

INFLUENCIA DE EMISIONES INDUSTRIALES EN EL POLVO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Antonio ARAGÓN-PIÑA¹, Arturo A. CAMPOS-RAMOS¹, Roberto LEYVA-RAMOS², Martha HERNÁNDEZ-ORTA², Nicolás MIRANDA-ORTIZ¹ y Antoni LUSZCZEWSKI-KUDRA²

¹Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Sierra Leona 550, Col. Lomas 2^a Secc. San Luis Potosí 78210 S.L.P. Correo electrónico: aragon@uaslp.mx

²Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

(Recibido noviembre 2005, aceptado febrero 2006)

Palabras clave: partículas atmosféricas, emisiones antrópicas, elementos pesados, microscopía electrónica

RESUMEN

La ciudad de San Luis Potosí, México, se ha desarrollado alrededor de una gran actividad industrial minero-metalúrgica con más de un siglo de operaciones que han incrementado los niveles de contaminación por partículas con elementos pesados lo que ha provocado problemas de salud en la población, atribuidos exclusivamente a las refineras de cobre y zinc de la ciudad. Sin embargo, el alto desarrollo industrial ha dado lugar al establecimiento de otras empresas importantes situadas en una zona industrial cuya ubicación está diametralmente opuesta a la zona minero-metalúrgica, que también ha contribuido considerablemente en la generación de partículas contaminantes. La medición de los niveles de contaminación por partículas suspendidas totales y elementos pesados, ha proporcionado información global cuantitativa, sin embargo, estos estudios no aportan información específica de las características individuales de las partículas antrópicas y por tanto, no es posible asociar a tipos específicos de fuentes contaminantes. La contribución de este trabajo es revelar las características morfológicas y de composición química de las partículas atmosféricas, a través de técnicas de microscopía electrónica, lo que ha permitido asociarlas a tipos específicos de emisiones industriales. Con el objeto de comparar y confirmar la procedencia de las partículas atmosféricas antrópicas también se realizaron análisis de algunas emisiones industriales por las mismas técnicas.

Key words: airborne particles, anthropogenic emissions, heavy metals, electron microscopy

ABSTRACT

The city of San Luis Potosí, México, has grown in an area of intense metallurgic activity with more than a century of operations. This metallurgic activity has an impact on the pollution levels for heavy metals particles resulting in health problems in the population, that have been attributed exclusively to the copper and zinc refineries of the city. However, the high industrial development has given place to other important industries located in an area opposed to the location of the metallurgic zone. This industrial area has also considerably contributed to the generation of polluting particles. The measurements of pollution levels of total suspended particles and heavy

elements has provided quantitative global information, nevertheless, these studies do not generate specific information on the morphology and chemical composition of the anthropogenic particles, and therefore, it is not possible to associate them to specific types of polluting sources. The aim of this work is to reveal the morphological characteristics and chemical composition of the anthropogenic airborne particles, through electron microscopy techniques, which allow the association with specific industrial emissions. To compare and confirm the origin of the anthropogenic airborne particles, the characterization of some industrial emissions with the same methodology, has also been carried out.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de San Luis Potosí se localiza a $22^{\circ}09'10''$ latitud Norte y a $100^{\circ}58'38''$ longitud Oeste, en la parte central de México (**Fig. 1**). El clima es de tipo templado seco, su altitud es de 1877 m.s.n.m., predominan las rocas clásticas de origen aluvial, con una vegetación predominante de matorral crasicaule-espinoso. La topografía de la ciudad es bastante plana y forma parte de un gran valle (Medellín *et al.* 1988).

La ciudad posee una larga tradición en la actividad metalúrgica. Desde el inicio del siglo XX, se instaló al noroeste de la ciudad una refinera de cobre que llegó a ser la más importante a nivel nacional. Desde entonces, en esta refinera se han procesado

mineral y concentrados sulfurosos procedentes de todo el país. En 1982 se instaló una refinera de zinc que es actualmente una de las de mayor producción nacional y una de las más importantes en América Latina. Desde entonces, la ciudad de San Luis Potosí ha crecido alrededor de una intensa actividad minero-metalúrgica. Dentro de este ramo, tan sólo en el estado de San Luis Potosí existen 25 empresas que a nivel nacional, colocan a la entidad en el primer productor de fluorita, en la producción de zinc ocupa el segundo, el tercer lugar en la concentración y fundición del cobre, octavo lugar en la producción de plomo, noveno en plata y décimo en oro (INEGI 1999). Lo anterior conlleva a importantes actividades industriales en la ciudad principalmente en empresas de la transformación de minerales metálicos no ferrosos.

La ciudad capital también cuenta con dos áreas específicas para el establecimiento de las industrias, situadas ambas al sureste, y es lo que constituye la Zona Industrial. La primera sección se inauguró en octubre de 1963 y cuenta con una extensión aproximada de 10,860,000 m²; y en septiembre de 1981, se anexó una segunda sección de 12,831,146 m² de superficie. Es de suponerse que por la gran extensión y magnitud de numerosas industrias de esta zona, exista influencia en la contaminación atmosférica de la ciudad. En la Zona Industrial de la ciudad actualmente operan más de 253 empresas de las cuales sobresalen 35 fundidoras, 50 empresas en la industria básica del hierro, acero y metales no ferrosos, 34 empresas en la producción de auto partes, y 91 empresas dedicadas a la industria química (químicos básicos, hule, plásticos y productos farmacéuticos) (SEDECO, 2004).

En años recientes se ha incrementado el estudio y caracterización del polvo suspendido en el aire de ciudades con intensa actividad industrial donde los contenidos generalmente sobrepasan las normas ambientales en vigor (Rojas *et al.* 1990, Aldape *et al.* 1996, Miranda *et al.* 1994, Raga *et al.* 2001). Aunque existen muchos esfuerzos por cuantificar el tipo de contaminantes, poco se ha hecho por identificar las caracte-

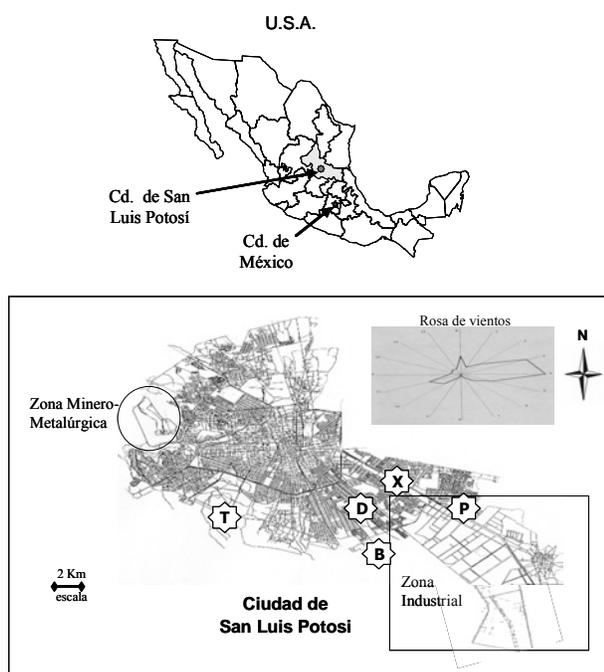


Fig. 1. Localización de las estaciones de muestreo y rosa de los vientos

rísticas individuales de las partículas que componen el polvo atmosférico, y que en numerosas ocasiones podrían proporcionar información de la naturaleza de las partículas (Ro *et al.* 2002, Krueger *et al.* 2003, Paoletti *et al.* 2003, Shi *et al.* 2003). Actualmente, en la ciudad de San Luis Potosí es donde se han hecho los estudios más completos de caracterización de partículas atmosféricas con metales pesados (Luszczewski *et al.* 1996, Aragón *et al.* 2000, 2002).

Entre los años de 1988 y 2002 se realizaron estudios de la calidad del aire en diferentes zonas de esta ciudad (Luszczewski *et al.* 1988, Medellín *et al.* 1988, Aragón 1999, Aragón *et al.* 2000, 2002). Estos estudios revelaron la presencia de un alto nivel de partículas suspendidas en el aire. Los niveles medios del total de partículas suspendidas (PST) y los niveles medios para plomo, cobre, zinc, arsénico y cadmio, excedieron los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estudios a nivel de salud pública en la ciudad, han revelado un elevado índice de enfermedades respiratorias, dermatológicas y de hipertensión arterial, que podrían estar asociadas a la presencia de partículas con metales pesados suspendidas en el aire (Batres *et al.* 1993, Díaz-Barriga 1999). El impacto toxicológico para los casos de plomo, arsénico, cadmio, mercurio y otros elementos pesados es bien conocido (Corey 1982).

En San Luis Potosí los estudios de microscopía electrónica han revelado características muy peculiares de las partículas atmosféricas, que desde el punto de vista morfológico y de composición química, en numerosas ocasiones es posible distinguir entre partículas de origen natural y antrópico. Las partículas encontradas de mayor interés contienen elementos como plomo, cobre, arsénico, zinc y cadmio (Aragón *et al.* 2000), mismas que han sido asociadas a emisiones procedentes de la zona minero-metalúrgica (Aragón *et al.* 2002).

La mayoría de los estudios de la contaminación atmosférica llevado a cabo en la ciudad, se han enfocado hacia los entornos de la zona minero-metalúrgica que ha sido la principal fuente de contaminación de la ciudad, en donde el tipo de partículas atmosféricas contaminantes presentan relación directa con las emisiones de la refinera de cobre, sin embargo, hasta ahora no ha sido determinado el impacto de las emisiones de partículas a la atmósfera, de la relativamente reciente zona industrial de la ciudad, en donde predominan las industrias del ramo del acero y metal mecánico. La identificación de los diferentes tipos de partículas emitidas por la Zona Industrial, es esencial para poder asociar a las actividades industriales realizadas y establecer el impacto ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar las características individuales de las partículas antrópicas y naturales, se colectaron partículas PST, de las cuales se consideraron exclusivamente las partículas con tamaños iguales o inferiores a 10 micrómetros. Las partículas fueron colectadas en la ciudad de San Luis Potosí de mayo de 2003 a abril de 2004. Para la ubicación de las estaciones de muestreo se consideraron cuatro puntos identificados como B, D, X y P situados estratégicamente en zonas habitadas alrededor de la Zona Industrial (**Fig. 1**). Se consideró la influencia de las condiciones meteorológicas para lo cual se tomaron en cuenta los datos de los últimos 10 años en donde las condiciones han sido similares año con año, condiciones que se repitieron durante el periodo de muestreo. Además, se consideró otro punto de muestreo situado en la zona boscosa principal de la ciudad, conocido como el Parque Tangamanga I, intermedio entre la Zona Industrial y la zona minero-metalúrgica e identificado como T en la **figura 1**.

Los polvos atmosféricos fueron recolectados en filtros de fibra de vidrio mediante muestreadores tipo Alto-Volumen. Estos filtros cuentan con un pH ligeramente mayor a 7.5 y una eficiencia de colección de 99% de partículas de >0.3 micrómetros de diámetro. El tiempo de recolección para cada muestra fue de 24 h continuas y con una capacidad de 1.3 m³/min de aire. Los filtros fueron estabilizados antes y después del muestreo a 23 ± 2 °C y 40 ± 5 % de humedad relativa durante 24 h, para determinar por diferencia el peso de las partículas suspendidas totales (PST) y considerando el volumen del aire filtrado. Conocer la concentración durante el periodo de estudio, además de los niveles de PST, también se determinaron las concentraciones de Pb, As, Cd, Ni, Fe, Mn y Cu por espectrometría absorción atómica (EAA), con un equipo marca Varian modelo AA-220. El análisis implicó una previa disolución ácida de la muestra con mezcla del ácido nítrico (85%) y perclórico (15%).

Para determinar posibles asociaciones entre elementos, se realizó un análisis estadístico por componentes principales (ACP), a partir de los datos de concentraciones de elementos obtenidos por EAA (Karue y col., 1992; Aragón y col., 2000), para lo cual se usó el software XlstatPro y el procedimiento de rotación Varimax para el análisis de factores.

Se empleó la técnica de difracción de rayos X (DRX) para caracterizar las fases mayoritarias contenidas en los polvos atmosféricos recolectados, para lo cual se reunieron cantidades suficientes juntando

pequeñas porciones de muestras representativas, correspondientes a dos de los sitios de muestreo: el sitio más cercano a la Zona Industrial (P), y el punto más alejado que corresponde al Parque Tangamanga I (T). Se empleó un difractor de polvos marca Rigaku modelo D MAX-2200.

Para la microscopía electrónica de barrido (SEM), se tomó una porción del filtro y las partículas fueron arrastradas usando etanol mediante un lavado muy suave para no desprender las fibras del filtro, y posteriormente secar las partículas en una estufa a 30°C durante 2 horas. Posteriormente las partículas fueron montadas sobre soportes con película de grafito y adherente para luego aplicar una capa de carbón conductor para su análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

La morfología, tamaño y composición química de las partículas fue determinada por SEM con un sistema acoplado de microanálisis de energía dispersa (EDS). El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido marca Philips modelo XL-30, equipado con detectores de imagen de electrones secundarios y retrodispersados, y para el microanálisis, se empleó un EDS con detector de Si(Li) de 30 mm² marca EDAX modelo DX4. Los espectros de energía dispersa de rayos X fueron obtenidos a 20 KV del SEM con un tiempo de adquisición de 60 s y una rapidez de conteo entre 1000 y 2000 cps.

Se analizaron con especial énfasis aquellas partículas con características antrópicas como las que contienen elementos pesados, carbón, y todas aquellas distintas correspondientes a los minerales comunes de la corteza terrestre. Cabe señalar que el sustrato de grafito del portamuestras y el recubrimiento, no interfieren en el análisis de partículas con carbón y tampoco ocultan los detalles morfológicos.

Mediante estas técnicas, con base a la composición química, cada tipo de partículas fue asociado, a un determinado compuesto químico o fase mineral. Para esto, también se relacionó la especial morfología que presentan las especies minerales comunes como son su textura, clivajes y cristalización.

Se analizaron 1555 partículas con características antrópicas y con presencia de metales pesados. Estas

partículas formaron parte de 65 muestras recolectadas a lo largo de un año, las cuales se observaron mediante imágenes de electrones retrodispersados y secundarios para identificar principalmente las partículas con elementos pesados y características antrópicas. La composición química de cada partícula se obtuvo mediante microanálisis por EDS.

Se capturaron también emisiones de chimeneas y de procesos industriales por deposición directa de las emisiones, sobre portamuestras preparados para ser analizados por las mismas técnicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Partículas suspendidas totales y concentración de metales pesados

La influencia de los vientos y el clima semidesértico de la ciudad favorecen la resuspensión de partículas en el aire, y en la Zona Industrial la resuspensión se ve también favorecida por el alto tránsito vehicular que presenta, lo cual explica los elevados niveles de PST obtenidos, con una media aritmética anual de 483 µg/m³, considerando las cuatro estaciones de muestreo durante el periodo de estudio. Como se observa, estos niveles son muy elevados si se compara contra el límite máximo permitido que es de 90 µg/m³, propuesto por la OMS ó de 75 µg/m³ de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA-1993.

La estación del Parque Tangamanga (T) reportó una media aritmética anual de PST de 164 µg/m³, que resulta también elevada a pesar de que es la estación más alejada de las actividades industriales. En el **cuadro I** se indican los niveles de obtenidos en cada estación de monitoreo.

También se obtuvieron los niveles de algunos elementos pesados por absorción atómica, como Fe, Pb, Mn, Ni, Cu, Cd y As para todas las estaciones de muestreo (**Cuadro II**). En general, para la Zona Industrial, los niveles de metales pesados resultaron mayores con respecto a los niveles que se presentan en el Parque Tangamanga, sin embargo, en esta estación se encontró un elevado nivel de arsénico debido a una importante contribución de la zona minero

CUADRO I. CONCENTRACIÓN MEDIA ANUAL DE PST (µg/m³)

Zona Industrial				Promedio	Parque Tangamanga	Límite permisible (OMS)
B	D	X	P		T	
694.4	308.5	679.8	249.4	483.0	164.4	90

CUADRO II. CONCENTRACIÓN MEDIA ANUAL DE ELEMENTOS PESADOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Estación	Fe	Pb	Mn	Ni	Cu	Cd	As
B	9.34	0.42	0.45	0.09	3.31	0.13	0.38
D	4.97	0.24	0.18	0.06	1.13	0.09	0.25
X	8.18	0.20	0.26	0.09	1.31	0.08	0.28
P	4.66	0.17	0.14	0.08	1.03	0.03	0.12
Promedio Zona Industrial	6.79	0.26	0.26	0.08	1.70	0.09	0.26
T	1.51	0.23	0.05	0.04	1.30	0.04	0.30
Límite permisible (OMS)	32.0	0.20	1.00	0.025	0.60	0.01	0.01

metalúrgica (Aragón *et al.* 2002) y lo mismo sucede con los niveles de cobre y plomo. Según se muestra en el **cuadro II**, los niveles de metales pesados resultan muy elevados con respecto a los límites permisibles recomendados por la OMS, por ejemplo, en el caso del Cu en el área de la Zona Industrial, su concentración se eleva hasta $3.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que la concentración permisible es de $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; y resulta notable la concentración del As en el Parque Tangamanga, que se eleva hasta $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que su límite permisible es de $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Análisis estadístico por componentes principales

Para el ACP se procesaron 1694 datos de análisis químicos por EAA correspondientes a siete elementos analizados en 242 muestras de polvo atmosférico. En la matriz de correlación obtenida y de acuerdo con los valores más significativos, se aprecia una mayor relación entre pares de elementos como Pb-Mn (0.803), Mn-Ni (0.804) y otras de menor magnitud entre el Cd-As (0.545), Fe-Mn (0.540) y Pb-Ni (0.629) (**Cuadro III**), lo que implica una posible relación con procesos de fundición.

Para realizar el análisis por factores se consideró que el porcentaje o porción de la varianza acumulada fuera mayor a 75% de acuerdo al criterio de selección de número de factores, por lo cual se consideraron los tres primeros factores sucesivos para el análisis factorial (**Cuadro IV**).

Una vez determinado el número de factores, se

construyeron dos gráficas ortogonales correspondientes al análisis de factores con rotación. La interpretación gráfica de los planos factoriales se muestra en la **figura 2**, en donde las variables de Cd y As estadísticamente corresponden a variables asociadas, y similarmente ocurre para las variables de Pb, Mn y Ni. Para el caso del Fe resulta ser una variable estadísticamente poco independiente, y podría considerarse mayormente como variable libre o también tener posibles asociaciones con las variables anteriores, en cambio, la variable correspondiente a Cu resulta independiente al no presentar asociaciones.

Las altas concentraciones de As y Pb en el aire son originadas principalmente por la fundición de cobre y el proceso de tostado de arsénico en la zona minero-metalúrgica; además, en la Zona Industrial, por procesos de fundición de calcinas ricas en plomo, así como el reciclado de baterías, de empresas del perfil de enseres para el hogar (fabricación de estatores), y de circuitos eléctricos. Las altas concentraciones de Cd se deben principalmente a la presencia de partículas de As-Cd emitidas por procesos de fundición de calcinas ricas en plomo en la Zona Industrial, en donde el cadmio constituye asociaciones directas con plomo y arsénico, lo cual se corrobora con los resultados obtenidos por el análisis estadístico ACP, en donde se encontró la asociación de las variables de As-Cd.

Análisis global por difracción de rayos X

Mediante DRX se encontró que para el punto P, las fases más importantes por orden de abundancia corresponden a fluorita (CaF_2), calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), microclina (KAlSi_3O_8) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (ver **Fig. 3a**). Para el punto T, las fases detectadas corresponden a cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fluorita (CaF_2), microclina (KAlSi_3O_8) y albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) (**Fig. 5b**). De estos resultados cabe destacar la presencia de fluorita como una de las fases principales en la estación P y que también se detecta en la estación del Parque

CUADRO III. MATRIZ DE CORRELACIÓN

	Fe	Pb	Mn	Ni	Cu	Cd	As
Fe	1						
Pb	0.157	1					
Mn	0.540	0.803	1				
Ni	0.499	0.629	0.804	1			
Cu	0.058	0.097	0.180	0.109	1		
Cd	0.413	0.285	0.245	0.253	-0.030	1	
As	0.284	0.363	0.232	0.219	-0.015	0.545	1

CUADRO IV. VALORES ABSOLUTOS Y PORCENTAJE DE DISTRIBUCIÓN DE VARIANZA

	Antes de rotación		Después de rotación	
	Magnitud	% varianza	% acumulada	% varianza
Valor 1	3.174	45.3	45.3	37.1
Valor 2	1.301	18.6	64.0	25.6
Valor 3	0.928	13.3	77.2	14.5
Valor 4	0.846	12.1	89.3	0.0

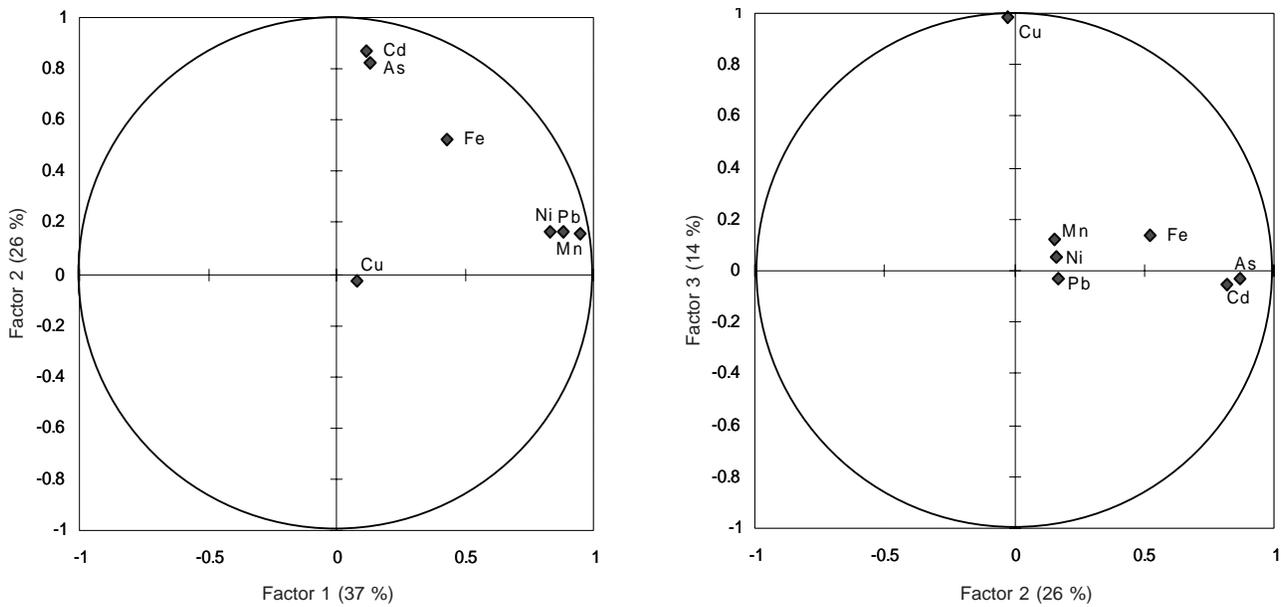


Fig. 2. Planos factoriales 1-2 y 2-3 con rotación que representan a las variables del análisis de factores de 1694 datos de análisis químicos por absorción atómica

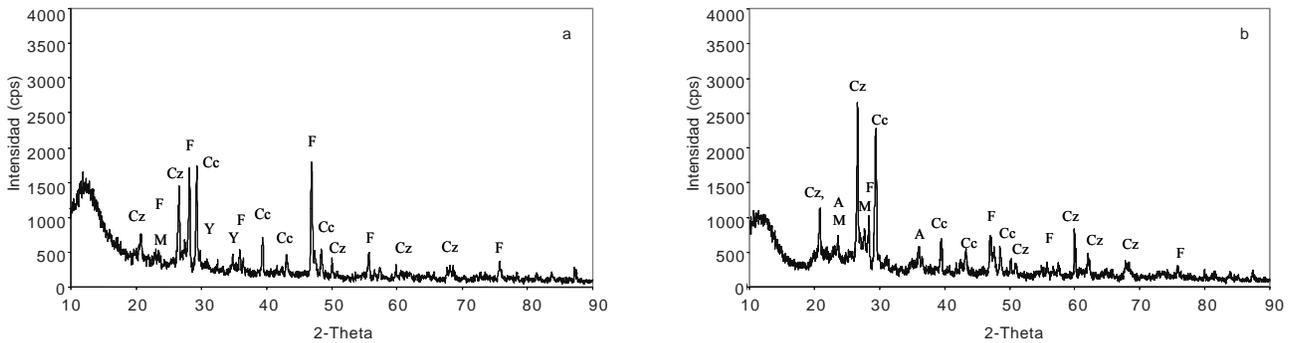


Fig. 3. Patrones de difracción de rayos X de los polvos atmosféricos de (a) de la estación P del entorno de la Zona Industrial, (b) de la estación Parque Tangamanga. Fluorita (F), cuarzo (Cz), calcita (Cc), microclima (M), yeso (Y), albita (A)

Tangamanga. Es indudable la influencia que tiene la Zona Industrial en cuanto a la presencia de partículas de fluorita en el aire de la ciudad, pues efectivamente en esta zona se realizan actividades de transporte, molienda y almacenamiento al aire libre de este mineral, lo cual explica la elevada concentración de fluorita en el aire.

Caracterización de partículas atmosféricas antrópicas por SEM

a) Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí

En los cuatro puntos de muestreo situados alrededor de la Zona Industrial (estaciones B, D, X y P), las partículas de tipo antrópico fueron clasificadas en grupos acuerdo a su composición química y morfología. Se encontraron varios tipos de partículas con un metal pesado dominante, lo que permitió su clasificación en partículas ricas en hierro, cobre, plomo, arsénico, zinc, níquel, estaño, aluminio, molibdeno y bismuto. Además hubo abundancia anormalmente alta de partículas de fluorita, lo cual concuerda con el estudio de DRX, y conlleva a clasificar estas partículas como antrópicas. La abundancia de partículas de fluorita tiene su explicación, ya que el mineral de fluorita es transportado hacia la Zona Industrial en donde se tritura y almacena al aire libre. También se encontraron abundantes partículas de residuos de la quema de combustóleo constituidas por carbón y azufre con trazas de vanadio y níquel, y que poseen una morfología esférica y porosa por la salida de gases resultantes durante la combustión (Aragón *et al.* 2000), además, se encontró otro tipo de partículas esferoidales constituidas por fosfatos de calcio.

La clasificación de estos grupos de partículas antrópicas se muestran en el **cuadro V**, en donde se indica su proporción relativa y tipo de morfología, y corresponden a 1555 partículas con características antrópicas y/o con elementos pesados. En la **figura 4** se presentan algunas fotomicrografías de las partículas antrópicas más representativas.

b) Zona boscosa Parque Tangamanga

En esta zona se encontró la abundancia de partículas atmosféricas de origen biológico, como fragmentos de plantas e insectos, y principalmente polen (**Fig. 5**). Sin embargo, en esta zona también se encontró la presencia de partículas antrópicas del tipo que se detectaron en la Zona Industrial, y corresponden principalmente a partículas de fluorita, residuos de la quema de combustóleo, y partículas esféricas de ferritas (**Fig. 6**). Además, se encontraron otros tipos de partículas antrópicas, que de acuerdo a su morfología y composición química, corresponden a partículas de

cobre metálico, sulfatos de plomo y trióxido de arsénico (**Fig. 6**) y de acuerdo con estudios realizados anteriormente (Aragón *et al.* 2000, 2002), las características de las partículas indican que su procedencia es la zona minero-metalúrgica, ubicada al NW de la ciudad.

La abundancia de partículas antrópicas en esta zona boscosa relativamente alejada de la Zona Industrial, se explica por los vientos dominantes durante la mayor parte del año, provenientes del E y ENE, que transportan las partículas antrópicas hacia el Parque Tangamanga. Por otra parte, y aunque en menor proporción, también existe la influencia de vientos procedentes del WSW y del N, principalmente durante el periodo invernal, lo cual explica la presencia de contaminación procedente de la zona minero-metalúrgica.

Caracterización por SEM de partículas emitidas por fuentes industriales

Las partículas atmosféricas de tipo antrópico más abundantes fueron comparadas directamente con las emitidas por algunas fuentes contaminantes de la Zona Industrial. Se realizaron muestreos directos en chimeneas y en procesos industriales. El propósito de estos muestreos fue identificar a las fuentes industriales que originan los tipos característicos de partículas antrópicas. Para este estudio se comprendieron emisiones de industrias del acero, automotriz, llantería, farmacéutica, enseres para el hogar, metal-mecánica, pailería y fundición de aluminio y bronce; asimismo, se realizaron muestreos en chimeneas de industrias en donde utilizan combustóleo o aceite como combustibles. Adicionalmente, se estudió una muestra del proceso de tostado de arsénico de la refinería de cobre de la zona minero-metalúrgica ubicada al noroeste de la ciudad.

En la **figura 7** se muestran algunas imágenes de algunos de los tipos de partículas más abundantes, en donde (a), (b), (c), (d) y (e) pertenecen a empresas de la Zona Industrial, (a) corresponde a óxido de hierro (ferrita) de una pailería, en (b) las pequeñas partículas esféricas son óxidos de hierro-zinc y corresponden a industrias del acero. En (c) se muestra una partícula de residuo de la quema de combustóleo, constituida por carbón-azufre con trazas de vanadio y níquel, de una fundidora de bronce que utiliza este combustible y que es muy usado dentro de la Zona Industrial. En (d) la partícula esférica de fosfato de calcio corresponde al tipo de partículas que se desprenden de industrias que emplean como combustible aceite automotriz usado, en este caso las fundidoras de bronce y aluminio; y finalmente, (e) pertenece a una partícula de aluminio proveniente de una industria de neumáticos. Las partículas de (f) son de emisiones de la

CUADRO V. CLASIFICACION DE PARTICULAS ATMOSFÉRICAS ANTRÓPICAS ENCONTRADAS EN EL ENTORNO DE LA ZONA INDUSTRIAL

Grupo elemento dominante	Abundancia relativa (%)*	Subgrupos	Morfología de partícula	% Partículas *
Ricas en Hierro	21.41	Ferritas	Esférica	8.31
		Óxido de Fe	Irregular	6.48
		Óxidos de Fe-Zn	Irregular	1.47
		Óxidos de Fe-Mn	Irregular	1.47
		Óxidos de Fe-Cu	Irregular	0.81
		Aleaciones Fe-Cr	Irregular	1.18
		Fe metálico	Irregular	0.88
		Óxidos de Fe-Ti	Irregular	0.44
		Aleaciones Fe-Ni	Irregular	0.37
Carbón-Azufre	20.75%	Carbón-azufre con trazas de V y Ni	Esférica y porosa	20.75
Ricas en Calcio	17.29%	**Fluorita	Forma mineral común	15.97
		Sulfatos de calcio	Cristales aciculares y tabulares	0.88
		Fosfatos de calcio	Esférica	0.44
Ricas en Cobre	16.92%	Cu metálico	Esférico	10.89
		Óxidos de Cu	Irregular	3.09
		Sulfatos de Cu	Irregular	0.88
		Sulfuros de Cu	Irregular	0.66
		Aleaciones Cu-Zn	Irregular	0.37
		Aleaciones Cu-Ag	Irregular	0.22
		Óxidos de Cu-As	Irregular	0.07
		**Calcopirita (CuFeS ₂)	Forma mineral común	-
		**Cobre nativo	Forma mineral común	0.74
Ricas en Plomo	9.35%	Óxidos de Pb	Irregular	2.65
		Sulfatos de Pb-Zn	Irregular	2.65
		Sulfatos de Pb	Agregados globulares	1.18
		Arseniatos de Pb	Agregados globulares	0.96
		Cloruros de Pb	Irregular	0.88
		Sulfatos de Pb-Cu	Irregular	0.74
		Aleaciones Pb-Sn	Agregados redondeados	0.29
		Trióxido de Arsénico	Cristales octaédricos	5.74
		Ricas en Arsénico	5.74%	Sulfatos de Zn
Ricas en Zinc	3.10%	Óxidos de Zn-Fe	Irregular	0.74
		Óxidos de Zn-As	Irregular	0.07
		**Esfalerita ((Zn,Fe)S)	Forma mineral común	0.52
Ricas en Níquel	2.06%	Ni metálico	Irregular	1.40
		Aleaciones Ni-V	Esférica	0.22
		Aleaciones Ni-Zn	Irregular	0.22
		Aleaciones Ni-Fe	Irregular	0.22
Ricas en Estaño	1.90%	Óxidos de Estaño	Irregular	1.47
		Aleación Sn-Pb	Agregados redondeados	0.22
		Cloruros de Sn	Irregular	0.07
		Aleación Sn-Zn	Irregular	0.07
		Sulfuros de Sn	Irregular	0.07
Ricas en Aluminio	0.88%	Óxidos de Aluminio	Irregular, laminar	0.52
		Óxidos de Al-Si	Esférica	0.22
		Aleación Al-Cu	Irregular	0.07
		Fluoruro de Al	Redondeada	0.07
Ricas en Bario y Estroncio	0.37%	**Barita (BaSO ₄)	Forma mineral común	0.15
		**Celestita (SrSO ₄)	Forma mineral común	0.15
		**Whiterita (BaCO ₃)	Forma mineral común	0.07
Ricas en Bismuto	0.15%	**Bi metálico	Laminar	0.15
Ricas en Molibdeno	0.07%	**Molibdenita (MoS ₂)	Laminar	0.07

* En número de partículas

** Se consideran antrópicas por su anormal abundancia relativa en el aire

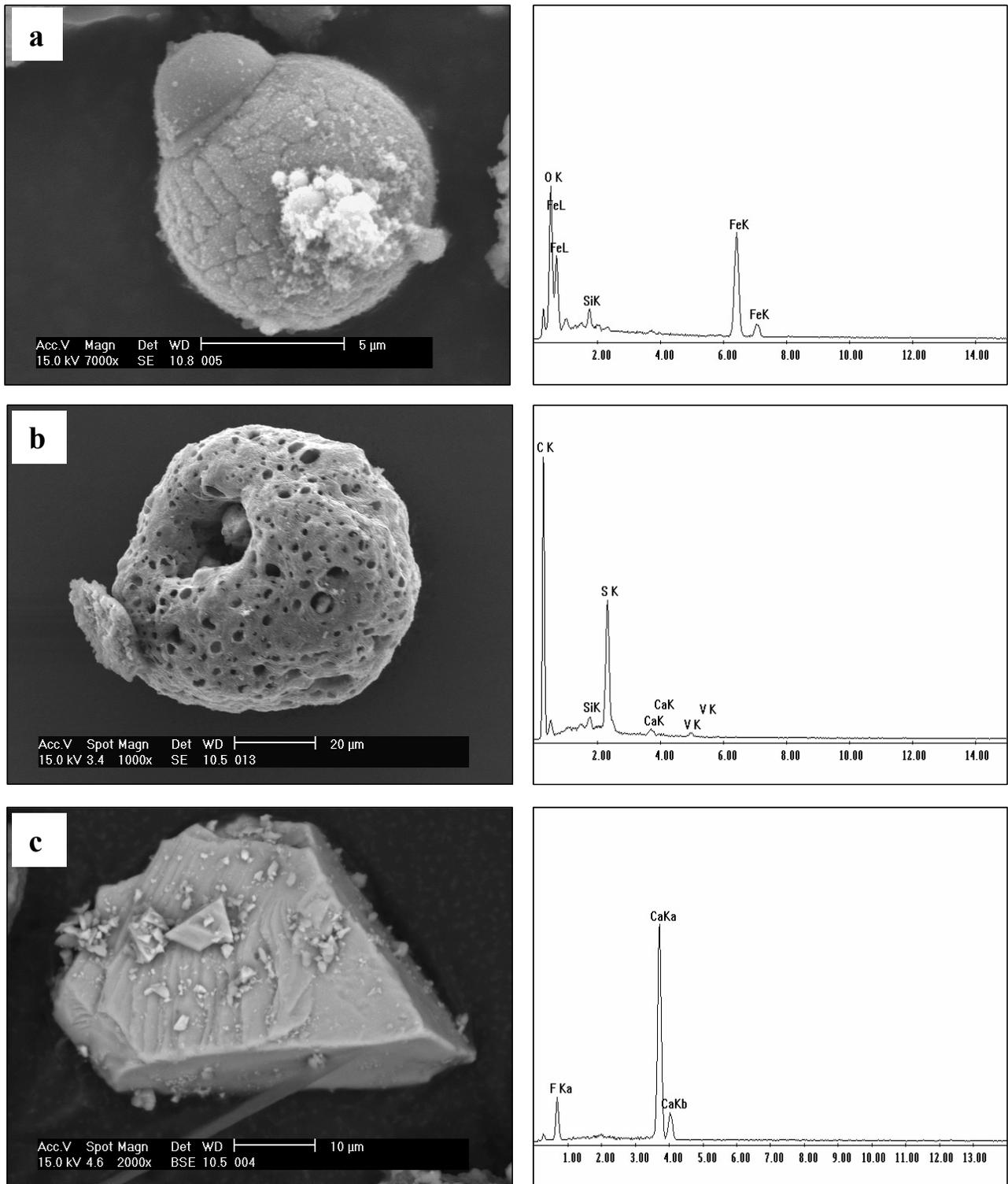


Fig. 4. Fotomicrografías y microanálisis EDS de partículas atmosféricas antropogénicas de la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí: (a) ferrita, (b) partícula de carbón-azufre con trazas de vanadio y níquel, (c) partícula de fluorita

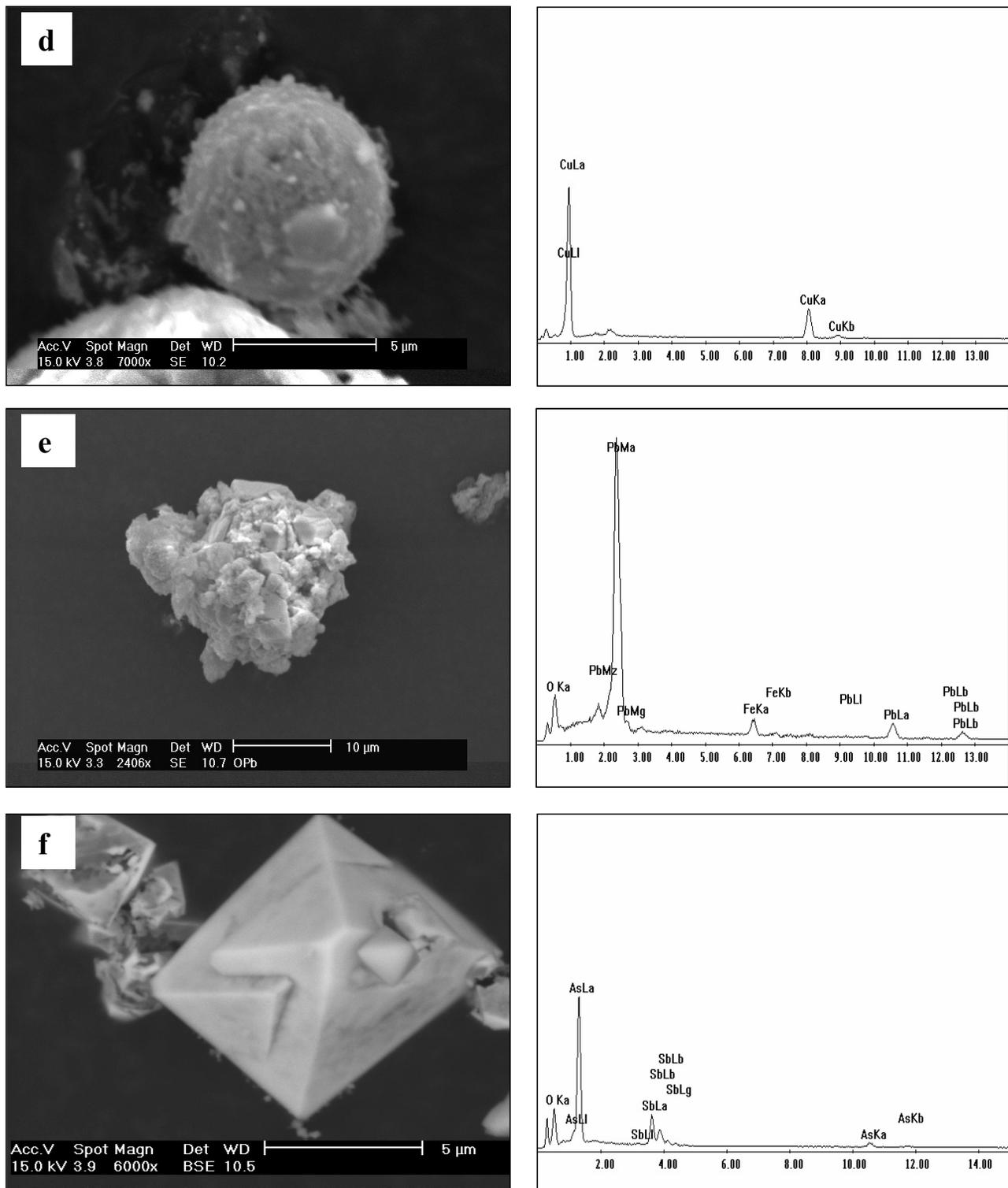


Fig. 4. (Continuación) Fotomicrografías y microanálisis EDS de partículas atmosféricas antropogénicas de la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí: (d) cobre metálico, (e) partícula sulfatos de plomo, (f) partícula de trióxido de arsénico y antimonio

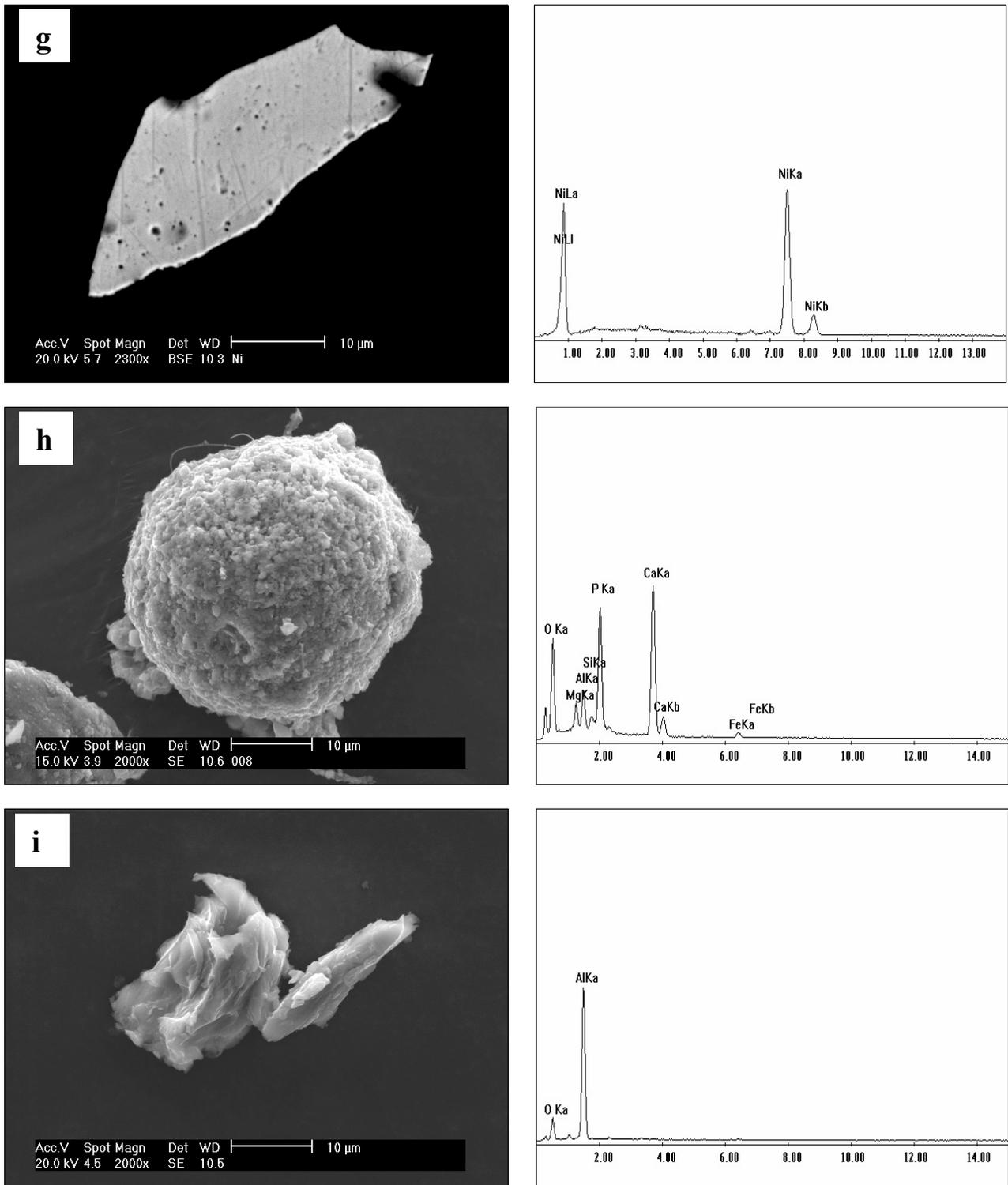


Fig. 4. (Continuación) Fotomicrografías y microanálisis EDS de partículas atmosféricas antropogénicas de la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí: (g) partícula de níquel, (h) partícula esférica de fosfato de calcio, (i) partícula de aluminio

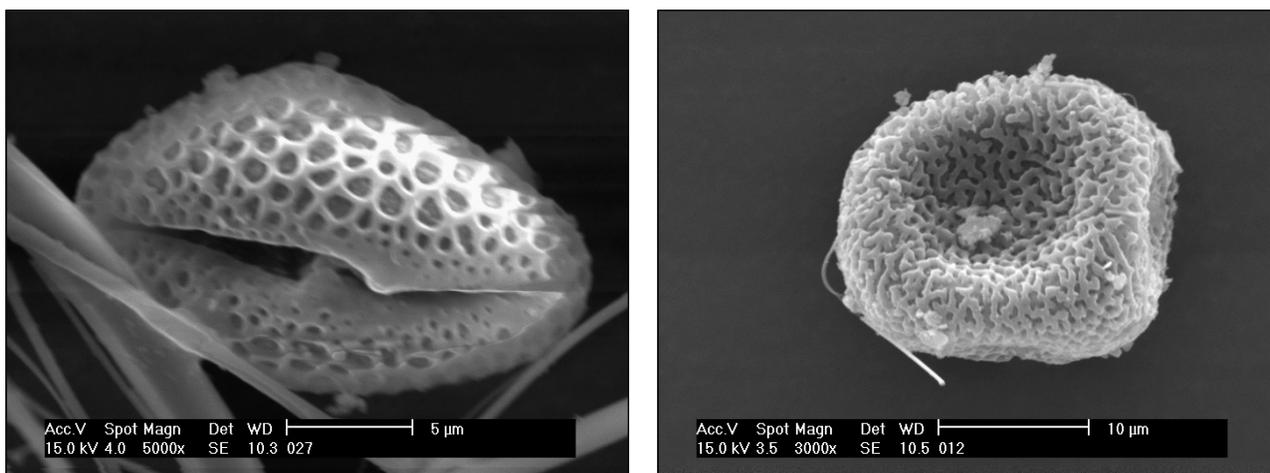


Fig. 5. Fotomicrografías de partículas atmosféricas de granos de polen recolectados en la estación Parque Tangamanga, en el que domina el material biológico y natural de la corteza terrestre

refinería de cobre de la zona minero-metalúrgica, aquí la partícula octaédrica es trióxido de arsénico y las partículas globulares de menor tamaño corresponden a sulfatos de plomo.

Se observa una gran similitud entre las partículas obtenidas de fuentes industriales con las partículas atmosféricas de tipo antrópico, lo cual permite asociarlas de manera directa con algunos tipos de fuentes contaminantes industriales, la similitud comprende tanto aspectos morfológicos como de composición química de las partículas.

Las altas concentraciones de cobre se deben a la presencia de partículas de cobre metálico, que es emitido por procesos de fundición de bronce ubicados en la Zona Industrial.

CONCLUSIONES

La ciudad de San Luis Potosí se ha destacado tradicionalmente por la intensa actividad minero-metalúrgica la cual ha tenido impacto en la contaminación del aire por partículas, sin embargo, en este trabajo se demuestra que la relativamente reciente Zona Industrial ubicada al oriente de la ciudad, ha contribuido de manera importante a incrementar la contaminación por partículas en el aire de la ciudad.

Las técnicas de SEM con microanálisis acoplado EDS, resultan ser una herramienta muy valiosa para la identificación del tipo de partículas atmosféricas contaminantes. La identificación de los tipos de morfología y composición química aporta valiosa información para establecer si es de origen natural o antrópico en un gran número de casos.

El tipo de partículas atmosféricas antrópicas difiere dependiendo del tipo de industrias establecidas en determinadas zonas dentro de la ciudad, lo cual permitió asociar a ciertos tipos de fuentes emisoras contaminantes de la ciudad de San Luis Potosí.

Es muy importante el conocer las características individuales de las partículas contaminantes que emite un tipo determinado de industria, para que de esta manera, se pueda establecer plenamente la procedencia o por lo menos el tipo de fuente, que origina cierto tipo de partículas contaminantes del aire.

Uno de los tipos de partículas atmosféricas que destacan por su abundancia corresponde a fluorita y sobre todo en los alrededores de la reciente Zona Industrial. Su presencia se debe a que dentro esta zona es transportado, triturado y molido este mineral el cual está expuesto al medio ambiente y es dispersado por los vientos.

Las direcciones de los vientos dominantes de la ciudad varían durante el transcurso del año, de los cuales destacan los que provienen del E y ENW que dispersan la contaminación de la Zona Industrial hacia la zona urbana de la ciudad, y en menor grado se da la influencia de vientos provenientes del WSW y del N que transportan las partículas antrópicas de la zona minero-metalúrgica hacia la zona urbana de la ciudad. Lo anterior explica el hecho de que la principal zona boscosa, ubicada entre las dos zonas industriales, se encuentre la presencia de partículas antrópicas provenientes de ambas.

Los niveles obtenidos de PST y metales pesados presentes en el aire de la ciudad de San Luis Potosí, resultaron muy elevados y concuerdan con los tipos de partículas que se detectaron por microscopía

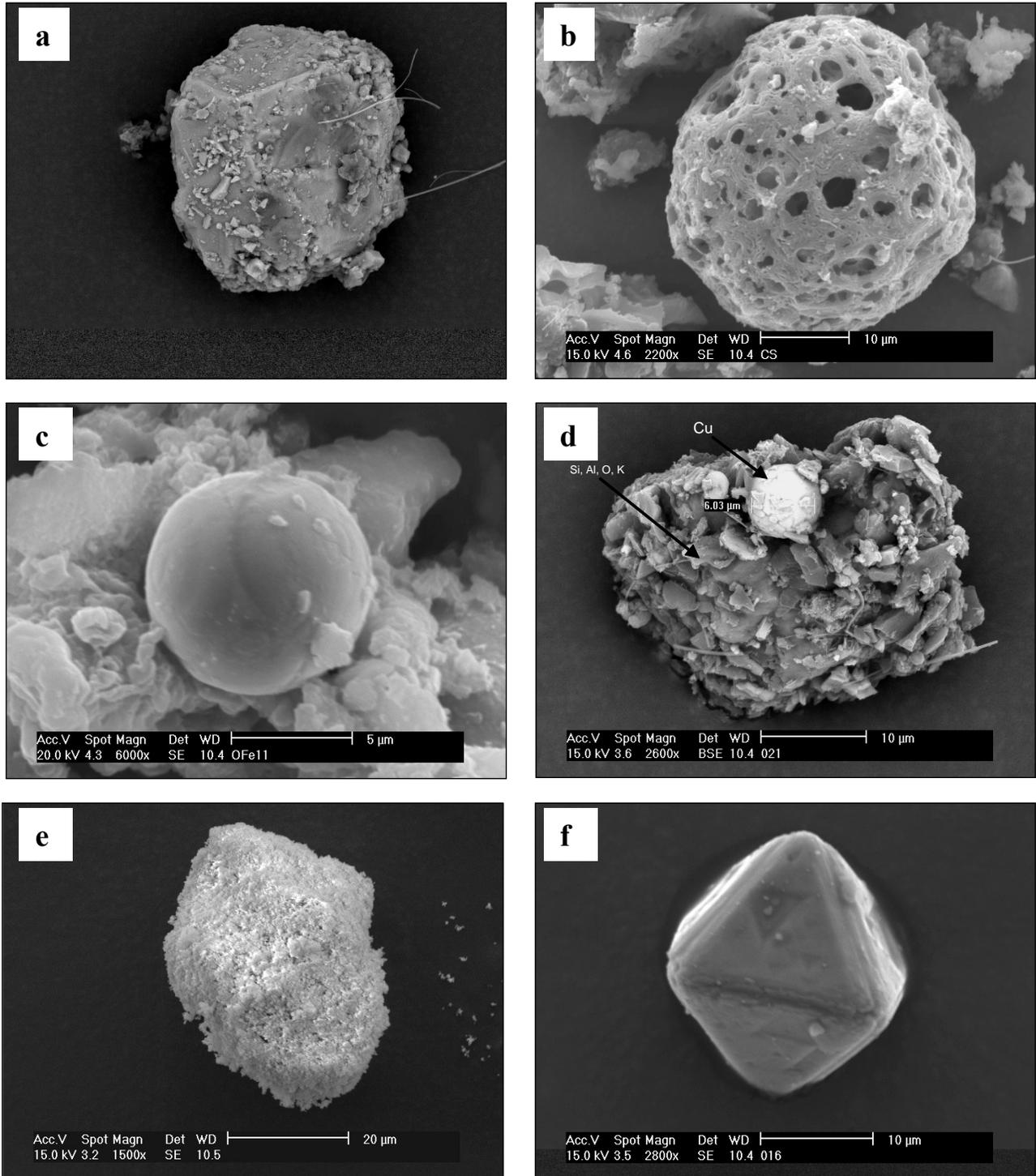


Fig. 6. Fotomicrografías de partículas atmosféricas antrópicas recolectadas en la estación Parque Tangamanga: (a) partícula de fluorita, (b) partícula de carbón-azufre, (c) partícula de ferrita, (d) partícula esférica de cobre, (e) partícula de sulfatos de plomo, (f) partícula de trióxido de arsénico

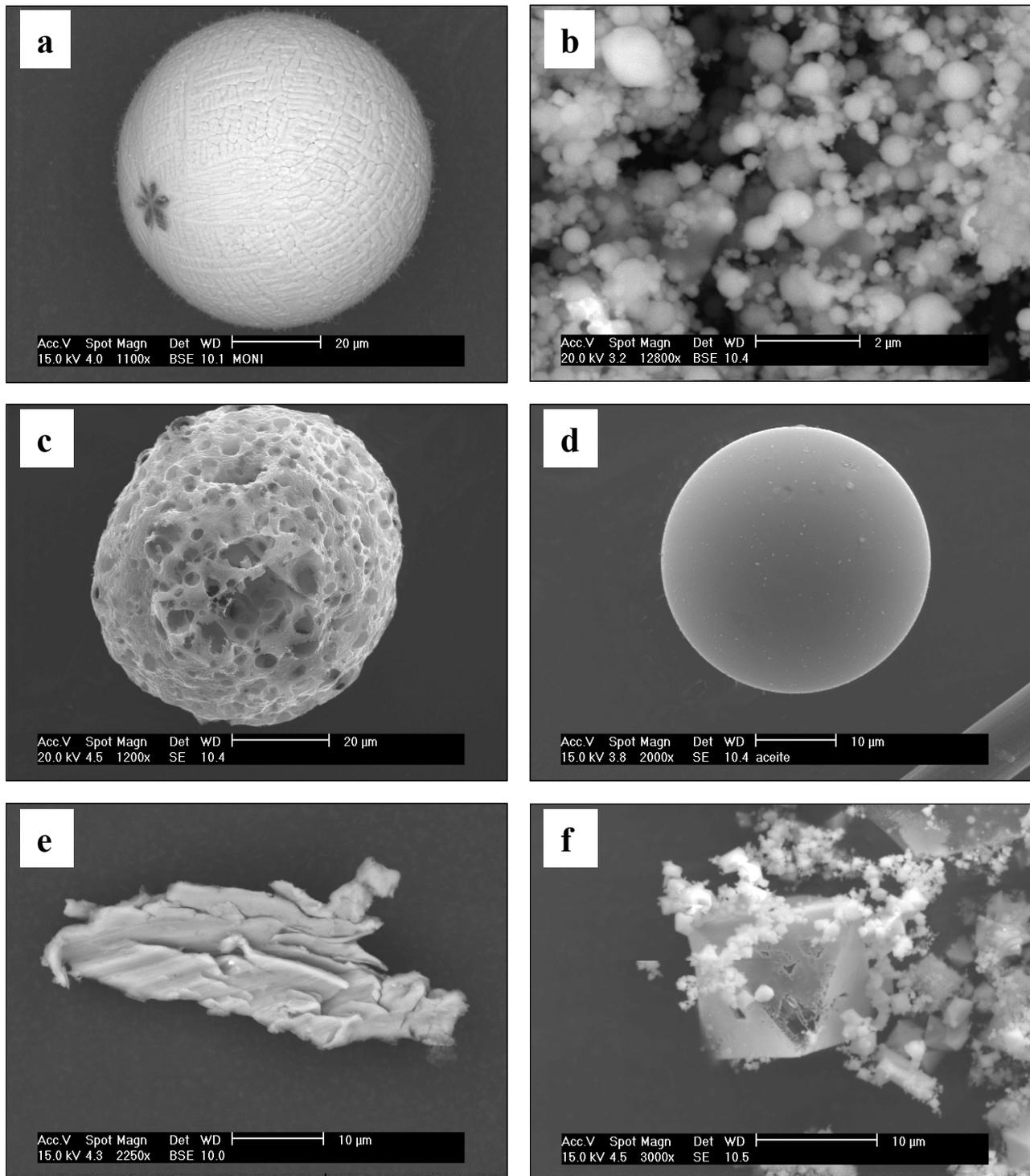


Fig. 7. Fotomicrografías de partículas emitidas a la atmósfera por fuentes industriales (a), (b) industrias del acero, (c) partícula de residuos de la quema de combustóleo de carbón-azufre y con trazas de vanadio y níquel, (d) partícula de fosfato de calcio emitida de la quema de aceite automotriz usado que se emplea como combustible, (e) partícula de aluminio emitida por industria llantera, (f) partícula de trióxido de arsénico y globulares de menor tamaño de sulfatos de plomo, emitidas por la refinera de cobre

electrónica, los cuales están directamente relacionados con las principales de actividades industriales desarrolladas en la ciudad.

El conocimiento generado mediante este tipo de estudios podría aplicarse como una herramienta de control y prevención muy selectiva en beneficio de la calidad del aire en ciudades donde se desarrolla una intensa actividad industrial, aunque es de esperarse que la asociación directa a fuentes emisoras industriales se complique enormemente en megaciudades con intensa actividad industrial y elevados volúmenes de emisión del tránsito vehicular y de focos domésticos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) a través de los proyectos SIGHO 2002020606 y SEMARNAT 2004-C01-48, así como la beca CONACYT No. 177848.

REFERENCIAS

- Aragón-Piña A. (1999). Características físicoquímicas y morfológicas del polvo suspendido en el aire de la ciudad de San Luis Potosí. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 164 p.
- Aragón-Piña A., Torres V.G. y Monroy F.M.G. (2000). Scanning Electron Microscope and Statistical Analysis of Suspended Heavy Metal Particles in Air Samples from a Metallurgically Active Mexican City. *Atmos. Environ.* 34, 4103-4112.
- Aragón-Piña A., Torres V.G., Santiago J.P. y Monroy F.M.G. (2002). Scanning and transmission electron microscope of suspended lead rich particles in the air of San Luis Potosí, Mexico. *Atmos. Environ.* 36, 5235-5243.
- Batres L.E., Carrizales L., Grimaldo M., Mejía J.J., Ortiz D., Rodríguez M., Yañez L. y Díaz-Barriga F. (1993). Caracterización del riesgo en salud por exposición de metales pesados en la ciudad de San Luis Potosí. *Environ. Res.* 62, 242-250.
- Corey G. y Galvao L.A.C. (1989). *Serie de Vigilancia*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud.
- Díaz-Barriga F. (1999). *Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú, 42 p.
- INEGI (1999). Información de Archivo. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. San Luis Potosí, México.
- Krueger B., Grassian V., Ledema M., Cowin J. y Laskin A. (2003). Probing heterogeneous chemistry of individual atmospheric particles using scanning electron microscopy and energy-dispersive x-ray analysis. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 75, No. 19, 5170-5179.
- Luszczewski K.A., Medellín P. y Hernández O.M. (1988). Medición de contaminantes de aire en San Luis Potosí, *Investigación*, 23-24, 89-100.
- Luszczewski K.A., Aragón-Piña A., Leyva R.R., y Hernández O.M. (1996). Características físico químicas de las partículas del polvo suspendido en el aire de la ciudad de San Luis Potosí. *Acances en Ingeniería Química*, 6, 145-151.
- Medellín M.P. y Hernández O.M. (1988). Método de evaluación de la influencia de la industria sobre la calidad del aire urbano. *Investigación*, 23-24, 82-88.
- Miranda J., Cahill T.A., Morales J.R., Aldape F., Flores M. y Diaz R.V. (1994). Determination of elemental concentrations in atmospheric aerosols in México City using proton induced X-ray emission, proton elastic scattering, and laser absorption. *Atmos. Environ.* 28, No. 14, 2299-2306.
- Paoletti L., Berardis B., Arrizza L., Passacantando M., Inglese M. y Mosca M. (2003). Seasonal effects on the physico-chemical characteristics of PM2.5 in Rome: a study by SEM and XPS». *Atmos. Environ.* 37, 4869-4879.
- Raga G.B., Baumgardner D., Castro T., Martínez-Arroyo y Navarro-González R. (2001). Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmos. Environ.* 35, 4041-4058.
- Ro Ch., Kim H., Oh K., Yea S., Lee Ch., Jang M. y Grieken R. (2002). Single particle characterization of urban aerosol particles collected in three Korean cities using low-Z electron probe X-ray microanalysis. *Environ. Sci. Technol.* 36, 4770-4776.
- Rojas C.M., Artaxo P. y Van Grieken. R. (1990). Aerosols in Santiago de Chile: a study using Receptor modeling with X-ray fluorescence and single particle analysis. *Atmos. Environ.* 24B, No.2, 227-241.
- SEDECO (2004). Directorio de empresas que operan en las zonas y parques industriales de la ciudad de San Luis Potosí. Secretaría de Desarrollo Económico. San Luis Potosí, México.
- Shi Z., Shao L., Jones L.P., Whittaker A.G., Lu S. y Beruble K.A. (2003). Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing. *Atmos. Environ.* 37, 4097-108.