



SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN AMBIENTAL

**Informe final de actividades dentro del marco de los términos de
referencia 2005**

**DETERMINACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS
SUSPENDIDAS DE ALGUNAS FUENTES FIJAS A PARTIR DE SUS
PERFILES MORFOLÓGICOS Y QUÍMICO ELEMENTALES**

Responsable: Dr. José David Sepúlveda Sánchez

Diciembre de 2005

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ANTECEDENTES	5
3. OBJETIVOS	7
4. MÉTODO Y PROCEDIMIENTO	8
4.1. DATOS DE MUESTRAS E INSTRUMENTOS	8
4.2. INSTRUMENTOS	10
4.2.1. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO	10
4.2.2. ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X (EDS)	11
4.3. PROCEDIMIENTO	11
4.3.1. MANUFACTURA DE PROBETAS	11
4.3.2. MÉTODO DE CONTEO	12
4.3.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS	13
5. OTRAS ACTIVIDADES	14
5.1. MANTENIMIENTO DEL LABORATORIO Y EQUIPO	14
5.2. DEMOSTRACIONES	15
6. RESULTADOS	15
7. DISCUSIÓN	17
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	18
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
ANEXOS	
A. TLAXCALA	A1-A610
B. GUATEMALA	B1-B448
C. ZACATEPEC	C1-C152
D. RAMA	D1-D163
E. METROBÚS	E1-E115
F. QUEROL	F1-F177
G. CENICA-INER	G1-G152
H. SITIO CENICA	H1-H104
I. COMACHUÉN	I1-I47
J. VORTEX	J1-J138

DETERMINACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS DE ALGUNAS FUENTES FIJAS A PARTIR DE SUS PERFILES MORFOLÓGICOS Y QUÍMICO ELEMENTALES

Informe Final

Se realiza el presente informe con base en los términos de referencia del proyecto correspondiente presentado en el mes de abril de 2005.

1. Introducción

Las partículas suspendidas representan uno de los objetos de estudio que más nos debe interesar por la complejidad y variedad de las mismas, especialmente aquéllas denominadas *respirables* o *PM10* y *PM2.5*, debido a que por su pequeño tamaño pueden ser inhaladas e incorporarse al organismo por diversos mecanismos y causar problemas de salud. Además, su presencia en el aire dificulta la visibilidad y representa un daño potencial a nuestra piel y conjuntivas oculares.

El incremento en las concentraciones de partículas suspendidas y su relación con la aparición o agravamiento de signos y síntomas respiratorios y cardiovasculares, no puede ser soslayado, ni su estudio postergado, ya que, en el momento actual, estos hechos se han convertido en uno de los principales intereses del área de la Salud Pública.

El conocimiento de las partículas suspendidas denominadas *fracción respirable*, y especialmente las de diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 μm , debe ser establecido de manera prioritaria, desde el momento mismo de su generación, tomando en cuenta la naturaleza de la fuente que las produce y todos los aspectos relacionados con dicha producción, como los horarios en que son producidas, la localización geográfica de la fuente y las tendencias características de los vientos en el área y su entorno.

A pesar de tener el conocimiento de la potencial toxicidad de muchas de las sustancias químicas que constituyen a las partículas suspendidas, no se conocen con certeza los perfiles morfológicos y químicos de sus fuentes de emisión y la manera como éstas se modifican en su tránsito en la atmósfera, manteniendo su tamaño o agregándose a otras para constituir partículas más grandes y de diferente morfología.

La composición de las partículas suspendidas, en muchos casos, resulta ser una mezcla compleja de diferentes elementos y compuestos, lo cual se explica por la gran variedad de fuentes emisoras y por la reactividad que suelen tener en el momento en que son generadas. Se han realizado estudios en diversas partes del mundo para caracterizar la composición y estructura de las mismas, pero no es suficiente la información que hasta el momento se tiene. En los últimos años, los esfuerzos de investigación se han centrado principalmente en la fracción *PM2.5*, y se ha encontrado que una muestra típica de esta fracción puede contener, además de carbono elemental y orgánico relacionado con las emisiones vehiculares del tránsito ciudadano, otros diversos tipos de compuestos, como

sulfatos, principalmente de calcio y amonio; cloruros, principalmente de sodio; nitratos, principalmente de amonio; materiales biológicos y otros compuestos orgánicos diversos. Además, se pueden encontrar oligoelementos, compuestos férricos y otros minerales que probablemente provengan de partículas de suelo resuspendidas o de actividades relacionadas con la construcción de inmuebles y caminos.

Tanto en las fracciones PM_{2.5} como en las PM₁₀ o mayores, se pueden identificar algunos marcadores químicos específicos, tanto en su forma elemental como constituyendo compuestos que indican, con probabilidad elevada, los procesos que les dan origen, y así podríamos deducir si el material particulado es emitido por una fuente de tipo industrial, o como resultado de algún proceso agrícola como la quema de biomasa para la preparación de la tierra previa a la siembra, o la quema de residuos. Por otro lado, la gran actividad de las ciudades, determina, de manera cotidiana, el uso de una gran cantidad de vehículos automotores que estarían emitiendo material particulado contaminante de manera casi constante. El área metropolitana de la Ciudad de México representa un ejemplo típico, al ser una entidad con una población cercana a los 20 millones de habitantes, una enorme actividad industrial y un elevado número de vehículos automotores. A estas condiciones se les suma como agravante las condiciones geográficas del Valle de México, situado en el altiplano central de la República Mexicana, a una altitud promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar, y con una orografía circundante que impide el libre flujo de las grandes corrientes de vientos y una topografía que, aunada a su altitud, determina condiciones favorables para la exposición solar la mayor parte del año.

Todas las condiciones mencionadas favorecen la actividad fotoquímica por la reacción de la energía solar con los compuestos emitidos por vehículos automotores, así como calderas y sistemas de combustión de diversas industrias, como las plantas productoras de energía o termoeléctricas, y además el consumo de gas LP, natural y otros combustibles en las actividades caseras.

A pesar de los estudios realizados hasta el momento mediante tecnología de análisis con el microscopio electrónico de barrido y el microanálisis mediante una sonda de espectrometría de rayos X acoplada al sistema de microscopía, se debe enriquecer la investigación del material particulado mediante el establecimiento de estrategias de muestreo, de manera sistematizada, que nos permitan seleccionar las partículas suspendidas de todas las fracciones posibles, no sólo en los típicos muestreos ambientales, sino también en estudios perimetrales a las fuentes de emisión o, mejor aún, en caso de ser posible, en chimeneas o ductos de expulsión.

En este proyecto se incluyeron monitoreos específicos de una fuente industrial de tipo metalmecánica, así como fuentes de área de quema de residuos agrícolas durante el proceso de la zafra. También se realizó el estudio de muestras obtenidas en trayectos de transporte público, específicamente en el corredor del Metrobús Insurgentes de la Ciudad de México, para determinar el tipo de exposición personal al material particulado al que se someten las personas que hacen uso de este medio de transporte; además, se realizaron muestreos de puntos específicos en algunos municipios del estado de Tlaxcala y en estaciones de monitoreo de la Ciudad de México.

En el rubro de la exposición personal, conviene destacar la continuación del estudio del carbono emitido por la quema de biomasa en estufas de municipios rurales, específicamente en la región de Comachuén del estado de Michoacán. También se estudiaron muestras provenientes de puntos conflictivos específicos de la ciudad de Guatemala, en el vecino país de Guatemala.

Por su importancia, el CENICA mantuvo su apoyo en estudios sobre la materia a gobiernos de diversas entidades federativas y otras áreas de la SEMARNAT, por ejemplo, muestreos de la RAMA del gobierno del D.F.

Todos los datos obtenidos en el presente estudio y los realizados en los años anteriores, resultan de utilidad para complementar algunos proyectos de investigación que se efectúan en el área de investigación en calidad del aire, y algunas otras áreas y laboratorios del propio CENICA.

2. Antecedentes

A partir de su creación, el CENICA estableció una línea de investigación sobre la naturaleza, origen y comportamiento de las partículas suspendidas mediante diversos métodos de investigación, y en el año de 1999, fue puesto en operación un equipo de Microscopía Electrónica de Barrido y Emisión Secundaria con una sonda para Microespectrometría de Rayos X acoplada al mismo, para el análisis de la composición química elemental. Con la implementación de esta tecnología, en el área de investigación de Calidad del Aire, ha sido posible realizar el estudio de muestras de partículas suspendidas provenientes de diversos sitios de monitoreo atmosférico. Durante el año 2000, se realizó el proyecto piloto denominado “Análisis de Muestras Provenientes de los Sistemas de Monitoreo de Partículas Suspendidas de Orígenes Diversos en Diferentes Áreas del Territorio Nacional”. Entre éstas se encontraron sitios del Estado de Morelos, Baja California Norte (zona de Tijuana) y regiones de la ZMVM, y de manera especial, la estación de monitoreo que el CENICA tiene en sus instalaciones en el campus de la UAM Iztapalapa. (Sepúlveda JD., 2000)

Este proyecto posibilitó establecer la metodología más adecuada para el manejo tanto de muestras obtenidas con equipos portátiles, como las de equipos estacionarios. Los resultados de este primer estudio que incluyó un periodo de un año, permitieron conocer que cerca del 50 por ciento de las partículas que se colectan por los sistemas mencionados son PM10, las que incluyen la fracción PM2.5, que en ese estudio representan poco más del 22 por ciento.

En el año 2001, fue realizado el estudio denominado “Caracterización y Clasificación de Partículas Mediante Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis de Rayos X, en Muestras Provenientes de 5 Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México” (Sepúlveda JD, 2001), circunscribiendo el tipo de muestras a la fracción PM10. El estudio comprendió 12 meses

del año, y las estaciones de monitoreo elegidas representaron las 5 regiones en que se ha dividido estratégicamente a la ZMVM para efecto de evaluación de la calidad del aire, todas ellas pertenecientes a la Red Manual del Sistema de Monitoreo Atmosférico (REDMA): Xalostoc (región noreste), Cerro de la Estrella (región sureste), Merced (región centro), Pedregal (región suroeste) y Tlalnepantla (región noroeste). En este estudio fueron analizadas muestras representativas de 120 filtros de sistemas de monitoreo de alto volumen, fracción PM10, de dos fechas quincenales de cada mes del año. (Sepúlveda JD, 2001)

Los resultados del análisis mostraron que en la región noreste (Xalostoc), se encontró el mayor número de partículas, y la mayor variedad, tanto en las consideradas naturales como en las antropogénicas. Asimismo, se observó que en la época seca-fría es mayor el número de partículas suspendidas. En contraparte, la región suroeste (Pedregal) nos mostró el sitio en donde se colectó el menor número de partículas en todas las temporadas.

A partir de los resultados de ese estudio, se pudo establecer un acercamiento en la relación del entorno y uso de suelo con las características de las partículas suspendidas, pero se requieren muchas más investigaciones para poder tener datos concluyentes al respecto.

Durante el año 2002, fue realizado un estudio para tratar de establecer la relación de la presencia de las partículas suspendidas antropogénicas con el entorno de las diferentes regiones del Valle de México, llevando a cabo la comparación de partículas provenientes de 120 fechas correspondientes a 12 meses, de agosto del 2000 a julio del 2001. Utilizando como criterios morfología y presencia de los denominados marcadores de combustión y otros marcadores antropogénicos, como el Carbono, Azufre, Vanadio, Potasio, Cloro y otros metales, fueron seleccionadas 600 partículas de un universo de 2400. Fueron clasificadas en 3 grupos de acuerdo a su tamaño: intervalo I (entre 10 y 2.6 μm), intervalo II (entre 2.5 y 1.1 μm), e intervalo III (de 1 μm y menores). En dicho estudio, la distribución de las partículas por región mostró a la región noreste (Xalostoc) como la de mayores concentraciones en los 3 tamaños, y a la región suroeste (Pedregal) como la de menores concentraciones. (Sepúlveda JD, 2002)

Aunque los resultados de dicho estudio permitieron realizar una asociación entre la morfología y la composición química, para proponer la agrupación de partículas con fines de clasificación, y aunque es posible determinar las probables fuentes de emisión de las partículas con base en el inventario de emisiones de las regiones involucradas, fue planteada como una necesidad la realización de estudios más amplios que nos permitan conocer la identidad de las partículas de los intervalos II (de 2.5 a 1.1 μm) y III (de 1 μm y menores). Esto se debe, principalmente, a la existencia de evidencias científicas de que hay una estrecha relación entre el agravamiento de las personas con sintomatología respiratoria y la exposición a elevadas concentraciones de partículas de diámetro igual o menor a 2.5 μm , además del incremento de la mortalidad en pacientes que padecen enfermedades cardiovasculares. (Borja-Aburto et al., 1998)

Interesados en el estudio de la fracción PM2.5 de las partículas respirables, el CENICA ha realizado, desde hace varios años, muestreos en diversos entornos, y participó de manera activa en el diseño de una red para el monitoreo de partículas menores a 2.5µm en la ZMCM orientada a la protección de la salud de la población, en cumplimiento a la revisión de la norma federal vigente, para establecer los límites permisibles de las concentraciones de partículas suspendidas, incluyendo un indicador para PM2.5. Los muestreos para este estudio incluyeron los 12 meses del año 2002, y de dichas muestras se seleccionaron las que se utilizaron para el estudio “Caracterización Morfológica y Química Elemental de Partículas PM2.5 en los municipios del Edo. de México: Ecatepec, Tlalnepantla y Nezahualcóyotl, y de las delegaciones Cuauhtémoc y Benito Juárez del D.F. mediante Microscopía Electrónica y Microanálisis Elemental por Espectrometría de Rayos X” (Sepúlveda JD, 2003), además del “Diseño e Instalación de la Red de Monitoreo de PM 2.5 en el Área Metropolitana de la Ciudad de México” realizado en el 2002, así como el estudio “Perfil Morfológico y Químico Elemental de Partículas Respirables en Fuentes de Emisión Puntual y Muestreos Ambientales” (Sepúlveda JD, 2004) y también la implementación de “Técnicas para el Análisis de Carbón Orgánico y Elemental” realizadas por personal de la Dirección de Investigación en Monitoreo y Caracterización de Contaminantes Atmosféricos de la DGCENICA.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Determinar la contribución de fuentes fijas específicas en emisiones de partículas suspendidas a la atmósfera a partir de la determinación de perfiles morfoquímicos mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido y microespectrometría puntal de rayos X acoplada en muestras de partículas suspendidas PM2.5, PM10 y/o PST obtenidas a partir de muestreos ambientales, perimetrales y/o en chimenea.

3.2. Objetivos específicos:

- 3.2.1. Determinar el perfil morfo-químico mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido y microespectrometría puntal de rayos X acoplada en muestras de partículas suspendidas PM2.5, PM10, y/o PST obtenidas a partir de muestreos perimetrales y/o chimena a realizarse por la Dirección de Investigación en Monitoreo y Caracterización de Contaminantes Atmosféricos en las siguientes fuentes:
 - Fuente industrial del tipo metal mecánica
 - Fuente de área de quema de residuos agrícolas
 - Fuentes vehiculares
 - Fuente industrial del tipo producción de energía
- 3.2.2. Caracterizar morfoquímicamente, a partir del análisis de microscopía electrónica de barrido y microespectrometría puntal de rayos X acoplada en muestras de partículas suspendidas PM2.5, PM10 y/o PST obtenidas a partir de muestreos ambientales de

los siguientes proyectos a cargo de la Dirección de Investigación en Monitoreo y Caracterización de Contaminantes Atmosféricos:

- Zona Metropolitana del Valle de México
- Municipio San Cosme Xalostoc, Tlaxcala
- Ciudad de Guatemala
- Comachuén, Michoacán
- Corredor Metrobús Insurgentes, Ciudad de México
- Solicitudes de apoyo por emergencias por parte de Gobiernos de los Estados y otras áreas de SEMARNAT

- 3.2.3. Determinar la contribución de algunas fuentes fijas en las emisiones de partículas suspendidas PM2.5, PM10 y/o PST mediante la comparación de los perfiles morfoquímicos y la caracterización de las muestras ambientales.
- 3.2.4. Capacitar al personal de la DGCENICA en la caracterización morfoquímica de muestras de partículas suspendidas PM2.5, PM10 y/o PST mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido y microespectrometría puntal de rayos X acoplada.
- 3.2.5. Elaboración de material de apoyo para la capacitación personal de la DGCENICA en la caracterización morfo-química de muestras de partículas suspendidas PM2.5, PM10 y/o PST mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido y microespectrometría puntal de rayos X acoplada.
- 3.2.6. Apoyo al personal de la DGCENICA en la difusión de resultados y experiencias de la DGCENICA en el estudio de caracterización morfoquímica de partículas suspendidas.
- 3.2.7. Elaborar un informe parcial y un informe final con la participación del personal de la Dirección de Investigación en Monitoreo y Caracterización de Contaminantes Atmosféricos de la DGCENICA.

4. Método y Procedimiento

Los muestreos fueron realizados dentro del periodo comprendido entre abril y noviembre de 2005.

4.1. Muestras

Fueron estudiados 12 filtros de los muestreos realizados en una compañía siderúrgica ubicada en el Municipio San Cosme Xalostoc, Tlaxcala, comprendiendo muestreos intramuros en fuente de las áreas de ollas, caldera y hornos, así como en la casa de filtros de bolsa, perimetrales y ambientales, en la zona de empresas y la población de Apizaco. Todos estos filtros recibidos correspondieron a muestreos de la fracción PM10 obtenidos con equipo de alto volumen sobre filtros de cuarzo de 8 x 10 pulgadas.

Del sitio CENICA se estudiaron muestras de 3 filtros de fibra de cuarzo de 8 x 10 pulgadas, obtenidas con equipo Andersen de alto volumen. Del proyecto para la evaluación

de concentraciones microambientales de partículas suspendidas en hogares rurales de la comunidad de Comachuén, Municipio de Nahuatzen, del Estado de Michoacán, se estudiaron muestras de 4 filtros de cuarzo de 37mm, ajustados para la fracción PM2.5, obtenidas con equipo de muestreo personal SKC.

Del estudio de exposición personal a contaminantes atmosféricos en transporte público para determinar el impacto en el corredor Insurgentes del Metrobús de la Ciudad de México, se recibieron para su análisis muestras de 6 filtros, 3 realizadas para la obtención de la fracción PM2.5 y 3 para la obtención de la fracción PM10, todas en filtro de microfibras de cuarzo con equipo de muestreo personal SKC.

Con respecto al sitio en donde se realizó una zafra, se eligió la comunidad de Zacatepec, Estado de Morelos, de donde se recibieron 4 filtros de microfibras de cuarzo obtenidos con equipo de alto volumen, ajustados para la fracción PM10.

Todas las muestras correspondientes a la Ciudad de Guatemala, fueron obtenidas en muestreadores dotados de filtros de cuarzo de 8 x 10 pulgadas, del tipo Andersen para alto volumen, y ajustados para la fracción PM10. Fueron realizadas en 2 sitios característicos de la ciudad, correspondiendo uno de ellos a la Universidad de San Carlos de Guatemala, campus Ciudad Universitaria, y el otro al Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá, ubicado en una avenida de alto tránsito vehicular. Se realizaron probetas de un total de 12 filtros.

Además fueron estudiadas muestras de 4 filtros correspondientes al estudio de caracterización de partículas suspendidas obtenidas con equipo Wedding 2 de alto volumen de microfibras de cuarzo de 8 x 10 pulgadas, todos realizados en la estación CENICA y que serán estudiados próximamente en el Instituto de Ciencias de la Tierra, en Barcelona, España, por el Dr. Xavier Querol.

Fueron estudiadas también muestras de fracciones PM10 obtenidas con bomba Vortex en 6 filtros de microfibras de cuarzo de 37mm, todas de la estación Ciudad de México. Como apoyo al Gobierno del D.F., se estudiaron 5 filtros obtenidos en las estaciones de monitoreo Pedregal, Tlalnepantla, Xalostoc, Merced y Cerro de la Estrella, todas etiquetadas como RAMA PM10.

Finalmente, fueron estudiadas muestras de 12 filtros de microfibras de cuarzo de 8 x 10 pulgadas, obtenidas con equipo de alto volumen ajustado a la fracción PM10, en las estaciones CENICA, Merced y Xalostoc, todas ellas dentro del subproyecto de colaboración con el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias de la Secretaría de Salud para la búsqueda de Carbono y elementos tóxicos en 3 temporadas climáticas en la Ciudad de México.

Cabe mencionar que, desde su entrega al laboratorio, los filtros fueron mantenidos en condiciones estables dentro de un desecador con sílica gel a la temperatura del laboratorio (20° C), hasta el momento de la realización de las probetas (muestras para observación en microscopía).

4.2. Instrumentos

4.2.1. Microscopio Electrónico de Barrido

Para el presente estudio fue utilizado un microscopio electrónico de barrido y emisión secundaria con control de rangos variables de vacío (presión variable) de la marca JEOL modelo JSM-5900 LV, con un espectrómetro EDS acoplado marca Oxford. Este sistema emite rayos catódicos mediante emisión termoiónica por el calentamiento de un filamento de tungsteno de manera controlada (radiación β). Estos electrones constituyen una radiación primaria o electrones primarios y pueden ser acelerados mediante una fuerza de atracción ejercida por la diferencia de potencial eléctrico entre el cátodo, donde se encuentra el filamento, y el ánodo, en forma de una placa perforada en su centro. Los electrones acelerados por diferencias de potencial entre 1000 y 35,000 voltios que atraviesan el ánodo, constituyen un haz que puede ser conducido hasta el material de estudio a través de su paso por una columna al vacío, dotada de sistemas electrostáticos y electromagnéticos que lo concentran para reducir su diámetro y le imprimen un movimiento de barrido electrónico, que consiste en el recorrido, punto por punto, y en forma lineal, de un área determinada.

El choque de estos electrones primarios sobre la superficie de la muestra da como resultado la interacción de su energía con los materiales que están siendo bombardeados, originándose diversos tipos de señales que son captados por detectores especiales. Entre estas señales de la superficie de las muestras bombardeadas, se encuentran electrones secundarios que nos proporcionan información sobre su morfología integral, lo que nos permite reconocer en estas *imágenes de electrones secundarios*, en el caso de las partículas, su tamaño, su forma, su textura y su aspecto. Para poder lograr esto, este sistema de formación de imagen se basa en la detección y colección de los electrones de cada punto superficial de emisión. Estos electrones son inducidos a un tubo intensificador de imagen como los que se utilizan en las cámaras de televisión, en sincronía con el barrido electrónico del haz primario. Las señales, entonces, son conducidas a un monitor de televisión que genera la reconstitución ampliada en su pantalla, punto por punto, de la imagen electrónica generada por la superficie de la muestra, lo que nos da una imagen de gran detalle y contraste.

Además del sistema mencionado anteriormente, los electrones del haz primario pueden penetrar la muestra un escaso espesor y, al ser desviados por los materiales bombardeados, lo que se denomina dispersión electrónica o retrodispersión, pueden ser atraídos y captados por detectores especiales para los mismos, y construirse otro tipo de imagen (diferente a la descrita en el caso de los secundarios) que se denomina imagen de electrones retrodispersos, lo que nos permite conocer algunas características del interior de la muestra. Esta modalidad de observación es necesaria para poder realizar el análisis con el espectrómetro de rayos X acoplado al sistema (EDS), ya que la utilización de estos detectores para electrones retrodispersos no interfiere en las funciones de la microsonda para rayos X. La caracterización química y morfológica de materia en estado particulado se realiza con el propósito de determinar, por una parte, las características físicas (forma, tamaño, aspecto y textura) y por otra parte, la presencia de elementos o contaminantes específicos como metales, que nos permitan inferir la composición de las partículas, y de

ser posible, destacar la presencia de marcadores específicos de origen. (UNEP/WHO.GEMS/AIR Methodology Review Handbooks. Nairobi, UNEP, 1994. Vol.3)

Por lo que se refiere a la caracterización morfológica o física de las partículas, el microscopio electrónico puede revelar detalles de la topografía de la superficie de cualquier material con una claridad y definición que no pueden ser obtenidas con ningún otro medio. Se ha demostrado que este instrumento es capaz de detectar: distribución de potenciales superficiales, fenómenos de luminiscencia superficiales, conductividad subsuperficial, composición superficial y cristalografía, hasta con una distancia límite resolutive de menos de 50nm (0.050 μ m) y con una profundidad de foco 500 veces mejor que en un microscopio de luz transmitida (óptico) a ampliaciones equivalentes (Thornton, 1968; Everhart & Hayes, 1972).

4.2.2. Espectrómetro de Energía Dispersiva de Rayos X (Microsonda EDS)

En este estudio fue utilizada una microsonda de análisis espectrométricos de energía dispersiva de rayos X de la casa OXFORD (EDS). El espectrómetro de energía dispersiva de rayos X acoplado al microscopio electrónico de barrido y denominado EDS, tuvo su origen en una microsonda para el análisis químico que desarrolló R. Castaing a partir de 1950. El funcionamiento de este tipo de sistemas se basa en la captación de los fotones de alta energía que emite cada elemento al ser bombardeado por el haz primario (rayos X característicos). Este tipo de señales es específico de cada elemento de la superficie de la muestra y se capta por un detector especial que posee la propiedad de transducir cada señal en un pulso específico, que es conducido a un sistema que compara esta información con un banco de datos que corresponde a los diferentes elementos de la tabla periódica. El sistema está dotado de un programa que nos permite la realización gráfica del espectro de picos de energía correspondientes a cada uno de los elementos que constituyen el área estudiada, pudiendo además conocer, de manera semicuantitativa, en porcentaje, cada uno de ellos.

El sistema nos permite realizar el análisis de toda el área que se encuentre bajo observación en el microscopio al cual está acoplado, y además, se pueden seleccionar puntos específicos en el área observada correspondientes a la amplificación elegida, teniéndose entonces la posibilidad de analizar puntos tan pequeños como 1 μ m o aún áreas menores, dependiendo esto de las características que la propia muestra posea. Todos los datos, imágenes y espectros de cada partícula pueden ser almacenados para facilitar su análisis, comparación y ordenamiento que se requieren en este estudio.

4.3. Procedimiento

4.3.1. Manufactura de las probetas (muestras analíticas)

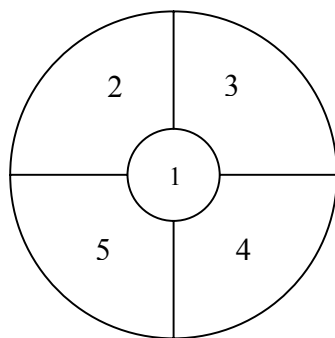
De cada uno de los filtros que comprendió este estudio, fueron preparadas 2 probetas, una de las cuales fue un círculo de 10mm de diámetro cortado de una porción intermedia entre

el centro y la orilla de cada filtro, el cual fue adherido mediante una etiqueta de carbón conductivo con doble adhesivo marca EMS a un cilindro de aluminio puro de 12.5mm de diámetro por 10mm de alto, y circundados por una aplicación de carbón coloidal; la otra probeta se obtuvo mediante una “impresión” de la superficie de un área correspondiente a 1.2cm de diámetro. Ambos tipos de probetas fueron sometidos a la deposición de iones de oro metálico en un sistema de vacío marca Denton Vac durante 3 minutos a un miliamperaje de 18. Siempre se utilizó el mismo diámetro de filtro para tener siempre un área conocida y equiparable, y poder comparar los resultados con otros estudios que se realizan en el área de calidad del aire como XRF y determinación de carbón total. Los resultados del estudio de esta área de superficie pueden ser extrapolados a la superficie total del filtro.

Al hacer una primera observación general de ambos tipos de probetas, se decidió realizar el estudio de conteo sólo en las que se adhirió la porción circular de filtro, ya que las impresiones no ofrecieron suficiente material de observación para este tipo de fracción. Se prepararon probetas a partir de 4 filtros vírgenes de microfibra de cuarzo procedentes del mismo lote de los filtros en estudio, para tener “blancos” de comparación y además descartar la posible presencia de partículas previo a la exposición en el muestreo.

4.3.2. Método de conteo

Se realizaron imágenes de 5 campos de cada círculo de filtro en estudio (centro y los cuatro cuadrantes):



Las imágenes fueron almacenadas a 2,500 y 5,000X de amplificación, dependiendo de las características de cada tipo de muestra, tratando de obtener campos de superficie constante de $1,000 \mu\text{m}^2$ ó $500 \mu\text{m}^2$ según el caso. La selección de los mismos se realizó de manera aleatoria. En el caso del presente estudio, no fue requerida la determinación de la densidad numérica. Sin embargo, se realizó esporádicamente en algunos casos, sólo para tener una idea general, debiendo recordar que esta determinación, en caso necesario, se efectúa mediante el método de Floderus modificado, que se basa en el conteo directo de estructuras o partículas en áreas calibradas conocidas, por ejemplo, $100 \mu\text{m}^2$, $500 \mu\text{m}^2$, 1mm^2 , etc. Si contamos un número de áreas representativas suficiente, podremos obtener el

promedio y extrapolarlo a la totalidad de 1cm^2 de la muestra, y así se determina la densidad numérica total.

Se sabe que las partículas en los filtros de los muestreos no sólo se encuentran en la superficie, sino que también penetran en el espesor del mismo, pero se asume que la posibilidad de encontrar una o muchas partículas en el plano superficial es proporcional a cada plano del espesor en que puedan penetrar.

4.3.3 Procedimiento para el análisis morfológico y químico elemental

Se procedió a localizar, de manera aleatoria, un campo por cada una de las regiones y se grabó la imagen correspondiente, etiquetando en una copia del mismo campo, cada una de las partículas existentes en el mismo.

Las muestras del presente estudio comprendieron 3 niveles de interés, siendo sólo las de Tlaxcala las que se estudiaron a profundidad para obtener datos que permitieran establecer una relación específica entre fuente de emisión y perfil morfoquímico, a lo que se denominó nivel III.

Las muestras de exposición personal procedentes tanto de Comachuén como del corredor Insurgentes del Metrobús, fueron analizadas para la búsqueda intencionada que se denominó nivel II. Todas las demás muestras sólo se estudiaron en un nivel exploratorio general.

De cualquier manera, en todos los casos se trató de encontrar los ejemplos más demostrativos de cada una de ellas, con ligeros desplazamientos a partir del punto aleatorio seleccionado, y para poder realizar el análisis morfológico y químico elemental, que nos permitiera la caracterización más completa. Por esa razón, se eligieron como un número suficiente, 5 campos de cada probeta (un punto central y un punto en cada uno de los 4 cuadrantes) a 2,500X ó a 5,000X de amplificación, según el tipo de muestra, y se eligió un voltaje de aceleración de 20kV, ya que al estar cubiertas con oro, las muestras son muy conductivas y permiten el uso de este voltaje que nos posibilita la excitación de prácticamente todos los elementos contenidos en las partículas. La resolución de la microsonda del sistema, fue de 60 eV ± 1 , y se eligió un tiempo de captura de señal de 30 a 60seg según el caso.

Algunas partículas fueron estudiadas en amplificaciones mayores de hasta 20,000X, debido al pequeño tamaño de las mismas, y tratando de cubrir con la amplificación la mayor cantidad de materia analizada. Se realizaron imágenes representativas de dichas partículas.

El modo de imagen de microscopía que se usó fue preferentemente electrones secundarios, pero en algunos casos, se usó el de electrones retrodispersos.

5. Otras actividades

5.1. Mantenimiento del laboratorio de microscopía electrónica y mantenimiento y ajuste del equipo de microscopía electrónica de barrido (MEB) y microespectrometría de energías dispersivas de rayos X acoplado (EDS).

Sistemáticamente se realizaron actividades de limpieza todos los días laborables, mediante remoción de depósitos de polvo en todas las superficies de las mesas de trabajo en el laboratorio, aparatos y pisos, con la ayuda de accesorios de limpieza adecuados. Además, se realizó limpieza profunda de todo el laboratorio, incluyendo ventanas, paredes y lámparas, una vez al mes. Asimismo, se realizó el aspirado de todos los componentes de la parte posterior del microscopio electrónico de barrido y los periféricos que constituyen el sistema de microscopía y espectrometría, para preservar de esta manera, el adecuado funcionamiento de las computadoras.

El mantenimiento incluyó también los equipos de uso común para el tratamiento, realización y adecuación de las muestras analíticas (probetas) incluyendo microscopios estereoscópicos, microscopio por transmisión de campo claro, limpiador ultrasónico, balanza analítica, platina térmica magnética, estufa de secado, campana de extracción y sistema para la deposición de iones metálicos al vacío, además de cristalería, materiales y utensilios diversos. Todos estos elementos de trabajo son necesarios durante los procesos de manejo de muestras de diversa índole.

Por lo que respecta al mantenimiento especializado del equipo de microscopía electrónica y el EDS acoplado, se realizaron dos tipos de actividades:

- a) Limpieza cotidiana de todas las superficies de los aparatos y de los accesorios de manejo, como los sujetadores y portamuestras. Limpieza y lubricación de las juntas de caucho de los accesos a la cámara de muestras, y al cañón electrónico. Limpieza de los componentes del sistema de emisión de radiaciones catódicas, siempre que sea necesario sustituir el filamento, incluyendo cilindro y cono de Wehnelt, electrodos, placa del ánodo, cilindro y apertura del ánodo. De manera cotidiana, se calibraron y ajustaron, cuando fue necesario, la iluminación del microscopio y el sistema de análisis espectrométrico mediante una muestra patrón, lo cual puede ser varias veces durante una sesión de 3 ó 4 horas. Además, se realizó la colocación de nitrógeno líquido 3 veces por semana, en el recipiente del EDS para dicho fin.
- b) Servicio general de mantenimiento preventivo del microscopio electrónico JEOL JSM-5900LV con microsonda EDS OXFORD acoplada. Éste se realizó una vez cada 6 meses e incluyó limpieza general del equipo, desarmado y limpieza fina de los componentes de los sistemas de iluminación, transporte y acoplamiento entre el MEB y el EDS, incluyendo cambios de aperturas y ajustes, tanto mecánicos como electrónicos, así como la sustitución del aceite de las bombas mecánicas de vacío. El servicio correspondiente al primer semestre fue realizado en el primer trimestre del año, y el segundo, durante el tercer trimestre por parte de los ingenieros de servicio de la casa JEOL, con los que se debe renovar una póliza cada año, la cual incluye, además de las visitas programadas, la asistencia, cada vez que sea requerida, para solventar problemas de emergencia. Estas actividades han permitido

que el sistema se encuentre funcionando prácticamente de manera ininterrumpida a lo largo de 6 años.

5.2. Demostraciones

Se realizaron diversas demostraciones del sistema y metodología utilizados en el laboratorio de microscopía electrónica a grupos de enseñanza media superior, de licenciatura y especialistas ambientales que acudieron a lo largo del año a las instalaciones del CENICA, así como también a integrantes de misiones japonesas de JICA.

6. Resultados

- **Relación específica entre fuente de emisión y perfil morfoquímico de emisiones particuladas de una industria de tipo metalmeccánica**

En el estudio de 12 filtros de los muestreos realizados en una compañía siderúrgica del municipio de San Cosme, Xalostoc, del Estado de Tlaxcala, se pudo apreciar una persistencia de partículas de todo tipo de morfologías, destacando las de forma esferoidal, además de irregulares, de diversos tamaños, de alto contenido en metales, principalmente Fe, Mn, Zn y Cu, además de sales ricas en Ca, Mg, Na, K y Cl, así como la persistencia, en la inmensa mayoría de las partículas, de C y O, el cual podría corresponder a la presencia de óxidos, así como también a la composición de la propia matriz de cuarzo.

La comparación de las muestras tomadas intramuros con las perimetrales y ambientales, permite apreciar una dilución de los componentes particulados típicos del área de hornos por el agregamiento, en la distancia, a la fracción muestreada de otros componentes de partículas, principalmente irregulares.

La casi totalidad de las partículas esferoidales, de tamaños desde menos de $1\mu\text{m}$ hasta 20 ó $30\mu\text{m}$, contuvo preponderantemente óxidos de Fe, Mn y Zn, sin importar su tamaño. Los detalles morfológicos nos mostraron que si bien algunas partículas esferoidales, especialmente las más pequeñas, son homogéneas, muchas de las mayores parecen ser resultado de agregamiento con modificaciones físicas que las van redondeando en su tránsito atmosférico. En algunas ocasiones, mostraron una cubierta de segmentos acordonados o plaquiformes. Asimismo, se pudieron apreciar muchas partículas de diversos tamaños, menores y mayores a $10\mu\text{m}$, con alto contenido metálico, pero también con elevado contenido de sales de Mg, Ca y Na, así como en algunos casos, partículas con elevado contenido de Pb y Cu.

- **Búsqueda intencionada de material particulado que tiene preponderancia en la exposición personal de manera directa.**

Para este rubro se estudiaron, por una parte, muestras obtenidas con equipo de muestreo personal SKC, portado por individuos que realizaron el trayecto del Metrobús en el corredor Insurgentes en la Ciudad de México, y por otra, las del proyecto para la evaluación de concentraciones microambientales de partículas suspendidas en hogares rurales de Comachuén, Michoacán.

En el caso de las muestras del Metrobús, se pudo apreciar una diferencia muy notable en el número de partículas entre las de la fracción PM10 y las de la fracción PM2.5, en las que se apreció una escasez de material particulado. Sin embargo, en ambos casos, las partículas presentes mostraron, casi siempre, cantidades significativas de C. En todos los análisis apareció, significativamente también, O y Si, y sólo en los casos en que se encontraron partículas mayores, se pudo apreciar la presencia de elementos como el Ca, Na, Mg, Fe, Al y K.

En lo que se refiere a las muestras de Comachuén, se corroboró que las nanopartículas de C van agregándose para constituirse en elementos de tamaños variables, en donde se aprecia la gran cantidad de nanopartículas carbonáceas y, por otra parte, también se pudieron apreciar condensaciones que originan partículas más compactas, también de gran contenido carbonáceo.

- **Niveles y caracterización de partículas suspendidas en diversos sitios de la Ciudad de Guatemala.**

Las muestras estudiadas procedentes de monitoreos en 2 sitios de la Ciudad de Guatemala, mostraron una variedad importante de partículas con diversas morfologías y tamaños, en prácticamente todos los casos. Casi la totalidad de las partículas mostró muy altos contenidos de C, siendo, en su mayoría, partículas muy pequeñas de rango nanométrico que en muchas ocasiones se constituyeron en agregados. Asimismo, se pudieron apreciar concentraciones significativas de Al y S en algunas de ellas, y en menor cantidad Fe.

- **Niveles y caracterización de partículas en áreas de la Ciudad de México**

Se estudiaron muestras correspondientes al programa CENICA para comparar la variación estacional, realizadas en el sitio CENICA, así como también muestras de otros sitios de la Ciudad de México, obtenidas principalmente con equipos de alto volumen para ser usadas en los proyectos de colaboración con el INER y con el Instituto de Ciencias de la Tierra de Barcelona, España. En todos los casos se encontró una gran variedad de partículas, las que casi en su totalidad contuvieron C como el componente más importante.

Todas las muestras de este tipo fueron estudiadas en el nivel general de exploración (I). Además de las mencionadas, también se estudiaron 5 filtros de la RAMA en los que se encontraron partículas características correspondientes a las regiones involucradas.

- **Determinación del perfil morfoquímico de fuente de área de quema de residuos agrícolas**

Los filtros estudiados procedentes de muestreos realizados en el área de Zacatepec, Estado de Morelos, nos mostraron diversos tipos de partículas irregulares, de tamaño y aspecto muy variado, pudiéndose apreciar también agregados de multipartículas nanométricas carbonáceas y condensados del mismo tipo. En la casi totalidad de las partículas estudiadas, el elemento preponderante resultó ser el C y, además, en mucho menor cantidad, Ca, Mg, y otros componentes de sales.

7. Discusión

El uso de la cobertura con oro en todas las probetas que fueron estudiadas con el microscopio electrónico, nos permitió realizar mejores análisis directamente sobre los fragmentos de filtros, ya que, por un lado, aumenta su retención en la superficie del mismo y, por otro, al mejorarse substancialmente su conductividad, se evita el incremento de energía estática que las sobrecargue y haga que salgan disparadas, perdiéndolas para siempre. Por lo tanto, hemos decidido, en todos los casos, cubrir las muestras con oro para poder realizar mejores análisis morfológicos y químicos. De cualquier manera, excluyendo los picos energéticos del oro, no se alteran las proporciones de los otros componentes elementales.

Por otro lado, se ha demostrado una vez más, la gran confiabilidad que el sistema microscopio electrónico de barrido y EDS acoplado tiene, para permitirnos obtener excelentes resultados de análisis químico elemental, además de lo obvio, morfológico.

Es importante señalar que en casi todos los casos de muestreos PM_{2.5} con bajo volumen, se disminuye en gran medida la cantidad de partículas capturadas, lo que hace muy difícil permitir extrapolar los datos a la probable totalidad de partículas y, además, imposibilita el traslado de estas partículas a la superficie de carbón adhesivo, y más aún, se complica el análisis de las mismas, ya que por su tamaño son fácilmente atravesadas por la radiación β del microscopio, excitando otros elementos correspondientes, tanto a la matriz de cuarzo, como al soporte mismo, y restando así, certidumbre al análisis específico de una partícula.

Sin embargo, los conocimientos obtenidos con la metodología que se utilizó en el presente estudio, no sólo mejoran el manejo analítico de la totalidad de la muestra, y particularmente de las partículas menos pequeñas, sino que también inciden en la calidad de la información de productos científicos a ser publicados en revistas, así como en presentaciones orales, carteles, congresos y otras actividades académicas. También, estos

conocimientos sirven de apoyo en los cursos, seminarios y talleres que el personal de la DGCENICA imparte a los sectores público, privado y académico.

Por otro lado, los datos encontrados en este estudio vienen a sumarse a los que se han obtenido en los años anteriores, enriqueciendo los conocimientos que le permiten a la DGCENICA generar información para que los tomadores de decisiones, tanto en el ámbito local como federal, puedan implementar las mejores medidas de prevención o control en el establecimiento de sus políticas ambientales de protección a la salud de la población en general, y del entorno ecológico en materia de contaminación atmosférica, lo que, evidentemente, redundaría en la mejor aplicación de los recursos económicos destinados para ese fin, evitándose así errores que incidieran en el gasto.

Resulta de gran importancia hacer patente que el estudio realizado se relaciona de manera directa con algunas de las actividades desarrolladas dentro de la Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental en el año 2004 y anteriores, ya que está aprovecha sus principales fortalezas en infraestructura analítica. Este tipo de técnicas analíticas que permiten la caracterización morfoquímica de las partículas suspendidas, enriquece la experiencia del personal de la DGCENICA especializado en la medición de parámetros ambientales.

8. Conclusiones y recomendaciones

Basándonos en los estudios realizados por nosotros mismos en años anteriores y en lo encontrado en el presente estudio, se corroboró el perfil de cierto tipo de partículas relacionadas con fenómenos de combustión a partir de los diversos tipos de energéticos. Como ejemplos muy evidentes, fueron encontradas en cantidades significativas partículas multiporosas con contenido de carbono, azufre, oxígeno y vanadio, en las muestras de las áreas cercanas a termoeléctricas, además de gran actividad fabril y de tránsito vehicular pesado, o bien los agregados de nanopartículas de tipo algodonoso características del hollín, tanto en muestras de Comachuén, Michoacán, referentes a la exposición personal al humo por quema de biomasa con fines domésticos, o también las obtenidas con muestreadores portados por personas que viajan largos trayectos en transporte público, como el caso del corredor Metrobús Insurgentes de la Ciudad de México.

El estudio también tiene un impacto en el aspecto ambiental y en los ámbitos social y económico, pues la caracterización química y morfológica de las partículas suspendidas de la atmósfera en todas sus fracciones, se realiza con el propósito de determinar, por una parte, las características físicas (forma, tamaño, aspecto y textura) y por otra parte, la presencia de elementos o contaminantes específicos como metales, que nos permitan inferir la composición de las partículas, y de ser posible, destacar la presencia de marcadores específicos de origen, (UNEP/WHO.GEMS/AIR Methodology Review Handbooks. Nairobi, UNEP, 1994. Vol.3) lo cual es de trascendental importancia en el establecimiento de los perfiles morfoquímicos de las diversas fuentes de emisión, tanto industriales, como

las de tipo metalmecánicas, químicas, de producción de energía, o también las relacionadas con las actividades agrícolas, ingeniería en alimentos, fuentes vehiculares, etc.

Es decir, como fue mencionado en la discusión, los datos encontrados en este estudio vienen a sumarse a los que se han obtenido en los años anteriores, enriqueciendo los conocimientos que le permiten a la DGCENICA generar información para que los tomadores de decisiones, tanto en el ámbito local como federal, puedan implementar las mejores medidas de prevención o control en el establecimiento de sus políticas ambientales de protección a la salud de la población en general, y del entorno ecológico en materia de contaminación atmosférica, lo que, evidentemente, redundaría en la mejor aplicación de los recursos económicos destinados para ese fin, evitándose así errores que incidieran en el gasto, por lo que resulta de gran importancia hacer patente que el estudio realizado se relaciona de manera directa con algunas de las actividades desarrolladas dentro de la Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental en el año 2004 y anteriores, ya que está aprovecha sus principales fortalezas en infraestructura analítica. Este tipo de técnicas analíticas que permiten la caracterización morfoquímica de las partículas suspendidas, enriquece la experiencia del personal de la DGCENICA especializado en la medición de parámetros ambientales.

En suma, las características integrales en experticia e infraestructura analítica en materia de caracterización de partículas, hacen del Centro un referente nacional en este campo. Debido a esto, los estudios de microscopía electrónica y análisis microespectrométrico de rayos X para la caracterización de las partículas suspendidas, tienen un impacto trascendente en las actividades de diversas instituciones gubernamentales y académicas que solicitan la colaboración del Centro, especialmente en lo que se refiere a proyectos de interés común. Ejemplos de esto estarían relacionados con la atribución que la DGCENICA tiene, para promover, supervisar, apoyar y auditar redes de monitoreo de la calidad del aire en el país, en las que los aspectos analíticos estarían dando la pauta en el conocimiento de los componentes atmosféricos muestreados. Hay que recordar que, en este sentido, el CENICA brinda asesoría en todos los trabajos técnicos de calibración a las redes de monitoreo atmosférico de 14 estados de la República Mexicana y a instituciones académicas y privadas, entre las que se encuentran el IMP, el INER, la UAM y la UNAM.

Además, es de nuestro conocimiento que existe una vinculación del estudio con el sistema de metas sectoriales de la Unidad Administrativa del INE, ya que su realización se encuentra vinculada directamente con la actividad R014 relacionada con la investigación científica y tecnológica. En esta actividad relevante la SEMARNAT, a través del Instituto Nacional de Ecología, ha realizado estudios por la DGCENICA como el Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico: Diagnóstico y Fortalecimiento del Sistema de Monitoreo Atmosférico, Etapa 1, que tiene como objetivo principal la instauración de un programa de monitoreo atmosférico que garantice un diagnóstico y vigilancia del estado de la calidad del aire a nivel nacional, que genere información real, válida y comparable entre los diferentes sitios y redes del país, y contar así con un instrumento fundamental en el establecimiento de políticas ambientales de protección a la salud de la población y de los ecosistemas. Y por otro lado, la realización de estudios con estas técnicas analíticas, se suma a las que el INE realiza para determinar la composición química de las partículas

suspendidas, como las fracciones de carbono total, carbono elemental y carbono orgánico, metales pesados, iones y compuestos poliaromáticos, herramientas que permitirán en un futuro cercano identificar la contribución específica de fuentes emisoras de partículas suspendidas en diferentes sitios.

En este rubro, este trabajo se inserta en los proyectos de investigación para el año 2005, relacionados con la caracterización física y química de partículas y los de exposición personal:

- Análisis morfológico de partículas suspendidas como herramienta para determinar la huella física que proporcione información de las fuentes que le dieron origen.
- Determinación del perfil de emisiones de partículas de fuentes fijas (proyecto en colaboración con el IMP)
- Implementación de técnicas de caracterización química de partículas, en especial la fracción orgánica (proyecto en colaboración con IMP)
- Apoyo para la integración de tres redes manuales de partículas suspendidas

Existen, además, diversos convenios de colaboración en los que se utilizarán análisis de microscopía electrónica y microespectrometría puntual de rayos X acoplada, por ejemplo con el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER) de la Secretaría de Salud.

También, el presente estudio contribuirá en el enriquecimiento de los datos que se encuentran en el Catálogo de Partículas Suspendidas, que será publicado en fecha próxima.

9. Referencias bibliográficas

1. Aragón Piña A, Torres Villaseñor G, Monroy Fernández M, Luszczewski Kudra A, Leyva Ramos R., 2000. Scanning electron microscope and statistical analysis of suspended heavy metal particles in San Luis Potosí, México. *Atmospheric environment* (34): 4103-4112.
2. Borja-Aburto VH, Castillejos M, Gold DR, Bierzwinski S, Loomis D, 1998. Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995. *Environ. Health Perspect.* (106): 849-855.
3. Chang-Jin M, Kasahara M, Höller R, Kamiya T, 2001. Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period. *Atmospheric environment* (35): 2707-2714.
4. Ebert RM, Díaz-Pache F, Grossi CM, Alonso FJ, Ordaz J, 2001. Airborne particulate matter around the Cathedral of Burgos (Castilla y León, Spain). *Atmospheric environment* (35): 441-452.
5. Sepúlveda JD, 2000. Informe final. INE-CENICA, México.

6. Sepúlveda JD. 2001. Informe final. INE-CENICA, México.
7. Sepúlveda JD. 2002. Informe final INE-CENICA, México.
8. Sepúlveda JD. 2003. Informe final INE-CENICA, México.
9. Zongbo S, Longyi S, Jones TP, Whittaker AG, Senlin L, Bérubé KA, Taoe H, Richards DR, 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.
10. INE-CENICA. Catálogo de Partículas Suspendidas estudiadas con Microscopía Electrónica de Barrido (en proceso de publicación)

Se hace entrega del presente informe final de actividades el día 19 de diciembre de 2005 para dar cumplimiento al contrato INE/ADA-012/2005, con la finalidad de que se emita el dictamen técnico y se otorgue la liberación técnica al informe, y pueda ser realizado el trámite de pago correspondiente. Este informe consta del reporte total del estudio, que incluye los anexos con las imágenes, espectros y análisis químico porcentual por elemento.