



Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



MICROANÁLISIS QUÍMICO DE POLVO ATMOSFERICO CON HACES DE IONES PROVENIENTES DE UN ACLERADOR DE PARTICULAS

F. Aldape y J. Flores M.

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)

RESUMEN

El análisis de materiales mediante la emisión de rayos X inducidos por partícula (PIXE: Proton Induced X-Ray Emission) se realiza mediante la incidencia de protones con energías de varios millones de electrón-volts (MeV), producidos por aceleradores de iones, sobre una muestra del material para excitarla y generar rayos X característicos (de energía conocida), los cuales identifican su contenido elemental. En el mundo existen cientos de estos aceleradores en laboratorios de universidades, institutos de investigación y laboratorios comerciales. Estos aceleradores producen haces de partículas cargadas altamente controlados, de tal manera que un gran número de partículas de energía conocida pueda ser enviado a una muestra. El método de detección se realiza a través de detectores de energía dispersiva, los cuales involucran la conversión directa de la energía de los rayos X en pulsos electrónicos. Este método provee un análisis cualitativo y cuantitativo del contenido elemental. PIXE es indudablemente una de las técnicas más valiosas dentro del amplio conjunto de técnicas de emisión de rayos X y una de las más utilizadas en los últimos años. Juega un papel preponderante en la vigilancia y la investigación de la contaminación atmosférica, como lo demuestra el gran número de publicaciones científicas en este tema, debido a sus principales ventajas como son: su carácter multi-elemental, alta sensibilidad, límites de detección hasta de 10^{-12} g, su capacidad para analizar muestras muy pequeñas en masa y en dimensiones, su rapidez de análisis y el hecho de ser no-destructiva. En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se han obtenido extensas bases de datos de concentraciones elementales en diversas investigaciones realizadas a partir de 1988. Éstas han aportado información sobre la variación temporal (series de tiempo) por elemento, separación de la componente antropogénica de la natural y medición del factor de enriquecimiento del sitio donde se colectaron las muestras. El procesamiento de los datos en su conjunto ha permitido predecir tendencias y diferencias estacionales de la contaminación atmosférica causada por partículas aerotransportadas. Mediante la aplicación de estadística multivariada o de análisis de factores a las bases de datos, ha sido posible establecer los perfiles elementales que permiten identificar las principales fuentes de los elementos químicos tóxicos y metales contaminantes. Las investigaciones sobre muestras de polvo atmosférico utilizando PIXE han proporcionado información sobre la



Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



contaminación atmosférica del Área Metropolitana de la Ciudad de México que permiten conocer sus orígenes, así como coadyuvar en la solución de este problema, aportando recomendaciones a las instituciones encargadas de establecer la vigilancia ambiental. Actualmente el laboratorio es un centro designado de ARCAL (Acuerdo Regional de Cooperación en América Latina y el Caribe del OIEA) para análisis PIXE y determinación gravimétrica de muestras de contaminación atmosférica por MPA. Este documento presenta la metodología para realizar la colección y el análisis de muestras de polvo atmosférico utilizando aceleradores de partículas, se muestran los más recientes resultados de las últimas investigaciones donde al procesamiento de los datos en su conjunto permite predecir tendencias y diferencias estacionales de la contaminación atmosférica causada por partículas aerotransportadas, se incluye una breve conclusión sobre la utilidad de la técnica, sus ventajas y desventajas y se termina con una breve reflexión sobre la utilidad de la técnica en un futuro próximo.

1. INTRODUCCION

En la década de los sesenta se investigaba sobre *las diversas fuentes de excitación para generar análisis espectroquímicos* a partir de rayos X característicos. Estos incluían electrones, rayos X, rayos γ , protones y partículas. El primer científico en utilizar un haz de protones provenientes de un acelerador Van de Graaff como agente excitador fue L. S. Birks¹, investigador del U. S. Naval Research Laboratory. Este proceso de excitación, representaba un mecanismo excitador muy apropiado para ser usado en una técnica de espectroscopía de rayos X, asociado a una sección eficaz de producción de rayos X muy alta y a un fondo bajo de radiación. En esa década, también, se realizaron importantes desarrollos tecnológicos que marcaron grandes avances en la tecnología moderna. Uno de los más importantes fue el desarrollo de los detectores semiconductores de silicio-litio (SiLi). La combinación de estas dos circunstancias favorables, el uso de protones como medio excitador y el desarrollo de los detectores semiconductores, permitió a Johansson² y colaboradores de la Universidad de Lund en Suecia, desarrollar en 1970 la espectroscopía de emisión de rayos X inducidos por partícula (Proton Induced X ray Emission: PIXE), cuyas características principales son el de ser un método de análisis multielemental de alta resolución, rápido y de gran sensibilidad. Las primeras muestras analizadas por ellos, para demostrar las bondades de la técnica, fueron justamente muestras de polvo atmosférico que contenía una cantidad de masa extraordinariamente pequeña.

Una vez reconocida la gran utilidad de los aceleradores de baja energía para realizar microanálisis en materiales mediante esta novedosa técnica, la demanda de éstos aumentó en una gran parte de la comunidad científica.

En la actualidad la técnica de microanálisis PIXE es aceptada como una de las técnicas básicas utilizadas en el estudio de la materia particulada aerotransportada (MPA), en virtud





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



de las múltiples cualidades que ésta ofrece para el estudio de este tipo de contaminante (cantidad de muestra del orden de un miligramo, gran sensibilidad, análisis multielemental, no destructiva y tiempos cortos de análisis del orden de unos cuantos minutos). Su utilidad es ampliamente reconocida y su uso se incrementa día con día. Tanto la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency: US-EPA) como la Agencia de Protección Ambiental de la Unión Europea reconocen a la técnica PIXE entre las técnicas de análisis aceptadas para realizar estudios de contaminación atmosférica por partículas.

En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), los aceleradores de partículas con que éste cuenta han sido ampliamente usados en investigaciones sobre contaminación atmosférica. Estas actividades se iniciaron en 1988, primero diseñando colectores de partículas, estrategias de monitoreo para su colección y colectando polvo atmosférico. En 1991 se instaló la técnica PIXE en el primer arreglo experimental^{3 - 4} desarrollado especialmente para realizar investigaciones en muestras de este tipo y en ese mismo año se validó y calibró el sistema PIXE. Desde entonces se han realizado diversas investigaciones^{5 - 17} en este rubro, las cuales han servido de marco para realizar otras igualmente importantes en aspectos de salud, por ejemplo, normar los criterios de diversas instituciones gubernamentales, como la Dirección General de Salud Ambiental en lo referente a la posible introducción del manganeso (Mn) como antidetonante en las gasolinas. Por otro lado, colaborando con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal en la localización de los sitios donde fue instalada la Red de Monitoreo de Partículas Finas (PM_{2.5}) en el Area Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM).

Las bases de datos obtenidas en el ININ sobre el contenido elemental en muestras de polvo atmosférico, tanto antes como después de la instalación de los programas: “verificación de emisiones de automotores” y “un día sin auto”, forman un conjunto histórico invaluable que ha permitido caracterizar desde entonces las partículas en el AMCM y corroborar la efectividad de los programas instalados por el gobierno. Un ejemplo es el cálculo de la concentración de Plomo (Pb) antes y después de la instalación del programa de gasolina sin plomo “magna sin” que mostró la disminución de este elemento en la atmósfera y a su vez la efectividad de esta medida de control sobre las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

2. METODOLOGIA

2.1 Colección de muestras.

El desarrollo de un proyecto de investigación de contaminación atmosférica en partícula aerotransportada requiere necesariamente de una etapa de colección de muestras. En función del objetivo del proyecto se define el colector que debe ser usado, la elección del sitio o sitios de colección, la frecuencia y duración del periodo de colección, etc., con lo que implícitamente quedará diseñada la campaña de colección. Si se requiere caracterizar un





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



sitio, la campaña deberá ser suficientemente larga, de tal manera que se pueda obtener un promedio de la concentración másica y elemental, así como de la variación temporal de estos parámetros. Con esta información se conocerá lo que realmente ocurre en el sitio. Si además el objetivo requiere de conocer las fuentes que producen a los elementos contaminantes, es necesario obtener los perfiles mediante análisis por componente principal para identificarlas, y en este caso la campaña de colección deberá de consistir de al menos 60 muestras, ya que algunos programas estadísticos no arrojan resultados confiables con menos de este número de muestras.

Actualmente la US-EPA ha editado procedimientos para realizar la colección de muestras. En ellos se establecen con claridad parámetros como la ubicación, altura y características del sitio de colección; si se observan en la práctica estas recomendaciones se asegura una toma adecuada de muestra. Si se desea que los resultados obtenidos de una investigación se tomen en cuenta por instituciones gubernamentales o por otros investigadores, se deben seguir los procedimientos mencionados y utilizar muestreadores de referencia para coleccionar las muestras.

El proceso de colección comprende el manejo adecuado y elección de los filtros que serán utilizados para coleccionar la materia particulada aerotransportada, de acuerdo a las exigencias del colector seleccionado. Si se desea conocer si en el sitio de colección se cumple o no la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 ($65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), deberá cuantificarse la concentración másica en los filtros, para lo cual es necesario su pesaje antes y después de la colección, así como seguir los procedimientos establecidos para ello.

Para garantizar resultados confiables, es indispensable el manejo cuidadoso de los filtros y la vigilancia durante la colección, principalmente en lo que se refiere al flujo correcto en el colector.

2.2 Análisis elemental

Para determinar el contenido elemental en muestras de filtros provenientes de colectores de referencia (teflón o nuclepore) se utiliza la técnica PIXE. En el ININ, la irradiación de las muestras se realiza con un haz de protones de 2.0 MeV de energía, suministrado por un acelerador de partículas. En el análisis se aplica el protocolo de pruebas y control de calidad utilizado durante la intercomparación de técnicas analíticas de origen nuclear aplicadas a estudios de contaminación atmosférica del aire, realizadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)¹⁸.

Los átomos de la muestra se ionizan con un haz de iones (protones) provenientes del acelerador. Enseguida los átomos tienden a desexcitarse (10^{-15} seg), proceso durante el cual se emiten rayos-X con energías características del átomo de donde provienen. El registro de estas energías es lo que permite identificar unívocamente a los elementos. Un detector (Si-Li





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



o Ge-Li) acoplado a la salida de la cámara de reacción, conjuntamente con un analizador multicanal, registra, clasifica y cuantifica las energías de los rayos-X. El multicanal genera un espectro de rayos-X que se será analizado para identificar los elementos contenidos en la muestra as evaluar la concentración de cada uno de ellos. El uso de un programa de cómputo permite adquirir los datos del multicanal y analizar los espectros. Una función importante que realiza el programa es la determinación del área bajo la curva o pico de cada elemento, una vez que se le ha restado el fondo que se genera durante la irradiación. Las concentraciones se cuantifican comparando el área neta de cada elemento desconocido en la muestra de interés contra el área neta obtenida de cada elemento en una muestra patrón calibrada en microgramos por centímetro cuadrado ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^2$), previamente irradiada. Las muestras patrón se irradian anticipadamente en condiciones experimentales idénticas a las condiciones de la irradiación de las muestras bajo estudio, con el fin de determinar el factor de respuesta del sistema para cada elemento. Este proceso es conocido como la calibración del sistema PIXE y permite determinar la curva de sensibilidad del mismo. El valor de la concentración de cada elemento en la muestra se determina en $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ o en $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-2}$, según convenga. Si se cuenta con el área de colección y el volumen total de aire muestreado, ésta se puede expresar en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Este valor es de suma importancia, por lo que es recomendable, durante el proceso de análisis, realizar siempre un ejercicio de control de calidad y seguridad (QC/QA) utilizando blancos de laboratorio, de campo y de análisis.

Si los valores de las concentraciones elementales de cada muestra corresponden a una campaña de colección de varios meses, se crean tablas de concentraciones (bases de datos). Esta información es el primer resultado organizado del análisis. Si proviene de procesos de irradiación realizada, cuidando todos los parámetros que intervienen en ella, esto es, aplicando control de calidad, se garantiza que posterior a la aplicación de los métodos matemáticos que se apliquen se obtendrá información congruente, tal que la interpretación de ésta permita obtener conclusiones importantes sobre la contaminación del lugar y el origen de las fuentes que la produjeron.

3. RESULTADOS

Se presentan resultados de una de las investigaciones¹⁹⁻²⁰ más recientes:

*** DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE AZUFRE DETERMINADA POR PIXE EN LA ATMOSFERA DEL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO.**

En este estudio se analizaron 922 muestras utilizando PIXE para determinar la concentración elemental (ng/m^3) de la partícula fina aerotransportada (PFA). Las muestras fueron colectadas cada tres días por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). Se comenzó a finales del año 2003 y se continuó a lo largo del año de 2004 en tres sitios, y durante el año completo de 2005 y hasta los primeros meses del año 2006, tomando muestras cada 6 días durante esta última





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



etapa en las 7 estaciones que conforman la Red (Figura 1). Los resultados obtenidos permitieron determinar la distribución espacial de azufre (S) en el área, y mostraron una uniformidad razonable en el espacio, pero una bien marcada variabilidad en el tiempo (Figura 2). La distribución espacial de S también ha mostrado patrones similares entre estaciones equivalentes de año a año, aunque no una periodicidad estricta. La Figura 3 presenta tres mapas con líneas de iso-concentraciones de azufre (S), vanadio (V) y Níquel (Ni), los cuales muestran patrones de distribución semejantes entre sí, y una razonable uniformidad espacial sobre el AMCM. En la Figura 4 pueden observarse las líneas de vientos dominantes en el AMCM. Al comparar estas figuras se puede concluir que los elementos S, V y Ni viajan juntos a lo largo de las líneas de vientos dominantes. En la figura 3 se observa que ellos se producen en la misma área (Tlanepantla) y se atribuyen a la misma fuente: los humos de la combustión producidos por una gran cantidad de fuentes móviles (principalmente el transporte), el cual quema combustibles fósiles que contienen estos elementos en su composición. Otros elementos también muestran una afinidad razonable entre ellos en la variación espacial, pero con diferente patrón con respecto al S, V y Ni. Esto puede ser atribuido a que estos contaminantes provienen de fuentes fijas localizadas en un conjunto alterno de áreas industriales o urbanas.

También se realizaron comparaciones de S entre sitios de muestreo en cada una de tres estaciones climáticas (seca-fría, seca caliente y lluvias) y se calcularon sus correlaciones con el fin de confirmar estas aseveraciones. En la Figura 5 se pueden observar estos resultados.

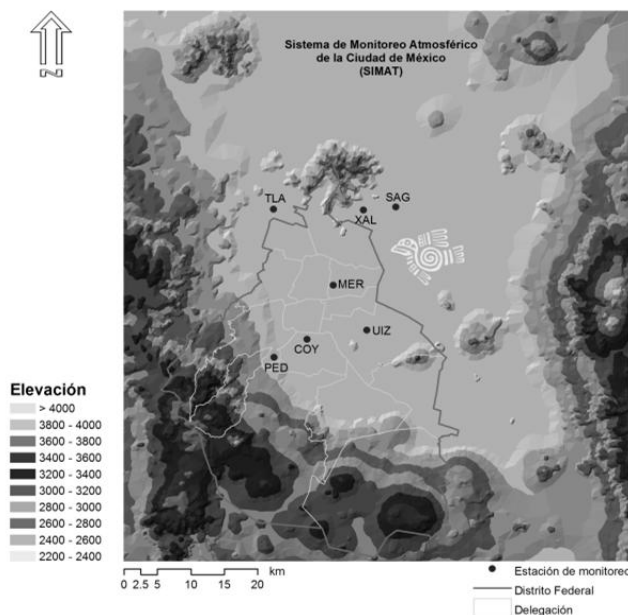


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en el Área Metropolitana de la Ciudad de México.



Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012
47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA
27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México

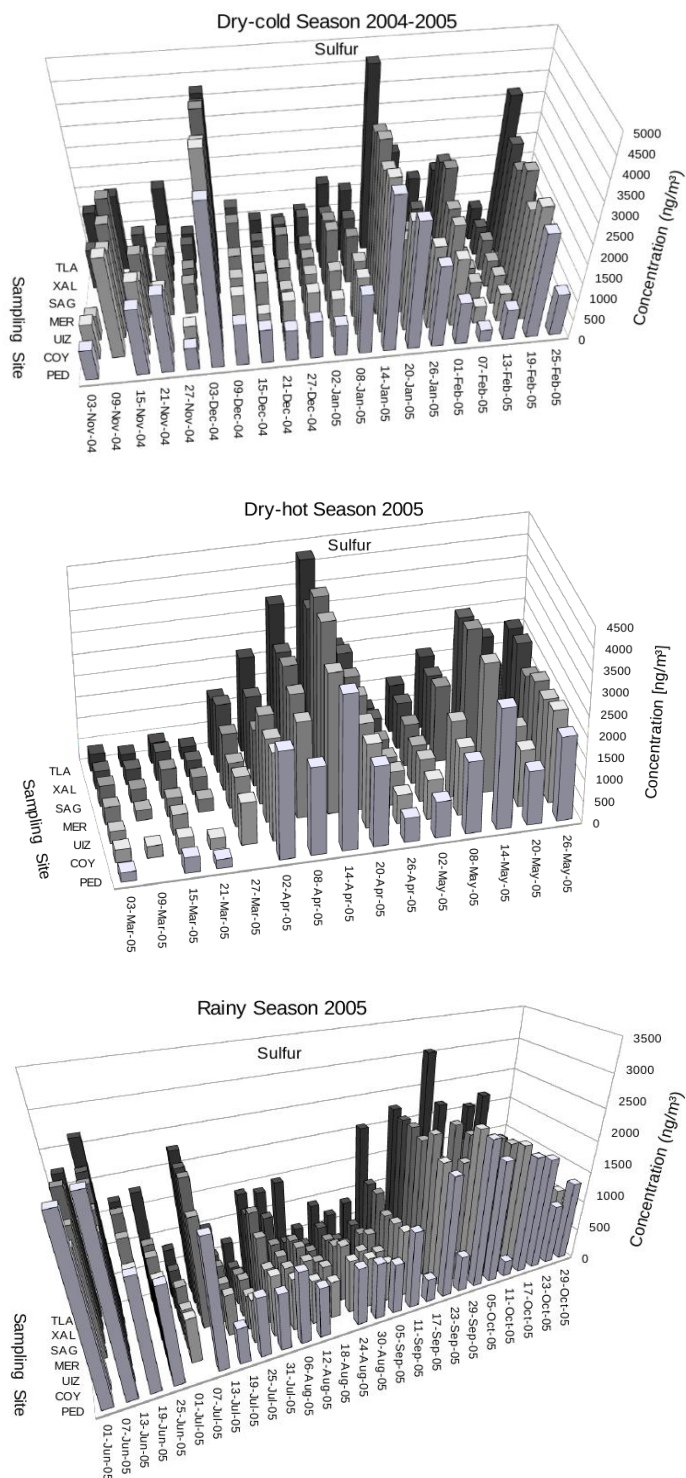


Figura 2. Niveles de concentraciones de azufre de cada uno de los sitios para las tres estaciones climáticas: seca-fría 2004 - 2005, seca-caliente 2005, y de lluvias 2005.





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México

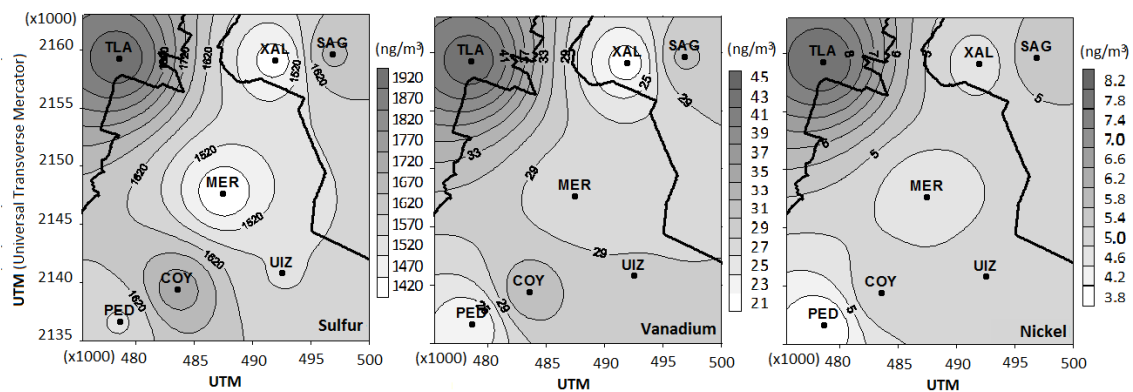


Fig. 3. Líneas de iso-concentración de azufre (S), vanadio (V) y níquel (Ni) mostrando patrones de distribución semejantes. Estación climática seca-fría 2004-2005.

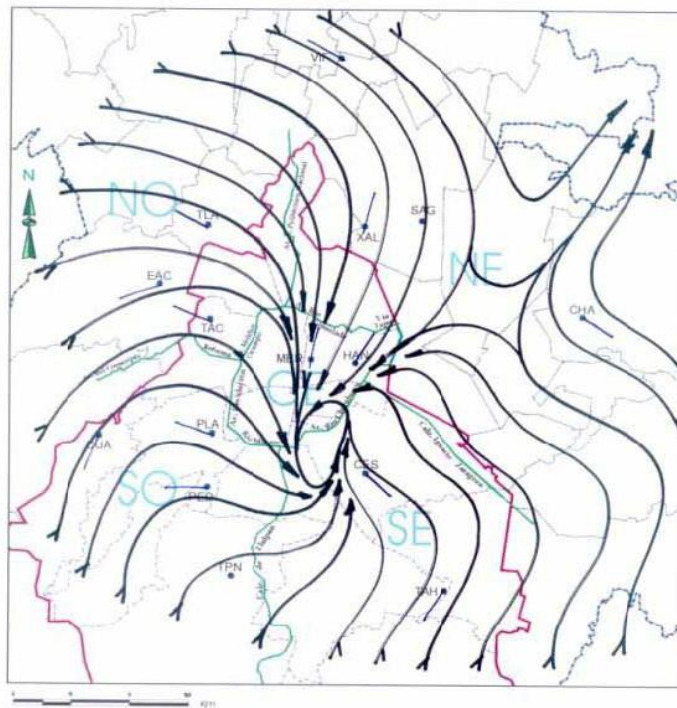


Figura 4. Patrón de vientos dominantes en el Área Metropolitana de la Ciudad de México.



Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México

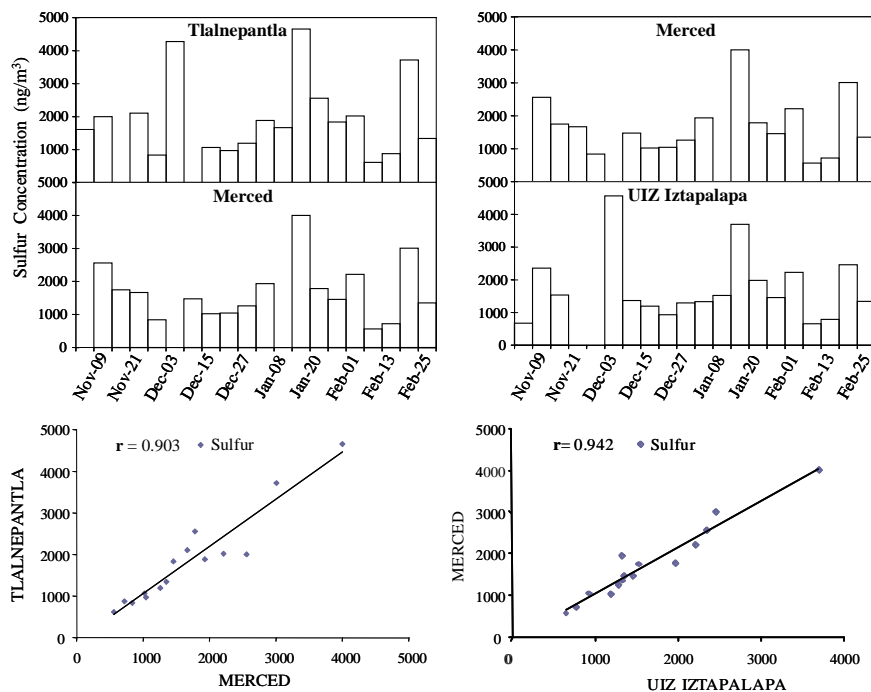


Figura 5. Comparación, dos a dos, de niveles de concentración de azufre (S) para tres sitios, durante la estación climática seca-fría de 2004-2005 y sus respectivas correlaciones.

4. CONCLUSIONES

De esta investigación observamos que, la cantidad colectada de polvo atmosférico en partícula fina en los filtros, fue de solo unos cuantos microgramos. Esta cantidad de masa no es suficiente para poder efectuar el análisis elemental por las técnicas tradicionales como espectroscopía de emisión óptica, absorción atómica, y en algunos casos, ni aún el análisis por activación neutrónica. Se puede concluir que el análisis de muestras de contaminación atmosférica debido a partículas que flotan en el aire es un problema único, ya que la cantidad de materia colectada en los filtros es extraordinariamente pequeña y contiene, además, un gran número de elementos químicos dentro de un amplio intervalo de números atómicos, cuyas concentraciones son completamente diferentes. Por lo tanto, el esquema de análisis que se requiere para este tipo de investigaciones es tal que debe medir muchos de los elementos de interés, debe tener una alta sensibilidad para proveer resultados confiables para aquellos elementos presentes en bajas concentraciones, aun en la presencia de grandes cantidades de otros elementos, y debe ser rápido con el fin de analizar un gran volumen de muestras. PIXE es indudablemente la técnica que satisface plenamente estos requisitos. Por ello, juega un papel preponderante en la vigilancia y la investigación de la



Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



contaminación atmosférica, como lo demuestra el gran número de publicaciones en diferentes revistas de carácter científico²¹. Se debe hacer énfasis en que la información provista por PIXE, es esencial para llegar a conclusiones como las que se obtuvieron en el ejemplo aquí mostrado, y que la sola información acerca de la concentración en masa, como aquella provista por la SMA-GDF RAMA, no es suficiente para obtener información sobre la distribución espacial de algunos elementos, la uniformidad en el tiempo, e incluso las tendencias elementales de la contaminación. Por consiguiente, PIXE puede ser usado rutinariamente para determinar el contenido de S en la PFA ya que esta técnica ofrece la ventaja de tener alta sensibilidad para determinar tanto S como otros metales contenidos en el orden de trazas en las muestras de los aerosoles. Los resultados de PIXE pueden ser usados para calcular las variaciones temporales y las correlaciones multielementales del contenido elemental en los aerosoles. Esta información es fundamental para desarrollar estrategias y establecer regulaciones sobre el control de la contaminación.

5. PERSPECTIVAS

La presencia de partículas finas (micropartículas y nanopartículas) en la atmósfera que dan lugar a la contaminación atmosférica es una de las causas principales del cambio climático global de la Tierra²². Actualmente se requiere más información acerca de la MPA contenida en la atmósfera, sus distintos tamaños y sus concentraciones elementales, en particular de las partículas finas. Estas partículas han sido encontradas en la troposfera y ejercen una influencia importante en el clima global debido a que estando contenidas en las nubes, pueden simultáneamente reflejar, absorber o transmitir diferentes radiaciones del espectro electromagnético, dando lugar a un calentamiento (*global warming*) o enfriamiento (*global dimming*) global de la tierra. Ambos fenómenos están muy correlacionados entre sí, sumando sus efectos en algunos casos y contrarrestándose en otros. Igualmente, ambos fenómenos tienen gran efecto tanto a nivel regional como a nivel global, provocando alteraciones de los ciclos de lluvias, patrones de circulación de vientos y cambios en los gradientes de temperatura entre subregiones continentales y oceánicas. Asimismo, el enfriamiento provocado por el oscurecimiento global también provoca la acidificación de las lluvias y también se le atribuye la muerte de miles de personas en el mundo durante cada año.

Por lo tanto, es conveniente continuar realizando estudios que ofrezcan la información que se requiere para la toma adecuada de decisiones que conduzcan al control y a la eventual reducción de la contaminación atmosférica por este tipo de contaminante.





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



REFERENCIAS

1. Birks, L. S., Seebald, R. E., Batt, A. P. and Grosso, J. S., *Excitation of characteristic X-rays by Protons, Electrons, and Primary X-rays*; Journal of Applied Physics, **35** (9) (1964) 2578 – 2581.
2. Johansson, T. B., Akelsson, R., and Johansson, S. A. E., *X-ray Analysis: Elemental Trace Analysis at the 10^{-11} g Level*; Nucl. Instr. And Meth. in Phy. Res., **B84** (1970) 141-143.
3. Flores, M., J. Aldape, F., Díaz, R.V., Crumpton, D., *Set up and improvements of the PIXE facility at ININ, Mexico*, Nucl. Instr. And Meth. in Phy. Res., **B75** (1993) 116-119.
4. F. Aldape, J. Flores M., R. V. Díaz and D. Crumpton, *Temporal variations in elemental concentrations of atmospheric aerosols in Mexico City*, Nucl. Instr. and Meth. **B75** (1993) 304-307.
5. F. Aldape, J. Flores M., R.V. Díaz (ININ); J. R. Morales, T. A. Cahill, L. Sarabia (UCD), *Seasonal Study of the Composition of Atmospheric Aerosols in Mexico City*, International Journal of PIXE **1** (1991) 355-371.
6. F. Aldape, J. Flores M., R.V. Díaz (ININ); J. Miranda, T. A. Cahill, J. R. Morales (UCD), *Two Year Study of Elemental Composition of Atmospheric Aerosols in Mexico City*, International Journal of PIXE **1**, (1991) 373-388.
7. F. Aldape, J. Flores M., R. V. Diaz and D. Crumpton, *Upgrading of the PIXE System at ININ (Mexico) and Report on Elemental Composition of Atmospheric Aerosols from 1990 in the ZMCM*, Nuclear Instruments and Methods **B109/110**, 1996, 459-464.
8. F. Aldape, J. Flores M., R. Garcia G., J. W. Nelson, *PIXE Analysis of Atmospheric Aerosols from a Simultaneous Three Site Sampling during the Autumn of 1993 in Mexico City*, Nuclear Instruments and Methods **B109/110**, 1996, 502-505.
9. R. Uribe-Hernández, A. J. Pérez-Zapata, J. Flores M., F. Aldape, B. Hernández-Méndez. *Lead Contents in Blood Samples of a Children Population of Mexico City Related to Levels of Airborne Lead Determined by PIXE*, International Journal of PIXE, **6**, 1996, 255-262.
10. F. Aldape, B. Hernández Méndez and J. Flores M., *Manganese Survey in Airborne Particulate Matter from a Mining Area at Hidalgo State, Mexico*, Nuclear Instruments and Methods, **B150**, 1999, 363-369.
11. F. Aldape, J. Flores M., R.V. Díaz, B. Hernández-Méndez, J. M. Montoya Z., E. E. Blanco, A.F. Fuentes and L. M. Torres-Martínez, *PIXE Analysis of Airborne Particulate Matter from Monterrey, Mexico : A First Survey*, Nuclear Instruments and Methods, **B 150**, 1999, 439-444.
12. J. Flores M., F. Aldape, R. V. Díaz, B. Hernández-Méndez and R. Garcia G., *PIXE Analysis of Airborne Particulate Matter from Xalostoc, Mexico. Winter to Summer Comparison*, Nuclear Instruments and Methods, **B150**, 1999, 445-449,
13. J. Flores M. and F. Aldape, *PIXE Study of Airborne Particulate Matter in Northern Mexico City*. International Journal of PIXE, Vol. 11, Nos. **1 & 2**, 2001, 61-67.





Memorias

Sección Química Nuclear

30° CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA, CLAQ – 2012

47° CONGRESO MEXICANO DE QUÍMICA

27 al 31 de octubre de 2012, Cancún Quintana Roo, México



14. Aldape and J. Flores M., “*Analysis of Airborne Particulate Matter collected after an Eruption Episode of the Popocatepetl Volcano*”, International Journal of PIXE, Vol. **13**, Nos. 3 & 4, 2003, 133-139.
15. F. Aldape and J. Flores M., “*Source Apportionment of Fine Airborne Particulate Matter in the Mexico City Metropolitan Area*”, *IJPIXE* **14** (2004) 147-160.
16. F. Aldape, J. Flores M., J. Flores A., A. Retama-Hernández and O. Rivera-Hernández, “*Elemental Composition and Source Identification of PM_{2.5} Particles Collected in Downtown Mexico City*”, *IJPIXE* **15** (2005) 263-270.
17. F. Aldape, J. Flores M., A. A. Martínez Pontón, “*Evaluation of Fine Airborne Particulate Matter at Toluca, Estado de México, using PIXE*”. International Journal of PIXE Vol.**18**, Nos. 3 & 4 (2008) 187-197.
18. IAEA, Report IAEA/AL/174, *Report on the Proficiency Test for Analytical Laboratories Involved in Air Pollution Studies*, in accordance with the rules presented in the ISO/IEC, Guide 43-1, 1997, PT-XRF-IAEA/03, Seibersdorf, Austria, November 2006.
19. F. Aldape, J. Flores M., J. Flores A., A. Retama-Hernández and O. Rivera Hernández. “*Spatial Distribution of Sulfur determined by PIXE in the Atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area*”. **In Press 2012**. International Journal of PIXE.
20. J. Flores M., F. Aldape, J. Flores A., A. Retama-Hernández and O. Rivera Hernández. “*Sulfate Aerosol Levels derived from Sulfur content determined by PIXE in Atmospheric Particles collected in the Mexico City Metropolitan Area*”. **In Press 2012**. International Journal of PIXE.
21. Willy Maenhaut, Klas G. Malmqvist. *Handbook of X-Ray Spectrometry (Methods and Techniques)*. Practical Spectroscopy Series. **14**. 517-581, 1993. Edited by René E. Van Grieken and Andrzej A. Markowicz.
22. V. Ramanathan. *Global dimming by Air Pollution and Global Warming by Greenhouse Gases. Global and Regional Perspectives*. Proceedings of the 17th, International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols, Galway, Ireland, August 13-17, 2007.

