	----- -----
Partículas ricas en Ca 0.13%	P-O	Esférica	Antrópico	8	0.13	8.7
Partículas ricas en As 0.10%	O O	Octaédrica Esférica	Antrópico Antrópico	1 5	0.02 0.08	8.8 -----
Partículas ricas en Sb 0.10%	----- Fe-O	Irregular Irregular	Antrópico Antrópico	2 2	0.05 0.05	----- -----
Partículas ricas en Mn 0.07%	O -----	Mineral Irregular	Mineral (MnO ₂) Antrópico	2 2	0.035 0.035	8.10 -----
Partículas ricas en Hg 0.05%	S	Mineral	Mineral (HgS)	3	0.05	8.11
Partículas ricas en Bi 0.03%	S	Mineral	Mineral (Bi ₂ S ₃)	2	0.03	8.12
Partículas ricas en Ti 0.03%	O	Mineral	Mineral (TiO ₂)	2	0.03	-----
Partículas ricas en Sr 0.02%	C-O	Mineral	Mineral (SrCO ₃)	1	0.02	8.13
Partículas ricas en Se 0.02%	-----	Irregular	Antrópico	1	0.02	-----
Partículas ricas en Cr 0.02%	O	Esférica	Antrópico	1	0.02	-----

Cuadro 4.2. Tamaño de partículas de la Zona Industrial.

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	≤ 2.5µm	> 2.5µm ≤ 5µm	> 5µm ≤ 10µm	>10µm
Partículas ricas en Cu 33.3%	-----	Esférica	Antrópico	65.2	23.2	10.2	1.3
	Ni	Esférica	Antrópico	38	49.1	10.4	2.5
	S	Esférica	Antrópico	79.9	15.3	4.9	0
	Cl	Esférica	Antrópico	0	100	0	0
	-----	Dendrítico	Mineral	57.1	33.3	9.5	0
	-----	Irregular	Antrópico	42.7	22.7	18.7	16
	Zn	Irregular	Antrópico	17	27.7	25.5	29.8
	S	Estructura laminar	Mineral (CuS)	76.4	16.3	6.5	0.8
Partículas ricas en C elemental 21.4%	Pb-Sn-O	Irregular	Antrópico	94.1	0	0	5.9
	S-V-Ni	Esférica porosa	Antrópico	0	0	1	99
Partículas ricas en Ba 13.7%	-----	Aglomerados esféricos	Antrópico	78.3	17.4	4.3	0
	S-O	Mineral	Mineral (BaSO ₄)	36.7	24.7	25.7	12.9
	S-O	Esférica	Antrópico	80	20	0	0
Partículas ricas en Fe 12.0%	C-O	Mineral	Mineral (BaCO ₃)	12.5	0	37.5	50
	-----	Esférica	Antrópico	33.8	22.1	33.8	10.3
	O	Esférica	Antrópico	15.7	19.6	39.2	25.4
	Cr-Ni-O	Esférica	Antrópico	17.8	36.1	28.4	17.8
	Zn-O	Esférica	Antrópico	33.3	33.3	33.3	0
	-----	Irregular	Antrópico	2.1	18.9	27.4	51.6
	O	Irregular	Antrópico	6.7	6.7	26.7	60
Partículas ricas en Zn 10.2%	Cr-Ni-O	Irregular	Antrópico	20	20	20	40
	O	Redondeadas	Antrópico	90.4	4.8	1.2	3.6
	O	Agregados aciculares	Antrópico	77.3	7.6	8.5	6.6
Partículas ricas en Pb 6.8%	O	Esférica	Antrópico	96.1	2.6	0.7	0.7
	O	Esférica	Antrópico	75	0	0	25
	S-O	Esférica	Antrópico	100	0	0	0
	Cu-Fe-O	Esférica	Antrópico	0	0	100	0
	S	Irregular	Antrópico	76.9	21.3	1.9	0
	O	Irregular	Antrópico	70.3	22.5	6.3	0.9
	S-Sn-Sb-Cu-Fe-O	Irregular	Antrópico	74.1	24.1	1.7	0
	S-O	Irregular	Antrópico	60.6	30.3	9.1	0
	S	Mineral	Mineral (PbS)	26.3	42.1	31.6	0
	-----	Irregular	Antrópico	40	30	30	0
Partículas ricas en Ni 0.7%	O	Facetada	Antrópico	50	16.7	33.3	0
	Cr-O	Agregados aciculares	Antrópico	50	16.7	16.7	16.7
	-----	Cúbica	Antrópico	0	100	0	0
	V-Cu	Esférica	Antrópico	42.3	46.2	7.7	3.8
	-----	Esférica	Antrópico	41.7	41.7	16.7	0
	-----	Irregular	Antrópico	16.7	66.7	0	16.7
	Cu	Irregular	Antrópico	0	0	100	0
Partículas ricas en V (0.4%)	Ni-O	Esférica	Antrópico	91.3	4.3	4.3	0
	Ni-O	Irregular	Antrópico	0	100	0	0
Partículas ricas en Sn 0.38%	O	Esférica	Antrópico	50	25	25	0
	O	Irregular	Mineral (SnO ₂)	80	6.7	6.7	6.7
	S-O	Irregular	Antrópico	0	0	100	0
Partículas ricas en Ce 0.22%	Pb-Cu-O	Irregular	Antrópico	0	33.3	33.3	33.3
	Fe-O	Esférica	Antrópico	16.7	50	33.3	0
	Fe-O	Irregular	Antrópico	42.9	14.3	28.6	14.3

Cuadro 4.2. Tamaño de partículas de la Zona Industrial. Continuación

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	≤ 2.5µm	> 2.5µm ≤ 5µm	> 5µm ≤ 10µm	>10µm
Partículas ricas en W 0.17%	----	Irregular	Antrópico	80	10	10	0
Partículas ricas en Zr 0.13%	O Ce-O	Irregular Irregular	Antrópico Antrópico	85.7 0	14.3 0	0 100	0 0
Partículas ricas en Ca 0.13%	P-O	Esférica	Antrópico	50	12.5	37.5	0
Partículas ricas en As 0.10%	O O	Octaédrica Esférica	Antrópico Antrópico	0 80	100 20	0 0	0 0
Partículas ricas en Sb 0.10%	---- Fe-O	Irregular Irregular	Antrópico Antrópico	100 50	0 0	0 50	0 0
Partículas ricas en Mn 0.07%	O ----	Mineral Irregular	Mineral (MnO ₂) Antrópico	0 0	0 0	50 0	50 100
Partículas ricas en Hg 0.05%	S	Mineral	Mineral (HgS)	100	0	0	0
Partículas ricas en Bi 0.03%	S	Mineral	Mineral (Bi ₂ S ₃)	50	0	50	0
Partículas ricas en Ti 0.03%	O	Mineral	Mineral (TiO ₂)	0	0	50	50
Partículas ricas en Sr 0.02%	C-O	Mineral	Mineral (SrCO ₃)	0	0	0	100
Partículas ricas en Se 0.02%	----	Irregular	Irregular	100	0	0	0
Partículas ricas en Cr 0.02%	O	Esférica	Antrópico	0	100	0	0

Cuadro 4.3. Partículas identificadas en la Zona Centro.

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	PARTÍCULAS ANALIZADAS	% DEL TOTAL	Micrografía en Apéndice A
Partículas ricas en C elemental 28.5%	S-V-Ni	Esférica porosa	Antrópico	584	28.4	2.1
	-----	Aglomerados esféricos	Antrópico	2	0.1	2.2
Partículas ricas en Fe 26.8%	-----	Esférica	Antrópico	56	2.7	4.1
	O	Esférica	Antrópico	262	12.7	4.2
	Cr-Ni-O	Esférica	Antrópico	65	3.2	4.3
	Zn-O	Esférica	Antrópico	8	0.4	4.4
	-----	Irregular	Antrópico	85	4.1	4.5
	O	Irregular	Antrópico	47	2.3	4.6
	Cr-Ni-O	Irregular	Antrópico	28	1.4	4.7
Partículas ricas en Cu 19.4%	-----	Esférica	Antrópico	175	8.5	1.2
	Ni	Esférica	Antrópico	68	3.3	1.3
	S	Esférica	Antrópico	2	0.1	-----
	-----	Dendrítico	Mineral	4	0.2	-----
	-----	Irregular	Antrópico	23	1.1	-----
Partículas ricas en Ba 11.7%	Zn	Irregular	Antrópico	24	1.2	1.4
	S	Estructura laminar	Mineral (CuS)	102	5.0	-----
Partículas ricas en Pb 5.8%	S-O	Mineral	Mineral (BaSO ₄)	238	11.6	3.1
	C-O	Mineral	Mineral (BaCO ₃)	2	0.1	-----
	O	Esférica	Antrópico	4	0.2	-----
	Cu-Fe-O	Esférica	Antrópico	1	0.0	-----
	S	Irregular	Antrópico	19	0.9	6.1
	O	Irregular	Antrópico	51	2.5	6.2
	S-Sn-Sb-Cu-Fe-O	Irregular	Antrópico	8	0.4	-----
	S-O	Irregular	Antrópico	11	0.5	6.4
	S	Mineral	Mineral (PbS)	11	0.5	6.7
	O	Facetada	Antrópico	4	0.2	-----
Partículas ricas en Zn 4.4%	Cr-O	Agregados aciculares	Antrópico	11	0.5	6.6
	O	Redondeadas	Antrópico	52	2.5	-----
	O	Agregados aciculares	Antrópico	14	0.7	5.2
Partículas ricas en Ni 1.1%	O	Esférica	Antrópico	25	1.2	-----
	V-Cu	Esférica	Antrópico	15	0.7	7.1-7.2
	-----	Esférica	Antrópico	7	0.3	7.3
Partículas ricas en Ca 0.44%	-----	Irregular	Antrópico	2	0.1	-----
	P-O	Esférica	Antrópico	9	0.44	8.7
Partículas ricas en Cd 0.44%	Fe-S-O	Irregular	Antrópico	9	0.44	8.1
Partículas ricas en Zr (0.34%)	Si-O	Mineral	Mineral (ZrSiO ₄)	5	0.24	8.6.1
	Ce-O	Irregular	Antrópico	2	0.10	8.6
Partículas ricas en V (0.24%)	Ni-O	Esférica	Antrópico	4	0.19	-----
	Ni-O	Irregular	Antrópico	1	0.05	-----

Cuadro 4.3. Partículas identificadas en la Zona Centro. Continuación

GRUPO DE PARTICULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	PARTÍCULAS ANALIZADAS	% DEL TOTAL	Micrografía en Apéndice A
Partículas ricas en Ce 0.19%	Fe-O	Esférica	Antrópico	3	0.14	-----
	Fe-O	Irregular	Antrópico	1	0.05	8.4.1
Partículas ricas en Sn 0.19%	Fe-O	Irregular	Antrópico	1	0.05	-----
	O	Mineral	Mineral (SnO ₂)	2	0.10	8.3
	S-O	Irregular	Antrópico	1	0.05	-----
Partículas ricas en W 0.19%	-----	Irregular	Antrópico	3	0.19	8.5
Partículas ricas en As 0.19%	O	Octaédrica	Antrópico	2	0.13	8.8
	Fe-S	Mineral	Mineral (FeAsS)	1	0.06	8.8.1
Partículas ricas en Sb 0.19%	O	Irregular	Antrópico	1	0.19	8.9
Partículas ricas en Mo 0.19%	S	Mineral	Mineral (MoS ₂)	1	0.19	8.14

Cuadro 4.4. Tamaño de partículas de la Zona Centro.

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	≤ 2.5µm	> 2.5µm ≤ 5µm	> 5µm ≤ 10µm	>10µm
Partículas ricas en C elemental 28.50%	S-V-Ni	Esférica porosa	Antrópico	0	0.3	0.3	99.3
	-----	Aglomerados esféricos	Antrópico	0	100	0	0
Partículas ricas en Fe 26.80%	-----	Esférica	Antrópico	50	17.9	25	7.1
	O	Esférica	Antrópico	24.8	19.5	34	21.8
	Cr-Ni-O	Esférica	Antrópico	26.2	36.9	29.2	7.7
	Zn-O	Esférica	Antrópico	75	12.5	12.5	0
	-----	Irregular	Antrópico	2.4	12.9	25.9	58.8
	O	Irregular	Antrópico	19.1	12.8	19.1	48.9
Partículas ricas en Cu 19.40%	Cr-Ni-O	Irregular	Antrópico	10.7	39.3	28.6	21.4
	-----	Esférica	Antrópico	56.6	30.3	10.3	2.9
	Ni	Esférica	Antrópico	45.6	35.3	16.2	2.9
	S	Esférica	Antrópico	100	0	0	0
	-----	Dendrítico	Mineral	0	100	0	0
	-----	Irregular	Antrópico	30.4	39.1	21.7	8.7
	Zn	Irregular	Antrópico	8.3	8.3	37.5	45.8
Partículas ricas en Ba 11.70%	S	Estructura laminar	Mineral (CuS)	85.3	9.8	2.9	2
	S-O	Mineral	Mineral (BaSO ₄)	50.8	17.6	14.3	17.2
Partículas ricas en Pb 5.80%	C-O	Mineral	Mineral (BaCO ₃)	0	50	50	0
	O	Esférica	Antrópico	100	0	0	0
	Cu-Fe-O	Esférica	Antrópico	0	100	0	0
	S	Irregular	Antrópico	78.9	5.3	10.5	5.3
	O	Irregular	Antrópico	70.6	11.8	17.6	0
	S-Sn-Sb-Cu-Fe-O	Irregular	Antrópico	75	25	0	0
	S-O	Irregular	Antrópico	63.6	9.1	0	27.3
	S	Mineral	Mineral (PbS)	45.5	45.5	9.1	0
Partículas ricas en Zn 4.40%	O	Facetada	Antrópico	75	25	0	0
	Cr-O	Agregados aciculares	Antrópico	72.7	27.3	0	0
	O	Redondeadas	Antrópico	94.2	0	1.9	3.8
	O	Agregados aciculares	Antrópico	78.6	14.3	7.1	0
Partículas ricas en Ni 1.10%	O	Esférica	Antrópico	92	0	4	4
	V-Cu	Esférica	Antrópico	46.7	40	13.3	0
	-----	Esférica	Antrópico	57.1	42.9	0	0
Partículas ricas en Ca 0.44%	-----	Irregular	Antrópico	0	0	50	50
	P-O	Esférica	Antrópico	22.2	33.3	11.1	33.3
Partículas ricas en Cd 0.44%	Fe-S-O	Irregular	Antrópico	55.6	0	11.1	33.3
Partículas ricas en Zr (0.34%)	Si-O	Mineral	Mineral (ZrSiO ₄)	20	80	0	0
	Ce-O	Irregular	Antrópico	0	50	0	50
Partículas ricas en V (0.24%)	Ni-O	Esférica	Antrópico	25	25	50	0
	Ni-O	Irregular	Antrópico	100	0	0	0

Cuadro 4.4. Tamaño de partículas de la Zona Centro. Continuación

GRUPO DE PARTÍCULAS	ELEMENTOS ASOCIADOS	MORFOLOGÍA	ORIGEN	≤ 2.5μm	> 2.5μm	> 5μm	>10μm
					≤ 5μm	≤ 10μm	
Partículas ricas en Ce 0.19%	Fe-O	Esférica	Antrópico	66.7	33.3	0	0
	Fe-O	Irregular	Antrópico	0	100	0	0
Partículas ricas en Sn 0.19%	Fe-O	Irregular	Antrópico	0	0	0	100
	O	Mineral	Mineral (SnO ₂)	50	0	50	0
	S-O	Irregular	Antrópico	0	100	0	0
Partículas ricas en W 0.19%	-----	Irregular	Antrópico	33.3	0	0	66.7
Partículas ricas en As 0.19%	O	Octaédrica	Antrópico	0	100	0	0
	Fe-S	Mineral	Mineral (FeAsS)	100	0	0	0
Partículas ricas en Sb 0.19%	O	Irregular	Antrópico	100	0	0	0
Partículas ricas en Mo 0.19%	S	Mineral	Mineral (MoS ₂)	0	100	0	0

4.3 Descripción de los grupos mayoritarios de aeropartículas antrópicas

A continuación se hará una descripción de las características fisicoquímicas de cada uno de los grupos mayoritarios de partículas antrópicas de la Ciudad de Querétaro, así como las asociaciones de cada grupo a posibles fuentes emisoras de contaminación atmosférica, tomando como punto de comparación estudios previos reportados en la literatura (ver 3.4).

4.3.1 Partículas ricas en cobre

Las partículas ricas en cobre representan el grupo más abundante en la Zona Industrial con 33.3% de abundancia relativa y 19.4% para la Zona Centro. (**Cuadros 4.1 y 4.3**).

La fase de mayor abundancia fue la covelita (CuS), una fase mineral que presenta clivajes y ángulos definidos característicos (**Figura 4.4a y 4.4b**), esta fase no se identificó en los estudios realizados en San Luis Potosí. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se identificó una fase de CuS (**Figura 4.4c**), la cual presenta una forma irregular que no concuerda con las características físicas de la covelita identificada en la Ciudad de Querétaro. Esta fase irregular de CuS identificada en la ZMVM no se logró asociar a una fuente emisora. Debido a la falta de información en la literatura, la covelita identificada en este estudio no se logró asociar a una fuente emisora. Sin embargo, las formas minerales (como la covelita) no se encuentran presentes en el aire debido a causas naturales como la resuspensión de polvo provocada por el viento, la abundancia relativa de la covelita en el aire de la Ciudad de Querétaro es muy elevada (12.8 % dentro del grupo de partículas de cobre), esto es indicativo de la existencia de una actividad antrópica que provoca la liberación de covelita al aire, probablemente emisiones fugitivas de industrias que utilizan este mineral.

Las partículas esféricas de cobre metálico (**Figura 4.4d**) corresponden a la segunda fase de mayor abundancia en la Ciudad de Querétaro. Este tipo de partícula ha sido identificado en estudios previos realizados en San Luis Potosí (**Figura 4.4e**; Aragón, 1999) y ZMVM (**Figura 4.4f**; Labrada, 2006). La morfología esférica de las partículas de cobre metálico las sitúa dentro de las generadas por

procesos de fundición, debido a las temperaturas alcanzadas en estos procesos, las partículas liberan más calor que el que pueden transmitir a los alrededores, permitiendo un súbito incremento en la temperatura de la partícula, adquiriendo así formas esféricas (Aragón, 1999).

Las partículas esféricas de cobre asociado a níquel (**Figura 4.4g**) corresponden al tercer grupo de mayor abundancia dentro de las partículas ricas en cobre. Este tipo de partícula se identificó en la ZMVM (**Figura 4.4h**; Labrada, 2006) y en un proceso de fundición de bronce en la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.4i**; Campos, 2005). Sin embargo, el tipo de partícula identificada en la Ciudad de San Luis Potosí no presenta forma esférica como las identificadas en la Ciudad de Querétaro y ZMVM. No obstante, la forma esférica de las partículas de cobre-níquel las sitúa dentro de los procesos de fundición.

Las partículas irregulares de cobre y zinc (**Figura 4.4j**) han sido identificadas en procesos de fundición de bronce y aluminio, así como en la fabricación de circuitos eléctricos (**Figura 4.4k**; Campos, 2005). Partículas similares fueron identificadas en la ZMVM (**Figura 4.4l**; Labrada, 2006) donde se asociaron al mismo tipo de actividad. Para el resto de los grupos de partículas ricas en cobre, no se logró identificar una asociación a una fuente emisora, excepto para las partículas de cobre dendrítico (**Figuras 4.4m y 4.4n**), cuyo origen es geológico natural. Este tipo de partícula se ha identificado de igual forma en la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.4ñ**; Aragón, 1999).

La Zona Industrial presenta mayor cantidad de partículas de tamaño menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$ (**Figura 4.4o**). Probablemente debido a que las partículas aerotransportadas desde la Zona Industrial hasta la Zona Centro experimentan procesos de coagulación, (combinación de dos partículas para formar una) debido a las condiciones de humedad relativa. Estas partículas coaguladas son de mayor tamaño y tienden a depositarse con mayor facilidad, disminuyendo así la cantidad de partículas de tamaño menor a $2.5 \mu\text{m}$.

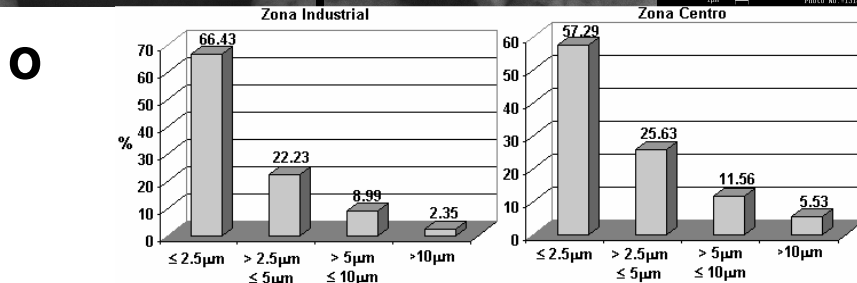
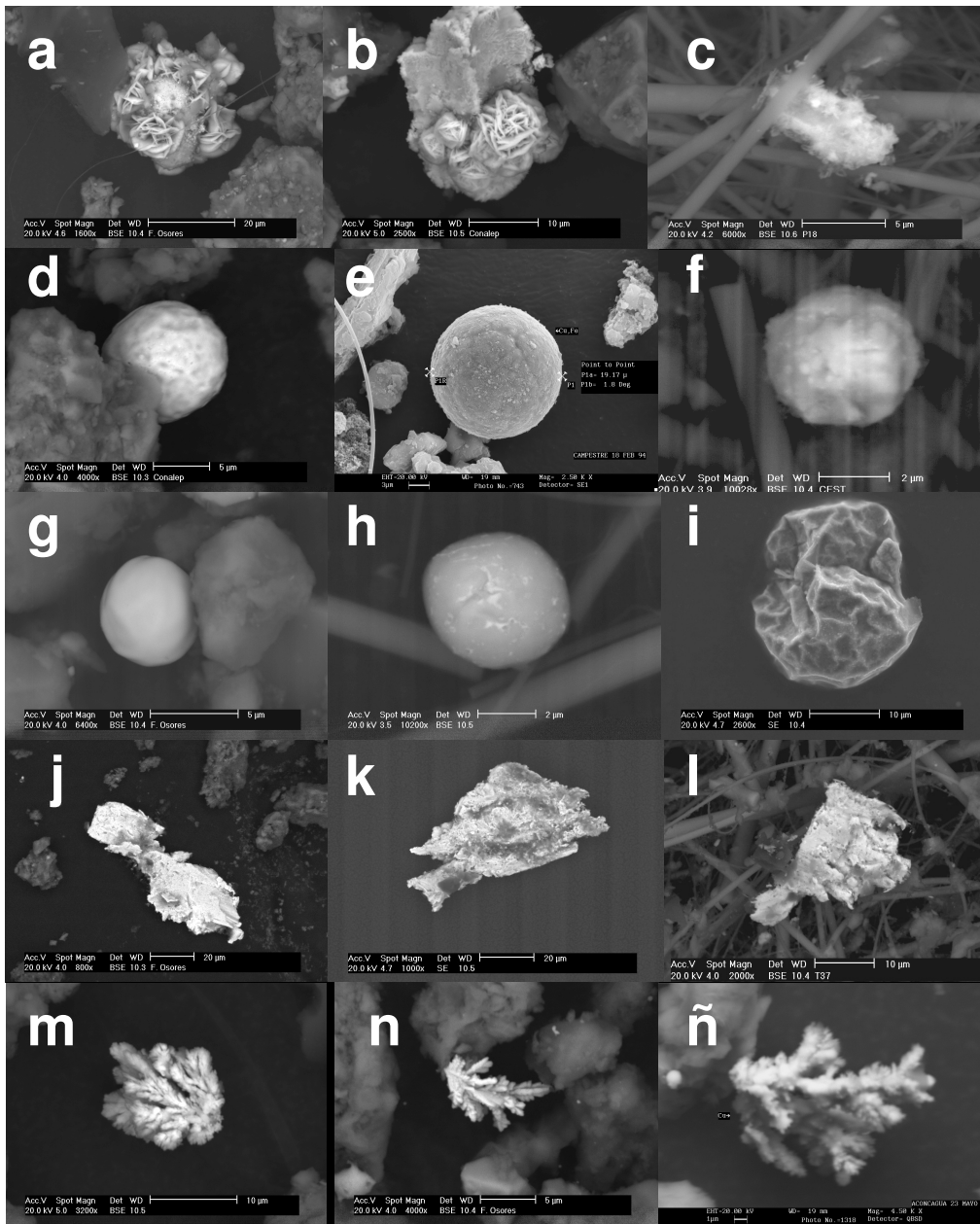


Figura 4.4. Micrografías de partículas de (a), (b) CuS identificadas en Qro, (c) CuS en ZMVM, (d) cobre metálico en Qro, (e) cobre metálico en SLP, (f) cobre metálico en ZMVM, (g) Cu-Ni en Qro, (h) Cu-Ni en ZMVM, (i) Cu-Ni en SLP, (j) Cu-Zn en Qro, (k) Cu-Zn en SLP, (l) Cu-Zn en ZMVM, (m) y (n) cobre nativo en Qro, (ñ) cobre nativo en SLP, (o) distribución de tamaño de partículas ricas en cobre.

4.3.2 Partículas ricas en carbono elemental

Las partículas ricas en carbono elemental representan el grupo más abundante en la Zona Centro con un 28.5% de abundancia relativa y 21.4% para la Zona Industrial (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Este grupo de partículas se subdivide en dos grupos, partículas de carbono elemental asociado a S, con trazas de V-Ni, y partículas de carbono elemental solamente.

Las partículas de C-S con trazas de V-Ni (**Figuras 4.5a, 4.5b y 4.5c**) representan el grupo más abundante dentro del grupo de partículas ricas en carbono elemental. Este tipo de partícula presenta formas esféricas porosas y tamaños mayores a 10 μm (**Cuadros 4.3 y 4.4**). En estudios similares se ha identificado este tipo de partícula, tal es el caso de la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.5d**; Aragón, 1999), la ZMVM (**Figura 4.5e**; Labrada, 2006) y en las Islas Canarias de España (**Figura 4.5f**; Alastuey *et al.*, 2005). Estas partículas se asocian a la quema de combustóleo, la forma porosa de este tipo de partículas se debe a la fuga de gases desde el interior durante el proceso de combustión (Aragón, 1999).

Se identificaron en forma minoritaria, partículas de carbono elemental de morfología esférica compacta y continua (**Figura 4.5g**). Partículas similares se han identificado previamente en Beijing (**Figura 4.5h**; Shi *et al.*, 2003), en donde se asociaron a residuos resultantes de procesos de combustión de carbón. Partículas similares de carbono elemental fueron identificadas en la ZMVM (**Figura 4.5i**; Labrada, 2006), donde se asociaron de igual forma a procesos de combustión de carbón, así como a emisiones vehiculares. Partículas de carbono elemental en forma de agregados (**Figuras 4.5j y 4.5k**; Yue *et al.*, 2006) fueron identificadas en Shanghai, donde se asociaron a las emisiones de automotores a diesel y gasolina, este tipo de partículas presenta generalmente tamaños menores a 100 nm.

En este estudio, algunas de las partículas identificadas de carbono elemental presentan morfologías cuasi esféricas y tamaños mayores a las identificadas en la literatura. Sin embargo, considerando la posibilidad de que la temperatura de los procesos de combustión sea determinante en las

características de esfericidad y tamaño de la partícula, es posible establecer las asociaciones a las fuentes emisoras antes mencionadas.

Finalmente, las partículas de C-S-V-Ni presentan en su gran mayoría partículas con tamaños mayores a 10 μm en ambas zonas de estudio (**Figura 4.6a**). Por otro lado, las partículas de carbono elemental presentan en su mayoría tamaños menores a 2.5 μm para la Zona Industrial (**Figura 4.6b**), la Zona Centro muestra una distribución diferente, esto pudiera ser causado por la cantidad tan pequeña de partículas identificadas en esta zona.

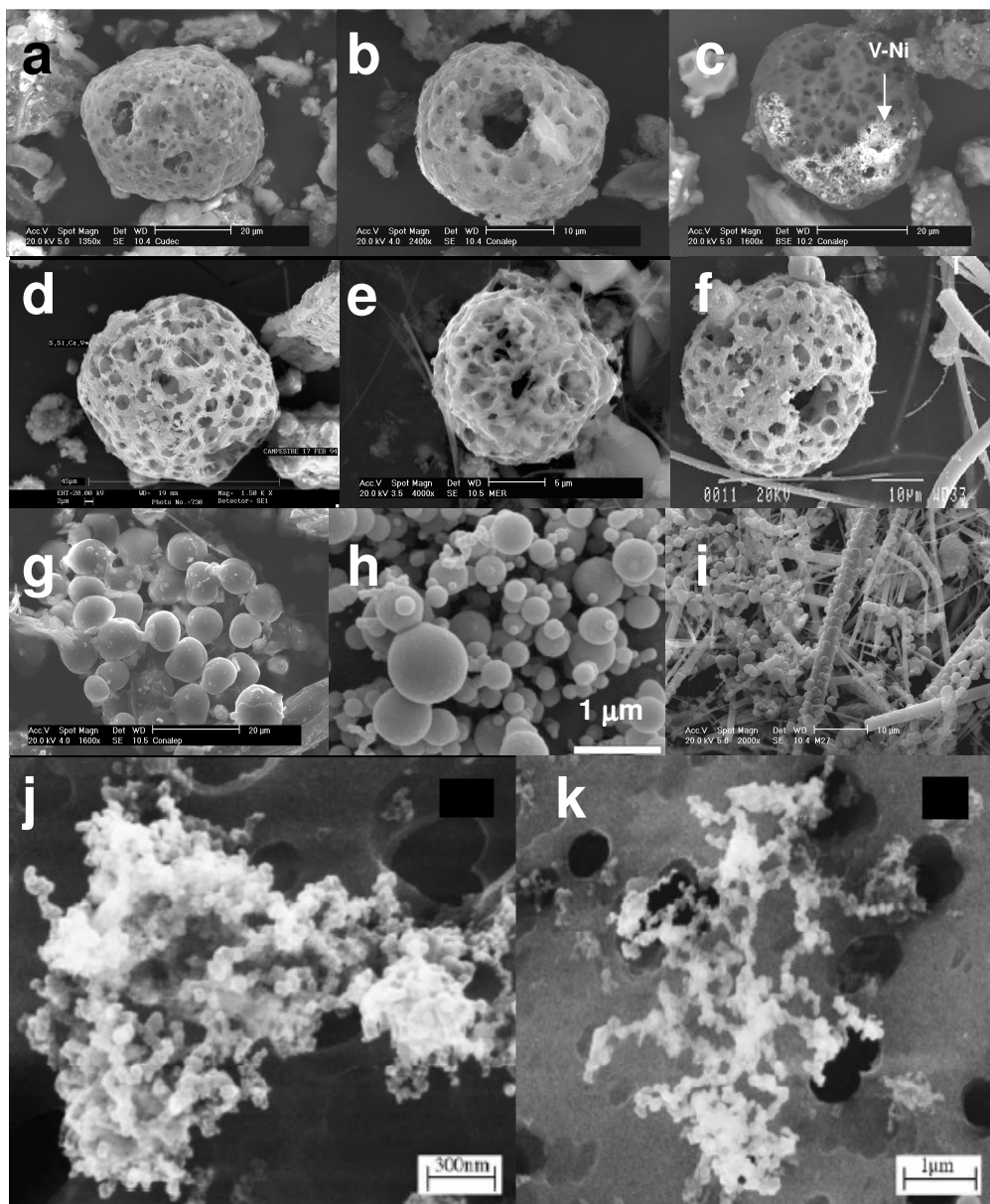


Figura 4.5. Micrografías de partículas de (a), (b) y (c) C-S asociado a V-Ni identificadas en Qro, (d) C-S en SLP, (e) C-S en ZMVM, (f) C-S en España, (g) carbono elemental en Qro, (h) carbono elemental en Beijing, (i) carbono elemental en ZMVM, (j) y (k) agregados de carbono elemental en Shanghai.

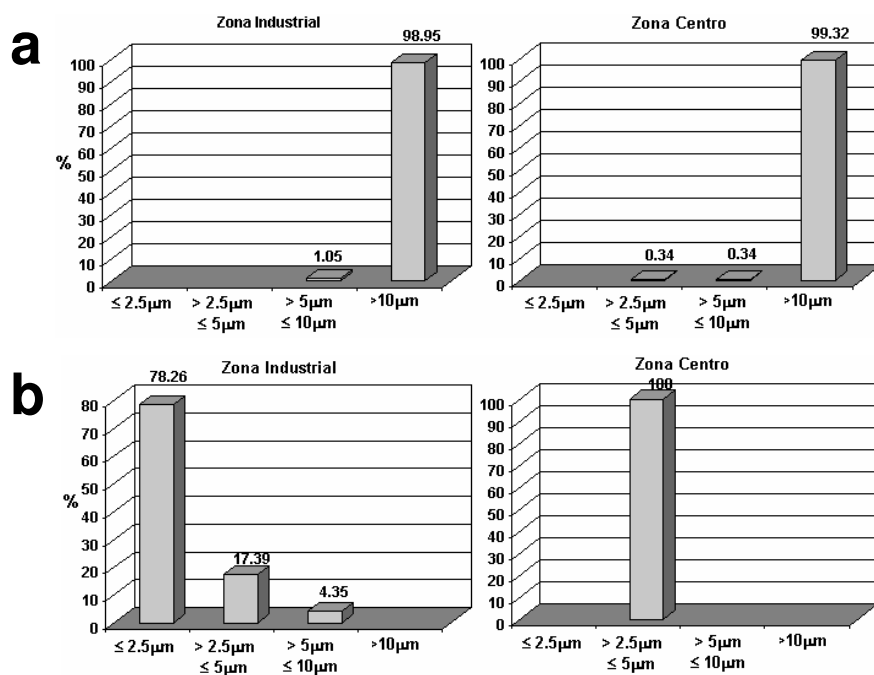


Figura 4.6. (a) Distribución de tamaño de partículas de C-S-V-Ni, (b) distribución de tamaño de partículas de carbono elemental.

4.3.3 Partículas ricas en bario

Las partículas ricas en bario representan el 13.7% del total de partículas analizadas en la Zona Industrial y el 11.7% para la Zona Centro. (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas de BaSO_4 de tipo mineral y antrópico, así como partículas de BaCO_3 de tipo mineral.

Las partículas identificadas de BaSO_4 (**Figura 4.7a**) presentan clivajes y ángulos definidos característicos de la fase mineral barita. Esta fase se ha identificado en la ZMVM (**Figura 4.7b**; Labrada, 2006) y en la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.7c**; Campos, 2005), en donde se ha asociado a industrias que fabrican vidrio y pigmentos, así como a procesos del sector automotriz, específicamente al recubrimiento de alternadores. Se identificaron también partículas de barita con estroncio presente en solución sólida $[(\text{Ba},\text{Sr})\text{SO}_4]$ (**Figura 4.7d**), la presencia del estroncio en la barita es un comportamiento muy común para esta fase, de tal forma que se ha identificado en otros sitios como en San Luis Potosí (**Figura 4.7e**; Campos, 2005).

En las **Figuras 4.7f y 4.7g** se muestra un fenómeno descrito en Diociaiuti *et al.* (2001) para las partículas de carbono aplicado al caso de la barita. Las partículas de carbono suelen ser transportadoras de diversos compuestos en su superficie, en este caso se presenta una partícula esférica de carbono con pequeñas partículas de barita incrustadas en su superficie. Este fenómeno se presentó de forma regular para este tipo de partícula.

De forma minoritaria se identificaron partículas de esféricas de BaSO_4 (**Figura 4.7h**). En la ZMVM se identificaron partículas esféricas de Ba-O-Zn (**Figuras 4.7i y 4.7j**; Labrada, 2006), las cuales pudieran asociarse a la industria de pinturas, debido a la existencia de un compuesto formado por BaSO_4 y ZnSO_4 denominado litopón (en Labrada, 2006). Ahora, resulta complicado establecer una asociación de las partículas esféricas de BaSO_4 al uso de litopón, debido a la diferencia en la composición química. Sin embargo, la forma esférica es característica de procesos antrópicos, además de la existencia de la posibilidad de la generación de partículas esféricas de BaSO_4 por el uso de litopón, no se descarta la posibilidad de establecer esta asociación.

Finalmente se identificaron partículas de BaCO_3 (**Figura 4.7k**), las cuales presentan clivajes y ángulos definidos característicos del mineral witherita. Esta fase mineral se ha identificado de igual forma en San Luis Potosí (**Figura 4.7l**; Campos, 2005). Esta fase se encuentra presente en el aire debido a fuentes de origen geológico, natural.

La Zona Centro de la Ciudad de Querétaro presenta una cantidad mayor de partículas ricas en bario de tamaños menores o iguales a $2.5 \mu\text{m}$ (**Figura 4.7m**) que la Zona Industrial. Esto debido probablemente a la acumulación y resuspensión de partículas provenientes de la Zona Industrial.

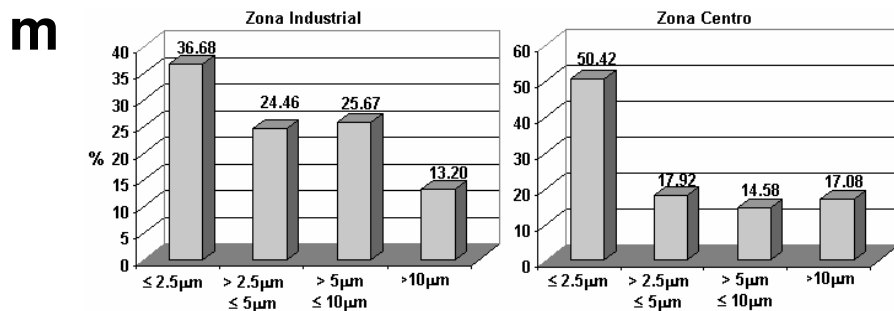
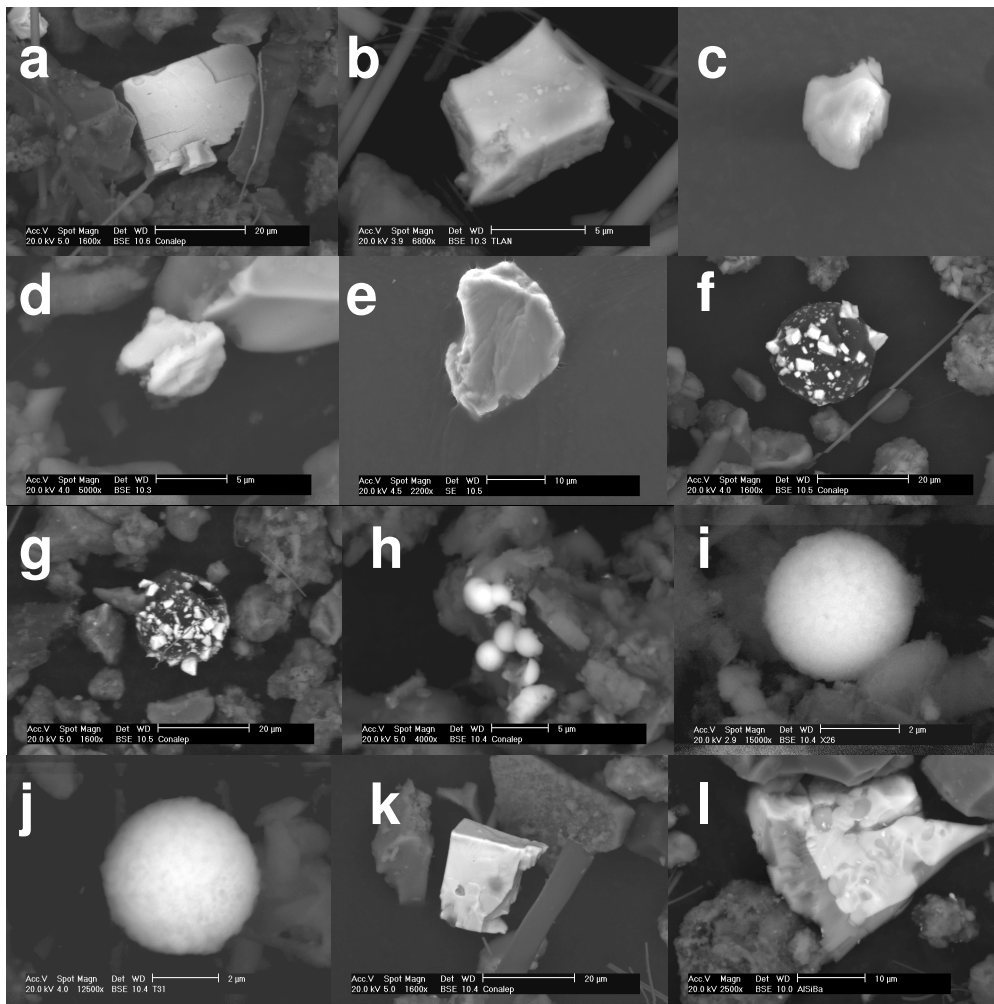


Figura 4.7. Micrografías de partículas de (a) Barita (BaSO_4) identificadas en Qro, (b) barita en ZMVM, (c) barita en SLP, (d) $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$ en Qro y (e) en SLP, (f) y (g) barita incrustada en carbono esférico en Qro, (h) barita esférica en Qro. (i), (j) Ba-O-Zn esférico en ZMVM, (k) BaCO_3 en Qro, (l) BaCO_3 en SLP, (m) distribución de tamaño de partículas ricas en bario.

4.3.4 Partículas ricas en hierro

Las partículas de hierro representan el 12.0 % y el 26.8 % de abundancia relativa en las Zonas Industrial y Centro, respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron principalmente partículas esféricas de óxido de hierro esférico y óxido de hierro asociado a cromo y níquel. De forma minoritaria se identificaron partículas esféricas de hierro metálico y óxido de hierro asociado a zinc, así como formas irregulares de hierro metálico, óxido de hierro y óxido de hierro asociado a cromo y níquel.

Las partículas de óxido de hierro de forma esferoidal identificadas en este estudio (**Figuras 4.8a, 4.8b y 4.8c**) han sido identificadas en el aire de la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.8d**; Aragón, 1999) y ZMVM (**Figura 4.8e**; Labrada, 2006), así como en fuentes fijas de la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.8f**; Campos, 2005). Este tipo de partículas se asocian a procesos de fundición de bronce, aluminio y acero, así como a procesos de soldadura (Campos, 2005).

Las partículas esféricas de óxido de hierro asociado a cromo y níquel (**Figura 4.8g y 4.8h**) corresponden al segundo grupo en el orden de mayor abundancia. Este tipo de partículas sólo se han identificado en la ZMVM (**Figura 4.8i**; Labrada, 2006). La forma esferoidal de este tipo de partículas es característica de procesos antrópicos y es probable que se asocie de igual forma a los procesos de fundición y soldadura antes mencionados, debido a las similitudes de composición química y morfología. Por otro lado, se identificaron partículas de forma cuasi esférica (**Figura 4.8h**) un fenómeno que probablemente se debe a la temperatura de los procesos antrópicos, la cual no es suficiente para alcanzar la forma esférica en las partículas.

Se identificaron partículas irregulares de hierro asociado a cromo y níquel (**Figura 4.8j**), así como hierro metálico (**Figura 4.8k**). Partículas similares se han identificado en la ZMVM (**Figura 4.8l**; Labrada, 2006). Estos tipos de partícula se asocian al desgaste y corrosión de estructuras metálicas expuestas a la intemperie (Aragón, 1999), así como al desgaste de autopartes (Schauer *et al.*, 2006). La Zona Centro presenta mayor abundancia de este tipo de partículas, debido

posiblemente al desgaste de autopartes de vehículos pesados de transporte público.

Las partículas esféricas de óxido de hierro asociado a zinc (**Figuras 4.8m y 4.8n**) se han identificado en emisiones generadas por industrias acereras en San Luis Potosí (**Figura 4.8ñ**). Por lo tanto, este tipo de partícula se asocia a las industrias acereras en la Ciudad de Querétaro, debido a su operación en la Zona Industrial.

Las partículas ricas en hierro de tamaño menor a $2.5 \mu\text{m}$ presentaron una abundancia relativa mayor en la Zona Centro que en la Zona Industrial (**Figura 4.8o**), este comportamiento puede ser el resultado de la acumulación y resuspensión de partículas provenientes de la Zona Industrial. La resuspensión puede ser provocada por el tránsito vehicular durante los periodos de monitoreo, debido a que el equipo de monitoreo se localiza entre las avenidas Zaragoza y Constituyentes, donde el tránsito vehicular es intenso.

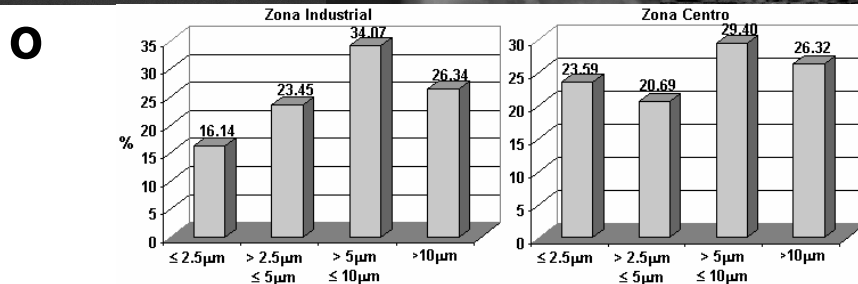
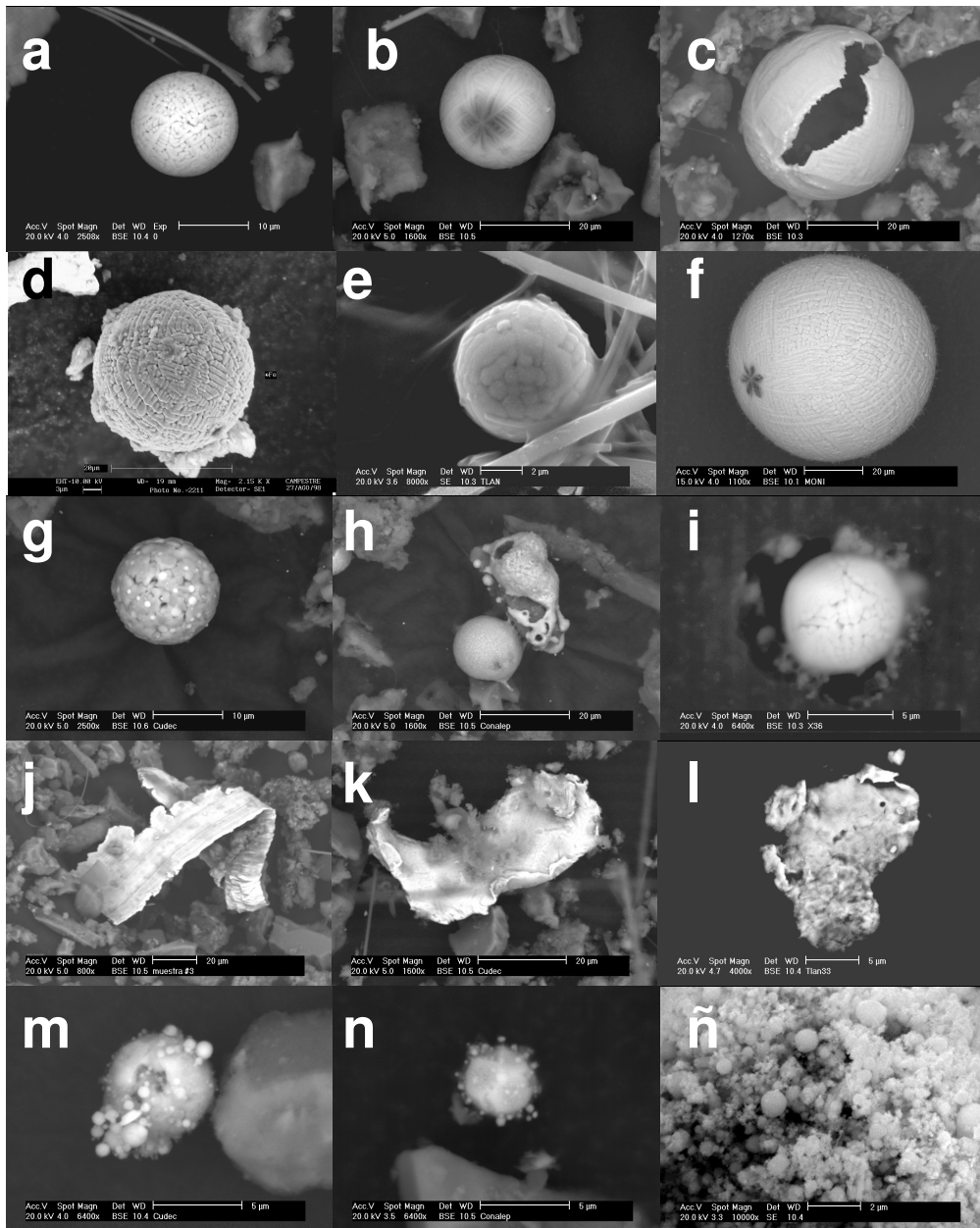


Figura 4.8. Micrografías de partículas de (a), (b) y (c) Fe-O en Qro, (d) Fe-O en SLP, (e) Fe-O en ZMVM, (f) Fe-O en fuente fija, (g) y (h) Fe-O-Cr-Ni en Qro, (i) Fe-O-Cr-Ni en ZMVM, (j) Fe-O-Cr-Ni irregular en Qro, (k) Fe metálico irregular en Qro, (l) Fe metálico irregular en ZMVM. (m) y (n) Fe-O-Zn esférico en Qro, (ñ) Fe-O-Zn esférico en SLP, (o) distribución de tamaño de partículas ricas en hierro.

4.3.5 Partículas ricas en Zinc

Las partículas ricas en zinc representan el 10.2% del total de partículas antrópicas de la Zona Industrial y el 4.4% para la Zona Centro (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas de óxido de zinc de formas redondeadas, aciculares y esféricas.

Las partículas de óxido de zinc de formas redondeadas (**Figura 4.9a**) no han sido identificadas previamente, por lo tanto no es posible establecer una asociación de este tipo de partícula a una fuente emisora. Sin embargo, la morfología característica de este tipo de partículas (puntas redondeadas) sugiere un proceso a temperaturas elevadas, probablemente un proceso de sinterizado. Una variante en la morfología de estas partículas fue la formación de agregados de pequeñas partículas de óxido de zinc (**Figura 4.9b**), esta morfología es característica de un polvo de zinc (**Figura 4.9c**; Guo *et al.*, 2007) formado a partir de óxido de zinc (ZnO) y pentóxido de niobio (Nb₂O₅), el cual es utilizado en dispositivos electrónicos como teléfonos celulares, dispositivos inalámbricos y sistemas de posición global (GPS). Esto debido a sus excelentes propiedades dieléctricas (Guo *et al.*, 2007).

Las partículas de óxido de zinc de forma acicular (**Figuras 4.9d, 4.9e, 4.9f, 4.9g y 4.9h**) presentan características similares a las micro y nanofibras de óxido de zinc desarrolladas en Estados Unidos (**Figura 4.9i**, Cheng *et al.*, 2007). Este tipo de estructuras son utilizadas en la fabricación de nanodispositivos en electrónica y optoelectrónica (Cheng *et al.*, 2007). De igual forma, el óxido de zinc se utiliza en la fabricación de pinturas y pigmentos textiles (en Labrada, 2006), dado que la forma de las partículas de pinturas y pigmentos es generalmente acicular (Di Marco *et al.*, 2006) es posible asociar las partículas identificadas de óxido de zinc a este sector.

Se identificaron partículas esféricas de óxido de zinc (**Figuras 4.9i y 4.9j**). Este tipo de partículas se han identificado en la ZMVM (**Figuras 4.9k y 4.9l**; Labrada, 2006) y se asocia principalmente a las emisiones de industrias metálicas básicas.

La gran mayoría de las partículas de óxido de zinc presentó tamaños menores o iguales a $2.5 \mu\text{m}$ (**Figura 4.9m**). La Zona Centro presenta mayor cantidad de partículas con tamaños menores o iguales a $2.5 \mu\text{m}$, esto puede ser debido a la acumulación y resuspensión de partículas provenientes de la Zona Industrial.

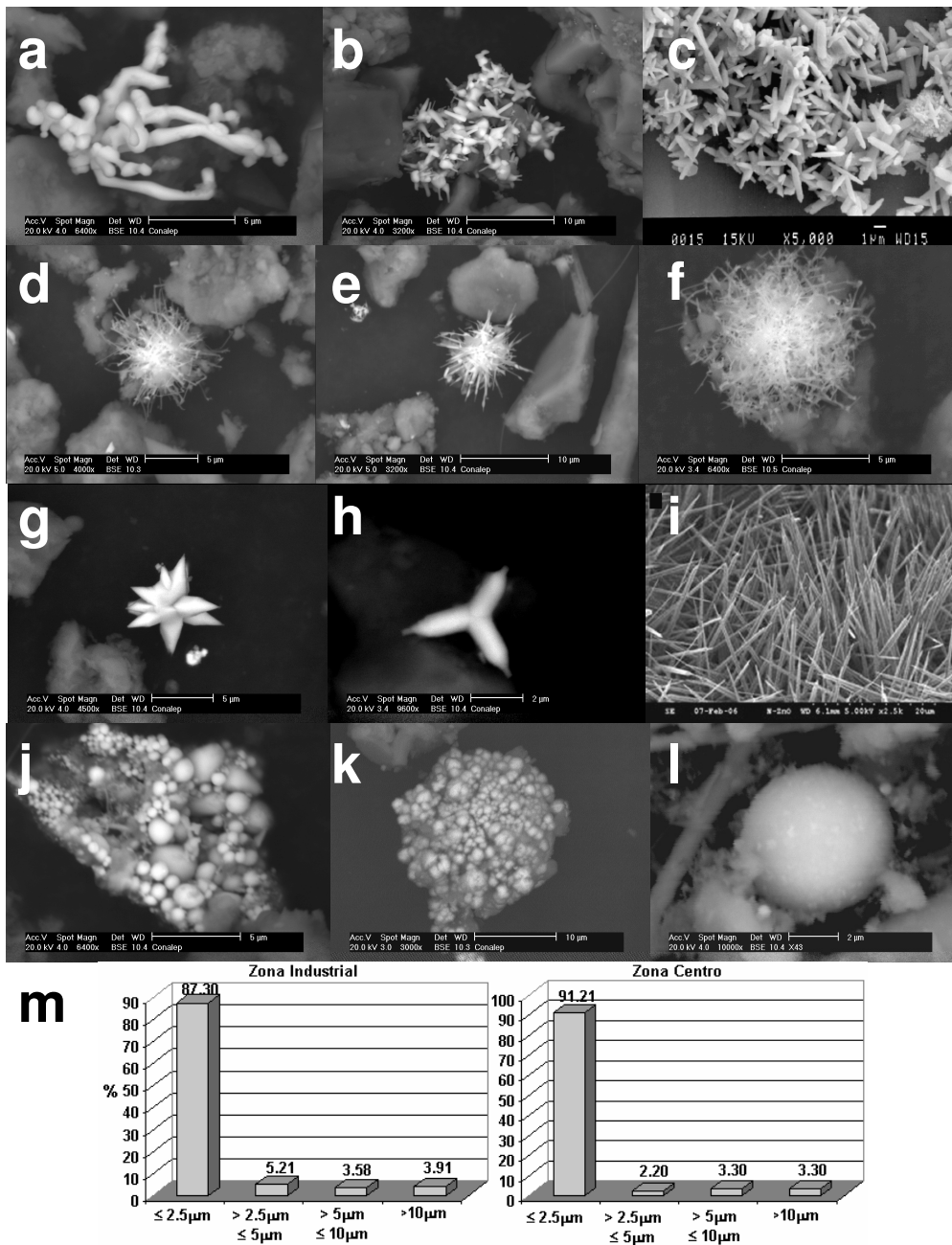


Figura 4.9. Micrografías de partículas de (a) ZnO redondeado en Qro, (b) agregados de ZnO en Qro, (c) agregados de $ZnNb_2O_6$ en China. (d), (e), (f), (g) y (h) óxido de zinc acicular en Qro., (i) óxido de zinc acicular en EE.UU., (j) y (k) óxido de zinc esférico en Qro., (l) óxido de zinc esférico en ZMVM, (m) distribución de tamaño de partículas ricas en zinc.

4.3.6 Partículas ricas en plomo

Las partículas ricas en plomo representan el 6.8% y 5.8% del total de partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron principalmente partículas de sulfuro y óxido de plomo de forma irregular. De forma minoritaria se identificaron partículas esféricas de óxido y sulfato de plomo, así como asociado a elementos como cobre y hierro. Las formas irregulares abarcan partículas de plomo metálico y sulfato de plomo, así como asociado a elementos como S, Sn, Sb, Cu y Fe; galena, cromatos de plomo y óxidos de plomo.

Las partículas de sulfuro de plomo irregular (**Figura 4.10a y 4.10b**) representan la fase de mayor abundancia dentro del grupo de partículas ricas en plomo. Esta fase de plomo sugiere un origen antrópico, ya que difiere de la forma mineral (PbS) denominada galena (**Figura 4.10c**). Esta fase de sulfuro de plomo no se identificó en los estudios previos realizados en la Ciudad de San Luis Potosí y ZMVM.

El segundo grupo de partículas en orden de mayor abundancia corresponde a las partículas de óxido de plomo de forma irregular (**Figura 4.10d**). Este tipo de partícula ha sido identificado en la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.10e**; Campos, 2005) y en la ZMVM (**Figura 4.10f**; Labrada, 2006) donde representó la fase de mayor abundancia en ambos estudios. En estos estudios se establecen asociaciones a diversas fuentes que utilizan procesos de combustión de gasolinas, entre las cuales destaca el tránsito vehicular. Esta asociación se ve apoyada por estudios realizados en estacionamientos cerrados en la Ciudad de México, donde se detectaron concentraciones de plomo del orden de 500 mg/kg (Flores *et al.*, 2002). Además de ha determinado que los pesos de plomo colocado en las llantas para el balanceo de automóviles, se desgastan periódicamente provocando la liberación de partículas de plomo al aire (en Labrada, 2006).

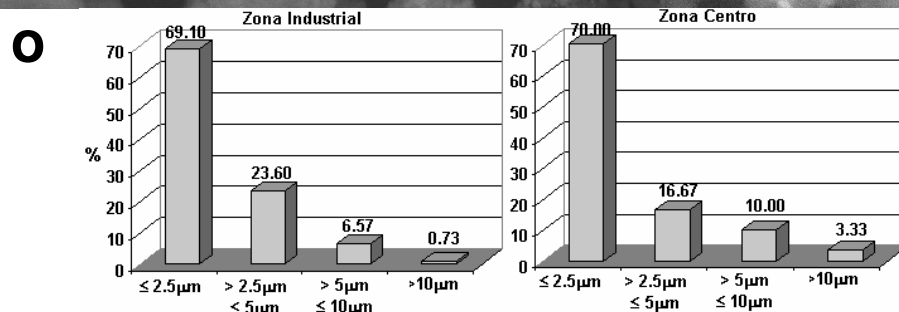
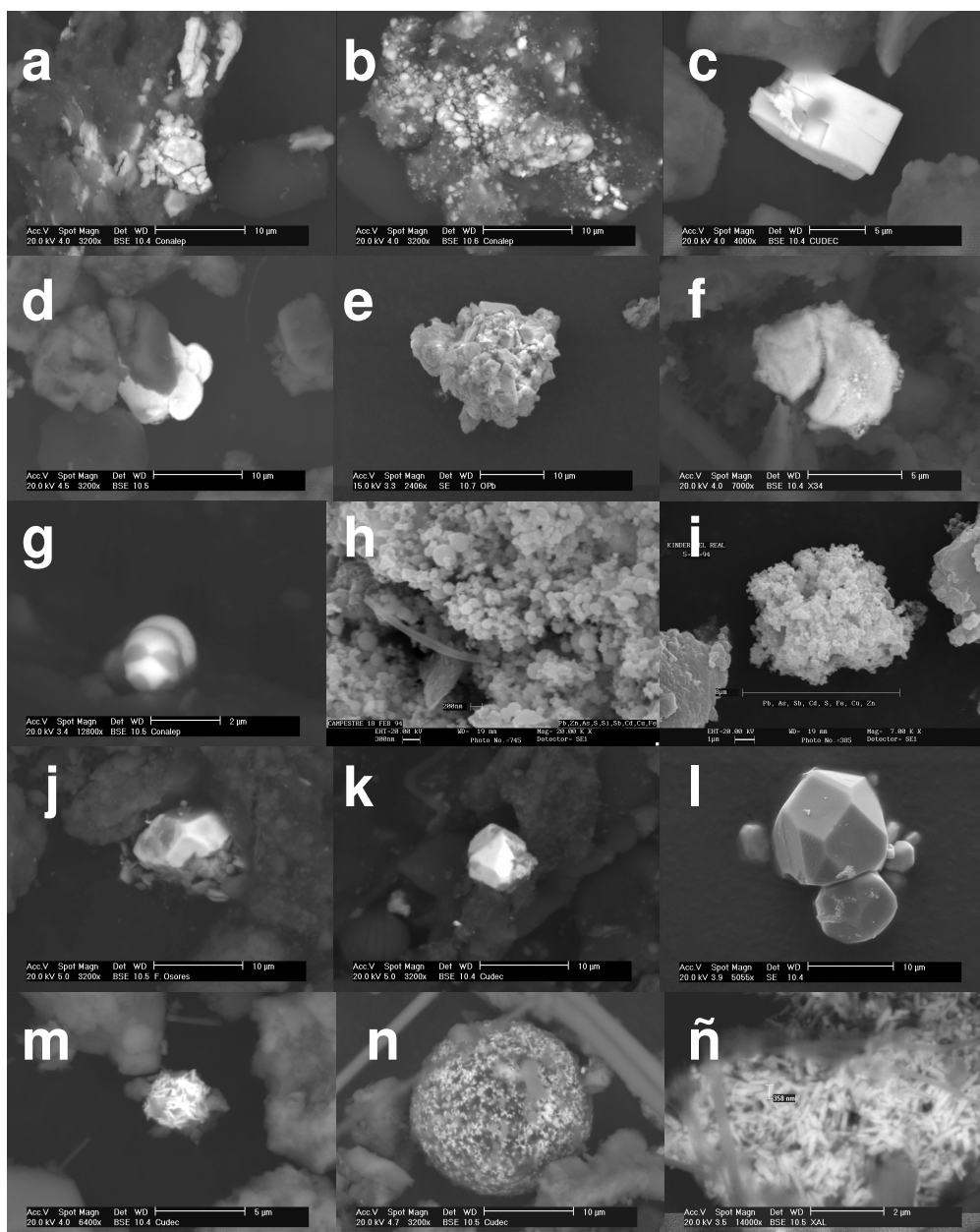


Figura 4.10. Micrografías de partículas de (a), (b) PbS irregular en Qro, (c) PbS mineral en Qro, (d) Pb metálico en Qro, (e) Pb metálico en SLP, (f) Pb metálico en ZMVM, (g) PbSO₄ en Qro, (h), (i) PbSO₄ en SLP, (j) y (k) PbO facetado en Qro, (l) PbO facetado en SLP. (m) y (n) cromato de plomo en Qro, (ñ) cromato de plomo en ZMVM, (o) distribución de tamaño de partículas ricas en plomo.

Las partículas esféricas de sulfato de plomo (**Figura 4.10g**) fueron escasamente identificadas en la Ciudad de Querétaro. Este tipo de partículas fue identificado en la Ciudad de San Luis Potosí como una fase mayoritaria (**Figuras 4.10h y 4.10i**; Aragón, 1999). Estas partículas se asociaron a la escoria resultante de los procesos minero-metalúrgicos de la ciudad. Este tipo de actividad no es propia de la Ciudad de Querétaro, por lo tanto se establece la posibilidad del arrastre por el viento de este tipo de partícula desde la Ciudad de San Luis Potosí hasta la Ciudad de Querétaro.

Las partículas de óxido de plomo de formas facetadas identificadas en la Ciudad de Querétaro (**Figura 4.10j y 4.10k**) se identificaron de igual forma en procesos de reciclaje de baterías de automóviles (**Figura 4.10l**; Campos, 2005) en la Ciudad de San Luis Potosí.

Las partículas de cromato de plomo de formas aciculares identificadas en la Ciudad de Querétaro (**Figura 4.10m y 4.10n**) han sido identificadas previamente en la ZMVM (**Figura 4.10ñ**; Labrada, 2006) donde fueron asociadas al sector automotriz, esto debido a la presencia de cromatos de plomo en pigmentos utilizados en el recubrimiento de automóviles. Una asociación más de este tipo de partículas a pigmentos es la presencia de cromato de plomo en la pintura amarilla utilizada para delinear las líneas de tránsito (en Labrada, 2006). Para este tipo de partícula se presentó un fenómeno similar que para las partículas de bario, se presentan incrustadas en partículas esféricas de carbono (**Figura 4.10n**), las partículas de carbono suelen transportar diversos compuestos en su superficie (Diociaiuti *et al.*, 2001). Tal es el caso de la barita y del cromato de plomo en este estudio.

La distribución de tamaño de las partículas ricas en plomo se muestra en la **Figura 4.10o**. Se observa que la gran mayoría de las partículas presentan tamaños menores o iguales a 2.5 μm para ambas zonas de estudio.

4.3.7 Partículas ricas en níquel

Las partículas ricas en níquel representan el 0.7% y 1.1% del total de partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1**

y 4.3). Se identificaron principalmente partículas esféricas de níquel asociado a vanadio. De forma minoritaria se identificaron partículas esféricas e irregulares de níquel metálico, así como asociado a cobre.

Las partículas esféricas de níquel asociado a vanadio (**Figura 4.11a**) fueron identificadas de igual forma en la ZMVM (**Figura 4.11b**; Labrada, 2006) donde se asociaron a la quema de combustóleo. Partículas similares fueron identificadas en un estudio realizado en Tokio, Japón (**Figura 4.11c**; Okuda *et al.*, 2007), estas partículas fueron asociadas de igual forma a la quema de combustóleo, aún cuando no presentaron formas esféricas. Entre estos estudios existe una variabilidad en cuanto a la morfología de las partículas identificadas de Ni-V, esto debido probablemente a que la temperatura del proceso de combustión es determinante en la morfología de las partículas, adquiriendo formas esféricas e irregulares. Una razón más para sostener esta asociación es la identificación de trazas de níquel y vanadio en las partículas esféricas porosas de carbono y azufre (**Figura 4.5c**), las cuales son generadas por la quema de combustóleo.

Las partículas esféricas de níquel asociado a cobre (**Figuras 4.11d y 4.11e**) no han sido identificadas en estudios previos, no obstante la forma esférica de este tipo de partículas las sitúa dentro de las generadas por procesos de fundición. La misma asociación es aplicable a las partículas esféricas de níquel metálico (**Figura 4.11f**). Las partículas irregulares de níquel metálico (**Figura 4.11g, 4.11h y 4.11i**) no han sido identificadas en los estudios previos reportados en la literatura revisada. Finalmente, la distribución de tamaño de las partículas ricas en níquel se muestra en la **Figura 4.11j**, se observa que ambas zonas de estudio presentan partículas de tamaño menor o igual a 5 μm .

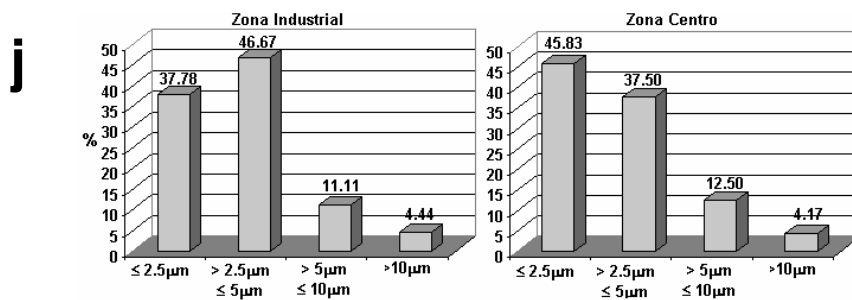
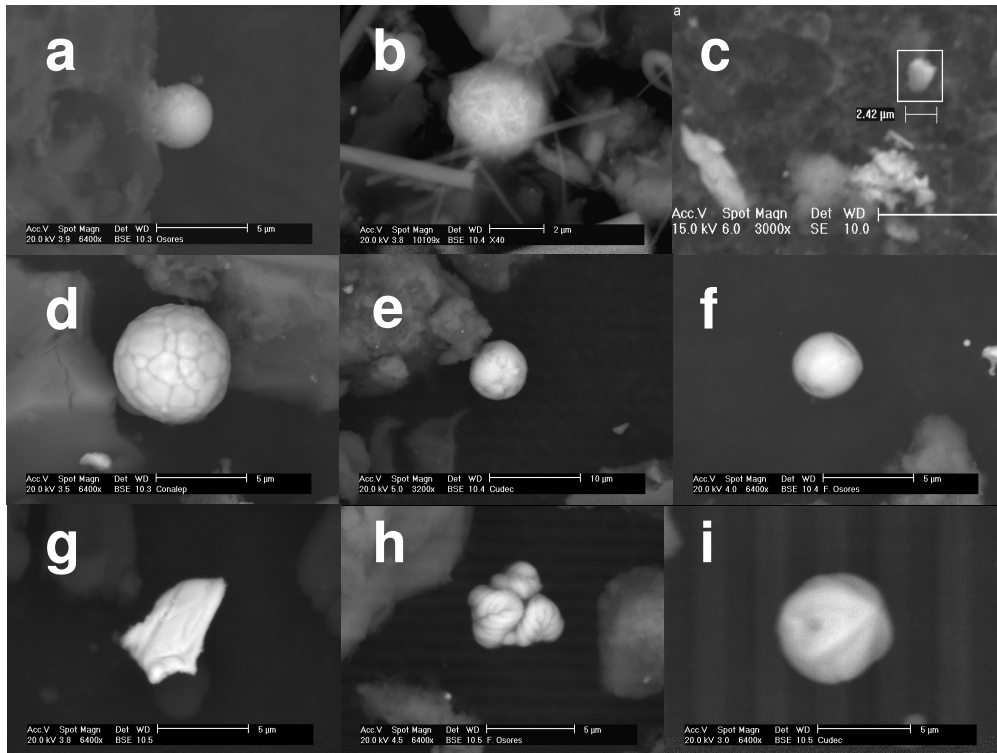


Figura 4.11. Micrografías de partículas de (a) Ni-V en Qro, (b) Ni-V en ZMVM, (c) Ni-V en Tokio. (d), (e) níquel-cobre en Qro, (f) níquel metálico en Qro. (g), (h), (i) níquel metálico irregular en Qro, (j) distribución de tamaño de partículas ricas en níquel.

4.4 Descripción de los grupos minoritarios de aeropartículas antrópicas

Los grupos minoritarios de partículas del polvo atmosférico se muestran en el **Cuadro 4.5**. Cada grupo de partículas representa un porcentaje menor al 1% del total de partículas analizadas en las Zonas industrial y Centro.

Cuadro 4.5. Grupos minoritarios de aeropartículas antrópicas.

Partículas ricas en:		
Cadmio (Cd)	Zirconio (Zr)	Bismuto (Bi)
Vanadio (V)	Calcio (Ca)	Titanio (Ti)
Estaño (Sn)	Arsénico (As)	Estroncio (Sr)
Cerio (Ce)	Antimonio (Sb)	Selenio (Se)
Molibdeno (Mo)	Manganeso (Mn)	Cromo (Cr)
Tungsteno (W)	Mercurio (Hg)	

En la Zona industrial se identificaron solamente grupos de partículas ricas en manganeso, mercurio, bismuto, titanio, estroncio, selenio y cromo. En la Zona Centro se identificaron solamente grupos de partículas ricas en cadmio y molibdeno. El resto de los grupos de partículas se identificaron en ambas zonas de estudio. Sin embargo, esta situación no indica que los grupos de partículas identificados en cada zona sean característicos de dichas zonas, debido a la cantidad tan pequeña de partículas identificadas.

Las partículas ricas en cadmio representan el 0.44% de las partículas analizadas de la Zona Centro (**Cuadro 4.3**). Se identificaron partículas de óxido de cadmio asociado a elementos como S y Fe (**Figuras 4.12a y 4.12b**), esta fase no se ha identificado con anterioridad, solamente se ha identificado cadmio en solución sólida en fases minerales como esfalerita (**Figura 4.12c**; Aragón, 1999).

Las partículas ricas en vanadio representan el 0.4% y 0.24% de las partículas analizadas en la Zona industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas de vanadio con trazas de níquel de morfología esférica e irregular (**Figuras 4.12d y 4.12e**). Al igual que las partículas de níquel con trazas de vanadio, este tipo de partículas pueden asociarse a la quema de combustóleo, debido a las similitudes de morfología y composición química.

Las partículas ricas en estaño representan el 0.38% y 0.19% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1**

y 4.3). Se identificaron partículas del mineral casiterita (SnO_2), partículas esféricas de óxido de estaño (**Figura 4.12f**), así como formas irregulares de óxido de estaño asociado a elementos como S, Pb, Cu y Fe (**Figura 4.12g**). La casiterita es un mineral accesorio característico de rocas volcánicas (Aragón, 1999), y es probable que su presencia en el aire sea debida a la erosión provocada por el viento de este tipo de material. Las partículas de óxido de estaño de forma esférica sugieren su origen en procesos de fundición, posiblemente procesos de soldadura y fabricación de peltre (ATSDR, 2005). Las partículas irregulares de óxido de estaño asociado a S, Pb, Cu y Fe, sugieren su origen en procesos antrópicos, debido a las formas irregulares y a las asociaciones presentadas con elementos pesados.

Las partículas ricas en cerio representan el 0.22% y 0.19% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas de óxido de cerio asociado a hierro de formas esféricas (**Figura 4.12h**) e irregulares (**Figura 4.12i**). Partículas similares de cerio esférico e irregular fueron identificadas en la ZMVM (**Figuras 4.12j y 4.12k**; Labrada, 2006). Sin embargo, estas partículas presentan lantano como elemento asociado. En la Ciudad de México se han realizado estudios enfocados a la disminución de las emisiones de óxidos de nitrógeno empleando convertidores catalíticos, estos convertidores utilizan catalizadores a base de elementos como cerio y zirconio (Vázquez *et al.*, 2002). Considerando estos estudios es probable que las partículas esféricas de cerio se asocien a las emisiones provenientes del tránsito vehicular con este tipo de convertidor catalítico.

Las partículas ricas en molibdeno representan el 0.19% de las partículas analizadas en la Zona Centro (**Cuadro 4.3**). Se identificaron solamente partículas de MoS_2 (**Figura 4.12l**), cuya forma y composición química corresponden a la del mineral molibdenita.

Las partículas ricas en tungsteno representan el 0.17% y 0.19% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron únicamente partículas irregulares de tungsteno metálico (**Figura 4.12m**) las cuales coinciden con las identificadas previamente en la ZMVM (**Figura 4.12n**; Labrada, 2006). Este tipo de partículas difiere química y

morfológicamente de la forma mineral scheelita (CaWO_4) por lo cual el posible origen de estas partículas es antrópico.

Las partículas ricas en zirconio representan el 0.13% y 0.34% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas de ZrSiO_4 (**Figura 4.12ñ**), cuyas características fisicoquímicas corresponden al mineral zircón. Se identificaron también partículas irregulares de óxido de zirconio asociado a cerio (**Figura 4.12o**). Es probable que estas partículas provengan de las emisiones del tránsito vehicular, debido a determinados tipos de convertidores catalíticos (Vázquez *et al.*, 2002). Es posible también que el contenido de cerio presente en este tipo de partículas, se asocie al mineral ceranita (CeO_2).

Las partículas ricas en calcio representan el 0.13% y 0.44% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron únicamente partículas esféricas de fosfato de calcio (**Figura 4.12p**). Estas partículas difieren del mineral apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$] en la morfología, por lo que el posible origen de las partículas esféricas es antrópico. Este tipo de partícula se ha identificado en la Ciudad de San Luis Potosí (**Figura 4.12q**; Campos, 2005), donde se asoció a la quema de aceite automotriz usado.

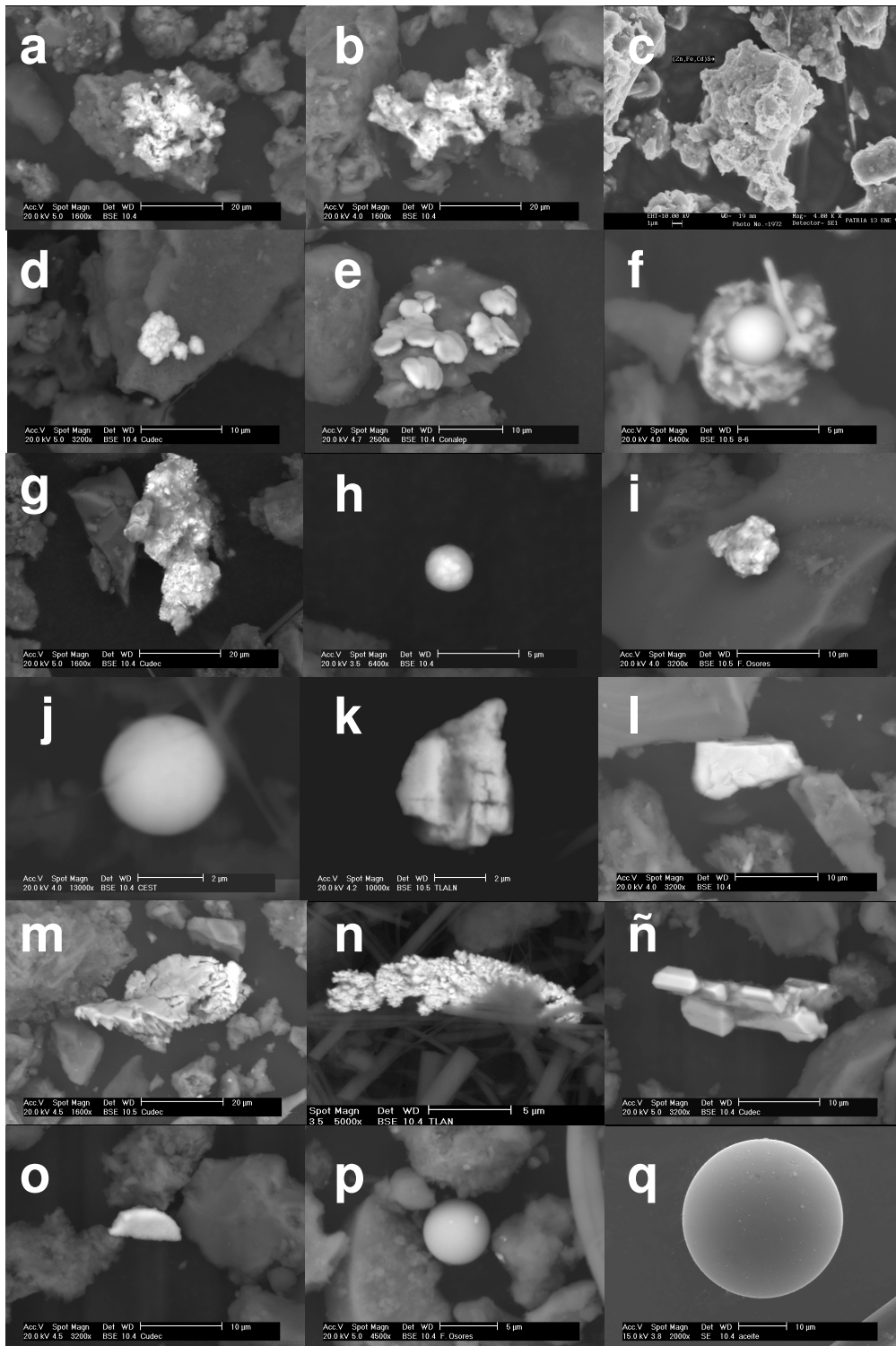


Figura 4.12. Micrografías de partículas de (a), (b) Cd-O-Fe-S en Qro, (c) esfalerita con trazas de cadmio en SLP, (d), (e) vanadio-níquel en Qro, (f) óxido de estaño esférico. (g) Sn irregular asociado a S-Pb-Cu-Fe en Qro, (h) Ce-Fe-O esférico en Qro, (i) Ce-Fe-O irregular en Qro, (j) Ce-La-O esférico en ZMVM, (k) Ce-La-O irregular en ZMVM, (l) Molibdenita en Qro, (m) W en Qro, (n) W en ZMVM, (ñ) $ZrSiO_4$ en Qro, (o) Zr-Ce-O en Qro, (p) fosfato de calcio en Qro, (q) fosfato de calcio en SLP.

Las partículas ricas en arsénico representan el 0.10% y 0.19% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas de trióxido de arsénico de forma esférica y octaédrica (**Figura 4.13a**), así como de la fase mineral arsenopirita (FeAsS). En la ciudad de San Luis Potosí se han identificado partículas de trióxido de arsénico de forma octaédrica (**Figuras 4.13b y 4.13c**), estas partículas se asociaron a refinerías de cobre y/o zinc (Aragón, 1999). Debido a la condensación y cristalización tan regular de este tipo de partículas se supuso que provenían de gases emitidos por procesos de estas industrias. Esta suposición se apoya en la sublimación presentada por las partículas de trióxido de arsénico (**Figura 4.13a**) al calor del haz de electrones del SEM-EDS, pudiéndose llevar a cabo el proceso inverso dando lugar a cristales regulares (Aragón, 1999). En la Ciudad de Querétaro no se realiza este tipo de actividad generadora de partículas de trióxido de arsénico, por lo que se supone que provienen, por arrastre del viento, de lugares donde se realiza este tipo de actividad, como la Ciudad de San Luis Potosí.

Las partículas ricas en antimonio representan el 0.10% y 0.19% de las partículas analizadas en la Zona Industrial y Centro respectivamente (**Cuadros 4.1 y 4.3**). Se identificaron partículas irregulares de antimonio metálico, así como óxido de antimonio asociado a hierro. Este tipo de partículas no se presenta de forma natural, lo cual hace suponer que su origen es antrópico.

Las partículas ricas en manganeso representan el 0.07% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron partículas de manganeso elemental que sugieren un origen antrópico, así como del mineral pirolusita (**Figura 4.13d**). En San Luis Potosí se identificaron partículas de MnO₂ que no concuerdan con la morfología de la pirolusita (**Figura 4.13e**; Aragón, 1999).

Las partículas ricas en mercurio representan el 0.05% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron únicamente partículas de mercurio asociado a azufre (**Figuras 4.13f y 4.13g**), esta fase se relaciona con el mineral cinabrio (HgS).

Las partículas ricas en bismuto representan el 0.03% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron únicamente partículas de bismuto asociado a azufre (**Figura 4.13h**), estas partículas se asocian al mineral bismutina (Bi_2S_3).

Las partículas ricas en titanio representan el 0.03% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron únicamente partículas de óxido de titanio de morfología característica, la cual corresponde al mineral rutilo (TiO_2). En la ZMVM la fase mineral de rutilo identificada de forma mayoritaria fue la ilmenita (**Figura 4.13i**; Labrada, 2006). Se identificaron también partículas de óxido de titanio de forma esférica (**Figura 4.13j**; Labrada, 2006), las cuales se asociaron a procesos de pailería y pigmentos (probablemente pigmentos automotrices).

Las partículas ricas en estroncio representan el 0.02% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron únicamente partículas de carbonato de estroncio (**Figuras 4.13k y 4.13l**), las cuales se asocian al mineral estroncianita.

Las partículas ricas en selenio representan el 0.02% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron únicamente partículas de selenio elemental.

Las partículas ricas en cromo representan el 0.02% de las partículas analizadas en la Zona Industrial (**Cuadro 4.1**). Se identificaron únicamente partículas de óxido de cromo de forma esférica, las cuales provienen probablemente de la industria del cromado.

Finalmente, en este estudio se caracterizaron por SEM-EDS partículas atmosféricas de la Ciudad de Querétaro y se establecieron asociaciones con posibles fuentes emisoras, considerando estudios previos reportados en la literatura. Sin embargo, no se logró asociar una cantidad considerable de partículas atmosféricas a un tipo de fuente emisora, debido a la falta de estudios de caracterización en fuentes emisoras. Es por tanto necesario realizar este tipo de estudios en la Ciudad de Querétaro, para complementar y verificar las asociaciones realizadas en este estudio.

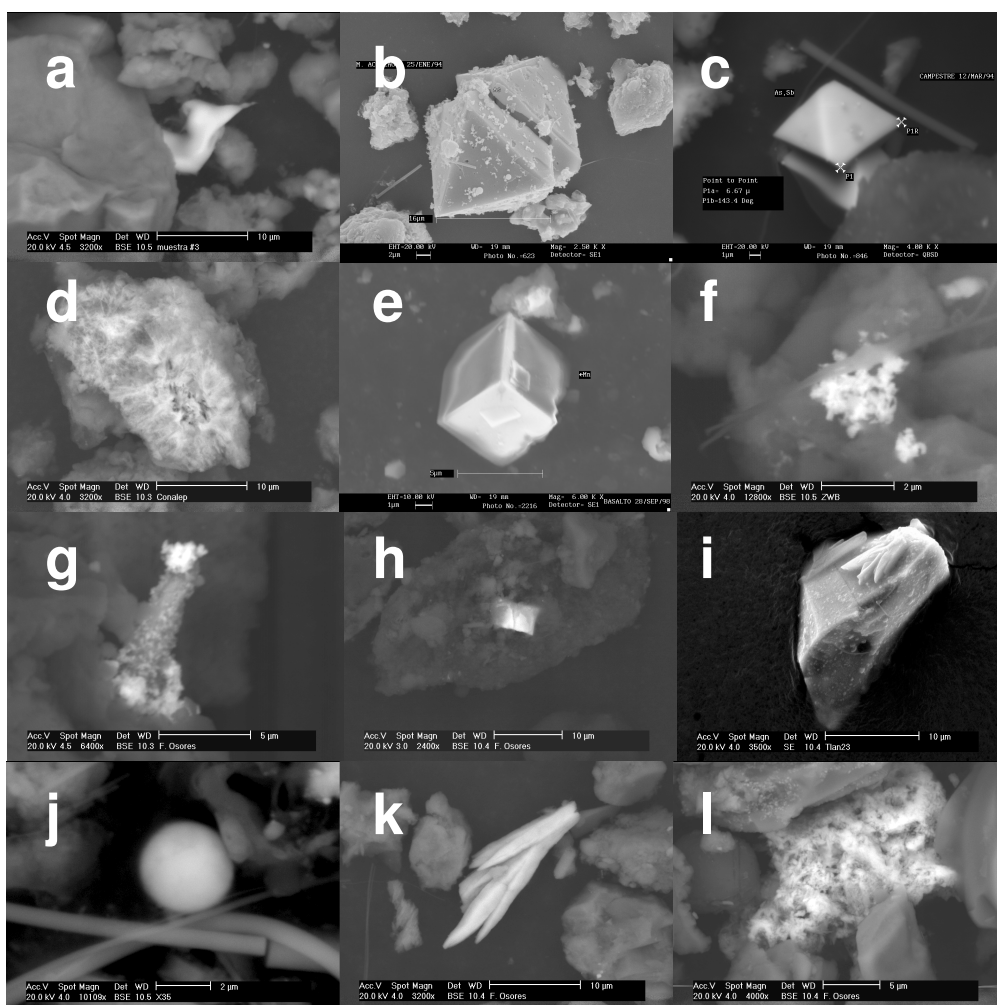


Figura 4.13. Micrografías de partículas de (a) trióxido de arsénico en Qro, (b), (c) trióxido de arsénico en SLP, (d) pirolusita en Qro, (e) óxido de manganeso en SLP, (f) y (g) HgS en Qro, (h) Bismutina en Qro, (i) ilmenita en ZMVM, (j) óxido de titanio en ZMVM, (k) y (l) carbonato de estroncio en Qro.

V. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

1. Durante el periodo de estudio (julio de 2005 – junio de 2006), la Ciudad de Querétaro presentó niveles de PST que sobrepasan el límite máximo permitido de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$, establecido por la norma NOM-025-SSA1-1993 de la Secretaría de Salud. Dichos niveles de PST solamente son sobrepasados en la estación seca (enero, febrero, marzo y abril), presentando niveles por debajo del máximo permitido en la estación húmeda.
2. La Zona industrial de la Ciudad de Querétaro presenta contaminación atmosférica por partículas antrópicas mayoritariamente de tamaño menor o igual a $10 \mu\text{m}$ (excepto las partículas de C-S-V-Ni), compuestas principalmente por cobre, carbono elemental, bario, hierro, zinc, plomo y níquel; y de forma minoritaria, vanadio, estaño, cerio, tungsteno, zirconio, calcio, arsénico, antimonio, manganeso, mercurio, bismuto, titanio, estroncio, selenio y cromo. De igual forma, la Zona Centro presenta contaminación atmosférica por partículas antrópicas mayoritariamente de tamaño menor o igual a $10 \mu\text{m}$ (excepto las partículas de C-S-V-Ni), compuestas principalmente por carbono elemental, hierro, cobre, bario, plomo, zinc y níquel; y de forma minoritaria, calcio, cadmio, zirconio, vanadio, cerio, estaño, tungsteno, arsénico, antimonio y molibdeno.
3. La gran mayoría de las aeropartículas identificadas en la Zona Industrial, se identificaron de igual forma en la Zona Centro. Considerando las similitudes entre composición química, morfología y tamaño de partícula, así como la dirección de vientos de la Zona Industrial y de la Zona Centro, se concluye que la Zona Industrial afecta directamente a la Zona Centro con aeropartículas de tipo antrópico de tamaños menores o iguales a $10 \mu\text{m}$, principalmente. Siendo mayor esta afectación durante la estación seca que durante la estación húmeda.

4. Los resultados por SEM-EDS revelaron que el 73.24% y 60.8% del total de aeropartículas analizadas en las Zonas Industrial y Centro respectivamente, corresponden a partículas con tamaños menores o iguales a 10 μm . De los grupos mayoritarios de aeropartículas de la Zona Industrial, las aeropartículas ricas en cobre, zinc y plomo, presentan el 66.43%, 87.30% y 69.10% de partículas con tamaños menores o iguales a 2.5 μm . Para la Zona Centro, de los grupos mayoritarios, las aeropartículas ricas en cobre, zinc y plomo presentan el 57.29%, 91.21% y 70.0% de partículas con tamaños menores o iguales a 2.5 μm . Este tipo de aeropartículas puede representar un riesgo para la población, debido a que los grupos mayoritarios de partículas presentan tamaños menores o iguales a 2.5 μm .
5. La gran mayoría de las partículas asociadas a una fuente emisora corresponden a partículas provenientes del sector industrial. Por lo tanto, se presume que el sector industrial es el principal emisor de partículas antrópicas en la Ciudad de Querétaro.

5.2 Recomendaciones

1. Establecer una red de monitoreo de partículas PM_{10} en la Ciudad de Querétaro. Con una red de monitoreo de este tipo, se podría complementar la información fisicoquímica obtenida por SEM-EDS, incorporando técnicas de análisis global (como la Espectroscopia de Absorción Atómica) a las muestras obtenidas. Teniendo así, información de las concentraciones en el aire de partículas respirables. Ampliando la posibilidad de realizar estudios posteriores, enfocados a la exposición de la población a determinados niveles y concentraciones de partículas PM_{10} .
2. Realizar estudios de caracterización fisicoquímica por SEM-EDS, a las emisiones provenientes de fuentes fijas en los principales parques industriales de la Ciudad de Querétaro, con la finalidad de identificar de forma directa las fuentes emisoras de contaminación, y así establecer medidas correctivas que conlleven a la mejora de la calidad del aire de la ciudad.

Referencias

- Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Vincent, R., 1999. Pulmonary toxicity of an atmospheric particle sample is due to the soluble fraction. *Toxicology Applied Pharmacology* 157, 43-50.
- Alastuey, A., Querol, X., Castillo, S., Escudero, M., Avila, A., Cuevas, E., Torres, C., Romero, P. M., Exposito, F., García, O., Díaz, J. P., Van Dingenen, R., Putaud, J. P., 2005. Characterisation of TSP and PM_{2.5} at Izaña and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain) during a Saharan dust episode (July 2002). *Atmospheric Environment* 39, 4715-4728.
- Analitis, A., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Samoli, E., Nikoloulopoulos, A.K., Petasakis, Y., Touloumi, G., Pekkanen, J., 2006. Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality. *Epidemiology*, 17 (2), 230-233.
- Aragón, A., Torres, G., Monroy, M., Luszczewski, A., Leyva, R., 2000. Scanning electron microscopy and statistical analysis of suspended heavy metal particles in San Luis Potosí, Mexico. *Atmospheric Environment* 34, 4103-4112.
- Aragón, A., 1999. Caracterización fisicoquímica y morfológica del polvo suspendido en el aire de la Ciudad de San Luis Potosí. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- ATSDR, Estaño y compuestos de estaño, 2005. Disponible en: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts55.html
- Bérubé, K.A., Jones, T.P., Williamson, B.J., Winters, C., Morgan, A.J., Richards, R.J., 1998. Physicochemical characterization of diesel exhaust particles: Factors for assessing biological activity. *Atmospheric Environment* 33, 1599-1614.
- Bogo, H., Otero, M., Castro, P., Ozafrán, M.J., Kreiner, A., Calvo, E., Negri, M., 2002. Study of atmospheric particulate matter in Buenos Aires city. *Atmospheric Environment* 37, 1135-1147.
- Campos, A., 2005. Caracterización de partículas contenidas en el polvo atmosférico en el entorno de la Zona Industrial de San Luis Potosí. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Castillejos, M., Borja, V., Dockery, D., Gold, D., Loomis, D., 2000. Airborne coarse particles and mortality. *Inhalation Toxicology*, 12 (1): 61-72.

- Cheng, H., Cheng, J., Zhang, Y., Wang, Q.M., 2007. Large-scale fabrication of ZnO micro-and nano structures by microwave thermal evaporation deposition. *Journal of Crystal Growth* 299, 34-40.
- Chong, N., Sivaramakrishnan, K., Wells, M., Jones, K., 2002. Characterization of inhalable particulate matter in ambient air by Scanning Electron Microscopy and Energy Disperse X ray Analysis. *Environmental, Agricultural and Food Chemistry*.
- Chow, J., 1995. Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standards for Suspended Particles. *Air & Waste Management Association* 45, 320-382.
- Di Marco, W., Elizalde, G., Faid, Y., Pravata, R., Rojas E., 2006. Cátedra de industrias y servicios, industria de la pintura. Universidad Nacional de Cuyo. Disponible en:
<http://fing.uncu.edu.ar/catedras/archivos/industrias/2006Pinturas.pdf>
- Diociaiuti, M., Balduzzi, M., De Berardis, B., Cattani, G., Stacchini, G., Ziemacki, G., Marconi, A., Paoletti, L., 2001. The two PM_{2.5} (Fine) and PM_{2.5-10} (Coarse) fractions: evidence of different biological activity. *Environmental Research* A86, 254-262.
- Donaldson, K., Gilmour, M., MacNee, W., 2000. Asthma and PM₁₀. *Respiratory Research* 1, 12-15.
- Donaldson, K., MacNee, W., 1998. The mechanism of lung injury caused by PM₁₀. *Issues in Environmental Science and Technology* 10, 21-32.
- EPA (Environmental Protection Agency), August 2007. National Ambient Air Quality Standards. Disponible en <http://www.epa.gov/air/criteria.html#1>.
- EPA (Environmental Protection Agency), March 2006a. Basic Concepts in Environmental Science, Particle size categories. Disponible en:
<http://www.epa.gov/eogapti1/module3/category/category.htm>
- EPA (Environmental Protection Agency), March 2006b. Basic Concepts in Environmental Science, Aerodynamic diameter. Disponible en:
<http://www.epa.gov/eogapti1/module3/diameter/diameter.htm>
- EPA (Environmental Protection Agency), October 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I, pp 2-17 to 2-52.
- Flores, J., Vaca, M., López, R., González, A., Barcelo, M., 2002. Metales tóxicos en polvos de estacionamientos cerrados. XIII Congreso Nacional de la FEMISCA. Disponible en:
<http://www.femisca.org/publicaciones/XIIIcongreso/XIIICNIS151.pdf>

- Grantz, D.A., Garner, J.H.B., Johnson, D.W., 2003. Ecological effects of particle matter. *Environmental International* 29, 213-239.
- Guo, L., Dai, J., Tian, J., Zhu, Z., He, T., 2007. Molten salt synthesis of ZnNb₂O₆ powder. *Materials Research Bulletin* 42, 2013-2016.
- Harrabi, I., Rondeau, V., Dartigues, J.F., Tessier, J.F., Filleul, L., 2006. Effects of particulate air pollution on systolic blood pressure: A population-based approach. *Environmental Research* 101 (1), 89-93.
- Harrison, R.M., Yin, J., 2000. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. *The Science of the Total Environment* 249, 58-101.
- INE (Instituto Nacional de Ecología), 2004. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire. Disponible en: <http://sinaica.ine.gob.mx>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2006a. Agenda Estadística de los Estados Unidos Mexicanos. Disponible en: http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/agenda/2006/Agenda2006.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2006b. Resultados definitivos del II conteo de población y vivienda 2005 para el Estado de Querétaro Arteaga. Comunicado número 108/06.
- Jeol AST. A guide to Scanning Microscope Observation.
- Jusot, J.F., Lefranc, A., Cassadou, S., D'Helf-Blanchard, M., Eilstein, D., Chardon, B., Filleul, L., Medina, S., 2006. Estimating mortality attributable to PM₁₀ particles in 9 French cities participating in the European programme Apheis. *Santé Publique* 18 (1), 71-84.
- Kaiser, R., Romieu, I., Medina, S., Schwartz, J., Krzyzanowski, M., Künzli, N., 2004. Air pollution attributable postneonatal infant mortality in U.S. metropolitan areas: a risk assessment study. *Environmental Health: A Global Access Science Source* 3.
- Karue, J., Kinyua, A.M., El-Busaydi, A.H.S., 1992. Measured components in total suspended particulate matter in Kenyan urban area. *Atmospheric Environment* 26B (4), 505-511.
- Klesel J., 2000. How the SEM Works. Material Science and Engineering Department, Iowa State University. Disponible en: <http://www.mse.iastate.edu/microscopy/path2.html>

- Know, H., Cho, S., Chun, Y., Lagarde, F., Pershagen, G., 2002. Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environmental Research A90*, 1-5.
- Krueger, B., Grassian, V., Ledema, M., Cowin, J., Laskin, A., 2003. Probing heterogeneous chemistry of individual atmospheric particles using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray analysis. *Analytical Chemistry* 75, 5170-5179.
- Labrada, G.J., 2006. Caracterización de partículas del polvo atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Lannefors, H., Hansson, H., Granat, L., 1983. Background aerosol composition in southern Sweden-fourteen micro and macro constituents measured in seven particle size intervals at one site during one year. *Atmospheric Environment* 17, 87-101.
- Menéndez, M., Gil, J.I., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., 2003. Análisis de contribución de fuentes en PM10 y PM2.5 en un área de fondo urbano con influencia de emisiones industriales (Abanto, Vizcaya).
- Miggon, C., Caccia, J.L., 1990. Separation of Anthropogenic and Natural Emissions of Particulate Heavy Metals in the Western Mediterranean Atmosphere. *Atmospheric Environment* 24, 399-405.
- Mineral spectroscopy server, California Institute of Technology, 2007. Disponible en:
http://minerals.caltech.edu/Mineral_Pictures/Quartz_impaled.gif
- Mineralogiche e Petrologiche, 2002. Centro studi per la Geodinamica delle Catene Collisionali, Università degli Studi di Torino - Dipartimento di Scienze. Disponible en: http://www.dsmp.unito.it/ICP/ICP_HP.html
- Moreno, T., Gibbons, W., Jones, T., Richards, R., 2003. The geology of ambient aerosols: characterising urban and rural/coastal silicate PM10-2.5 and PM2.5 using high-volume cascade collection and scanning electron microscopy. *Atmospheric Environment* 37, 4265-4276.
- Noll, K., Yuen, P., Fang, Y., 1990. Atmospheric coarse particulate concentrations and dry deposition fluxes for ten metals in two urban environments. *Atmospheric Environments* 24A, 903-908.
- Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Secretaría de Salud. México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

- O'Neill, M.S., Loomis, D., Borja Aburto, V.H., Gold, D., Hertz-Picciotto, I., Castillejos, M., 2004. Do associations between airborne particles and daily mortality in Mexico City differ by measurement method, region, or modeling strategy?. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 14 (6), 429-439.
- Okuda, T., Nakao, S., Katsuno, M., Tanaka, S., 2007. Source identification of nickel in TSP and PM2.5 in Tokyo, Japan. *Atmospheric Environment*. Article In Press.
- Organización Mundial de la Salud, 2005. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, 11-23. Disponible en:
http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Paoletti, L., De Berardis, B., Arizza, L., Passacantando, M., Inglessis, M., Mosca, M., 2003. Seasonal effects on the physico-chemical characteristics of PM2.1 in Rome: a study by SEM and XPS. *Atmospheric Environment* 37, 4869-4879.
- Paoletti, L., De Berardis, B., Diociaiuti, M., 2001. Pshysico-chemical characterization of the inhalable particulate matter (PM10) in an urban area: an analysis of the seasonal trend. *The Science of the Total Environment* 292, 265-275.
- Paoletti, L., Diociaiuti, M., De Berardis, B., Santucci, S., Lozzi, L., Picozzi, P., 1999. Characterization of aerosol individual particles in a controlled underground area. *Atmospheric Environment* 33, 3603-3611.
- Palmer, K., 2005. Work in brief: PM10 and cause specific mortality. *Occupational and Environmental Medicine* 62 (10), 661.
- Pastuszka, J., Hlawiczka, S., Willeke, K., 1993. Particulate pollution levels in Katowice, a highly industrialized polish city. *Atmospheric Environment* 27B (1), 59-65.
- Querol, X., Alastuey, A., 2004. Contaminación atmosférica por material particulado en suspensión. Ministerio de medio ambiente.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Mantilla, E., Ruiz, C., 2001. Monitoring of PM10 and PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources. *Atmospheric Environment* 35, 845-858.
- Raga, G.B., Baumgardner, D., Castro, T., Navarro, R., 2001. México City air quality: a quantitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmospheric Environment* 34, 4041-4058.

- Rojas, C.M., Artaxo, P., Van Grieken, R., 1990. Aerosols in Santiago de Chile: a study using modelig with X-ray fluorescence and single particle analysis. *Atmospheric Environment* 24B (2), 227-241.
- Samara, C., Kouimtzis, T., Tsiatoridou, R., Kaniias, G., Simeonov, V., 2003. Chemical mass balance source apportionment of PM10 in an industrialized urban area of Northern Greece. *Atmospheric Environment* 37, 41-54.
- Schauer, J.J., Lough, G.C., Shafer, M.M., Christensen, W.F., DeMinter, J.T., Park, J.S., 2006. Characterization of metals emitted from motor vehicles. Health Effects Institute, Research report number 133, March.
- Schneider, B., 1989. Determinación de trazas metálicas atmosféricas. *Spectrochimica Acta* 44B (5), 519-523.
- SEDESU (Secretaría de Desarrollo Sustentable), 2006. Anuario Económico de Querétaro. Disponible en:
<http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/deseco/esteco/perfeco/anuario/2006/index.htm>
- SMA (Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal). Gestión ambiental del aire en el Distrito Federal 2000-2006, Edición 2006. Disponible en:
<http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/gaa/03.pdf>
- Shi, Z., Shao, L., Jones, T. P., Whittaker, A. G., Lu, S., Bérubé, K. A., He, T., Richards, R.J., 2003. Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing, 2001. *Atmospheric Environment* 37, 4097-4108.
- SIDECAP (Sistema de Información para el Desarrollo Empresarial la Competitividad y la Articulación Productiva), 2005.
- Simpson, R., Williams, G., Petroeschevsky, A., Best, T., Morgan, G., Denison, L., Hinwood, A., Neller, A., 2005. The short-term effects of air pollution on daily mortality on four Australian cities. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 29 (3), 205-212.
- UMSICHT Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicher-heits- und Energietechnik, 2005. Disponible en: <http://www.umsicht.fhg.de/leichtbau/>
- Utsunomiya, S., Jensen, K., Keeler, G., Ewing, R., 2004. Direct identification of Trace Metals in Fine and Ultrafine Particles in the Detroit Urban Atmosphere. *Environmental Science & Technology* 38, 2289-2297.

- Vázquez, A. L., Castillo, S., Mugica, V., Morán, M., 2002. Aplicación de nuevos materiales catalíticos para el control de óxidos de nitrógeno. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Disponible en:
<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/mexico26/vi-020.pdf>
- Xie, R.K., Seip, H.M., Leinum, J.R., Winje, T., Xiao, J.S., 2005. Chemical characterization of individual particles (PM10) from ambient air in Guiyang City, China. *Science of the total environment* 343, 261-272.
- Yue, W., Li, X., Liu, J., Li, Y., Yu, X., Deng, B., Wan, T., Zhang, G., Huang, Y., He, W., Hua, W., Shao, L., Li, W., Yang, S., 2006. Characterization of PM2.5 in the ambient air of Shanghai city by analyzing individual particles. *Science of the Total Environment* 368, 916-925.
- Zamorano, A., Márquez, S., Aránguiz, J. L., Bedregal, P., Sánchez, I., 2003. Relación entre bronquiolitis aguda con factores climáticos y contaminación ambiental. *Revista Médica Chile* 131, 1117-1122.

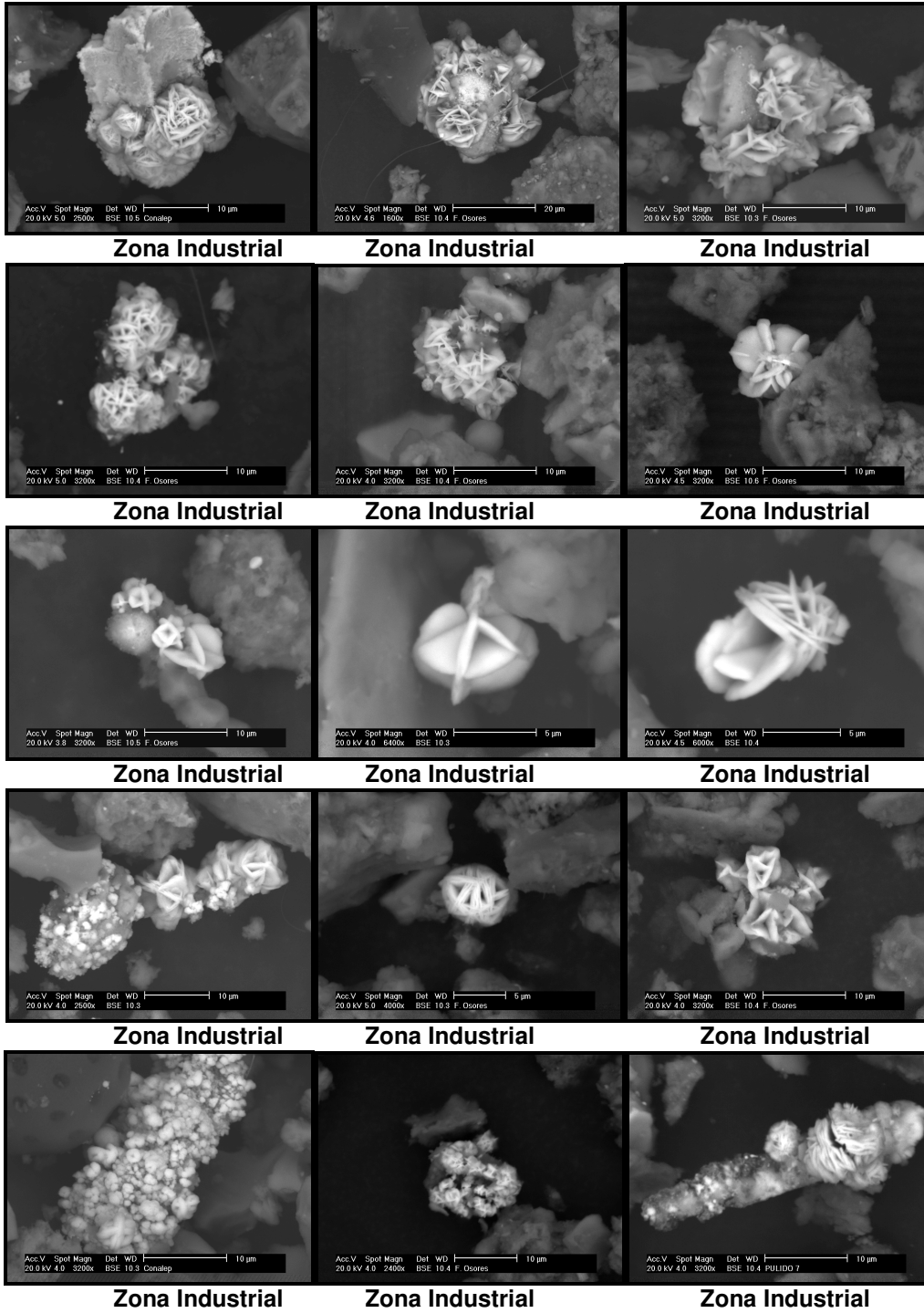
APÉNDICES

Apéndice A

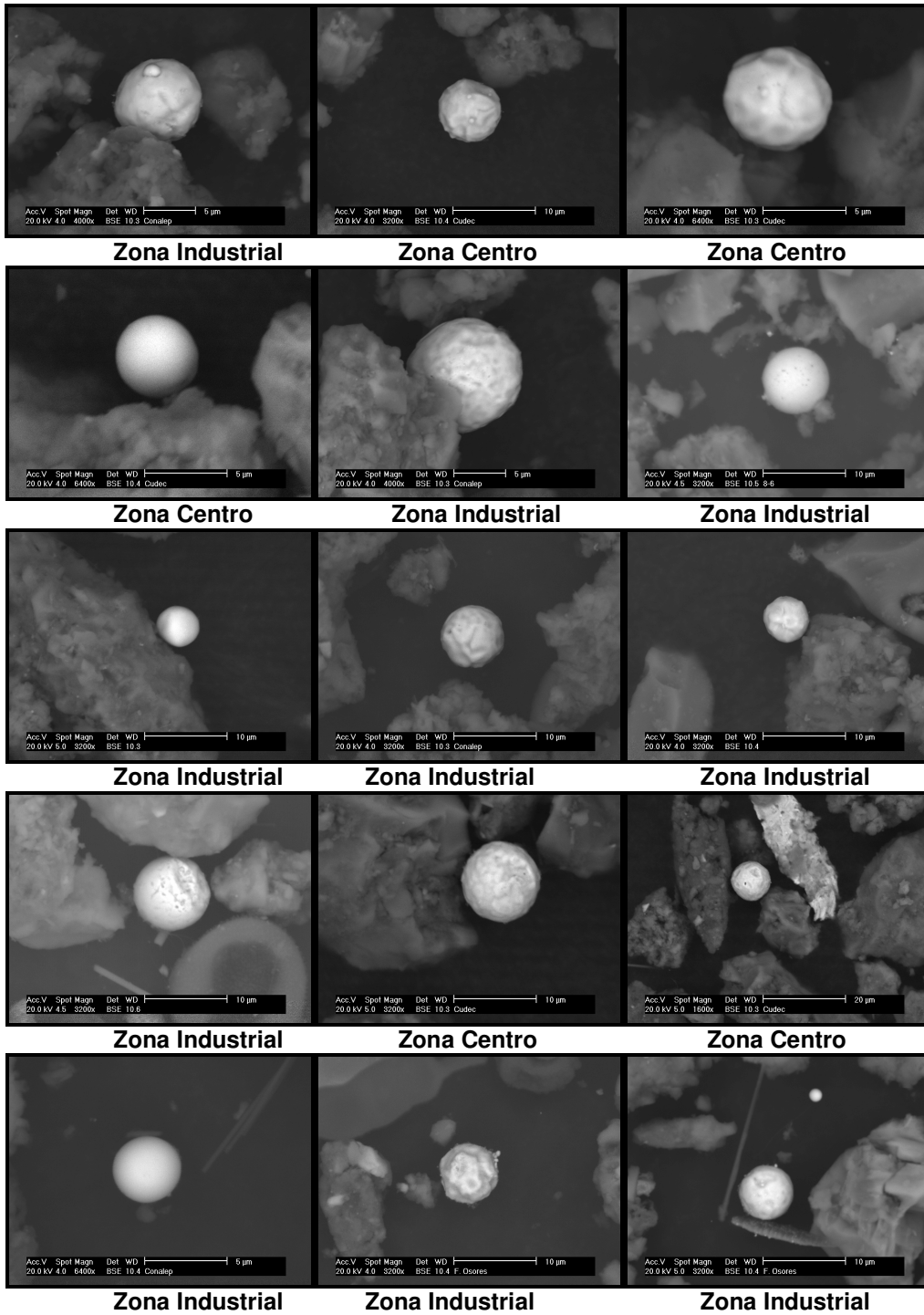
Micrografías de aeropartículas antrópicas de la Ciudad de Querétaro

1. Partículas ricas en Cobre

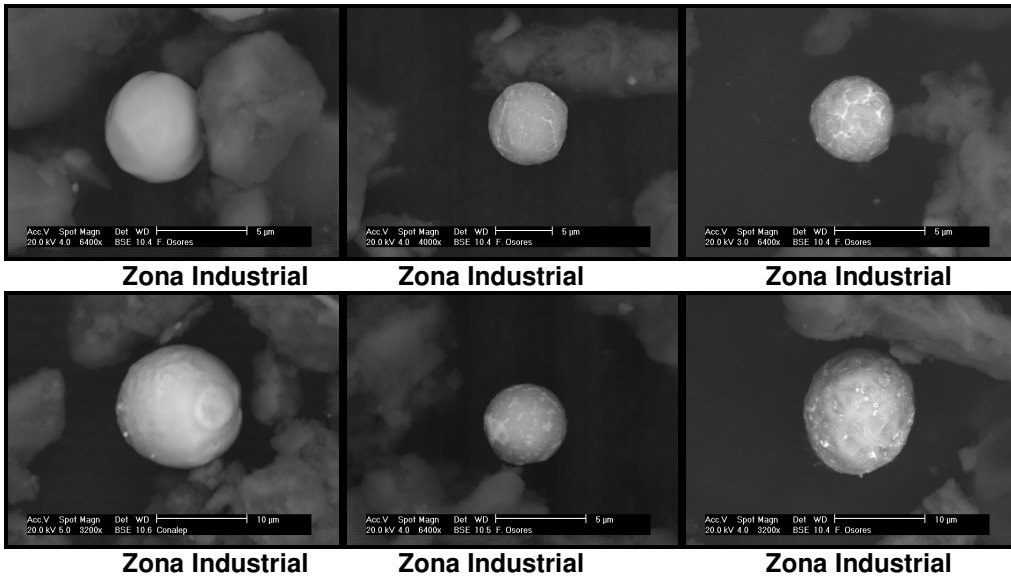
1.1 Covelita (CuS)



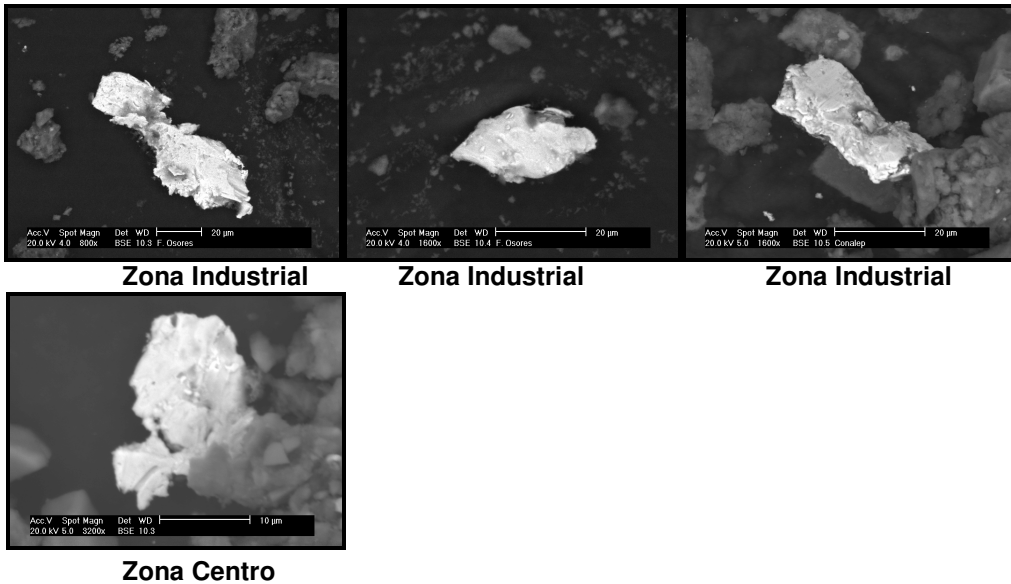
1.2 Cobre metálico esférico



1.3 Cobre-Níquel esférico

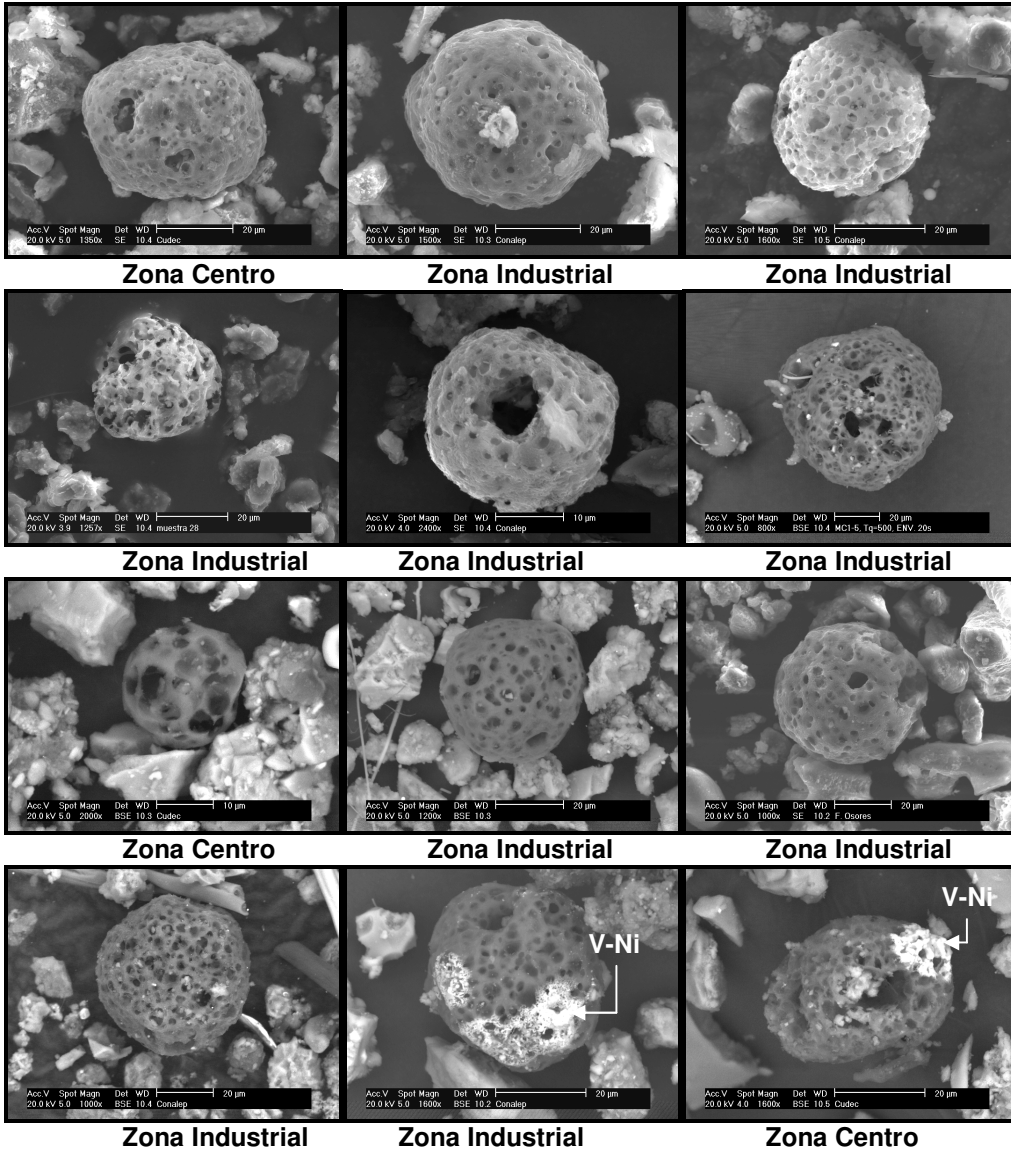


1.4 Cobre-Zinc

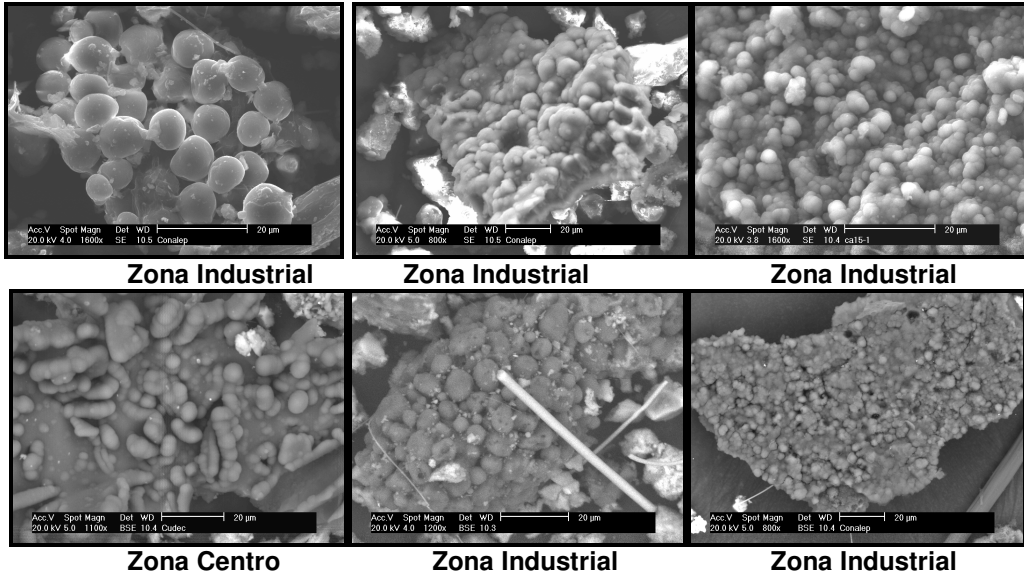


2. Partículas ricas en Carbono elemental

2.1 Carbono-Azufre con trazas de V-Ni

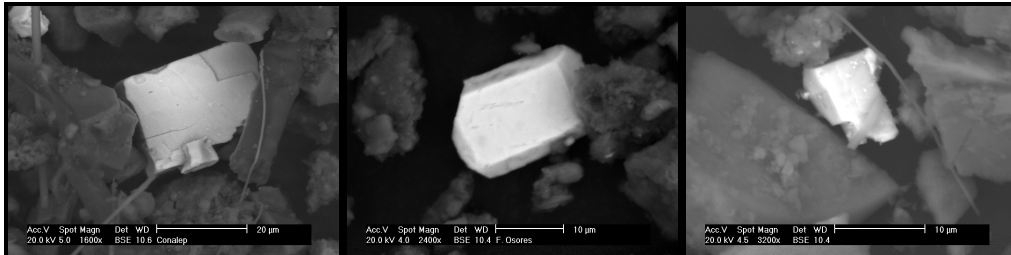


2.2 Carbono elemental



3. Partículas ricas en Bario

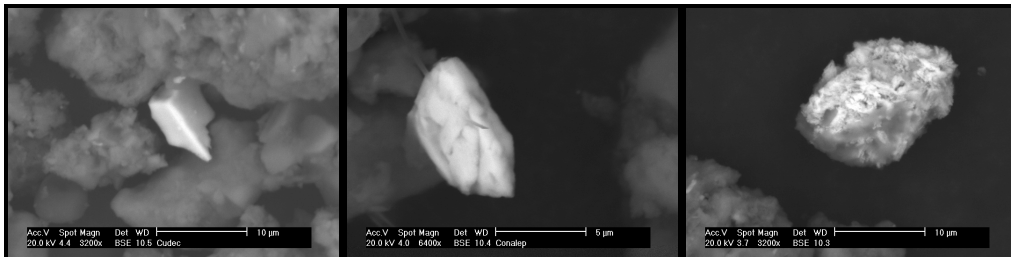
3.1 Barita ($BaSO_4$)



Zona Industrial

Zona Industrial

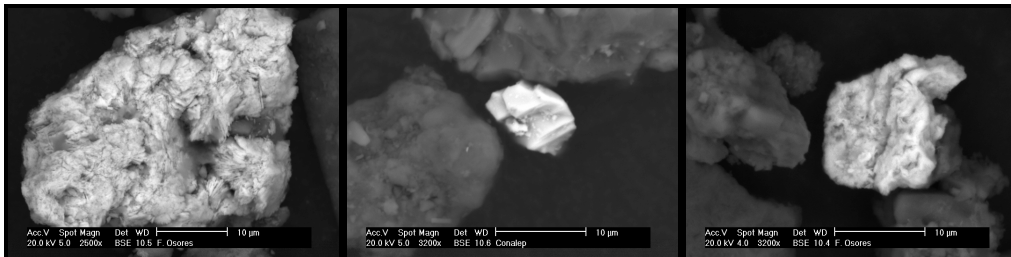
Zona Industrial



Zona Centro

Zona Industrial

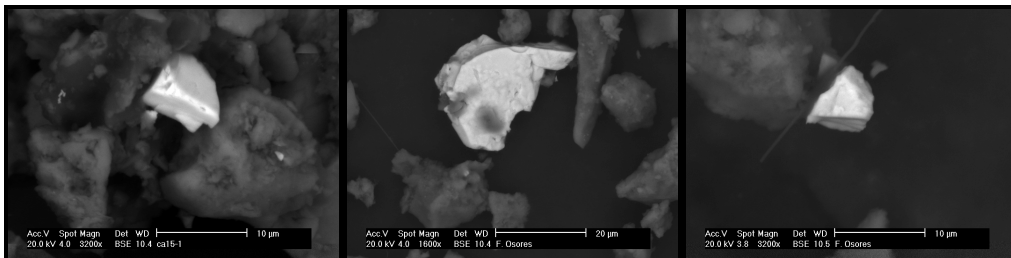
Zona Industrial



Zona Industrial

Zona Industrial

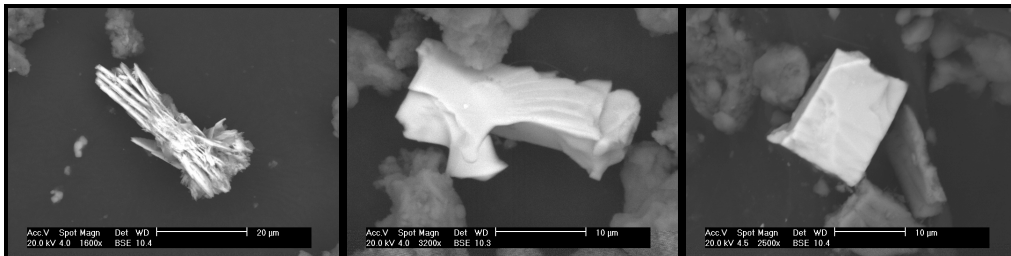
Zona Industrial



Zona Industrial

Zona Industrial

Zona Industrial

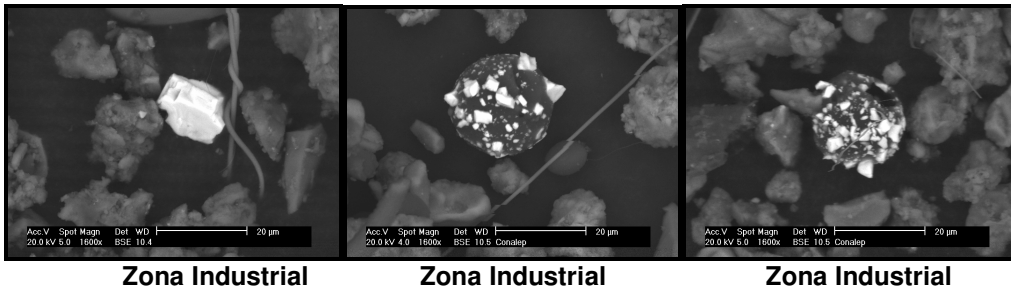


Zona Centro

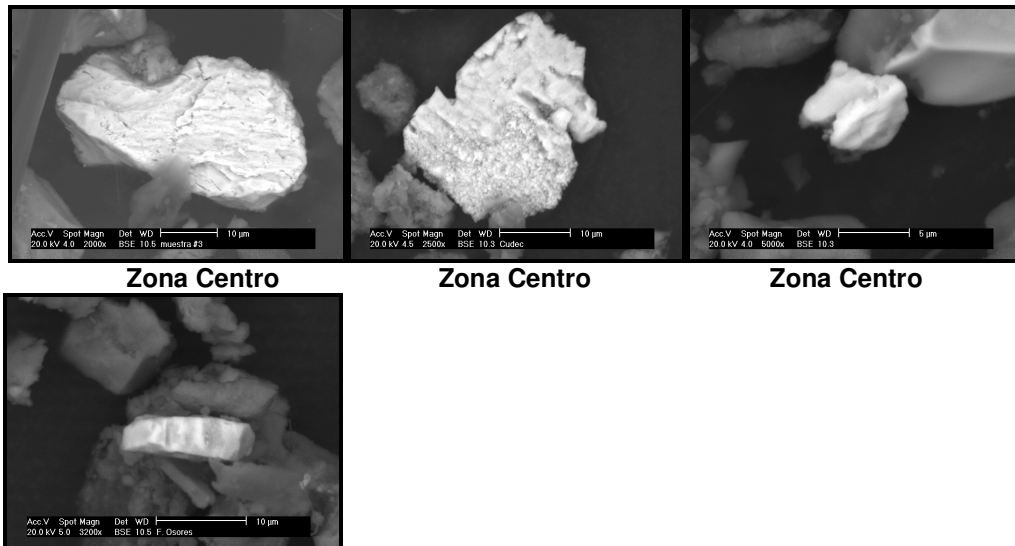
Zona Industrial

Zona Industrial

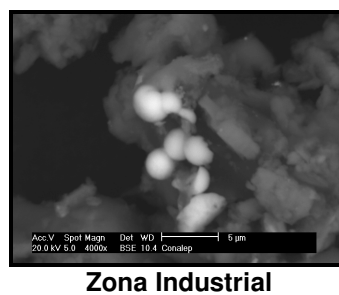
3.1 Barita (BaSO_4) (continuación)



3.2 (Ba,Sr) SO_4

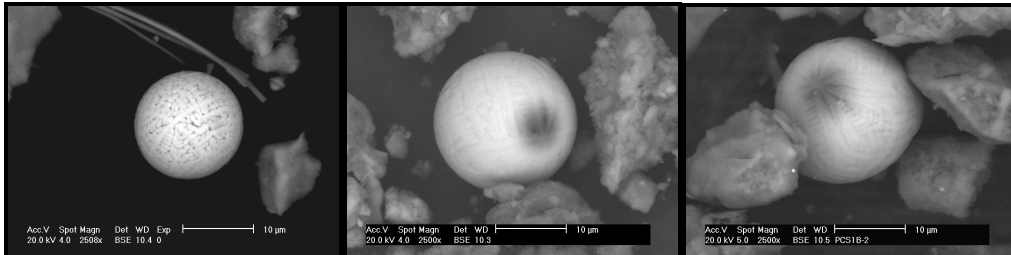


3.3 Barita esférica (BaSO_4)



4. Partículas ricas en Hierro

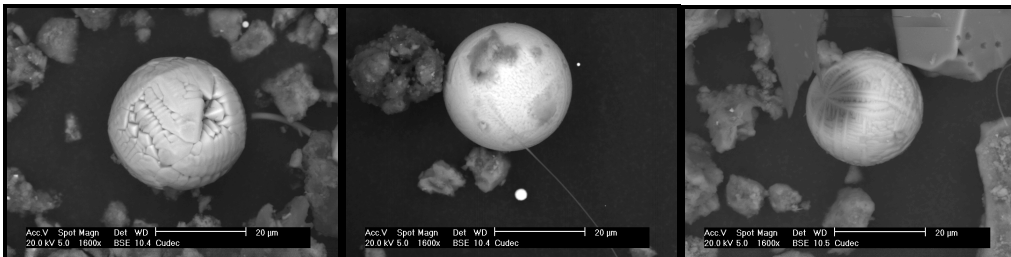
4.1 Fe-O esférico



Zona Centro

Zona Centro

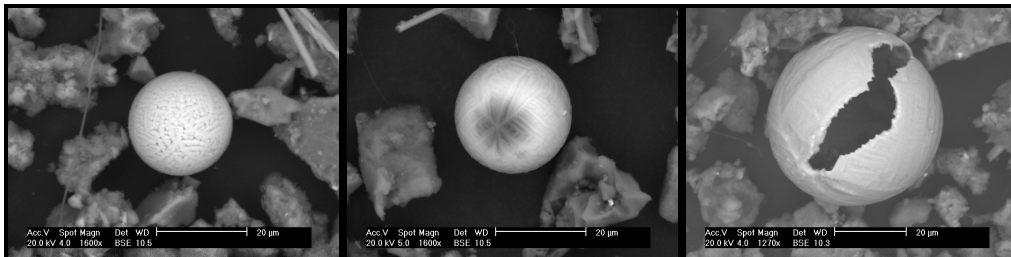
Zona Centro



Zona Centro

Zona Centro

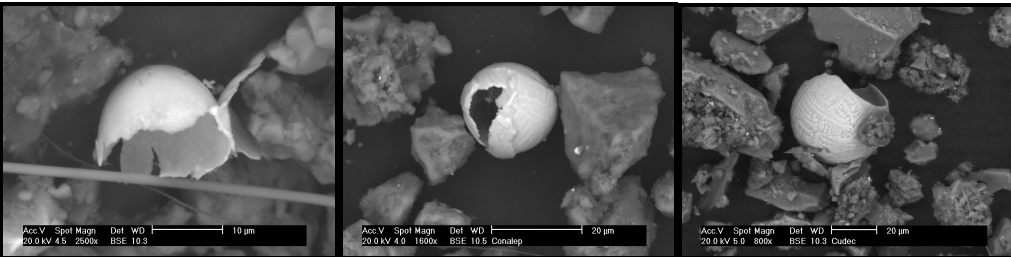
Zona Centro



Zona Industrial

Zona Industrial

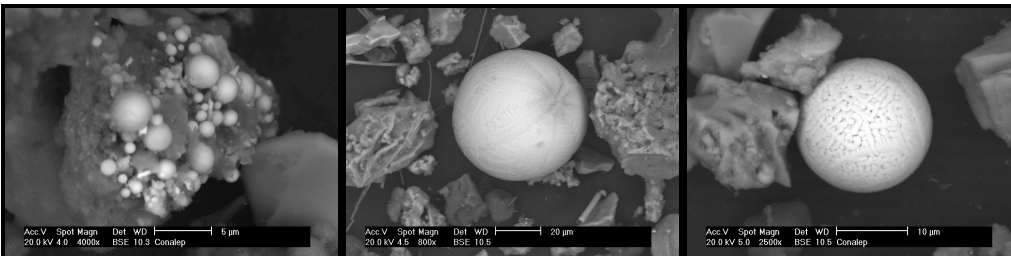
Zona Industrial



Zona Industrial

Zona Industrial

Zona Centro

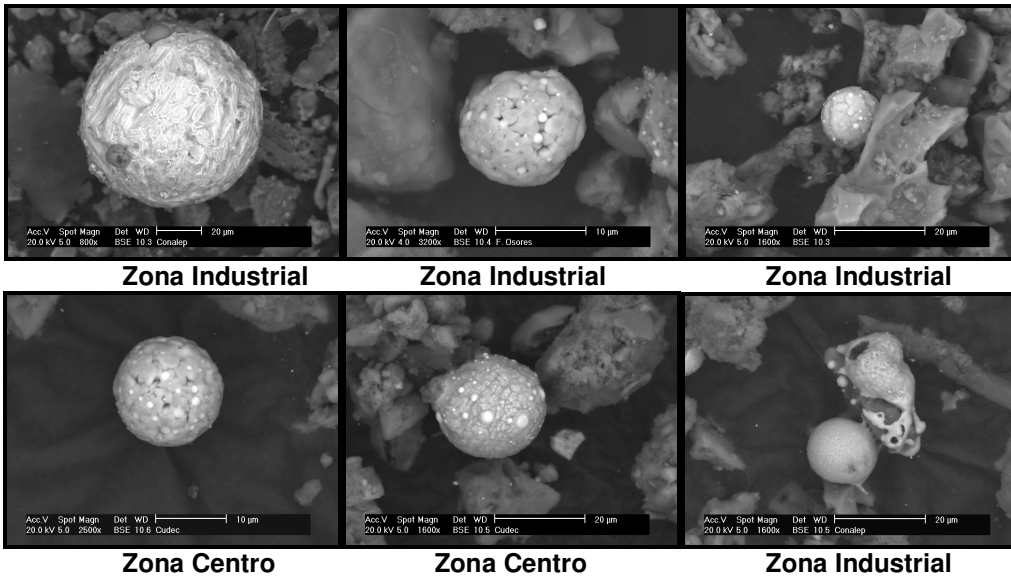


Zona Industrial

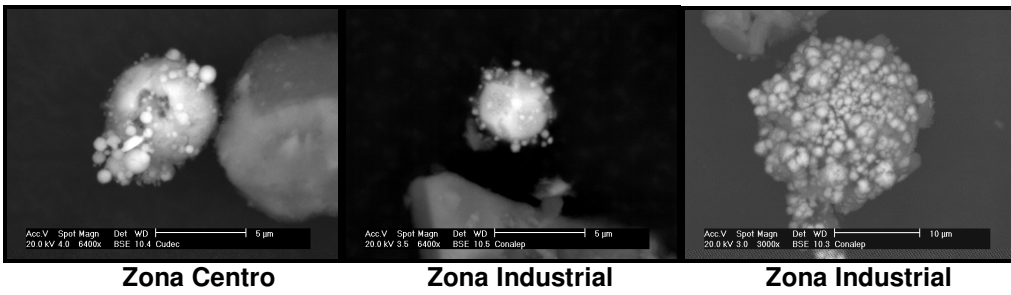
Zona Industrial

Zona Industrial

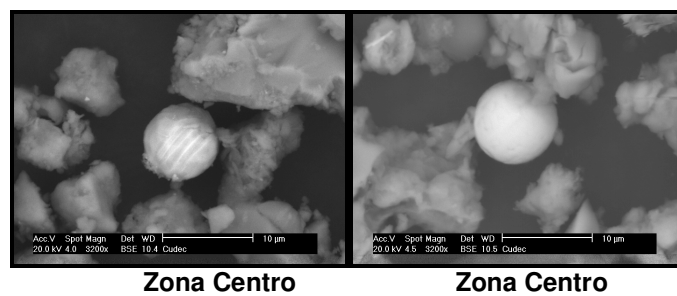
4.2 Fe-O-Cr-Ni esférico



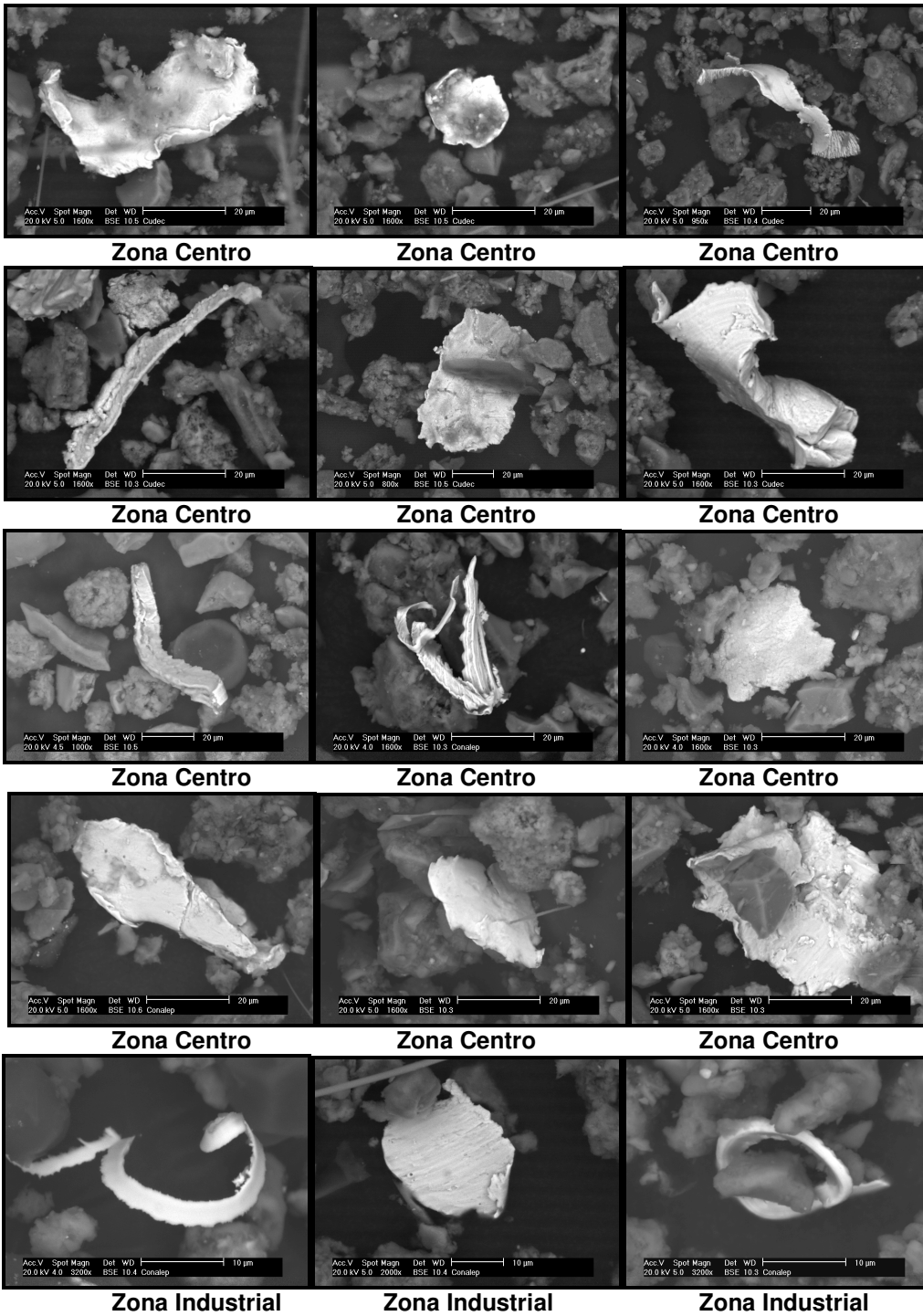
4.3 Fe-O-Zn esférico



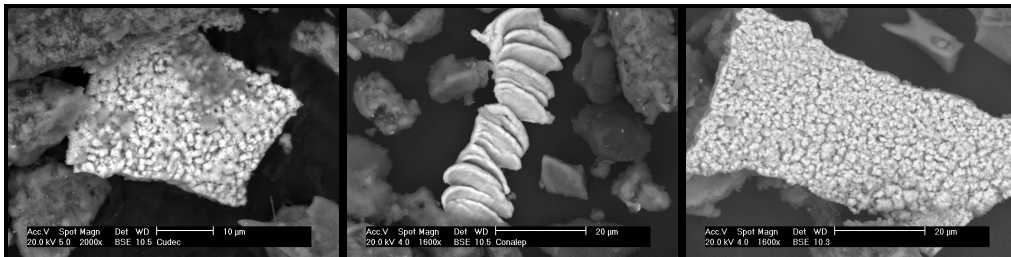
4.4 Fe metálico esférico



4.5 Fe metálico irregular.



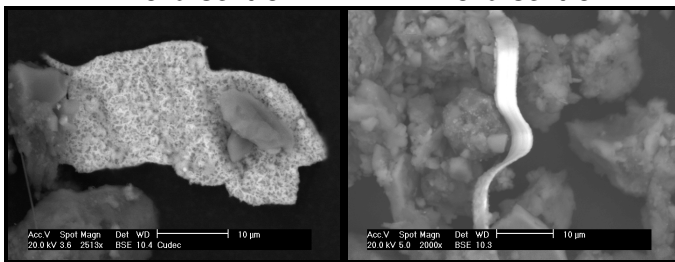
4.6 Fe-O irregular



Zona Centro

Zona Centro

Zona Industrial



Zona Centro

Zona Centro

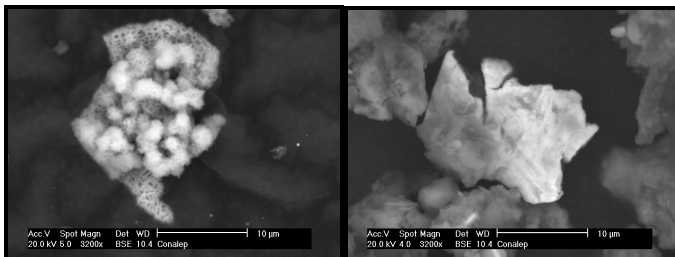
4.7 Fe-Cr-Ni-O irregular



Zona Centro

Zona Centro

Zona Centro

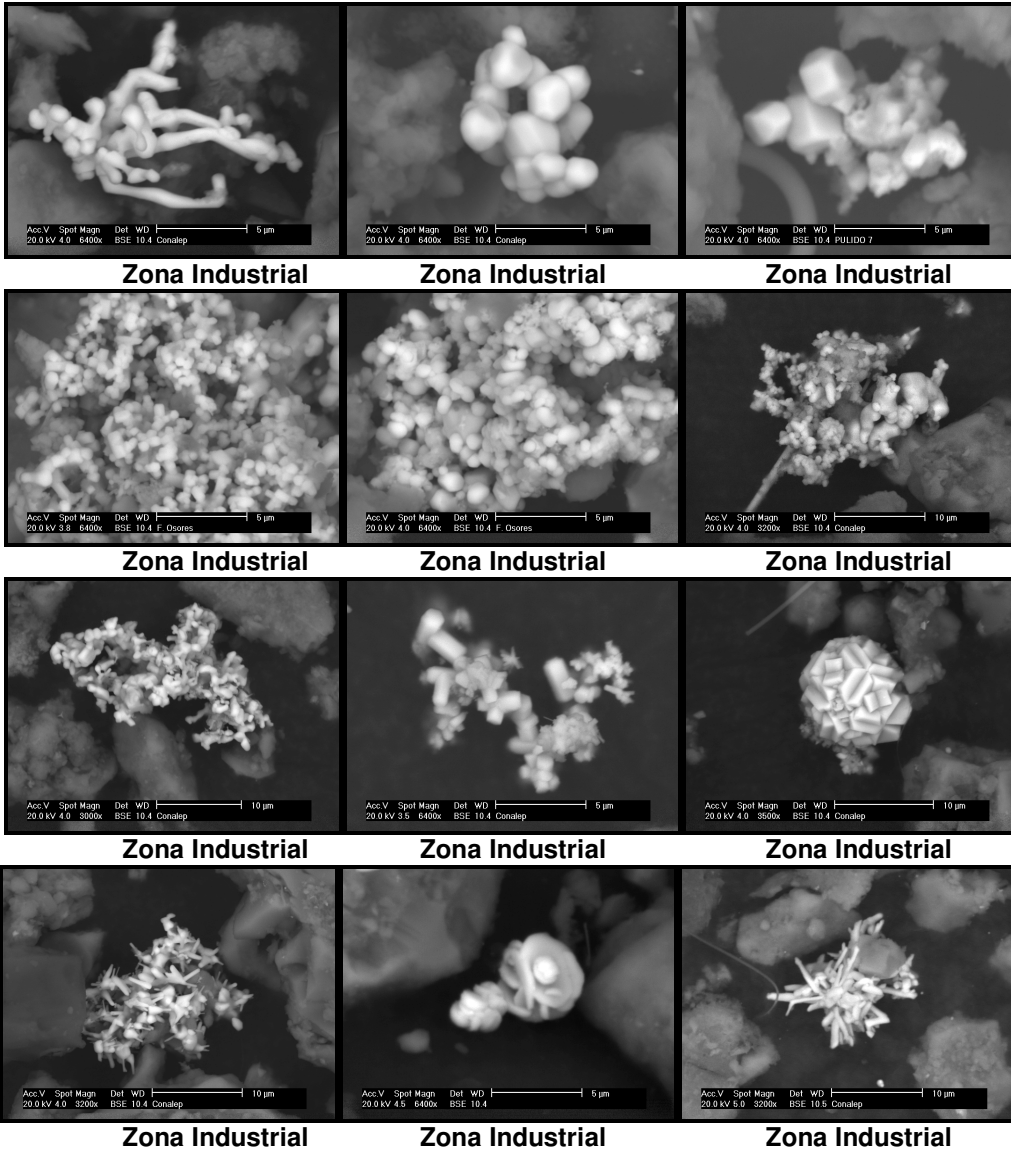


Zona Industrial

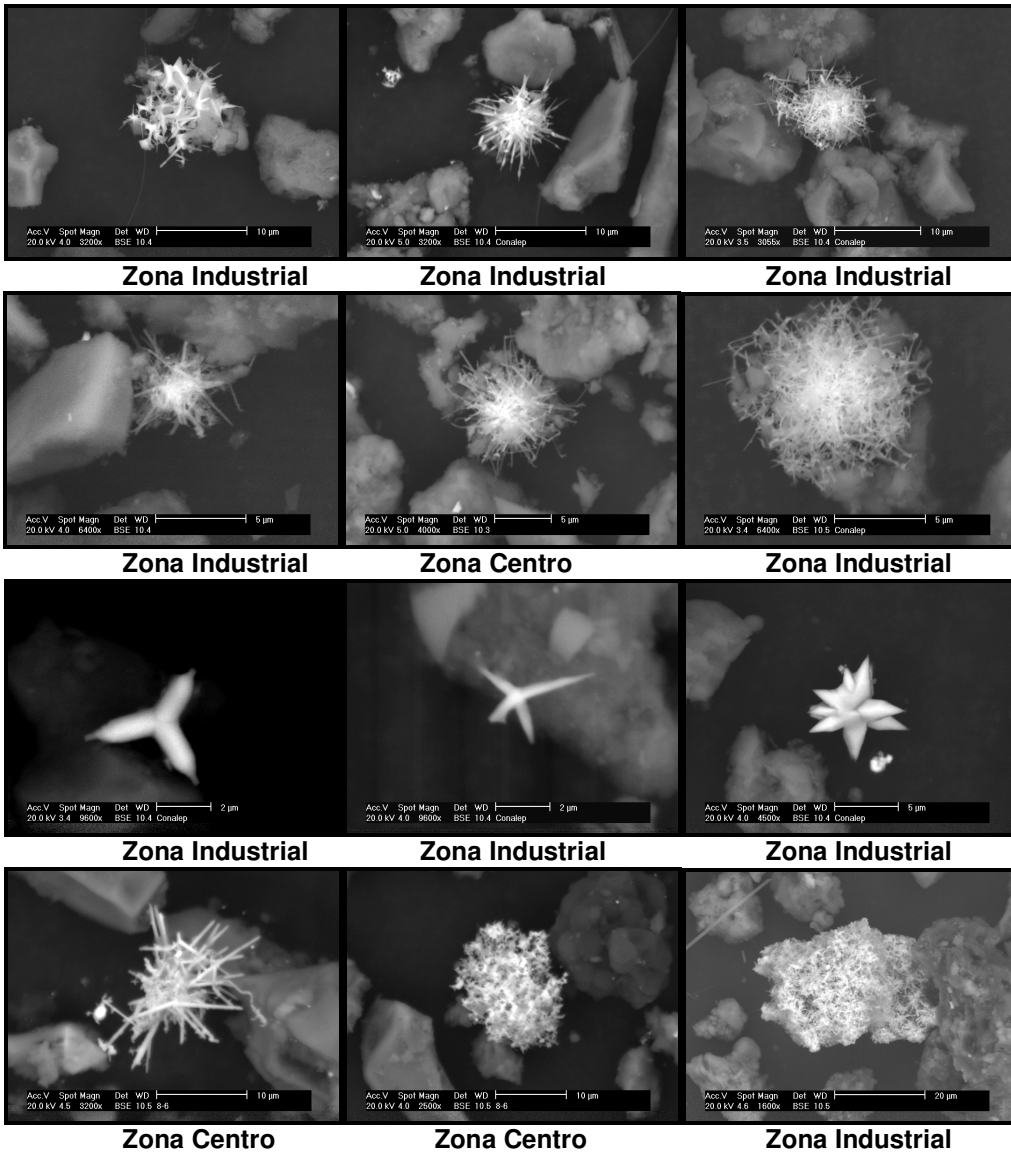
Zona Industrial

5. Partículas ricas en Zinc

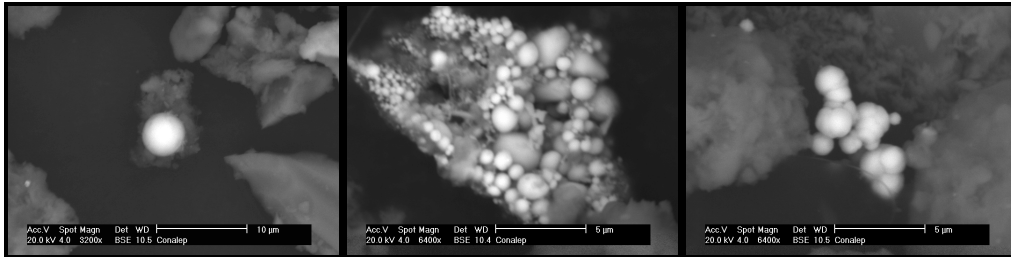
5.1 Zn-O redondeado



5.2 Zn-O acicular



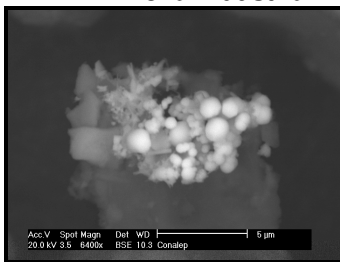
5.3 Zn-O esférico



Zona Industrial

Zona Industrial

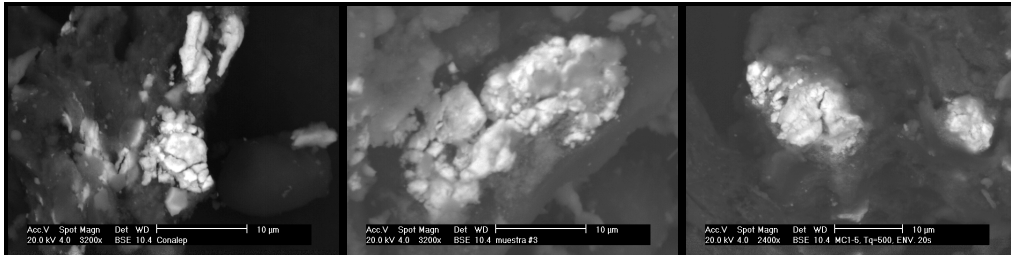
Zona Industrial



Zona industrial

6. Partículas ricas en Plomo

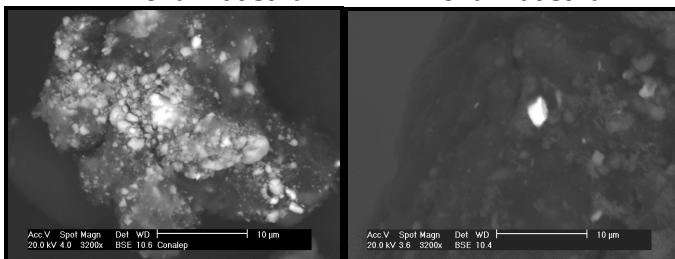
6.1 Pb-S Irregular



Zona Industrial

Zona Industrial

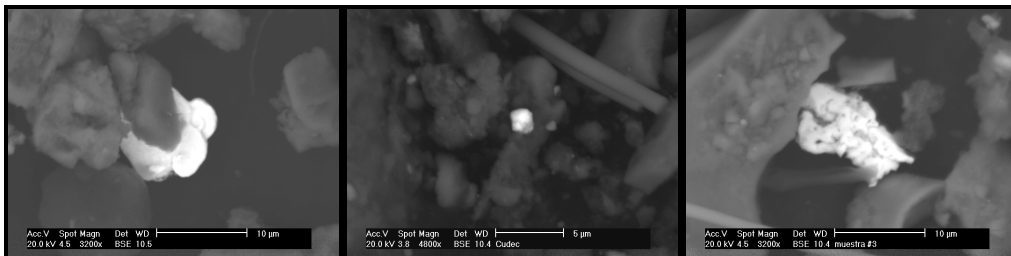
Zona Industrial



Zona Industrial

Zona Centro

6.2 Pb-O Irregular



Zona Industrial

Zona Centro

Zona Centro

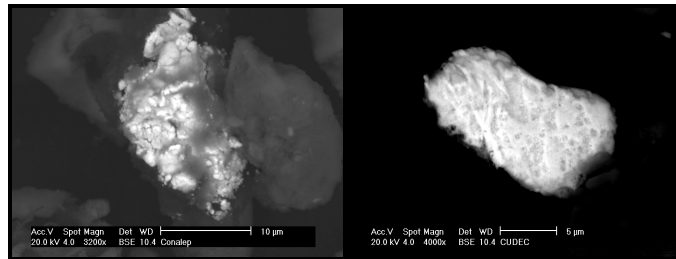


Zona Centro

Zona Centro

Zona Industrial

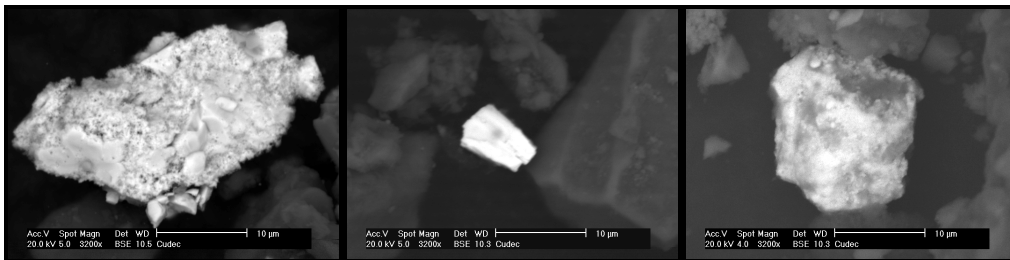
6.3 Pb metálico irregular



Zona Industrial

Zona Industrial

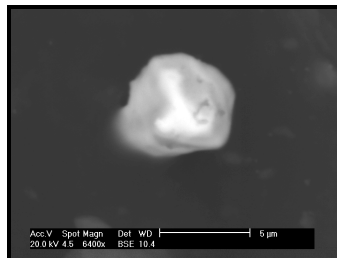
6.4 Pb-S-O irregular



Zona Centro

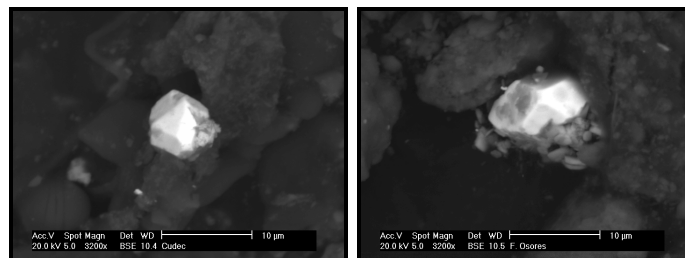
Zona Centro

Zona Centro



Zona Industrial

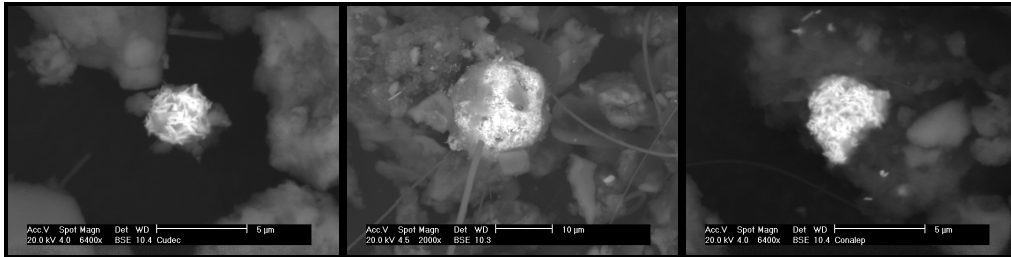
6.5 Pb-O facetado



Zona Industrial

Zona Industrial

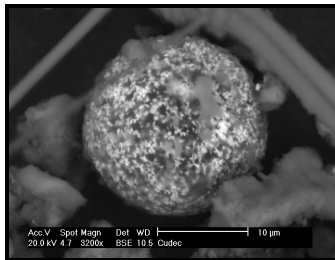
6.6 PbCrO₄ acicular



Zona Centro

Zona Industrial

Zona Industrial

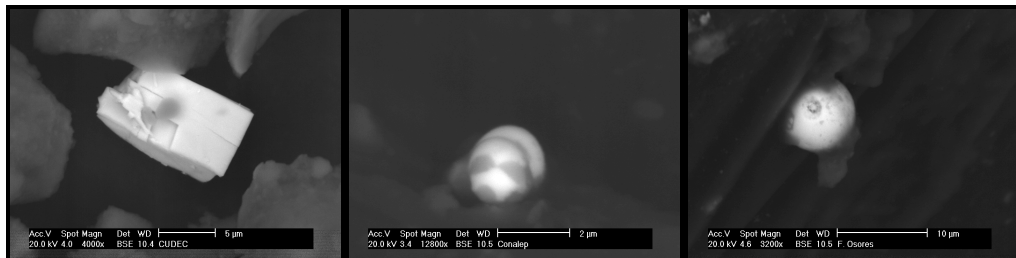


Zona Centro

6.7 Galena (PbS)

6.8 Pb-S-O esférico

6.9 Pb-Cu-Fe esférico



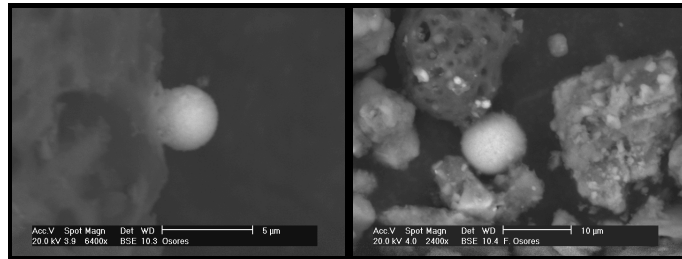
Zona Centro

Zona Industrial

Zona Industrial

7. Partículas ricas en Níquel

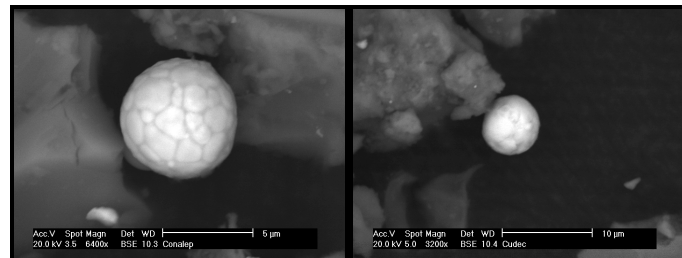
7.1 Ni-V esférico



Zona Industrial

Zona Industrial

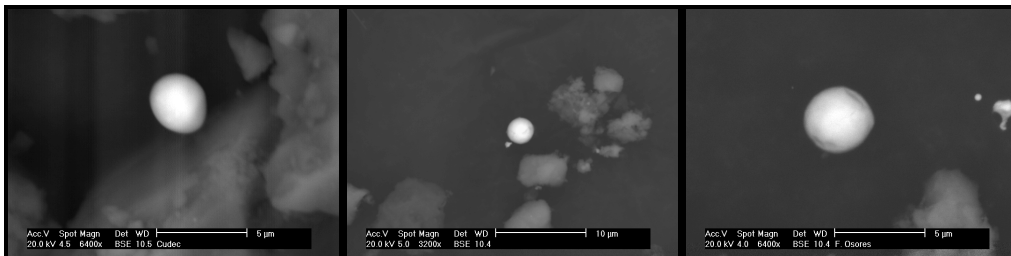
7.2 Ni-Cu esférico



Zona Industrial

Zona Centro

7.3 Ni metálico esférico

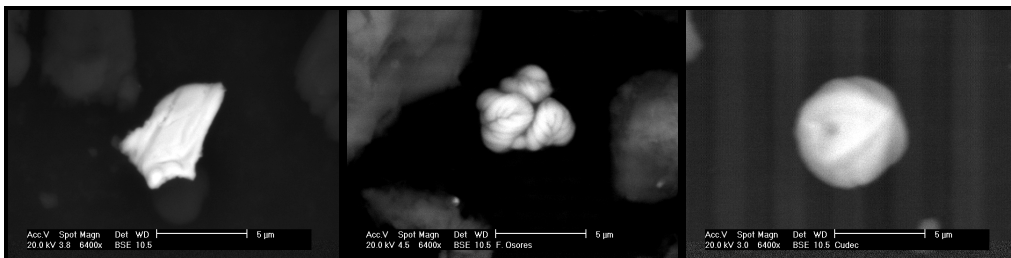


Zona Centro

Zona Centro

Zona Industrial

7.4 Ni-Cu irregular



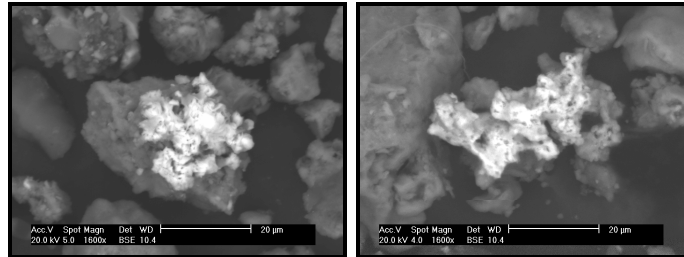
Zona Industrial

Zona Industrial

Zona Centro

8. Grupos minoritarios: Partículas ricas en Cd, V, Sn, Ce, Mo, W, Zr, Ca, As, Sb, Mn, Hg, Bi, Ti, Sr, Se y Cr

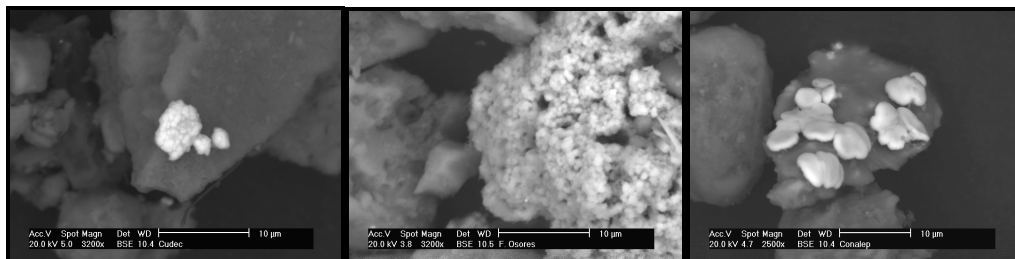
8.1 Cd-Fe-S-O



Zona Centro

Zona Centro

8.2 V-Ni

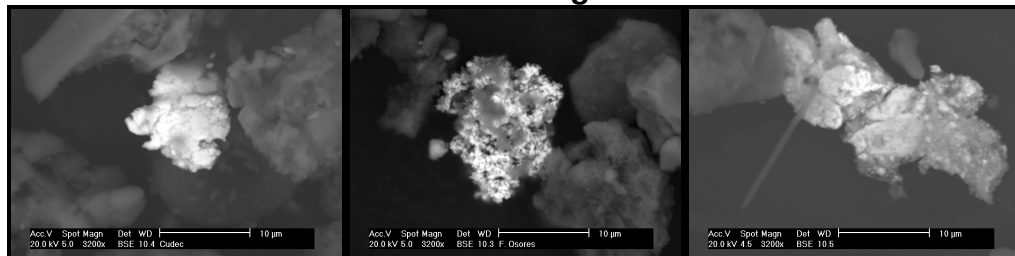


Zona Industrial

Zona Industrial

Zona Industrial

8.3 Sn-O irregular

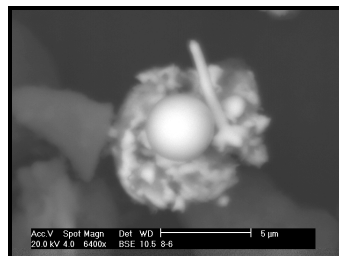


Zona Centro

Zona Industrial

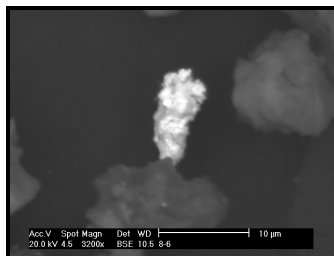
Zona Industrial

8.3.1 Sn-O esférico



Zona Industrial

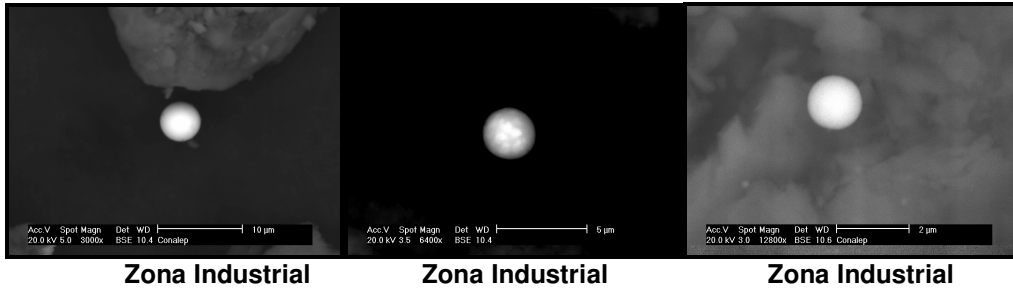
8.3.2 Sn-Pb-Cu-O



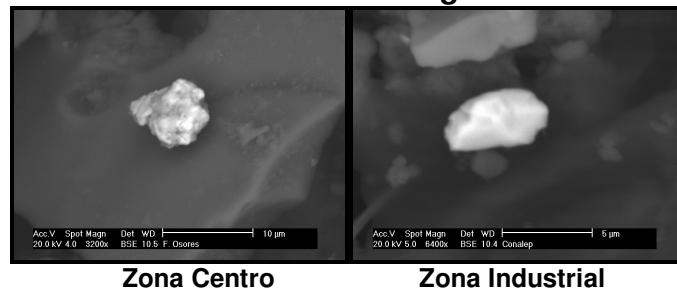
Zona Industrial

8. Grupos minoritarios: Partículas ricas en Cd, V, Sn, Ce, Mo, W, Zr, Ca, As, Sb, Mn, Hg, Bi, Ti, Sr, Se y Cr (continuación)

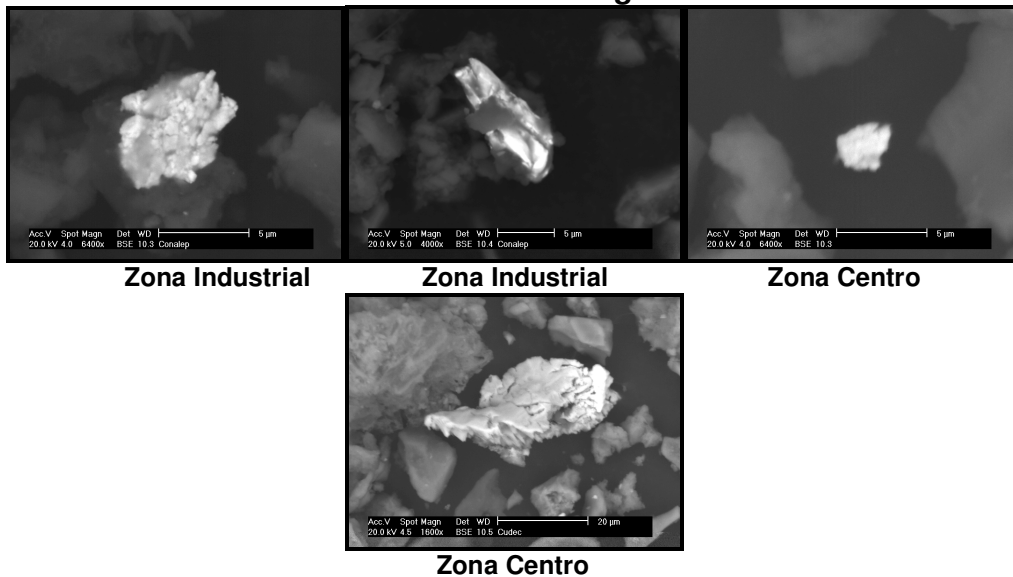
8.4 Ce-Fe-O esférico



8.4.1 Ce-Fe-O irregular

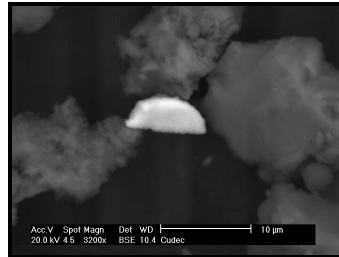


8.5 W metálico irregular



8. Grupos minoritarios: Partículas ricas en Cd, V, Sn, Ce, Mo, W, Zr, Ca, As, Sb, Mn, Hg, Bi, Ti, Sr, Se y Cr (continuación)

8.6 Zr-Ce-O



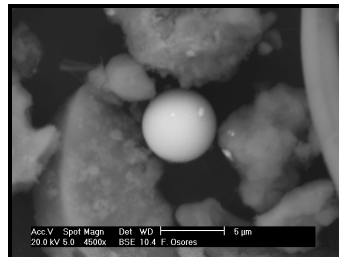
Zona Centro

8.6.1 ZrSiO₄

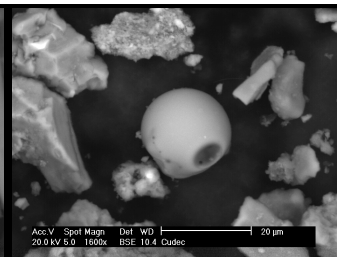


Zona Centro

8.7 Fosfatos de calcio Ca-P-O

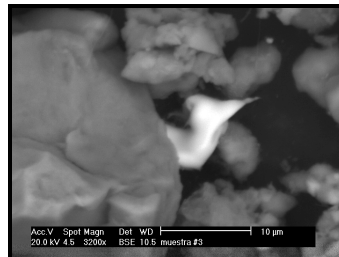


Zona industrial

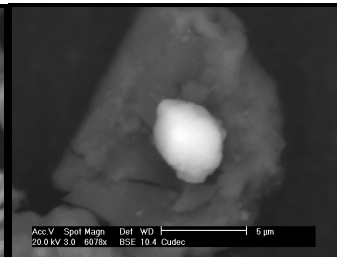


Zona Industrial

8.8 Trióxido de arsénico



Zona Centro



Zona Centro

8.8.1 Arsenopirita (FeAsS)



Zona Centro

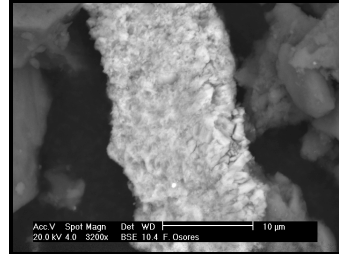
8. Grupos minoritarios: Partículas ricas en Cd, V, Sn, Ce, Mo, W, Zr, Ca, As, Sb, Mn, Hg, Bi, Ti, Sr, Se y Cr (continuación)

8.9 Sb metálico irregular



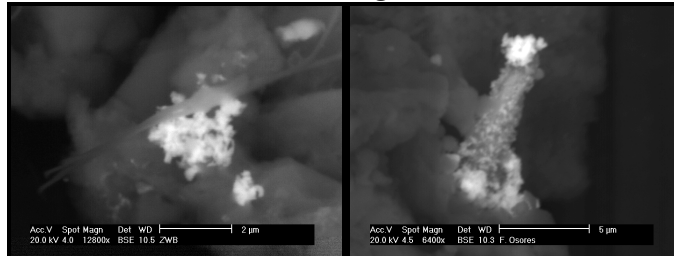
Zona Centro

8.10 MnO₂



Zona industrial

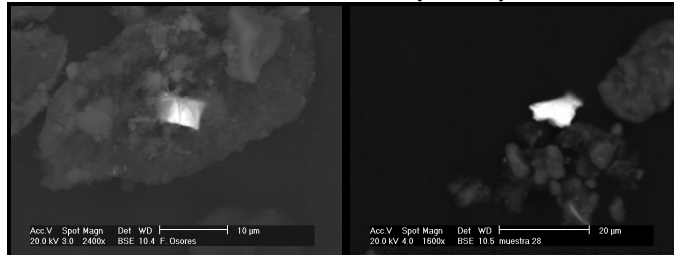
8.11 HgS



Zona industrial

Zona Industrial

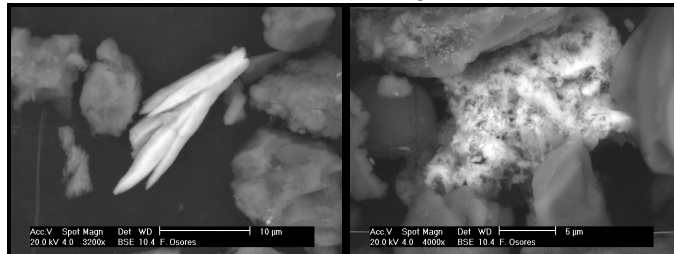
8.12 Bismutina (Bi₂S₃)



Zona industrial

Zona Industrial

8.13 SrCO₃

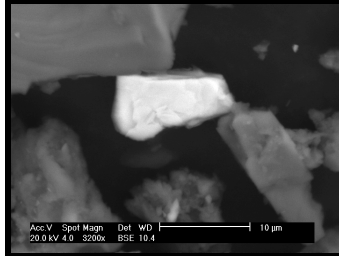


Zona industrial

Zona Industrial

8. Grupos minoritarios: Partículas ricas en Cd, V, Sn, Ce, Mo, W, Zr, Ca, As, Sb, Mn, Hg, Bi, Ti, Sr, Se y Cr (continuación)

8.14 Molibdenita (MoS₂)

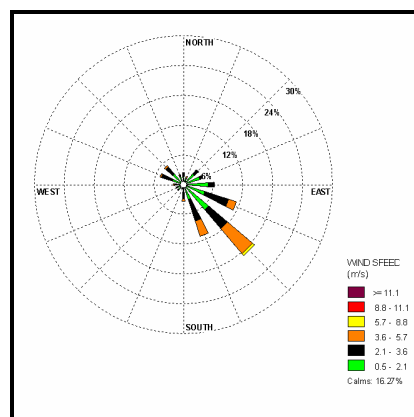
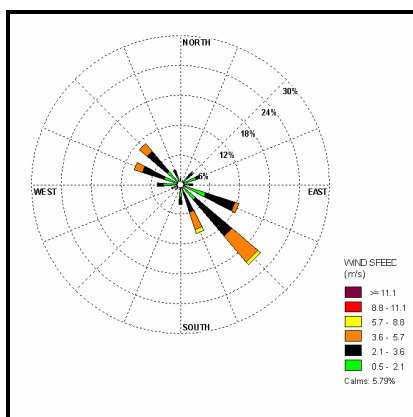
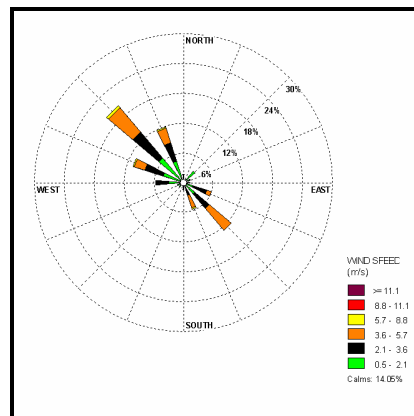
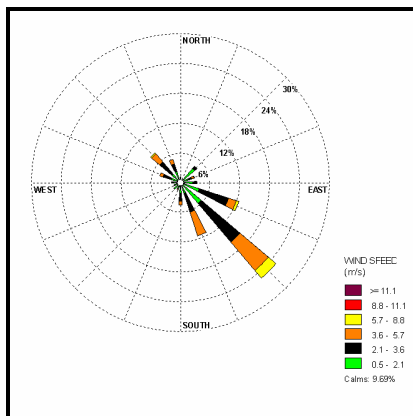
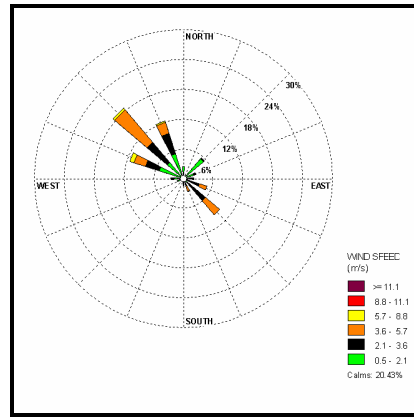
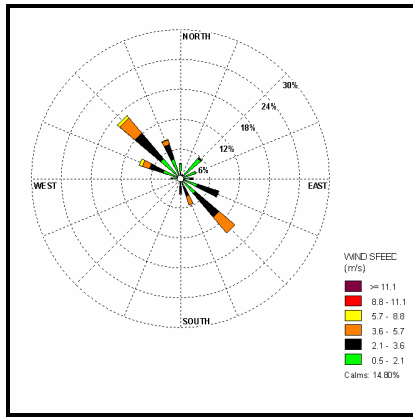


Zona Centro

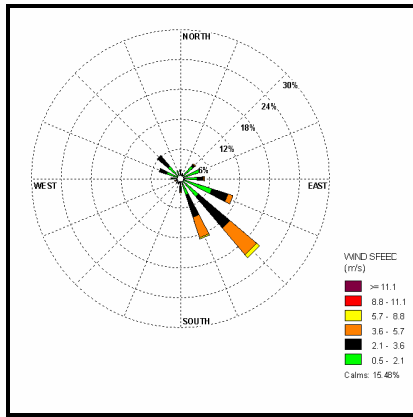
Apéndice B

Rosas de vientos mensuales de la Ciudad de Querétaro. Años 2004 y 2005

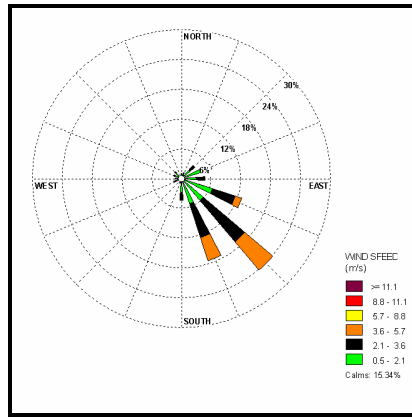
Año 2004
Estación 1. Félix Osores



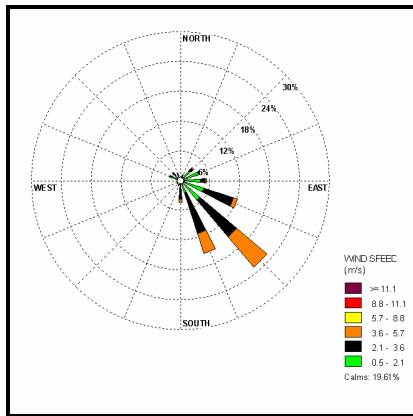
Año 2004
Estación 1. Félix Osores (continuación)



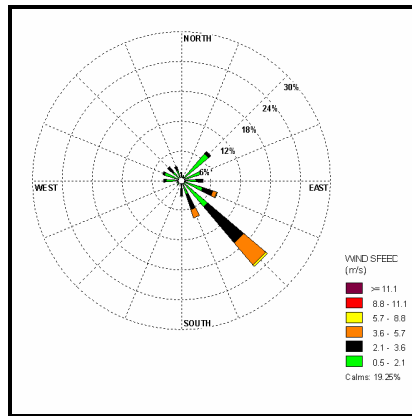
Julio



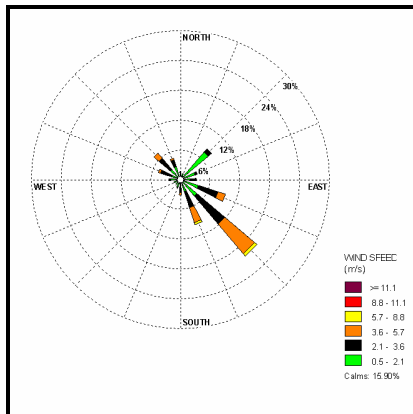
Agosto



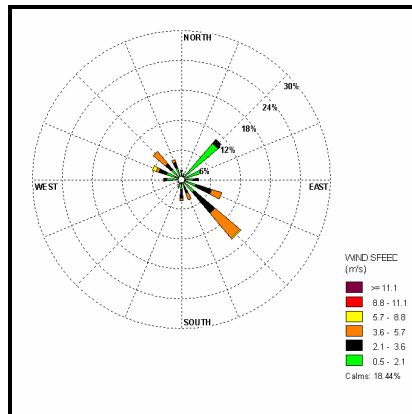
Septiembre



Octubre

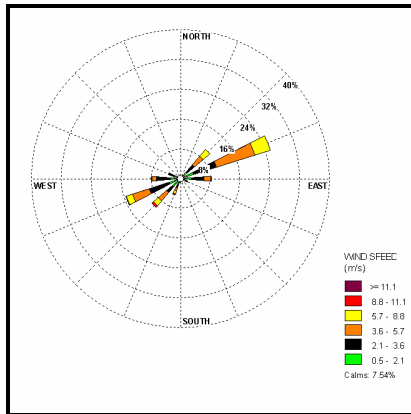


Noviembre

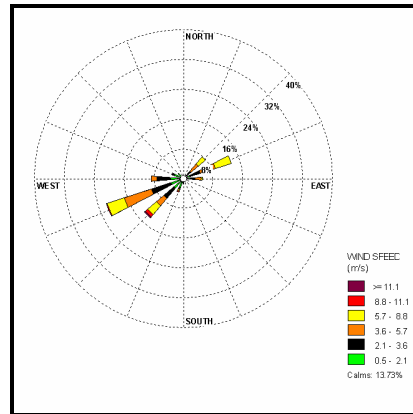


Diciembre

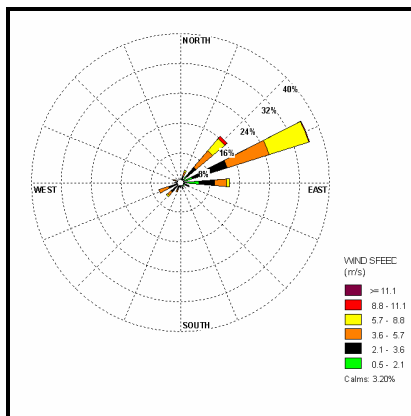
Año 2004 Estación 2. Tlaloc



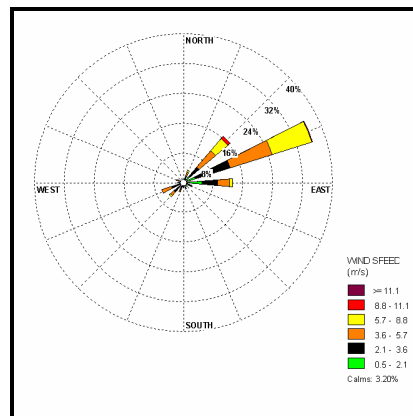
Enero



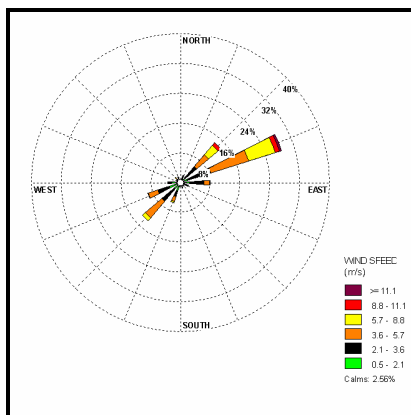
Febrero



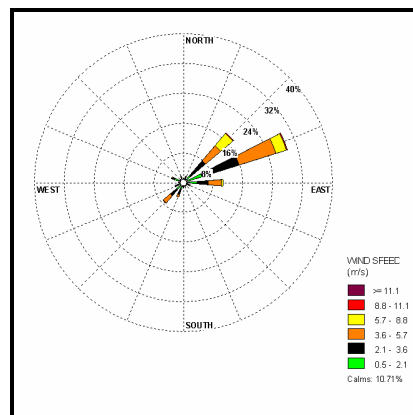
Marzo



Abril

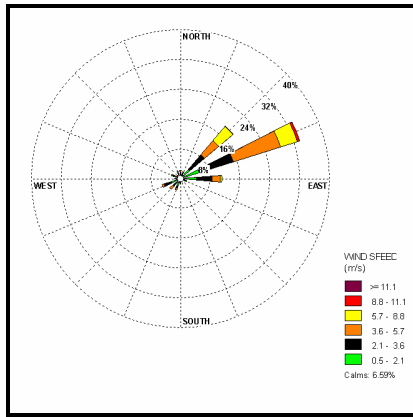


Mayo

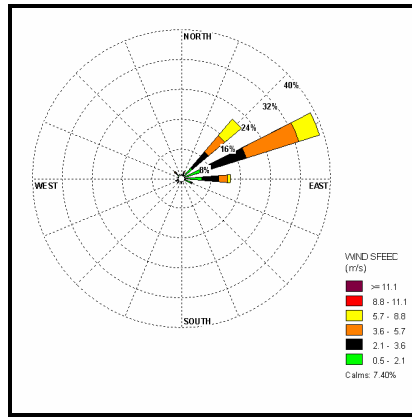


Junio

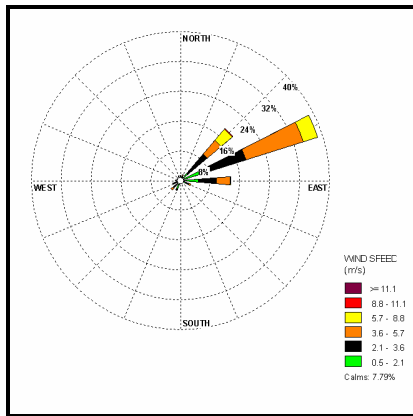
Año 2004
Estación 2. Tlaloc (continuación)



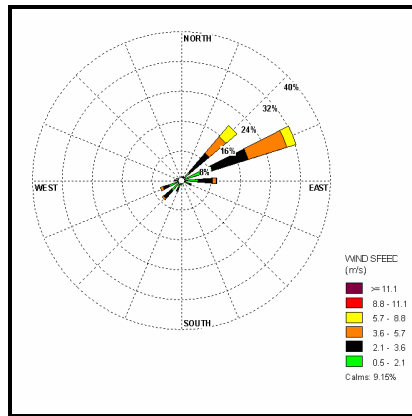
Julio



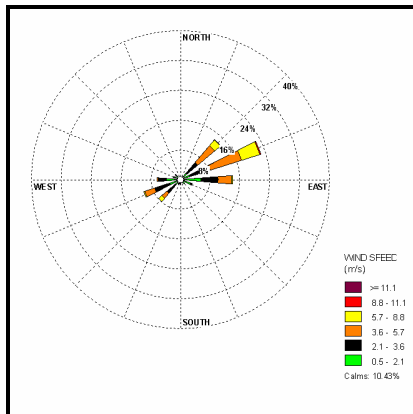
Agosto



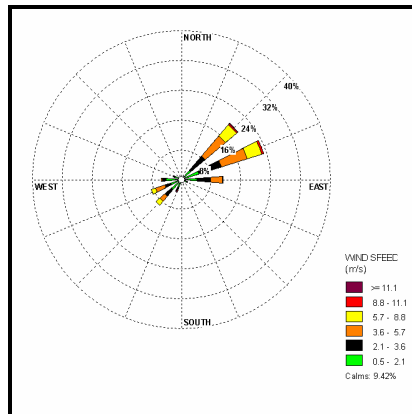
Septiembre



Octubre

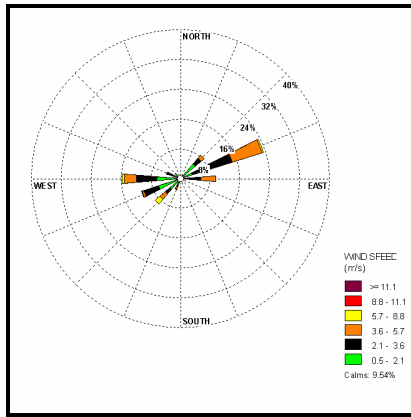


Noviembre

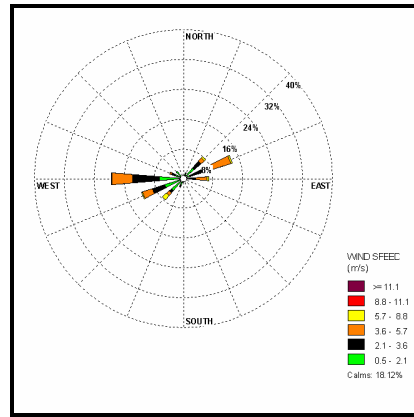


Diciembre

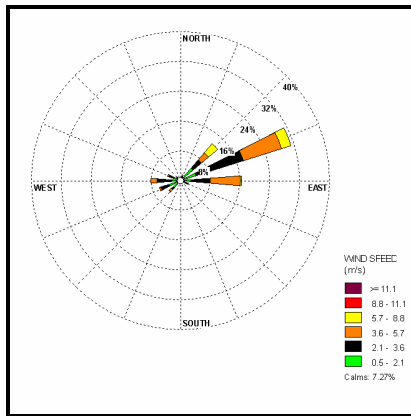
Año 2004 Estación 3. Centro



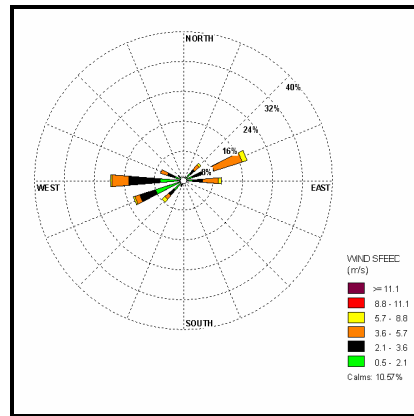
Enero



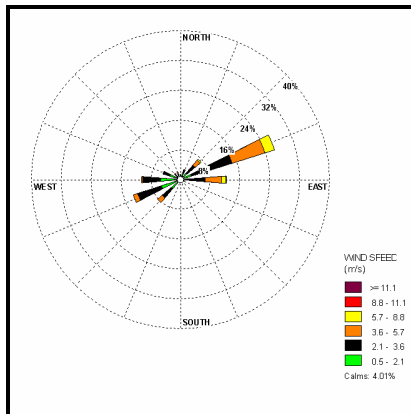
Febrero



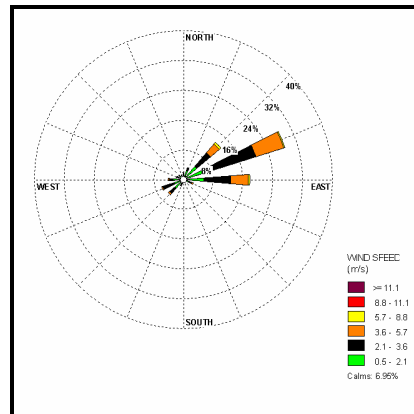
Marzo



Abril

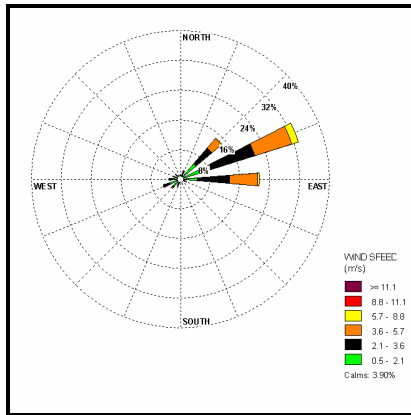


Mayo

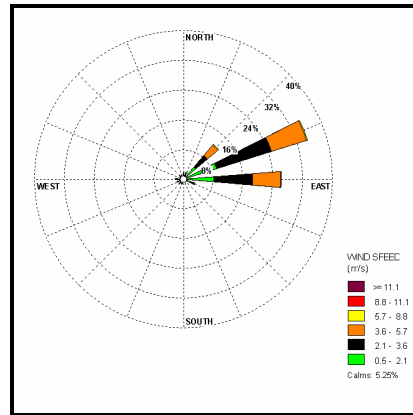


Junio

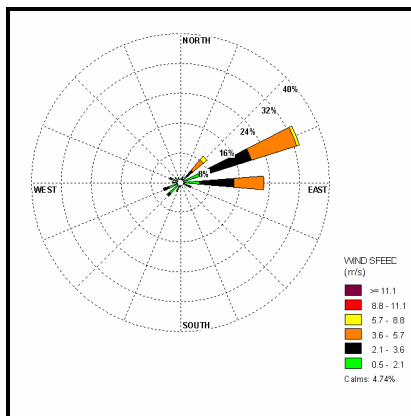
Año 2004
Estación 3. Centro (continuación)



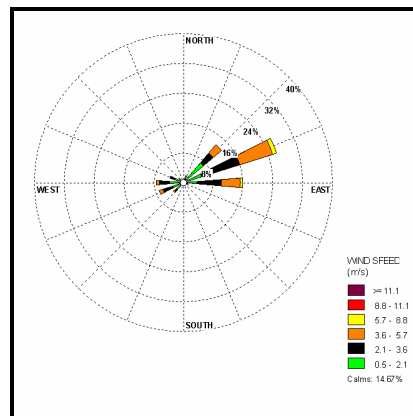
Julio



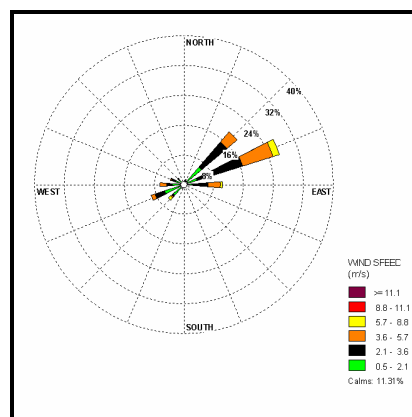
Agosto



Septiembre

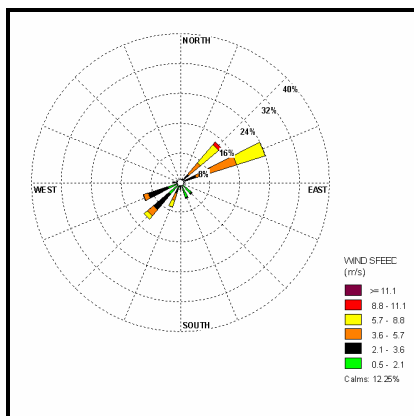


Noviembre

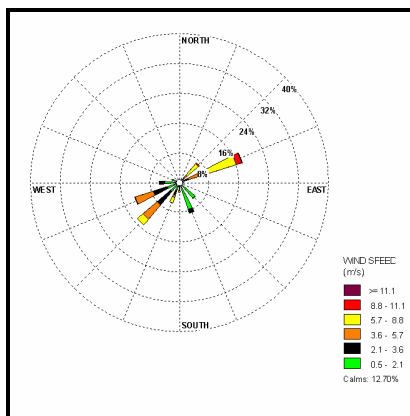


Diciembre

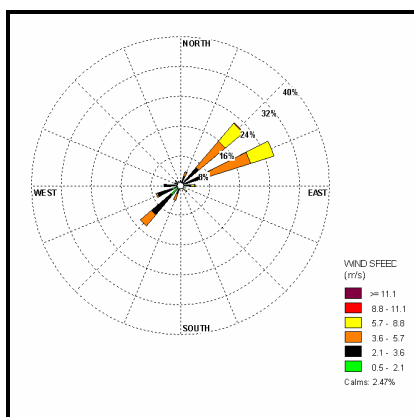
Año 2004 Estación 4. Estadio



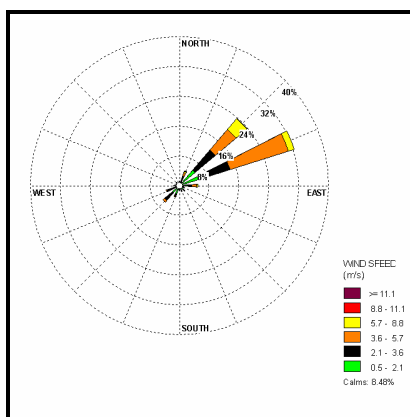
Enero



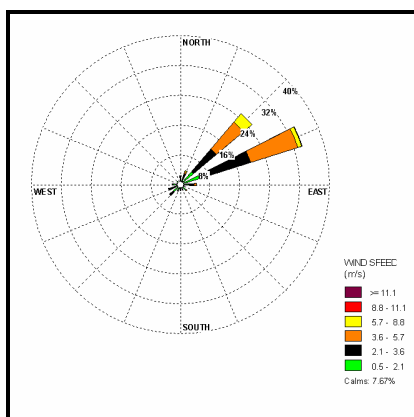
Febrero



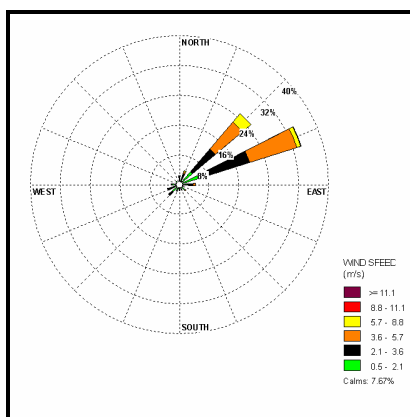
Mayo



Junio

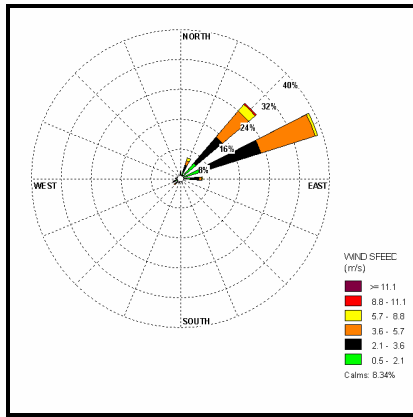


Julio

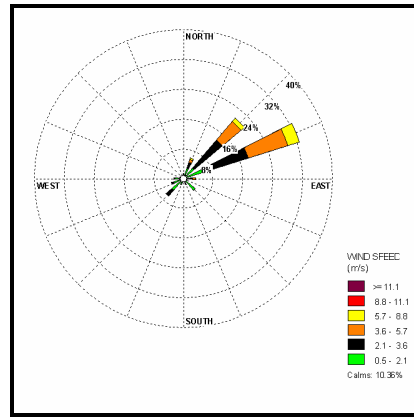


Agosto

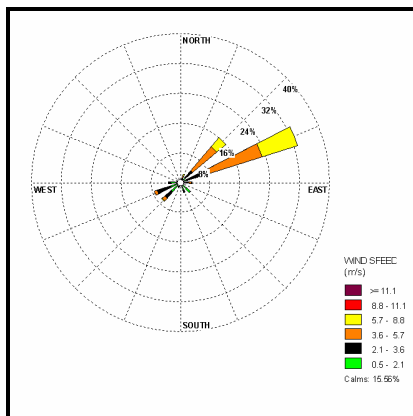
Año 2004
Estación 4. Estadio (continuación)



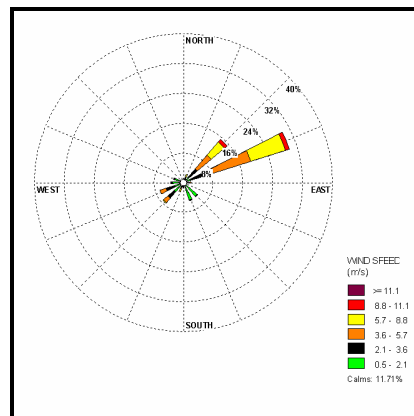
Septiembre



Octubre

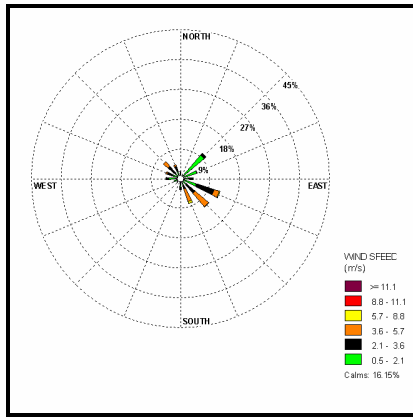


Noviembre

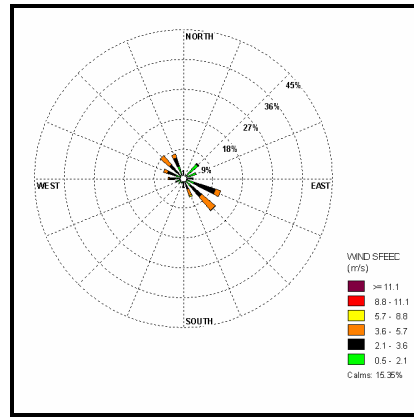


Diciembre

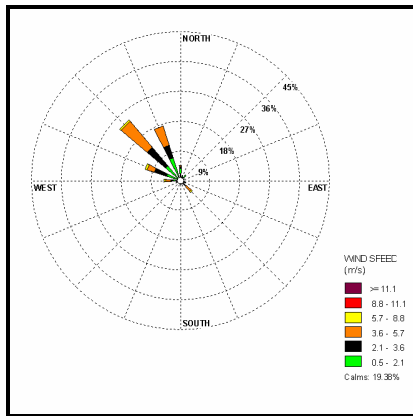
Año 2005
Estación 1. Félix Osores



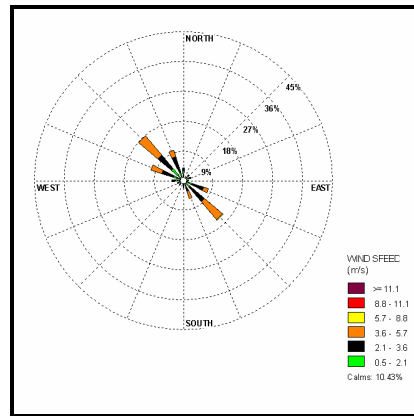
Enero



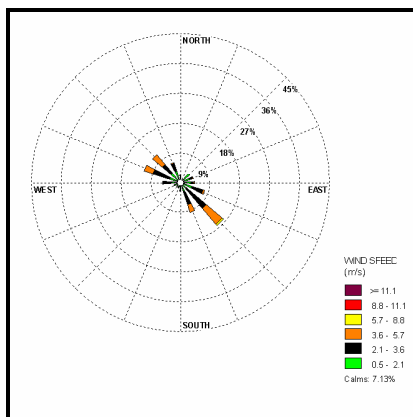
Febrero



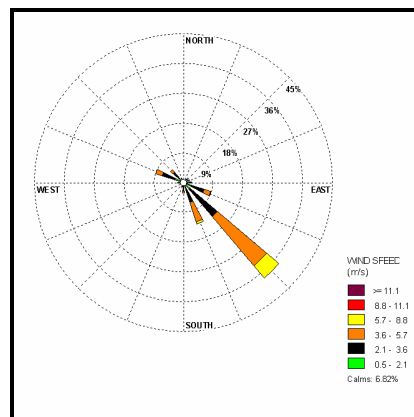
Marzo



Abril

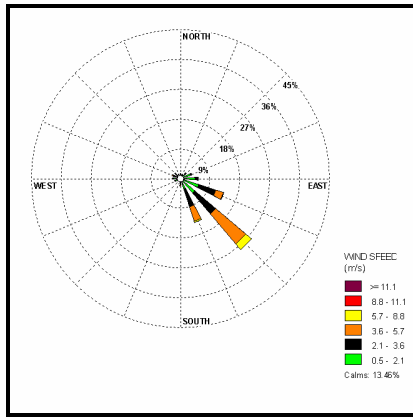


Mayo

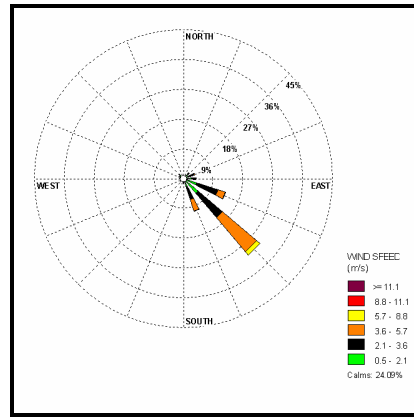


Junio

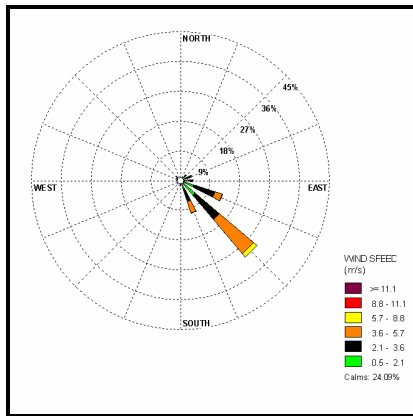
Año 2005
Estación 1. Félix Osores (continuación)



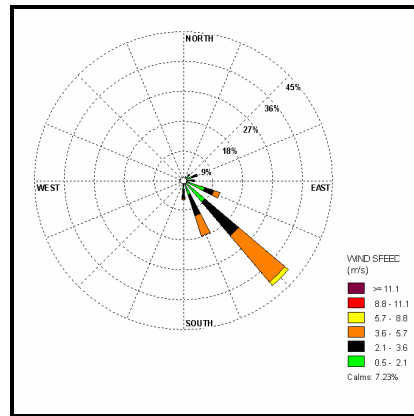
Julio



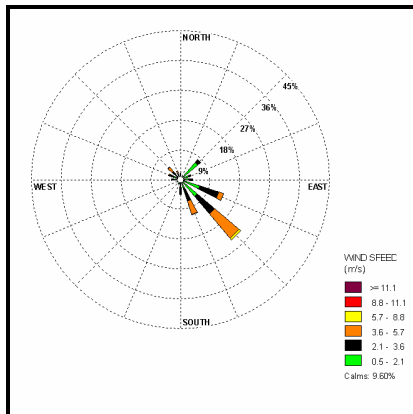
Agosto



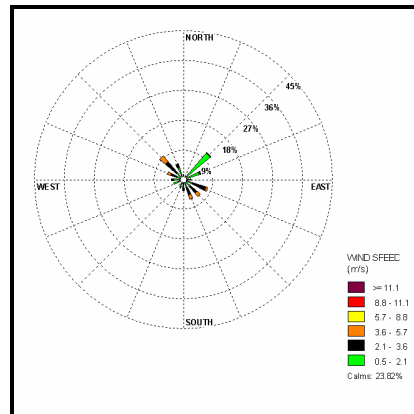
Septiembre



Octubre

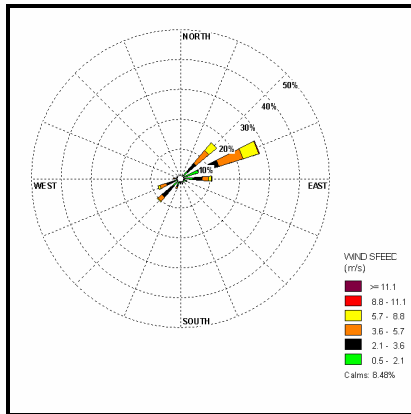


Noviembre

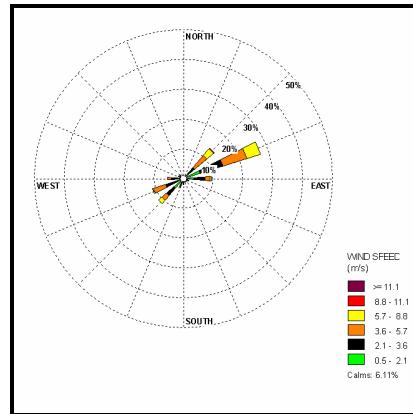


Diciembre

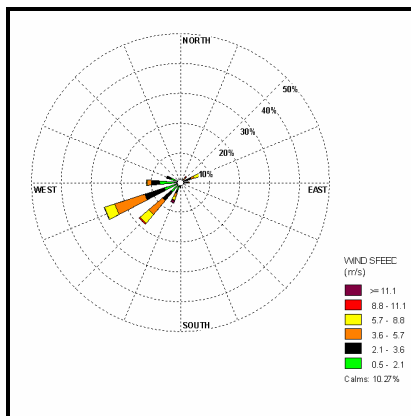
Año 2005 Estación 2. Tlaloc



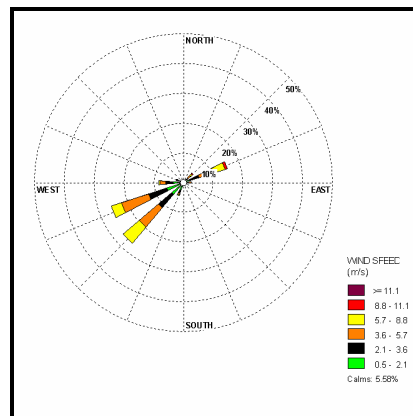
Enero



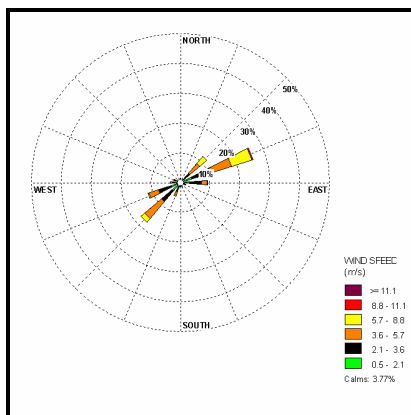
Febrero



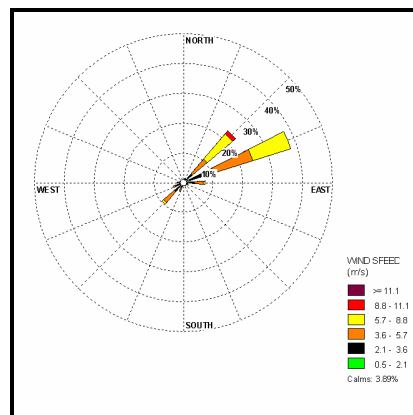
Marzo



Abril

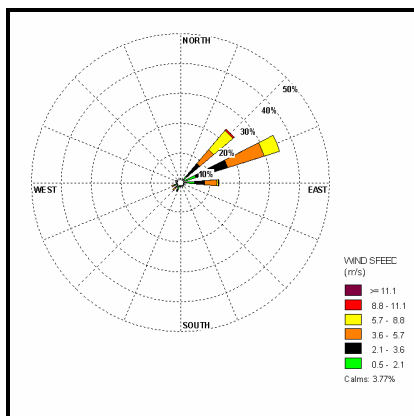


Mayo

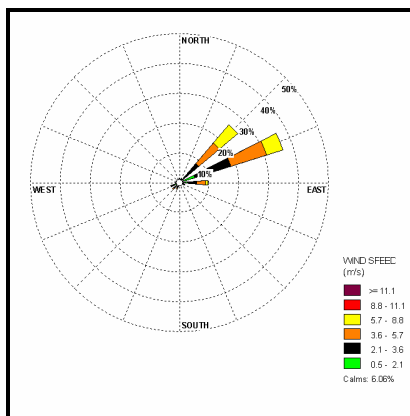


Junio

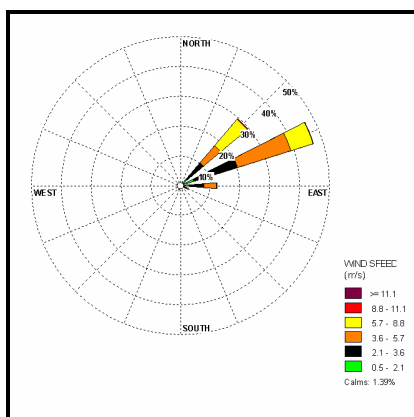
Año 2005
Estación 2. Tlaloc (continuación)



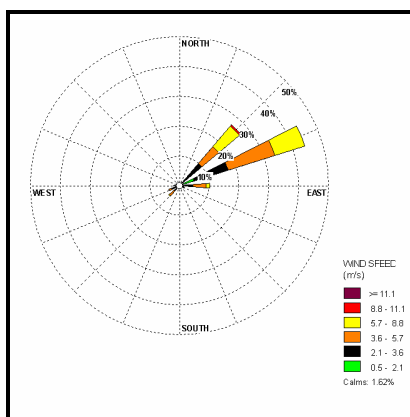
Julio



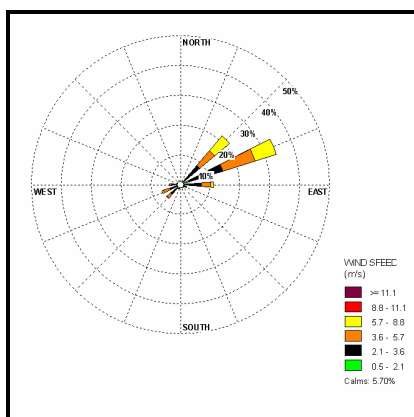
Agosto



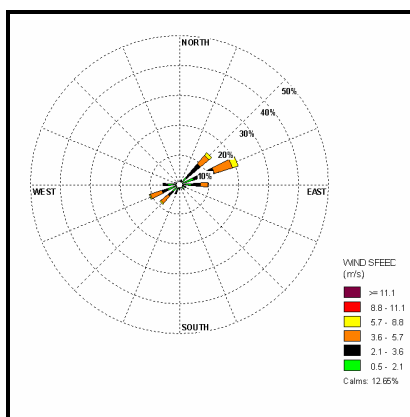
Septiembre



Octubre

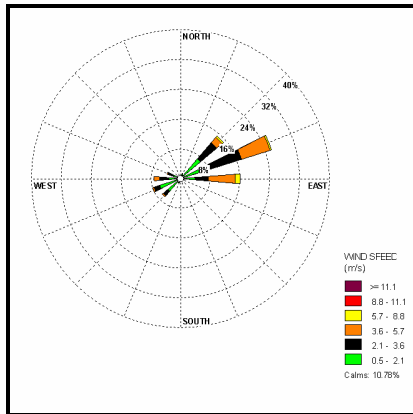


Noviembre

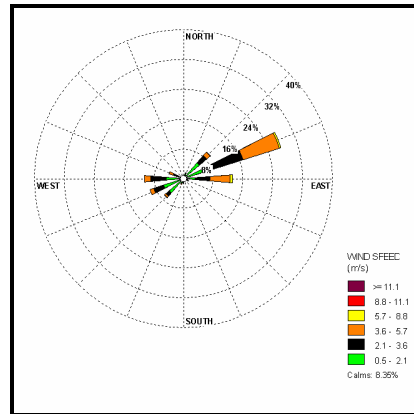


Diciembre

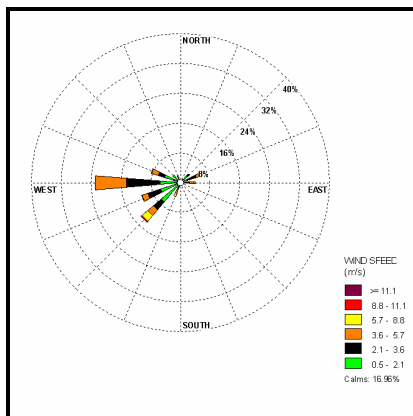
Año 2005 Estación 3. Centro



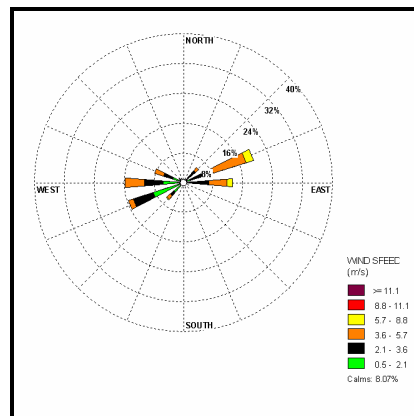
Enero



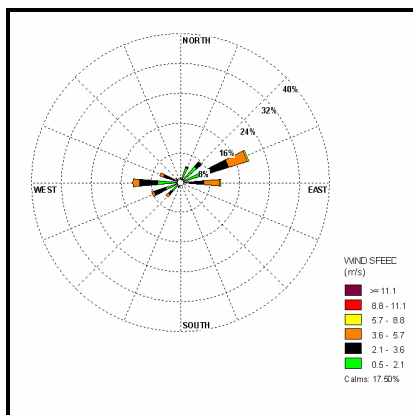
Febrero



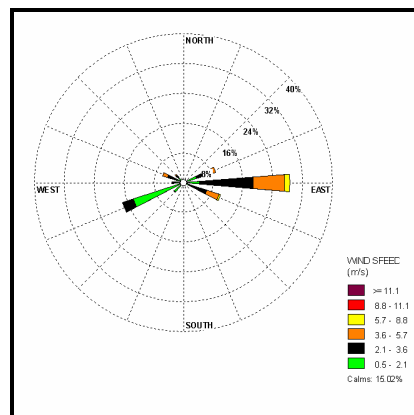
Marzo



Abril

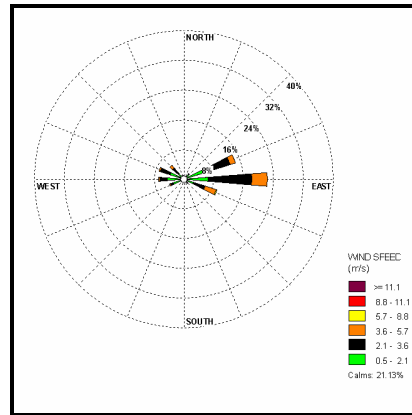


Mayo



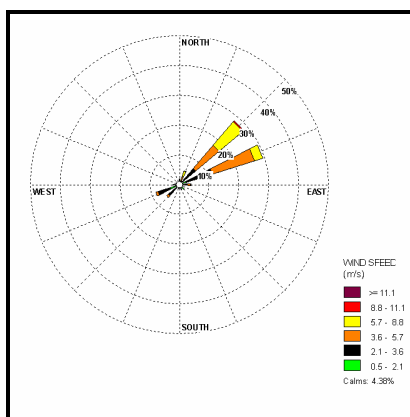
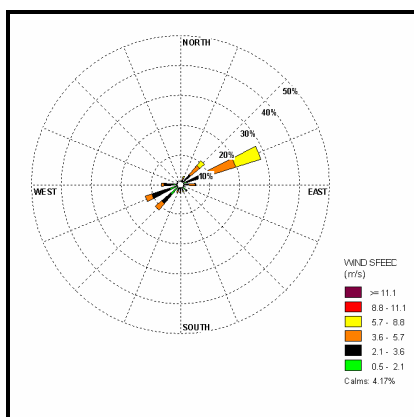
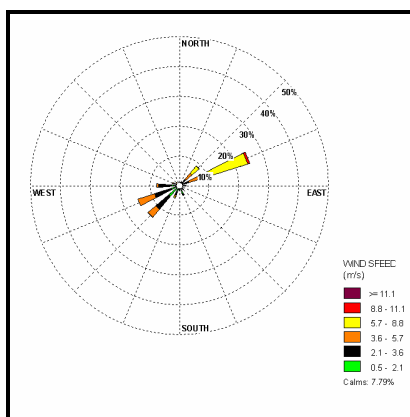
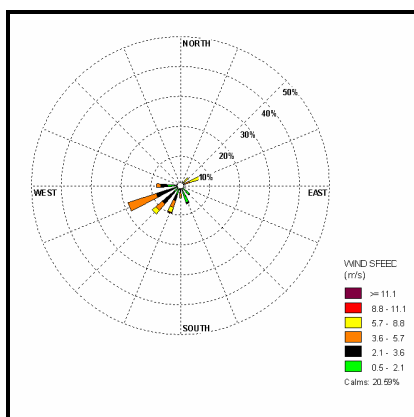
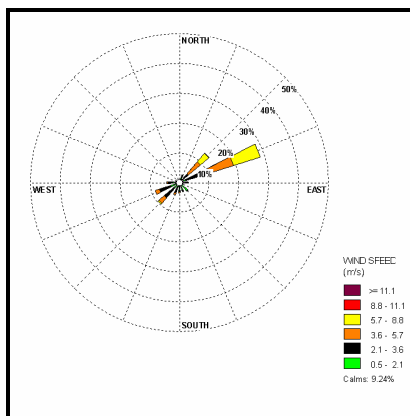
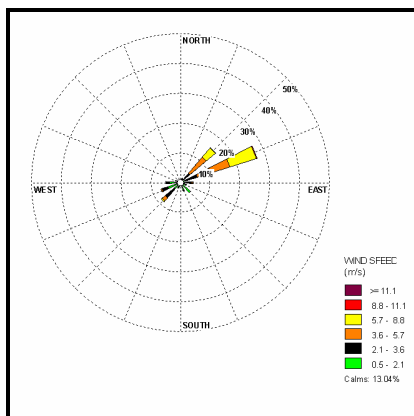
Noviembre

Año 2005
Estación 3. Centro (continuación)

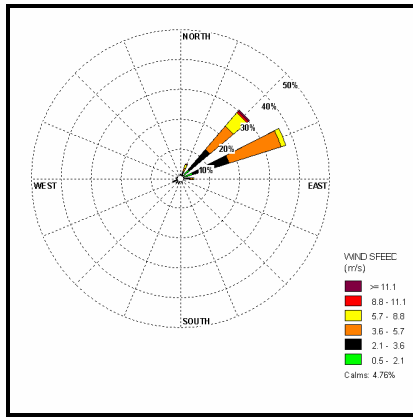


Diciembre

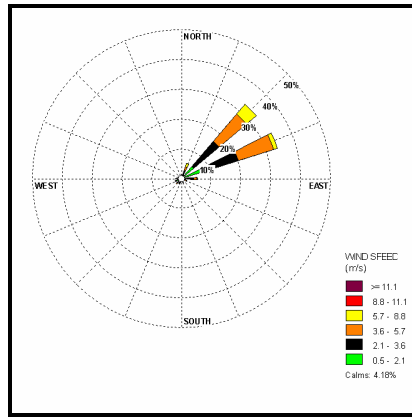
Año 2005 Estación 4. Estadio



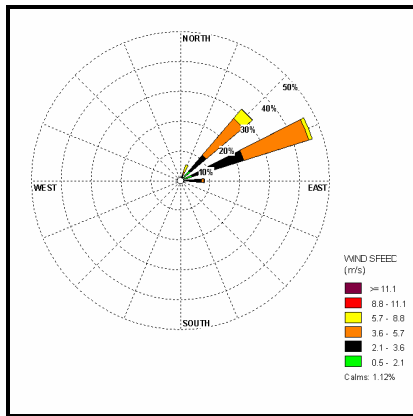
Año 2005
Estación 4. Estadio (continuación)



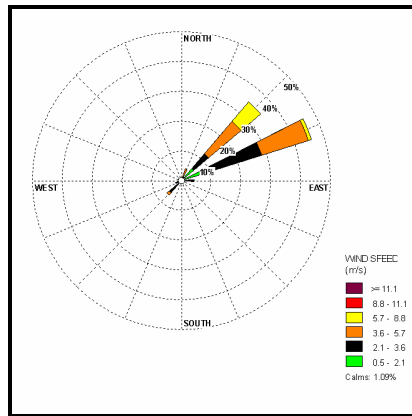
Julio



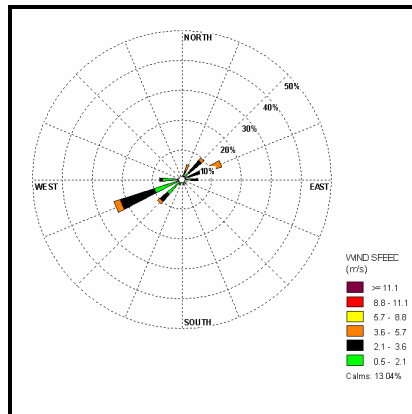
Agosto



Septiembre



Octubre



Diciembre