

00521  
169

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Facultad de Química**

**'ESTUDIO DEL AEROSOL DE LA CAPA DE AIRE SUPERFICIAL, EN LA  
ZONA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL'**

**TESIS**

Para Obtener el Título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Presenta:

**GERMÁN VÁZQUEZ PÉREZ MEDELLÍN**



México, D.F.

**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA**

2003

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## JURADO ASIGNADO

**Presidente:** Elizabeth Martínez Cámara  
**Vocal:** Víctor Manuel Luna Pabello  
**Secretario:** Amando Leyva Contreras  
**1er. Suplente:** Juana Judith Chávez Espín  
**2do. Suplente:** Alfonso Duran Moreno

... a la Dirección General de ...  
UNAM a difundir en formato electrónico el ...  
contenido de mi trabajo ...  
NOMBRE: Germán Vázquez  
Pérez Medellín  
FECHA: 21 Julio 03  
FIRMA: [Firma]

Facultad de Química, UNAM. México D.F.



**Dr. Amando Leyva Contreras**

Asesor



**Germán Vázquez Pérez Medellín**

Sustentante

---

## **AGRADECIMIENTOS**

- **A mi asesor y al personal de geofísica, de los cuales recibí gran ayuda y apoyo:**

**Amando Leyva Contreras**

**Héctor R. Estévez Pérez**

**Vidal Valderrama Ortiz\***

**Rogelio Montero Hernández**

**Agustín Muhlia Velázquez**

**Mauro Valdés Barrón**

**Telma Castro**

- **Al M. En C. Humberto Arriola Santamaría del Laboratorio de Química Nuclear de la UNAM, por su ayuda y orientación otorgadas para la elaboración de esta tesis.**
- **Al Dr. Pedro Ávila Pérez y a la M. en C. Graciela Zarazua Orozco del ININ, Por su valiosa aportación en el análisis de los datos, como en la discusión e interpretación de los resultados.**

---

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
2.1	El Aerosol Atmosférico y su Formación	3
2.2	El Aerosol y la Actividad Sísmica	4
2.3	Objetivos	6
2.4	Los Sitios de Muestreo	7
2.4.1	Volcán Pico de Orizaba	7
2.4.2	Volcán Popocatepetl	8
2.5	Técnicas de Muestreo de Partículas	12
2.5.1	Muestreadores de Partículas	12
2.5.2	Tomas de Aire	12
2.5.3	Medios de Filtrado y Soportes para Filtros	14
2.5.4	Medición de Flujo, Control y Movimiento	17
<b>3</b>	<b>DESARROLLO Y RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
3.1	Localización de los Sitios de Muestreo	19
3.2	Muestreador Para Altos Volúmenes (Hi-Vol)	23
3.2.1	Medio de Filtrado	25
3.3	Calibración del Hi-Vol	25
3.3.1	Procedimiento de Calibración	29
3.3.2	Cálculos Para la Calibración	31
3.4	Técnica de Muestreo	37
3.4.1	Preparación del Filtro y Hi-Vol	37
3.4.2	Muestreo en el Campo	38
3.5	Análisis de los Filtros	40
3.5.1	Análisis de PST y Concentración de Aerosoles	40
3.5.2	Análisis de FRX	43
3.5.3	Metodología de la técnica de FRX	46
3.6	Resultados	52
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>RELACIÓN DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>66</b>
6.1	Índice de Tablas	66
6.2	Índice de Figuras	66

---

## **1 RESUMEN**

El objetivo de esta tesis, es el de investigar la composición elemental, de la fracción metálica del aerosol superficial, de un sitio con actividad volcánica: Paso de Cortés, Edo. de México aledaño al volcán Popocatepetl, donde se utilizó un muestreador de partículas totales mayores a  $10\mu\text{m}$  para captar las partículas del aerosol. De los muestreos se obtuvieron las partículas suspendidas totales y el análisis de la composición metálica del aerosol, análisis que se realizó mediante la técnica de fluorescencia de rayos-x.

En zonas donde existe actividad volcánica emergen desde el subsuelo flujos de gases, como radón y/o  $\text{CO}_2$  por el efecto de movimientos sísmicos, arrastrando consigo partículas, que en combinación con estos gases forman un aerosol, el cual tiene características particulares como la de ser una fracción mineral abundante debido a su mecanismo de formación.

Para obtener las principales características de este aerosol, en la zona del volcán Popocatepetl, se llevó a cabo, en una primera fase, un muestreo cerca del volcán Pico de Orizaba, esto con el propósito de probar el muestreador en condiciones de campo y de tener un muestreo de aerosoles de una zona volcánica con muy poca actividad [10], para después comparar este muestreo con el realizado posteriormente cerca del volcán Popocatepetl, el cual se mantuvo en actividad durante el periodo de muestreo. El muestreador de partículas utilizado, se restauró y recalibró conforme a estándares de la EPA (Environmental Protection Agency) para el monitoreo de partículas suspendidas, dejándose en condiciones para realizar el muestreo.

Se determinaron las concentraciones de partículas suspendidas totales y se realizaron análisis por fluorescencia de rayos-x a los filtros de fibra de cuarzo utilizados. Los resultados de estos análisis

---

mostraron una gran dependencia de la composición metálica de las partículas con factores ambientales como el viento, la lluvia y la actividad humana presente cerca de los sitios de muestreo. Esto se reflejó en la cantidad y proporción en la que se encontraron ciertos elementos, dado lo cual fue difícil establecer una relación del resultado de los análisis con la actividad del volcán Popocatepetl.

La presente tesis, se llevó a cabo en el Instituto de Geofísica de la UNAM (IGEF), con equipo e instalaciones del Laboratorio de Aerosoles Atmosféricos del Departamento de Radiación Solar, en donde se llevó a cabo el análisis de partículas suspendidas totales. El análisis de las muestras por fluorescencia de rayos-x fue realizado por el Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ) en convenio con el Instituto de Geofísica.

---

## 2 INTRODUCCIÓN

### 2.1 El Aerosol Atmosférico y su Formación

Como aerosol atmosférico se define la mezcla de gases (N, H, O, C, He, etc.) que forman la atmósfera más su contenido de partículas suspendidas. Estas partículas pueden ser líquidas, sólidas o mixtas, es decir, formadas por una partícula sólida con una envoltura líquida. Por ejemplo se tienen aerosoles que se forman por agua condensada en forma de gotas minúsculas (neblinas) o partículas de compuestos de carbono residuales de la combustión de madera y combustibles fósiles (humos). Su tamaño va desde los  $0.001\mu$  a  $10.0\mu$  de diámetro en su fracción más numerosa y su concentración en masa va desde los  $\text{pg/m}^3$  a  $\text{mg/m}^3$ . Su composición es sumamente variada, pero principalmente consiste en agua, compuestos de carbono, compuestos orgánicos, silicio, sal y partículas metálicas. Las partículas del aerosol pueden ser originadas de manera Primaria al ser inyectadas directamente a la atmósfera a partir de la quema de combustibles o por erosión cólica de la superficie. También pueden ser generados de manera Secundaria en la misma atmósfera debido a que tienden a agruparse para formar agregados o cuando las partículas o los gases atmosféricos reaccionan químicamente entre si (Twomey S. [18], pp. 23:45), formándose de esta manera partículas con nuevas propiedades químicas y físicas. Partículas originadas de origen distinto a las mencionadas, serán tratadas en el párrafo (2.2). Las partículas pueden estar suspendidas en la atmósfera durante pocos minutos o de manera prácticamente indefinida dependiendo de su tamaño y densidad, pues tienden a depositarse bajo la influencia de la gravedad y del arrastre del aire; Las partículas más pequeñas forman agregados incrementando su peso y diámetro, reduciendo así su vida media en la atmósfera; también la lluvia lava eficazmente las partículas del aire. En la atmósfera los aerosoles tienen varios efectos,

---

como los químicos en la formación de lluvia ácida, o físicos al actuar como núcleos para la condensación de agua permitiendo la formación de nubes, y ópticos al dispersar y/o absorber la luz que atraviesa la atmósfera (Twomey S. [18]).

## **2.2 El Aerosol y la Actividad Sísmica**

De acuerdo con Pulinets S. y otros autores [13], las grietas que se forman en la corteza terrestre, como efecto de la actividad sísmica y en general de los movimientos tectónicos, permiten el escape de gases y partículas metálicas hacia la capa baja de la atmósfera terrestre. Entre los gases se tiene el Radón, gas de naturaleza radioactiva capaz de ionizar las moléculas y las partículas del aire, como consecuencia, las partículas ionizadas se separan bajo la acción de sus diferentes movilidades eléctricas y cargas en dos capas: una de iones positivos y otra de iones negativos, más cerca de la superficie la primera, formando una 'capa condensador', entre cuyas placas, se establece un campo eléctrico  $E_e$  casi-electrostático, con intensidad del orden de 1kV/m, que modifica el campo eléctrico natural de la atmósfera. En zonas sísmicamente activas, la modificación del campo eléctrico atmosférico se refleja en una modificación de la distribución de los electrones en la atmósfera, lo que de acuerdo con el modelo de interacción litosferaciónosfera [13], puede constituir un precursor de sismos de gran magnitud.

El aerosol propiamente volcánico es arrojado a la atmósfera durante el transcurso de las erupciones volcánicas, afectándola desde la troposfera hasta las capas superiores, dependiendo de la magnitud del evento. Sin embargo es el aerosol de la capa de aire superficial (no el eyectado por el cono del volcán) donde se encuentran las partículas emanadas desde la corteza terrestre por la actividad sísmica.

---

El gas radón (Rn) es continuamente formado a partir del decaimiento radioactivo del uranio (U) contenido en la corteza terrestre. El  $U^{238}$  tiene una vida media de 4.5 millones de años y decae a  $Rn^{226}$ , con una vida media de 1622 años, a  $Rn^{222}$  también radioactivo, y con una vida media de sólo 3.8 días, con la propiedad de ser soluble en agua. El  $Rn^{222}$ , a su vez decae en una cadena de varios elementos para finalmente formar plomo estable ( $Pb^{206}$ ), esto en aproximadamente 50 minutos, el cual, debido a sus propiedades radioactivas, es fácilmente detectable. El  $Rn^{222}$  tiende a ser acarreado a la superficie por otros gases como el H, He y  $CO_2$ , o bien por el agua al entrar en solución con ésta, así los gases que se acumulan debajo de la corteza terrestre emergen a la superficie a través de grietas y rocas porosas. A la víspera de un terremoto el subsuelo se reacomoda para liberar tensión, lo que causa que las grietas se cierren o abran modificando el flujo normal de estos gases; también el agua del subsuelo puede inundar grietas llenas de gas, incrementando la presión y obligándolo a ascender a la superficie más rápidamente. Es por eso que las fluctuaciones de su concentración en la superficie pueden ser usadas como indicador de actividad sísmica. Otro fenómeno que tiene lugar en la corteza terrestre, es el de la movilidad iónica durante el transporte de partículas ionizadas solubles en agua, por capilaridad de las rocas y sedimentos, así pueden formarse diferencias de potencial en el subsuelo, debido a que los iones presentan distintas movilidades, esto más parte el efecto ionizante del  $Rn^{222}$ , produce una variación del campo eléctrico natural de la atmósfera, al alcanzar estas cargas y gases la superficie terrestre.

---

### **2.3 Objetivos**

La hipótesis de la tesis, es que en la capa de aire superficial, la componente metálica del aerosol atmosférico, es de origen sísmico-volcánico, un tipo de aerosol aún poco estudiado. En este trabajo se reportan resultados de muestreos de aerosol en la capa de aire superficial, de sitios cercanos a los volcanes Pico de Orizaba y Popocatepetl, pese a que la presencia de este aerosol tiene bases científicas, descritas en el punto 2.2, su estudio experimental no ha sido abordado, al menos no hay reportes de ello en la literatura que se consultó.

El objetivo es el de por primera vez: Realizar un muestreo del aerosol de la capa superficial de aire en la zona de un volcán activo, es decir muestrear aerosol generado desde el subsuelo y no de las cenizas y humos expulsados directamente por el cono del volcán, y el de realizar análisis de partículas suspendidas totales y por FRX.

Las etapas para lograr el objetivo fueron:

1. Restauración y calibración del equipo para el muestreo de Aerosoles, el cual es un Hi-Vol (High Volume Air Sampler) fuera de servicio, razón por la que tuvo que ser reacondicionado para su uso.
2. Se llevó a cabo un muestreo preliminar cerca del volcán Pico de Orizaba con el fin de: Poner en marcha el Hi-Vol en un muestreo en campo, el de obtener práctica en el manejo de los filtros y el de obtener muestreos del aerosol, en la zona de un volcán con muy poca actividad volcánica [10], para posteriormente poder compararlos con los muestreos del volcán Popocatepetl.
3. Realizar del muestreo de aerosoles en la zona del volcán Popocatepetl.

---

4. Obtener el análisis de partículas suspendidas totales y de fluorescencia de rayos-x de los filtros obtenidos de los muestreos, para obtener su composición elemental metálica.

5. Análisis e interpretación de los datos obtenidos.

## **2.4 Los Sitios de Muestreo**

La zona donde se encuentra el volcán Popocatepetl, representa actualmente un lugar con actividad volcánica y por lo tanto sísmica, de fácil acceso, ya que se puede llegar con vehículo, además de que se encuentra cerca del D.F., lo cual se aprovechó para realizar esta tesis; a continuación se describen las características de estos sitios y su historia geológica.

### **2.4.1 Volcán Pico de Orizaba**

El Pico de Orizaba (o Citlaltépetl) es la cumbre más alta de México y el volcán más alto de Norteamérica con 5675msn, localizado a 19.03° latitud N y 97.27° longitud O, es el volcán más al oeste perteneciente al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, fué formado en tres etapas que comenzaron un millón de años atrás. La etapa más larga comenzó hace 33,000 años, seguida de un colapso provocando una gran avalancha de desechos y la erupción de una segunda ventila a un flanco además de la principal; ambas estuvieron activas hasta el comienzo del Holoceno. La reconstrucción de la cima del cono actual se completó hace 9,000 años. Durante el Holoceno las erupciones se llevaron acabo exclusivamente de la ventila principal, caracterizándose 7 periodos eruptivos, con reposos de entre 500 y 1,500 años, consistiendo en el crecimiento del domo acompañado de flujo piroclástico y salida de lava, el periodo eruptivo más reciente comenzó hace 690 años, lo que indica que puede esperarse actividad en el futuro geológico cercano. Registros históricos indican flujos de lava con moderada actividad explosiva; en años recientes su actividad

eruptiva en los años de 1545, 1566, 1569, 1630 y 1687, ha sido de moderada intensidad; el periodo eruptivo de 1545 fue el de mayor intensidad, extendiéndose a lo largo de 20 años. Actualmente en la zona sólo se detectan pequeños sismos y ausencia de actividad fumarólica. El cono actual tiene 4,000m de diámetro y 1,500m de altura; se caracteriza por estar cubierto con un glaciar permanente, uno de los más grandes del mundo.

**Tabla 1. Relación histórica de erupciones del Pico de Orizaba<sup>1</sup>.**

<b>Año</b>	<b>Evento</b>
6,850 b, h	Erupción explosiva, flujo piroclástico.
6,670 b, h	Erupción, flujo piroclástico.
6,220 b, h	Erupción explosiva, flujo piroclástico.
4,690 b, h	Erupción explosiva, flujo piroclástico.
2,190 b, h	Erupción explosiva, flujo piroclástico, lahares <sup>2</sup> .
1,500 b, h	Erupción explosiva.
1,450 b, h	Erupción y flujo de lava.
70	Erupción explosiva.
1260	Erupción explosiva.
1537	Erupción explosiva y flujo de lava.
1545	Erupción explosiva y flujo de lava.
1566	Erupción explosiva y flujo de lava.
1569	Erupción explosiva.
1613	Erupción y flujo de lava.
1687	Erupción explosiva.

(b) Antes de Cristo, (h) evento durante el holoceno.

#### 2.4.2 Volcán Popocatepetl

El Popocatepetl es el segundo volcán más alto de Norteamérica, se encuentra a 54 km al sureste del D.F. La cima que se localiza a 19°01' longitud N y 98°37' latitud O, tiene 5465msn de altura, la cual se encuentra generalmente cubierta por un glaciar; contiene un cráter de 250-450m de profundidad. El volcán es prácticamente simétrico, excepto por un pico, llamado el "Ventorillo", al noroeste, que es remanente de un volcán previo. Por lo menos 3 grandes conos anteriores

<sup>1</sup> Tomada de la página web: Global Volcanism Program [10].

<sup>2</sup> Alud de piedras, lodo y cenizas, que se forma cuando el glaciar de un volcán se derrite y fluye, debido al calor de una erupción.

---

fueron destruidos por gravedad durante el Pleistoceno hace 23,000 años, produciendo avalanchas masivas y depósitos al sur del volcán. El cono actual fue construido en 2 etapas, el llamado 'El Fraile' fue formado hace 10,000 años y fue parcialmente destruido por tres episodios de actividad explosiva; el último se formó hace 5,000 a 3,800 años. La cima actual del Popocatepetl fue formada al sur del cono El Fraile por emisiones repetidas de lava hasta 1,200 años atrás, después de lo cual comenzó una fase predominantemente explosiva. Desde tiempos prehispánicos comenzaron a ser grabadas varias de las erupciones históricas en códices Aztecas.

En los últimos 400 años las erupciones del Popocatepetl han sido relativamente pequeñas pero han provocado lluvias de ceniza en las poblaciones aledañas. En 1920 y 1927 hubo un periodo eruptivo explosivo de magnitud moderada permaneciendo en estado fumarólico hasta nuestros días. En 1993 comenzó a presentar fumarolas hasta el 21 de diciembre de 1994, con la primera emisión de ceniza en cerca de 70 años. De 1994 a 1997, la actividad, aunque no tan explosiva, continuó intensificándose hasta que en 1997 volvió a hacer erupción, con el evento más grande desde 1994, esto ocasionó sismos con una magnitud de 2.0 a 2.7 (M 2.0 y M 2.7) y una pluma de 8km de altura por encima del volcán, llegando la ceniza a la ciudad de México, nuevamente la actividad disminuyó formándose nuevamente un domo en el interior del cráter.

Durante 1998 la actividad aumentó, registrándose de nuevo actividad sísmica con una pluma de 4 a 5km de altura en agosto y sismos de M 2.0, la actividad continuó hasta diciembre y durante este lapso se registraron varias plumas y varios sismos de hasta M 3.5.

En 1999 hubo actividad en los meses de febrero a marzo, con sismos de M 4.0 y una pluma de 5km; la actividad disminuyó y se reincrementó de junio a septiembre, con sismos de M > 3.0.

---

En febrero del 2000 después de una calma de 5 meses, se formó un nuevo domo, pero a finales de este año la actividad se incrementó, con la formación de nuevos domos a una velocidad récord, teniéndose varios flujos piroclásticos y deslaves; posteriormente la actividad disminuyó hasta una calma relativa en septiembre, en diciembre la actividad arrojó una pluma de 4-5km y en diciembre del 2000 la actividad sísmica marcó un récord para el volcán, tendiéndose registros de actividad mayores que los de la actividad de 1994 y liberándose una energía 8 veces mayor que la total liberada durante 1997.

En enero del 2001 fragmentos del cráter comenzaron a ser lanzados a 1km de distancia y flujos piroclásticos generaron flujos de lodo al derretir el glaciar, lanzando una pluma a 8km de altura y provocaron sismos de M 2.1; de febrero a mayo la actividad se reduce a emisiones de vapor y cenizas de 1.5 a 2km de altura, hasta junio, cuando ocurre una explosión que produce una pluma de 4km de altura. Concretamente el 11 de Agosto del 2001, comenzaron a realizarse los muestreos de aerosol en Paso de Cortés. Al poco tiempo de que la actividad disminuyó a un nivel seguro para tener acceso al sitio, y desde esa fecha hasta el 4 de noviembre, cuando finalizaron los muestreos, el Popocatepetl presentó la siguiente actividad: Un nuevo crecimiento del domo fue detectado el 9 de agosto, con un incremento de la actividad sísmica con duración de 24 horas; para el 15 de agosto la actividad se incrementó de nuevo, con una fuerza parecida a la del día 9, pudieron verse fragmentos incandescentes lanzados a 500m del volcán; la actividad volvió a incrementarse al 9 de septiembre, emitiendo una pluma de 1km de altura y fragmentos lanzados hasta a 200m; durante octubre se levantó una pluma de 1.3km y se formó un nuevo domo de 50m de diámetro, en Noviembre se formó un nuevo domo de 130m, lo que coincidió con emisiones y sismos de M 2.3-2.7. La actividad posterior a los muestreos siguió disminuyendo, con sismos de M 2.3 en Diciembre y la formación de un nuevo domo de 190m. A inicios del 2002 la actividad

se mantuvo con sismos de M 2.6 y una explosión que destruyó parcialmente el domo anterior, formándose uno nuevo a finales de Enero. Durante los siguientes meses la actividad se a mantenido estable y en relativa calma con fumarolas y actividad sísmica de baja intensidad. A continuación se resume la actividad que el Popocatépetl ha tendido desde hace 23,000 años.

**Tabla 2. Relación histórica de erupciones del Popocatépetl<sup>3</sup>.**

<b>Año</b>	<b>Evento</b>
23,000 a	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo.
14,000 a	Gran erupción pliniana produce lluvias de ceniza y pómez sobre el Valle de México.
14,000-5,000 a	Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones.
3,000 b	Erupción grande.
200 b	Erupción grande.
800	Erupción grande.
800	Después de la última erupción explosiva, la actividad del Popocatépetl ha sido moderada. A lo largo de los últimos 1200 años se han presentado numerosos episodios de actividad similar a la actual. Algunos de ellos están documentados.
1354	Erupción menor.
1363	Fumarolas.
1512	Fumarolas.
1519	Erupción moderada seguida de actividad fumarólica.
1530	Termina actividad fumarólica.
1539-1549	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez.
1571	Emisiones de ceniza.
1592	Fumarolas y emisiones de ceniza.
1642	Fumarolas y emisiones de ceniza.
1663	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez.
1664	Emisiones de ceniza.
1665	Emisiones de ceniza.
1697	Fumarolas.
1720	Erupción leve y actividad fumarólica.
1804	Fumarolas leves.
1919-1927	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter. Hubo algunas víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre.
1994-1997	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un domo de lava en el fondo del cráter que alcanza el 20% de su capacidad. 5 personas perecieron cerca del borde del cráter durante una explosión ocurrida en mayo de 1996.
1997-2002	Erupción explosiva, flujos de lava. Actualmente continua en actividad.

(a) Años atrás, (b) Antes de Cristo

<sup>3</sup> Tomada de las páginas web: CENAPRED [3] y Global Volcanism Program [10].

---

## **2.5 Técnicas de Muestreo de Partículas**

A continuación se describen las características de los equipos y materiales utilizados para la recolección de partículas de aerosoles; estos varían principalmente según el diámetro, la cantidad y de las propiedades físicas y químicas de las partículas que se busca recolectar.

### **2.5.1 Muestreadores de Partículas**

Existe una amplia y definida regulación por parte de la EPA [5], respecto a las metodologías y técnicas de muestreo de aerosoles como contaminantes atmosféricos; los fabricantes de filtros y equipos para monitoreo, diseñan sus productos tomando en cuenta las especificaciones internacionalmente establecidas. Para el desarrollo de esta tesis, se siguieron las recomendaciones y metodologías de la EPA en cuanto al muestreo de aerosoles, aun que no enfocándolas como partículas contaminantes, generalmente de origen antropogénico, pues en este caso se estudian partículas de origen natural, generadas directamente del subsuelo, por lo que se sólo se tomaron en cuenta las normas aplicables al caso y para los fines de la tesis.

Los muestreadores de partículas básicamente consisten en combinaciones de tomas de aire selectivas para diferentes tamaños de partículas, medios de filtrado, soportes para los filtros, controladores y generadores de flujo. A continuación se describen las principales características de estos componentes.

### **2.5.2 Tomas de Aire**

Las tomas de aire varían dependiendo de lo que se requiera en cuanto a la separación, análisis químico y determinación de la distribución de las partículas suspendidas según su tamaño. Las tomas de aire simple o abiertas, básicamente sólo sostienen un medio que, tiene la función de

---

filtrar determinadas partículas y son útiles para determinar contenido total de partículas en el volumen de aire muestreado y para realizar su análisis químico; de este tipo de filtros no pueden obtenerse distribuciones de tamaños de partículas. La mayoría de los demás tipos de tomas de aire, se utilizan para obtener distribuciones del diámetro o de la masa de la partícula, y basan su funcionamiento en el diámetro aerodinámico de las partículas suspendidas y de la diferencia en la inercia que éstas presentan según su masa, como propiedad para poder separarlas. Las partículas que según su tamaño presenten un diámetro equivalente determinado, que sean filtradas al 50%, se determina como un punto de corte  $d_{50}$ , o bien la relación del diámetro de partícula, de las cuales el 16% de la muestra penetran la toma, al diámetro de las que penetran un 84% se conoce como la pendiente  $d_{50}/d_{84}$ ; entre menor sea esta pendiente, el punto de corte es menor y por lo tanto una pendiente igual a 1 da como resultado una eficiencia del 100% de separación de partículas dentro del rango de la pendiente; típicamente para las tomas de aire comerciales, la pendiente toma valores de 2 a 1.3. También las tomas de aire y en general los equipos para muestrear partículas, tienen una clasificación en función del flujo de aire para el cual están diseñados, los flujos para las entradas según los muestreadores, caen en los siguientes rangos: Altos volúmenes ( $>1,000$  lt/min), medios volúmenes ( $\sim 100$  lt/min), bajos volúmenes ( $\sim 10$  a  $20$  lt/min) y pequeños volúmenes ( $<5$  lt/min). Para poder obtener distribuciones de tamaños de partículas existen muestreadores con tomas que se conectan en serie formando los impactadores de cascada, para distribuciones detalladas. Los principios de operación, en los cuales las tomas se diseñan, son básicamente por impactación, flujo ciclónico, filtración selectiva y elutriación. El método de impactación consiste en un chorro de aire dirigido a un plato; según la inercia de las partículas al encontrarse con el plato, estas seguirán o no las líneas de flujo que divergen del plato, si las partículas no los siguen, impactan en el plato lo cual queda registrado; en este caso las

---

dimensiones del plato y el flujo de aire son específicas para determinados diámetros de partículas. Los equipos de flujo ciclónico, inducen un flujo circular dentro de un tubo, donde la inercia de las partículas hará que estas se adhieran a las paredes del tubo o de lo contrario que salgan despedidas de este, junto con el flujo de aire. La filtración selectiva, consiste en platos en serie, con orificios de tamaños determinados, sucesivamente menores en cada plato, donde las partículas son retenidas al ser más grandes que los orificios. El método de elutriación se basa en la diferente velocidad terminal que presentan las partículas según su diámetro aerodinámico, estos equipos introducen el flujo de aire a una cámara en dirección vertical ascendente, donde las partículas con una velocidad terminal mayor al flujo de aire caerán y se retendrán dentro de la cámara.

### **2.5.3 Medios de Filtrado y Soportes para Filtros**

Los filtros para muestreo de partículas consisten en materiales fibrosos muy cerrados o de membranas plásticas, como por ejemplo los filtros fabricados a partir de teflón, que han sido perforados microscópicamente y cuyos poros tienen diámetros regulares. En el caso de filtros de este tipo, el filtrado no es sobre la base de que el diámetro de la partícula sea mayor al de los poros en el filtro, si no que la retención de las partículas se realiza a partir de las colisiones y la adherencia que presentan estas con el material del cual está hecho el filtro.

La diferencia entre separar partículas con tomas de aire y usando filtros, es que estos últimos, son usados generalmente para posteriormente hacer análisis químicos de las partículas, por lo que el medio de filtrado también llega a participar en las técnicas de separación y/o análisis aplicados a las partículas como un componente extra, por ejemplo en el caso de que el medio de filtrado, junto con las partículas, se digiera para realizar una separación química en busca de algún

---

compuesto o elemento. Debido a esto los medios deben de contener concentraciones mínimas o carecer de la sustancia a analizar, y por consiguiente no todos los filtros serán compatibles con los análisis que se requieran hacer. Por lo anterior hay varias características, que hay que tomar en cuenta para la selección del medio de filtrado, que son las siguientes:

- **Eficiencia de Muestreo de Partículas:** Los filtros deberán de eliminar más del 99% de las partículas suspendidas contenidas en el flujo de aire al que se sometan, sin importar el tamaño de partícula y el flujo de aire; por ejemplo, los filtros de fibra de celulosa tienen eficiencias menores al 50%, y a menores porosidades se tienen mayores eficiencias, pero también esto incrementa la resistencia al flujo de aire.
- **Estabilidad Mecánica:** Los filtros deben de permanecer planos dentro del cartucho o marco del filtro del muestreador y de una pieza; tienen también que crear un buen sello entre ellos mismos y el muestreador a fin de eliminar fugas de aire. Un material quebradizo se puede descascarar, introduciendo errores en mediciones de masa. También cuando se requieren diferentes análisis del mismo filtro, diferentes secciones del filtro deberán poder seccionarse de manera precisa y sin dañar el resto del filtro.
- **Estabilidad Química:** Los filtros no deberán reaccionar químicamente con el depósito de partículas, inclusive cuando se sometan a solventes de extracción fuertes. No deberán de absorber gases que no pretendan recolectarse y cuando se requiera la adsorción de gases, éstos deberán de tener una eficiencia cercana al 100%. No deberán ser higroscópicos, ya que esto puede afectar las mediciones de masa, además de que el agua puede promover reacciones químicas en el material recolectado.
- **Estabilidad a la temperatura:** Los filtros deberán retener su porosidad y estructura en presencia de las temperaturas típicas del flujo de aire a muestrear y de los métodos de

---

análisis. Hay análisis que requieren mucho calentamiento, por lo que algunos filtros pueden derretirse, encapsulando los depósitos de partículas.

- **Concentraciones 'blanco':** Los filtros deberán contener concentraciones no demasiado altas, y lo más homogéneamente distribuidas, de los químicos que se quiera analizar; también deberán analizarse filtros no expuestos de los lotes muestreados, con el fin de establecer concentraciones base.
- **Resistencia al flujo y capacidad de carga:** Los filtros deben de permitir los flujos de aire que la toma requiera y los adecuados para obtener el depósito. Las partículas colectadas no deberán taponar el filtro lo que dure el muestreo, de manera que permita un flujo de aire constante; el filtro debe acumular concentraciones de partículas no menores a  $0.05\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , dentro de un periodo máximo de 24 horas (para muestreos de contaminación ambiental en ciudades).
- **Disponibilidad:** Los filtros seleccionados deben de ser fabricados de manera constante y similar, de manera que presenten características físicas y químicas que no varíen mucho, de un lote de fabricación a otro.

Existen equipos con tomas abiertas para los filtros y con soportes para filtros de tipo cartucho, estos cartuchos con los filtros en línea son prácticos al facilitar su manipulación y colocación en el sitio de muestreo, pero pueden afectar mediciones de masa, además de que tienden a variar mucho la concentración de partículas de los bordes con respecto al centro del filtro, los de tomas abiertas, que no cuentan con cartuchos, son una mejor elección para sistemas de monitoreo de aerosol ambiental, al permitir tomas y áreas más grandes, en ambos casos, los filtros expuestos no deberán someterse a vibración excesiva que pueda provocar que las partículas se desprendan de su superficie.

---

Muchos filtros no se manufacturan para fines de análisis químicos, si no sólo para la remoción de contaminantes, por lo que su propósito y propiedades deben de ser verificadas cuidadosamente antes de decidir su uso. En general, el examen para aceptarlos deben de incluir:

- Examen de filtros individuales por agujeros, rasgaduras y/o cualquier inhomogeneidad.
- Verificación del diámetro o área de filtros de un mismo lote.
- Verificación de niveles de concentración 'blanco' de las especies químicas a analizar.

#### **2.5.4 Medición de Flujo, Control y Movimiento**

Como ya se vió, las tomas de aire selectivas al tamaño de partículas son muy dependientes del flujo de aire y en el caso de que no se requiera una separación de tamaños, hay que mantener el flujo lo más constante posible, para asegurar una correcta determinación del volumen de aire muestreado; los equipos tienen dispositivos de retroalimentación que ajustan el flujo de la bomba, para así corregir la caída de presión, que se incrementa conforme se carga el filtro aumentando su resistencia al flujo de aire.

Existen dos tipos de controladores de flujo, los volumétricos y los de masa; las características de la toma y la inhalación son variables para el caso de los controladores volumétricos, pero no en el caso de los controladores de masa, que resultan ser más prácticos con respecto a la calibración ya que un cambio en la geometría del equipo no influye y en general son menos delicados, algo útil sobre todo en el trabajo de campo. En ambos casos, los cambios en la temperatura y la presión atmosféricas, a través del día y durante el año, causan que el flujo de volumen y masa varíen, por lo que deben ser calibrados a las condiciones promedio de la temperatura del muestreo y según la estación del año.

---

Para establecer el flujo de aire se requiere que la bomba pueda soportar trabajo continuo mínimo de 24hr y que cumpla con los flujos de aire requeridos por la toma de aire o del filtro; además debe mantener una potencia durante el muestreo. Generalmente en estos equipos se usan bombas de desplazamiento positivo o sopladores de tipo turbina, esto según la precisión en el flujo o del volumen de aire que se requiera según el tipo de muestreo.

---

### 3 DESARROLLO Y RESULTADOS

#### 3.1 Localización de los Sitios de Muestreo

El primer sitio donde realizaron muestreos y se tomó práctica en campo del Hi-Vol y del manejo de los filtros, fue en Puerto Nacional, Estado de Puebla, participando en el Proyecto IMPACTO, 'Campaña de Medición de Gases y Partículas en Puerto Nacional, Pue., México', encabezado por la Dr. Telma Castro, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, durante el mes de febrero del 2001. La localidad de Puerto Nacional se encuentra sobre la ladera oeste del Pico de Orizaba, a una altura de 3,300.0msn, a una distancia aproximada de 250km de la ciudad de México; el sitio se considera libre de contaminación, por lo que se esperaba recolectar partículas en su mayoría de origen natural; se tomaron muestreos diarios de 12 horas continuas, abarcando un periodo de 10 días.

El segundo sitio de muestreo, Paso de Cortes, se localiza en el Estado de México, a 25km del pueblo de Amecameca de Juarez, a una altura de 3,845msn, donde la presión atmosférica es de aproximadamente 0.681atm. Al sur del sitio se localiza el volcán Popocatepetl y al norte el Iztaccihuatl. Inicialmente se consideró el sito del cerro de Altzomoni, ya que cuenta con vigilancia y corriente eléctrica, pero su altura sobre la zona y los vientos dominantes producen necesariamente un aerosol de tipo erosional, diferente del que se pretendía muestrear, es decir, del que se agrega al aerosol de la capa de aire superficial por las emanaciones de gases y partículas que se producen a través de la corteza terrestre por la actividad sísmica. Por ello se decidió realizar el muestreo junto al albergue localizado en Paso de Cortes; éste se localiza más cerca del volcán y dentro del valle entre los dos volcanes, donde se prevé que exista mayor

---

actividad sísmica, lo que los encargados del albergue confirman, ya que reportan sismos de no muy alta intensidad cada vez que el volcán presenta actividad en cuanto a la emisión de fumarolas. La ubicación también fue propicia para realizar los muestreos ya que los vientos dominantes durante el muestreo (de oeste a este) no soplan del volcán hacia el albergue (de sur a norte), por lo que en los muestreos no se captaron cenizas ni aerosoles emanados por el cono del volcán durante la totalidad de los muestreos. Una gran desventaja de este sitio era que no contaba con corriente eléctrica, pero poco después de haber comenzado el muestreo se tendieron cables de corriente hacia el albergue, por lo que dejó de utilizarse una planta de luz como fuente de corriente y de esta manera pudieron tenerse muestreos más largos y continuos. Debido a que el Popocatepetl apenas comenzaba a disminuir su actividad, después de un periodo de moderada magnitud, al sitio se accedía con un oficio dirigido al Lic. Horacio Alejandro López López, director del Parque Izta-Popo, con el cual se nos permitía pasar el retén de seguridad sobre la carretera a Paso de Cortes.

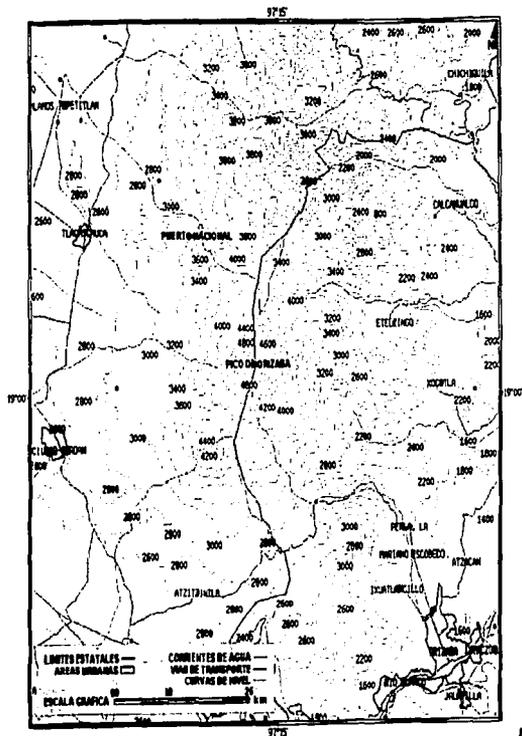


Fig. 1. Mapa volcán Pico de Orizaba.

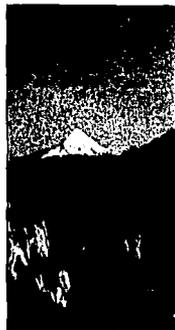


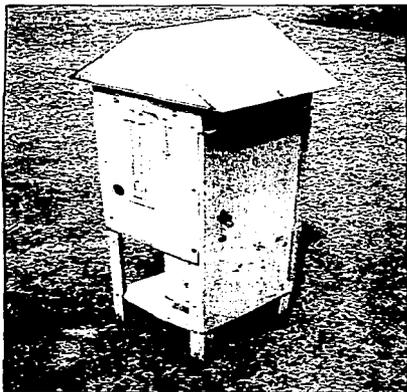
Fig. 2. Cara noreste del Pico de Orizaba desde Puerto Nacional.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

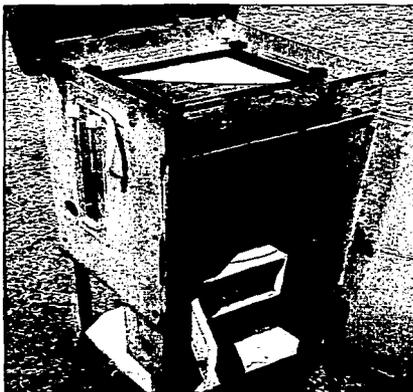


### 3.2 Muestreador Para Altos Volúmenes (Hi-Vol)

Para el trabajo de esta tesis se utilizó un muestreador para aerosoles de altos volúmenes, a continuación se da una descripción del equipo y su operación.



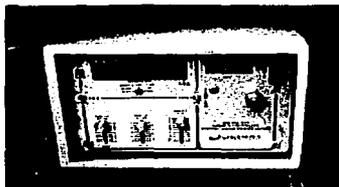
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Muestreador para altos volúmenes Hi-Vol.

---

Este muestreador cuenta con un tipo de toma simple, un controlador de flujo de masa, un contador de tiempo integrado y filtros de fibra de cuarzo (también conocidos como filtros de fibra de vidrio), este equipo es conocido como 'Hi-Vol' (High Volume air sampler), y también se conoce como PM<sub>10</sub> (particulate matter >10 $\mu$ ), por ser comúnmente usado para filtrar partículas mayores a 10 $\mu$ m de diámetro, variando un poco según el material y marca del filtro utilizado. El instrumento es un modelo marca Sierra Instruments, de la serie 350 y fue restaurado para su funcionamiento.

EL Hi-Vol es un muestreador de toma abierta, que es básicamente una bomba de aire con un filtro colocado en la parte de la succión, en la Fig. 6c se puede ver el filtro de color blanco, el cual ha sido cortado para mostrar la malla de soporte por debajo de él. El equipo consta de un chasis de aluminio anodizado (Fig. 6a), la succión la realiza un motor/soplador tipo turbina de 0.6 HP, 18,250 RPM, 115 VAC y 750 Watts, diseñado para trabajo pesado y continuo las 24 horas, el cual requiere que se recalibre el equipo por flujo; cada vez que se le cambian los carbones o cada 1000 horas de uso. El equipo cuenta con un contador de tiempo y controlador de flujo de masa (Fig. 6d), el cual mantiene el flujo de aire de manera constante durante el muestreo; el flujo de masa es controlado, registrando la transferencia de calor de un elemento calentado expreso, y expuesto al flujo de aire, en una sonda localizada debajo de la malla de soporte del filtro. El controlador es un Sierra Instruments serie 352, que mantiene un flujo de aire de acuerdo a la precisión requerida por la EPA, para el muestreo de grandes volúmenes de aire:  $\pm 1.0 \text{ ft}^3/\text{min}$  ( $\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{min}$ ) dentro de un rango de temperatura de 20 a 50°C, además de que corrige el flujo por la carga en el filtro, cambio de presión y voltaje. El flujo de aire se calcula a partir de la lectura de un manómetro de H<sub>2</sub>O, que mide la caída de presión a través del Hi-Vol, y que está

---

conectado a un orificio que se encuentra conectado a la tobera del motor en la parte de la salida de aire (Fig. 6b), El controlador de flujo también cuenta con un contador de tiempo integrado, del cual se puede obtener el tiempo de muestreo total. Para realizar el cálculo del volumen de aire muestreado; se cuenta con una gráfica calibrada para este equipo, la obtención de esta se detallará más adelante en la descripción de la calibración y operación del equipo.

### **3.2.1 Medio de Filtrado**

Como medio de filtrado se utilizaron filtros marca Whatman, de porosidad fina, grado QM-A de 8×10in (20.3×25.4cm) y de 4.0gm de peso promedio; son de microfibra de cuarzo de alta pureza, por lo que garantiza contener bajas concentraciones de sustancias ajenas al aerosol muestreado, exceptuando la del propio medio de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y por concentraciones relativamente altas de aluminio, que este tipo de filtros contiene según la bibliografía de la EPA [5]. La eficiencia de filtrado es mayor al 99.9% para la retención de partículas mayores a 0.6-0.8 $\mu\text{m}$  de diámetro; además de ser muy poco higroscópicos, son poco quebradizos. La preparación y cuidado de los filtros se detalla más adelante.

El filtro se coloca sobre un marco de acero inoxidable fijo al equipo, que a su vez sostiene una malla también de acero inoxidable, esta malla actúa como soporte mecánico para el filtro. Para mantener el filtro en posición durante el muestreo, se atornilla sobre el filtro otro marco, el cual cuenta con un empaque que evita fugas de aire hacia los bordes entre el filtro y el equipo.

### **3.3 Calibración del Hi-Vol**

Para obtener el flujo volumétrico de aire aspirado por el Hi-Vol a partir de la lectura del manómetro, debe de contarse con una gráfica de  $\Delta H_{\text{Tob}}$  vs. Q, donde  $\Delta H_{\text{Tob}}$  es la altura de la

---

columna de H<sub>2</sub>O del manómetro conectado a la tobera del Hi-Vol y Q el flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/seg); este flujo promedio mas el tiempo total de muestreo y la masa de las partículas muestreadas, son los datos a partir de los cuales; se obtiene la concentración media de las partículas capturadas por el filtro durante el muestreo. La calibración del equipo se basa fundamentalmente en obtener una correcta relación entre la lectura del manómetro ( $\Delta H_{Tob}$ ) y el flujo de aire (Q m<sup>3</sup>/seg) que es aspirado a través del filtro por el motor; con la ayuda de un calibrador.

La EPA [4] recomienda una frecuencia de recalibración para este tipo de muestreadores de partículas de:

- Por lo menos anualmente.
- Después de cualquier reparación que pueda afectar el flujo, como podría ser un cambio de motor o de los carbones del mismo o hasta que este acumule 1000 hr de funcionamiento.
- Después de colocar el equipo en un sitio de muestreo distinto.
- Cuando los valores del flujo observado, corregido a condiciones estándar, varíen  $\pm 10\%$  respecto al flujo obtenido durante la calibración, para la misma lectura del manómetro.

Así mismo, la EPA establece recalibraciones: cuando se cambia el suministro de corriente y también cuando el flujo de aire se desvíe más allá de las tolerancias para el flujo de operación. Para esta investigación, en un principio se utilizó una planta de luz, debido a lo cual el suministro de corriente no fue tan continuo como el voltaje suministrado por la red eléctrica, pues la temperatura del aire y la temperatura de la planta afectan la eficiencia de esta y por lo tanto el voltaje que genera. Los valores del flujo de aire para los primeros 4 muestreos fueron variables,

---

por lo que una calibración bajo estas condiciones no es útil, por lo que se tomó el flujo promedio de operación para realizar los cálculos posteriores y por medio de una ecuación se ajustó el volumen de aire muestreado a las condiciones de presión y temperatura del sitio de muestreo. Sin embargo para los restantes 7 muestreos se contó con corriente eléctrica constante, debido a que en septiembre del 2001 se instaló un transformador para suministrar corriente al albergue de Paso de Cortes, al cual pudo conectarse el equipo.

Para realizar la calibración se requiere:

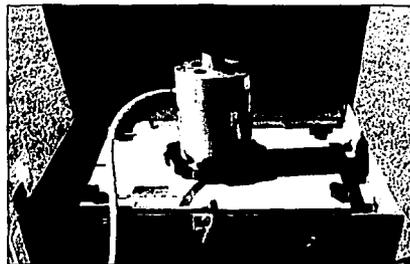
- Un Calibrador de Resistencia Variable o de Discos Perforados y su gráfica de Flujo vs. Presión Manométrica del manómetro conectado al calibrador, la cual es proporcionada por el fabricante.
- Manómetros de agua para el Calibrador y para el Hi-Vol, los cuales deberán tener una escala mínima de división de 2mm, que de preferencia deberán de asociarse al equipo y no intercambiarse.
- Un termómetro para temperatura ambiental, con un rango de lectura de 0.0 a 50.0°C y con una precisión de 0.1°C.
- Un barómetro con un rango de lectura de 500 a 800mmHg, con una precisión de 1mmHg.

En este caso para la calibración se contó con un calibrador de resistencia variable marca 'Sierra Instruments'. En la Fig. 7a puede verse el calibrador sobre la toma de aire del Hi-Vol, también se ve el manómetro del calibrador conectado a la toma lateral en el cilindro calibrador y el manómetro del Hi-Vol conectado a la tobera de salida de aire del mismo, en la Fig. 7b se ve como queda atornillado el calibrador sobre la base del filtro, el calibrador cuenta con un empaque

el cual evita fugas de aire entre el calibrador y el marco del filtro, también puede verse en la parte superior del calibrador; la perilla con la cual se regula el flujo de aire, que con aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de vuelta abre o cierra totalmente el flujo de aire y los 4 orificios por donde entra el aire.



(a)



(b)

Fig. 7. Calibrador para Hi-Vol de resistencia variable.

El procedimiento de calibración fue obtenido del manual del fabricante del Hi-Vol y también en el manual de la EPA: 'Quality Assurance Handbook' se obtuvieron varias recomendaciones en cuanto a la calibración y operación del equipo, muy útiles para la realización de la tesis. Para la calibración del Hi-Vol con un calibrador de resistencia variable o de platos perforados se sigue prácticamente el mismo procedimiento; con la diferencia de que el calibrador de resistencia variable basa su funcionamiento bloqueando el paso del aire excepto por unos orificios (a la

---

altura de la base), los cuales con la perilla pueden abrirse o cerrarse; regulando gradualmente así el flujo de aire; el de Discos Perforados cuenta con una serie de platos intercambiables con orificios de diferentes diámetros, con los cuales se pueden obtener varios flujos según el número de discos disponibles. En ambos casos al colocar el calibrador en lugar del marco del filtro (sin usar un filtro), atornillarlos al Hi-Vol y rotar la perilla o intercambiar los discos, puede regularse a voluntad el flujo de aire que ingresa al Hi-Vol. Justo debajo de las tomas de aire del calibrador; se encuentra una toma para el manómetro del calibrador; con la lectura de este manómetro ( $\Delta H_{Ca}$ ) y la gráfica proporcionada por el fabricante del calibrador; se obtiene el flujo de aire que pasa a través del calibrador, y por lo tanto del aire que pasa a través del Hi-Vol. La gráfica asocia la lectura del manómetro del calibrador ( $\Delta H_{Ca}$ ) con el flujo de aire a condiciones estándar ( $Q_0$ ); y está certificada para usarse con este calibrador, que a su vez fue calibrado con un medidor de flujo patrón por el fabricante. Finalmente ya conociendo el flujo corregido a las condiciones del muestreo ( $Q$ ); de aire a través del Hi-Vol; este se relaciona con la lectura del manómetro conectado muestreador ( $\Delta H_{Tob}$ ); de esta manera se obtiene el valor del flujo de aire sólo a partir de la lectura del manómetro conectado al Hi-Vol.

### **3.3.1 Procedimiento de Calibración**

A continuación se describe el procedimiento paso a paso:

1. El motor del Hi-Vol debe desconectarse del controlador de flujo y conectarse directamente a una fuente de corriente de voltaje constante.
2. Este procedimiento de calibración no requiere un filtro instalado y en general tampoco si se utiliza un Calibrador de Resistencia Variable o de Platos Perforados.

- 
3. Se debe de colocar el Calibrador sobre la toma del Hi-Vol, el cual tiene la misma entrada que el marco para sostener al filtro, por lo que sólo hay que atornillarlo como si fuese el marco del filtro; previamente hay que revisar que el empaque se encuentre en buen estado y que se ajuste bien para evitar posibles fugas de aire. Las tuercas deben de ajustarse a mano, pues utilizar algún tipo de herramienta puede dañar el empaque, y de manera radial para evitar morder el empaque.
  4. En este punto debe de seleccionarse el plato perforado con el que se tomará la primera medida o en el caso de tener un calibrador de resistencia variable ajustar la abertura. Como mínimo se requieren cuatro medidas del flujo para poder definir una relación de flujo entre el manómetro del calibrador y el de la tobera, por lo menos 3 medidas deberán de estar alrededor del flujo con el cual se planea muestrear. Debe de añadirse agua en el manómetro del calibrador y el de la tobera del Hi-Vol, con una columna de agua de aproximadamente 15cm. Los manómetros deberán de revisarse para comprobar que no tengan cuarteaduras; de lo contrario deberán de ser reemplazados.
  5. Se realizará una revisión por fugas, bloqueando la toma de aire del calibrador (bloqueando los 4 orificios debajo de la perilla del calibrador en este caso), lo cual puede hacerse con cinta metálica, y también se bloqueará la toma de presión para el manómetro del calibrador. Se debe de tener la precaución de no prender el motor más de 30seg cuando se bloqueen los orificios: esto reducirá la posibilidad de que se sobrecaliente el motor ya que éste es enfriado por el mismo aire que succiona. El calentamiento acorta la vida del motor y un sobrecalentamiento puede derretir el aislante de los cables causando un corto circuito. En el caso de que exista una fuga, el manómetro del Hi-Vol marcará una diferencia de presión o podrá oírse un silbido de aire, en cualquier caso si no existe fuga alguna; el manómetro de la tobera de salida de aire; no deberá marcar ninguna diferencia de presión. Las fugas son usualmente causadas por empaques dañados o faltantes entre el calibrador y la entrada del Hi-Vol; después de eliminar cualquier fuga que hubiese, se apaga el motor y se desbloquea el calibrador.

- 
6. Si los manómetros lo permiten ajustar el cero de las escalas a la base de los meniscos de agua de los manómetros, revisar sus conexiones y mangueras, que ambos estén abiertos a la atmósfera, es decir que no tengan obstrucción alguna y que no existan burbujas de aire dentro de las columnas de agua. Si al arrancar el motor el agua del manómetro del calibrador es expulsada, se puede bloquear con la mano la toma de aire del calibrador y después arrancar el motor, retirando la mano de la toma lentamente para evitar una gran caída de presión repentina que expulse el agua del manómetro.
  7. Junto con las lecturas de los manómetros del Hi-Vol y del calibrador, deberán de registrarse también la presión y temperatura ambiental. De preferencia deberán de utilizarse las mismas unidades para calibrar el Hi-Vol y para realizar los cálculos.
  8. Arrancar el muestreador y dejar que se caliente a la temperatura de operación de 3 a 5min y después leer las lecturas de los manómetros.
  9. Repetir el paso número 8 con los platos perforados, para obtener varias lecturas del flujo o ajustar el flujo con la perilla si se cuenta con un calibrador de flujo variable. Permitir unos minutos a que se estabilice el Hi-Vol antes de realizar las lecturas.

### **3.3.2 Cálculos Para la Calibración**

A continuación se describen los cálculos para procesar los datos obtenidos de la calibración. La EPA en el 'Quality Assurance Handbook', presenta una secuencia de cálculos estandarizada para la calibración del Hi-Vol, para muestreos con fines de monitoreo ambiental regulados por los E.U. aunque recomienda usar los procedimientos indicados por el fabricante, que son los siguientes:

1. El calibrador cuenta con una gráfica proporcionada por el fabricante (Fig. 8), de la cual se obtiene flujo de aire a condiciones estándar ( $Q_0$ ); a partir de la lectura del manómetro conectado al calibrador ( $\Delta H_{Ca}$ ). Lo primero que se hizo fue obtener una regresión potencial de esta curva; los puntos obtenidos de la gráfica original son los siguientes:

	0.0114	0.0071
	0.0197	0.0094
	0.0311	0.0118
	0.0464	0.0142
	0.0648	0.0165
$\Delta H_{cal} =$	0.0850	$Q_o = 0.0189 \frac{m^3}{seg}$
	0.1080	0.0212
	0.1346	0.0236
	0.1626	0.0260
	0.1969	0.0283
	0.2318	0.0307
	0.2711	0.0330

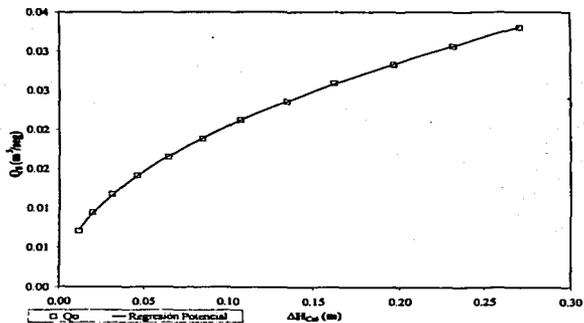


Fig. 8. Curva de regresión para el calibrador.

De la regresión potencial se obtienen las constantes  $A_1$  y  $B_1$  y el coeficiente de variación  $R^2$ , donde  $R$  es el coeficiente de correlación:

$$Q_0 = A_1(\Delta H_{Cal})^{B_1}$$

$$A_1 = 0.0621 \frac{m^3}{seg}$$

$$B_1 = 0.4824$$

$$R^2 = 0.9998$$

$$Q_0 = 0.0621 \frac{m^3}{seg} \cdot (\Delta H_{Cal})^{0.4824}$$

2. La curva proporcionada por el fabricante fue obtenida a una presión de 1.009atm y a 25°C o 289K. Para la calibración del Hi-Vol a la altura de la Ciudad de México se necesita una corrección para la presión y temperatura, pues la calibración se realizó en las instalaciones del Instituto de Geofísica (IGEF), durante la calibración se tenían 25°C de temperatura ambiente. De acuerdo con la fórmula para la corrección de presión y temperatura (obtenida del manual del calibrador):

$$Q = Q_0 \left( \frac{T_1 \cdot P_0}{T_0 \cdot P_1} \right)^{0.5}$$

$$T_0 = 298 \text{ K} \quad T_1 = 298 \text{ K}$$

$$P_0 = 1.009 \text{ atm} \quad P_1 = 0.884 \text{ atm}$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{298 \text{ K} \cdot 1.009 \text{ atm}}{298 \text{ K} \cdot 0.884 \text{ atm}} \right)^{0.5}$$

$$Q = 1.0684 \cdot Q_0$$

3. Se realiza la calibración y se obtienen las lecturas simultaneas de ambos manómetros para distintos flujos de aire, para la calibración se tomaron 11 flujos distintos, al colocar la perilla en 11 posiciones distintas, después se relacionaron las lecturas de ambos manómetros con una regresión lineal, de esta ecuación se obtendrá un ajuste; que dará la lectura del manómetro del calibrador ( $\Delta H_{Cal}$ ) a partir de la lectura del manómetro de la tobera ( $\Delta H_{ToB}$ ):

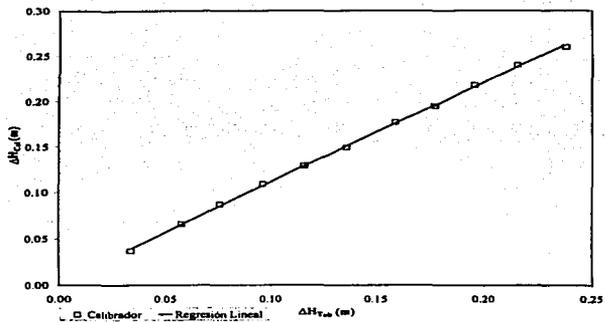


Fig. 9. Curva de ajuste de manómetros.

De la regresión lineal se obtienen las constantes  $A_2$  y  $B_2$  y el coeficiente de correlación  $R^2$ :

$$\Delta H_{Cal} = A_2 + B_2 \cdot \Delta H_{Tob}$$

$$A_2 = 0.002 \text{ m}$$

$$B_2 = 0.914$$

$$R^2 = 0.999$$

$$\Delta H_{Cal} = 0.002 \text{ m} + 0.914 \cdot \Delta H_{Tob}$$

$$\Delta H_{Cal} \approx 0.914 \cdot \Delta H_{Tob}, \text{ para } \Delta H_{Tob} > 0.005 \text{ m}$$

- Con la ecuación del paso núm. 3, de la cual se obtiene la  $\Delta H_{Cal}$  y la gráfica del calibrador del paso núm. 1. (que requiere la  $\Delta H_{Cal}$ ) se obtiene el flujo de aire ( $Q_0$ ), el cuál hay que corregir por presión y temperatura con la ecuación del paso núm. 2 y finalmente se obtiene el flujo de aire real ( $Q$ ).

5. Como siguiente paso se grafican directamente las lecturas del manómetro en la tobera del Hi-Vol vs. el flujo de aire real obtenido del paso núm. 4 ( $Q$  vs.  $\Delta H_{Tob}$ ), y se calcula una regresión potencial para obtener finalmente una ecuación para el Hi-Vol en cada sitio de muestreo, obteniéndose distintas curvas de flujo para el Hi-Vol según la corrección a las condiciones ambientales promedio en las locaciones donde se realizaron los muestreos, dando como resultado la siguiente grafica y ecuaciones:

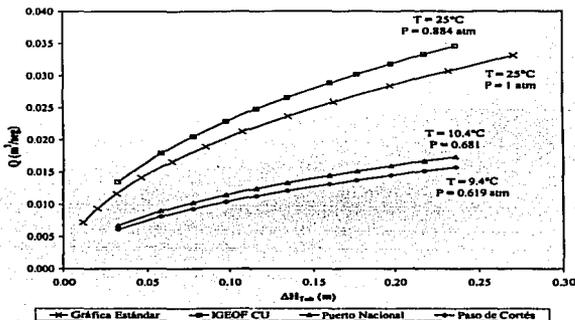


Fig. 10. Curvas de flujo del Hi-Vol.

- Ecuación para IGEOF:

$$Q = 0.0683 \frac{m^3}{seg} \cdot (\Delta H_{Tob})^{0.4709}$$

- Para Puerto Nacional (con corrección igual a: 0.501):

$$Q = 0.0342 \frac{m^3}{seg} \cdot (\Delta H_{Tob})^{0.4709}$$

- Para Puerto Nacional (con corrección igual a: 0.454):

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$Q = 0.0310 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \cdot (\Delta H_{\text{Tot}})^{0.4799}$$

6. Finalmente se necesita convertir la lectura del contador de tiempo en minutos (ver: Fig. 6d, en la parte superior derecha del controlador de flujo). Para un muestreo de 18hr (1080min); la lectura del contador (Cont) es de 1485.5 unidades; con estos datos se obtiene la constante del contador (K):

$$t_0 = 1080 \text{ min}$$

$$\text{Cont}_0 = 1485.5$$

$$K = \frac{t_0}{\text{Cont}_0}$$

$$K = \frac{1080 \text{ min}}{1485.5}$$

$$K = 0.727 \text{ min}$$

Posteriormente multiplicando la lectura del contador por K se obtiene la duración del muestreo (t) en minutos.

$$K = 0.727 \text{ min}$$

$$t = K \cdot \text{Cont}$$

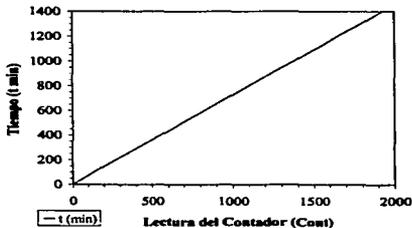


Fig. 11. Curva del contador de tiempo.

---

### **3.4 Técnica de Muestreo**

A continuación se describen los pasos que se siguieron para realizar los muestreos.

#### **3.4.1 Preparación del Filtro y Hi-Vol**

De manera previa a la realización del muestreo; unos días antes se prepara el filtro; primero se revisa que no tenga grietas o huecos, y de presentarlos el filtro se desecha; también se elimina cualquier rebaba o segmento suelto de filtro adherido que puedan desprenderse durante el muestreo, variando su peso y por lo tanto introduciendo un error al determinar el peso de las partículas suspendidas totales (PST), al obtener de los cálculos menos partículas de las que realmente se depositaron, cuando realmente lo que sucede es que hay menos filtro, después se le imprime un número de serie y se equilibra en un desecador durante 24hr, esto es llevar al filtro a un contenido de humedad determinado, lo cual se hace en un desecador con sílica-gel, donde el filtro permanece un periodo de 24 horas a humedad (24%) y temperatura (21°C) constantes; después del cual el filtro se saca del desecador y se pesa con una balanza analítica OHAUS diseñada específicamente para este tipo de filtros, con una precisión de  $\pm 0.1$ mg. Mediante este procedimiento, se obtiene el peso del filtro, mas su contenido de humedad a las condiciones de humedad dentro del desecador; posteriormente el filtro se guarda en una bolsa de plástico sellable y queda listo para utilizarse, durante todo el procedimiento los filtros se manipulan con pinzas especiales; con puntas anchas y de hule, con las cuales se evita agujerarlos o romperlos al manipularlos, además de que así se evita contaminarlos. De regreso del muestreo, ya con el filtro cargado de partículas, se equilibra y se pesa por segunda vez, obteniéndose en esta ocasión el peso del filtro, el del agua y el peso de las PST recolectadas. Por diferencia de peso antes y

---

después del muestreo; se obtiene únicamente la fracción del peso de las partículas depositadas, sin que variaciones en el contenido de humedad del filtro afecten el resultado; al hacer contener al filtro la misma cantidad de humedad antes y después del muestreo. A pesar de que los filtros son poco higroscópicos, en los lugares de muestreo se contaron en ocasiones con humedades del 100% al haber neblina, y esta se conserva dentro de la bolsa de plástico, por lo que el procedimiento es necesario.

El Hi-Vol prácticamente no requiere preparación alguna, debido a que el motor no requiere mantenimiento, mas que después de 1000hr de servicio, las cuales no se completaron durante los muestreos; en algunas ocasiones se retiró el exceso de polvo y de partículas acumuladas alrededor de la toma de aire y una sola vez se cambió el empaque que fija al filtro entre el marco sujetador y el Hi-Vol.

#### **3.4.2 Muestreo en el Campo**

Al sitio se llevaron como accesorios un termómetro de mercurio, que se coloca dentro del Hi-Vol a un lado del filtro para obtener la temperatura del aire; lo más cercano a la toma donde está el filtro, el promedio de las lecturas del termómetro se tomaron como la temperatura a la que se realizó el muestreo. La preparación del Hi-Vol y el procedimiento para comenzar el muestreo; consiste en conectarlo a la corriente eléctrica o a la planta de luz según fue el caso, después se le atornilla el manómetro; que se remueve del equipo para su transportación dado a que fácilmente se pueden romper la varilla de vidrio y la base de acrílico, se conecta la manguera a la tobera y posteriormente se llena de agua a una altura de 15cm, después se limpian con agua destilada el marco y la malla de soporte del filtro en el Hi-Vol, lo que sigue es sacar el filtro de la bolsa y

---

colocarlo en el Hi-Vol utilizando pinzas y finalmente se atornilla el marco. Justo antes de comenzar el muestreo se anotan: La locación del muestreo, la fecha y hora, la lectura del contador de tiempo, la temperatura y se arranca el motor con el interruptor de encendido en el controlador de flujo. Durante el muestreo cada hora se anotan la temperatura y la lectura del manómetro, está última; cuando comenzó a usarse corriente eléctrica del albergue; permaneció prácticamente constante variando a lo mucho  $\pm 5.0 \text{ mmHg}$ . Únicamente en caso de lluvia se detuvieron los muestreos, ya que el filtro se reblandece con la humedad y puede romperse; por lo que haría imposible obtener correctamente el peso total de las partículas filtradas, además de que estas pueden ser eliminadas del filtro por el agua. Al finalizar el muestreo se apaga el Hi-Vol, se anota la lectura del contador de tiempo, se desatornilla el marco, el filtro se dobla; esto para evitar que partículas se adhieran al lado interno de la bolsa de plástico o que se desprendan del filtro, pues cuando se recolectan una gran cantidad de partículas; estas no se adhieren al filtro y muy fácilmente se desprenden, después se desatornilla el manómetro, se desconecta el Hi-Vol de la corriente y queda listo para transportarse.

Los muestreos en Puerto Nacional a las faldas del Pico de Orizaba, se realizaron a diario; obteniéndose un filtro cargado al día, tuvieron una duración de 12 horas comenzando a las 12:00pm, debido a que no se pasaba parte de la tarde y la noche en Puerto Nacional (pues se dormía en el poblado de Tlalchichuca); para controlar el encendido y arranque del Hi-Vol, a este se conectó un timer programado para 12 horas; así todos los muestreos comenzaron a la misma hora y duraron lo mismo.

A diferencia de los muestreos en el Pico de Orizaba, los muestreos en Paso de Cortés no fueron diarios y el tiempo de muestreo no fue tan regular; debido a que sólo fue posible hacerlos los

---

sábados y al finalizar los muestreos se regresaba al Distrito Federal. Según las condiciones en la carretera para llegar a Paso de Cortes; los muestreos en promedio se llevaron a cabo desde las 7:30am a las 6:00pm, juntando en total 11 horas y 30 minutos de muestreo. Todos los viernes, un día antes del muestreo, y también poco tiempo antes de tomar la carretera, se consultaba la página web del CENAPRED [3] para saber si las condiciones del volcán permitían realizar el muestreo de manera segura.

### **3.5 Análisis de los Filtros**

De los filtros primero se obtuvo el peso de las partículas suspendidas totales (PST), este análisis se realizó en el 'Laboratorio de Aerosoles Atmosféricos' del Departamento de Radiación Solar del IGEF, el cual cuenta con el material y equipo necesario. Cómo se vio en el punto 3.4.1, el procedimiento fue básicamente pesarlos antes y después del análisis habiéndose ajustado su humedad en ambos casos. También se obtuvo la concentración de varios elementos, principalmente de metálicos, contenidos en el aerosol recolectado por el método de Fluorescencia de Rayos-X (FRX), este análisis se realizó por parte del Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ). A continuación se describe como se efectuaron y se procesaron los datos obtenidos de los análisis.

#### **3.5.1 Análisis de PST y Concentración de Aerosoles**

Para obtener la concentración de partículas en el filtro, es necesario tener previamente el volumen total de aire muestreado, el cual se obtuvo con la lectura del manómetro del Hi-Vol y la gráfica de la curva del Hi-Vol donde se realizó el muestreo como ya se vió en el punto 3.3.2; a continuación se muestra la secuencia de cálculos para obtener las PST y la concentración de

---

partículas para un filtro, para lo cual se tomo como ejemplo el filtro de Paso de Cortés del 13 de Octubre del 2001.

Del muestreo se tienen los datos de tiempo total muestreado ( $t$ ), la lectura promedio del manómetro ( $\Delta H_{Tob}$ ) y de las PST el peso de las partículas depositadas ( $W_p$ ), para el filtro del 13 de octubre del 2001 se tienen los siguientes datos:

$$t = 390 \text{ min}$$

$$\Delta H_{Tob} = 14.81 \text{ cm}$$

Primero se obtiene el flujo de aire con la ecuación del Hi-Vol para el Paso de Cortés, del punto 3.3.2:

$$Q = 0.0310 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \cdot (\Delta H_{Tob})^{0.4709}$$

$$Q = 0.0310 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \cdot (14.81)^{0.4709}$$

$$Q = 0.1103 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

A continuación se calcula el volumen total de aire muestreado con el tiempo total de muestreo:

$$V = t \cdot 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}} \cdot Q$$

$$V = 390 \text{ min} \cdot 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}} \cdot 0.1103 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$V = 2582.17 \text{ m}^3$$

Con el peso del filtro antes ( $M_1$ ) y después del muestreo ( $M_2$ ), por diferencia se obtiene el peso de las partículas depositadas ( $M_p$ ):

$$M_p = M_2 - M_1$$

$$M_p = 4216.9\text{mg} - 4183.1\text{mg}$$

$$M_p = 33.8\text{mg}$$

Finalmente; la concentración de las partículas recolectadas en el aire (X), es igual a:

$$X = \frac{M_p}{V}$$

$$X = \frac{33.8\text{mg}}{2582.17\text{m}^3} \cdot 1000\mu\text{g}$$

$$X = 13.09 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

A continuación se muestran los resultados del análisis de PST y su concentración en el aire muestreado, obtenidos para cada filtro en ambos sitios:

PST Puerto Nacional									
Muestra	Fecha	t (min)	$\Delta H_{Tos}$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /seg)	V (m <sup>3</sup> )	M <sub>1</sub> (mg)	M <sub>2</sub> (mg)	M <sub>p</sub> (mg)	X (μg/m <sup>3</sup> )
F21616	20-Feb-01	868.2	13.5	0.117	6071.8	4264.3	4546.3	282.0	46.44
F21615	21-Feb-01	863.8	13.6	0.117	6060.6	4220.5	4464.0	243.5	40.18
F21614	22-Feb-01	865.3	13.3	0.115	5991.5	4213.0	4493.5	280.5	46.82
F21613	23-Feb-01	821.0	13.8	0.117	5784.7	4245.0	4538.6	293.6	50.75
F21612	24-Feb-01	855.8	14.8	0.121	6233.1	4405.5	4785.1	379.6	60.90
F21611	25-Feb-01	825.3	15.8	0.125	6199.4	4416.0	4775.3	359.3	57.99
F21610	26-Feb-01	863.8	15.8	0.125	6488.6	4396.0	4574.5	178.5	27.51
F21609	27-Feb-01	863.1	14.8	0.121	6286.0	4425.0	4657.3	232.3	36.96
F21608	28-Feb-01	658.2	15.8	0.125	4944.2	4403.5	4666.5	263.0	53.19
F21607	01-Mar-01	634.2	12.5	0.112	4272.9	4326.0	4786.3	460.3	107.73

PST Paso de Cortés									
Muestra	Fecha	t (min)	$\Delta H_{Tos}$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /seg)	V (m <sup>3</sup> )	M <sub>1</sub> (mg)	M <sub>2</sub> (mg)	M <sub>p</sub> (mg)	X (μg/m <sup>3</sup> )
FO21601	11-Ago-01	437.0	10.6	0.094	2469.7	4379.3	4388.4	8.9	3.60
FO21602	18-Ago-01	646.0	11.4	0.097	3775.8	4287	4295.9	8.9	2.36
FO21603	25-Ago-01	594.0	12.8	0.103	3676.4	4264.5	4267.9	3.4	0.92
FO21605	01-Sep-01	556.0	10.6	0.094	3146.7	4231.5	4240.9	9.4	2.99
FO21606	09-Sep-01	518.0	14.5	0.109	3400.2	4394.5	4403.6	9.1	2.68
FO21617	22-Sep-01	456.0	11.4	0.098	2674.1	4201.5	4207.1	5.6	2.09
FO21618	29-Sep-01	829.0	15.2	0.112	5559.5	4107.5	4130.4	22.9	4.12
FO21619	06-Oct-01	633.0	15.0	0.111	4210.7	4254.4	4280.7	26.3	6.25
FO21620	13-Oct-01	390.0	14.8	0.110	2582.2	4183.1	4216.9	33.8	13.09
FO21621	20-Oct-01	523.0	14.9	0.111	3470.7	4190.3	4218.6	28.3	8.15
FO21622	04-Nov-01	606.0	15.7	0.113	4121.2	4200.3	4253.4	53.1	12.88

Tabla 3. Resultados de PST.

---

### 3.5.2 Análisis de FRX

La FRX es la técnica más comúnmente usada para el análisis de la composición de un amplio rango de elementos en este tipo de filtros, la FRX para este tipo de muestras es muy útil, debido a que puede analizar muestras en una gran variedad de formas físicas y en cualquier estado físico. Así en este caso sólo se requirió un segmento del filtro sin preparación alguna para realizar el análisis, lo cual es muy útil ya que la cantidad de partículas recolectadas por filtro es muy baja y separar las partículas del filtro resulta complicado, además de que esto podría contaminar las partículas, el método también es capaz de detectar concentraciones muy bajas de varios elementos prácticamente en tiempo real y tiene la ventaja de ser un análisis no destructivo; en este caso, por ser el filtro es muy grande se contó con una cantidad de muestra más que suficiente para realizar los análisis. La fluorescencia se define como la generación de radiación secundaria de un átomo a partir de irradiación por medio de una fuente externa de radiación primaria; en la técnica de FRX esto se logra por medio de la interacción de rayos-x externos con los electrones en los átomos a analizar. Estos electrones, al absorber energía, pueden, aun que con poca probabilidad, absorber la cantidad energía exacta para subir de un nivel a otro de mayor energía en el proceso llamado excitación de resonancia; también, con mayor probabilidad puede suceder el proceso en el cual el electrón recibe una cantidad de energía igual o mayor a su energía de enlace, lo que hace que el electrón sea expulsado del átomo dejando un espacio libre en algún orbital, lo que hace que la energía del átomo se incremente por encima de su configuración estable, para que el átomo regrese a su estado estable, los electrones de las capas superiores se transferirán al espacio vacante liberando energía en el proceso; debido a que los electrones en las capas tienen energías discretas, la cantidad de energía que necesita el electrón liberar para bajar y ocupar el lugar vacante es muy definida, esta energía se libera en forma de onda

---

electromagnética, que lleva una cantidad de energía equivalente a la usada para la transición del electrón ( $E_\gamma$ ) de una capa o otra. Desde el punto de vista cuántico esta energía se libera en forma de un fotón con una energía igual a:

$$E_\gamma = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck igual a:  $6.625 \times 10^{-34}$  J/seg,  $c$  la velocidad de la luz y  $\lambda$  es la longitud de onda del fotón, usualmente  $E_\gamma$  de manera práctica se obtiene con unidades de keV. Dependiendo del átomo, hay capas orbitales con mayor probabilidad que otras; de que sus electrones se transfieran para ocupar vacantes en capas inferiores; cuando un gran numero de transiciones suceden, los fotones emitidos de varias capas forman un espectro de emisión característico. Las energías pueden ser muy bajas y no detectables, por lo que las emisiones que ocurren en capas internas, que liberan energía dentro de la longitud de onda de los rayos-x, son más significativas en cuanto a la información que puede obtenerse de ellas, debido a que los electrones de capas internas tienen un enlace más fuerte al núcleo que átomos externos de la capa de valencia, lo que hace las energías de transición de capas inferiores sean prácticamente intensivas del estado químico del átomo, de todos modos los fotones emitidos por electrones de capas externas son pocos y están más allá de la resolución de los equipos de FRX. Otra ventaja es que las capas que emiten rayos-x son pocas haciendo relativamente fácil la interpretación de los espectros de emisión, además de que los rayos-x atraviesan fácilmente el medio de las muestras, reduciendo errores por absorción o dispersión.

---

En los equipos de FRX la fuente primaria de radiación electromagnética se obtiene a partir de tubos de rayos-x o de las emisiones de rayos gamma y rayos-x de materiales radioactivos; la fuente radiación se tiene que apuntar a la muestra; de manera indirecta al detector; para que este sólo detecte los rayos-x emitidos de manera secundaria por la muestra y no los emitidos por la fuente de radiación. El detector de Rayos-X está hecho de un material semiconductor generalmente fabricado de silicio y/o germanio, el cual al recibir radiación se ioniza, haciéndolo momentáneamente conductor al potencial eléctrico al que se somete, la absorción de energía ionizante por parte del detector hace que se cree una carga libre, que idealmente es proporcional a la energía depositada por la carga de la partícula incidente, de esta relación de energías posteriormente se obtiene el espectro de emisión, en el que se grafica la cantidad de fotones detectados contra su energía en keV. En un espectro de emisión (ver Fig. 12), los fotones de varias energías que son detectados se registran de manera independiente como 'cuentas' y dependiendo de la muestra, se favorecerá más la formación de fotones de ciertas energías formando estas cuentas varios 'picos'; que de su posición característica en el espectro de energías; se puede determinar el átomo del cual provino y de su área, que es proporcional al número de cuentas, la concentración del elemento en la muestra. En este caso el límite de detección se entiende como la menor cantidad o concentración de determinado elemento que puede ser detectada por el equipo.

Como primera opción para realizar los análisis de FRX, se acudió al Laboratorio de Química Nuclear de la Facultad de Química a cargo del M. en C. Humberto Arriola Santamaría, quién facilitó el equipo de FRX construido por el mismo; este cuenta con una fuente radioactiva de americio ( $\text{Am}^{253}$ ) como fuente de radiación primaria y un detector de centelleo, pero debido a que

---

la concertación de las partículas en el filtro fue baja, resultó estar por debajo del límite de detección del equipo, debido a esto; los análisis se realizaron en el ININ contando con el apoyo del Dr. Manuel Ávila Pérez y la operadora del equipo M. en C. Graciela Zarazua Orozco. El equipo de FRX del ININ; cuenta como fuente de radiación primaria un tubo de rayos catódicos de tungsteno, el equipo obtuvo la concentración de los siguientes elementos en la mayoría de los filtros: Potasio (K), calcio (Ca), titanio (Ti), manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb) y estroncio (Sr).

### **3.5.3 Metodología de la técnica de FRX**

Para realizar el análisis de fluorescencia de rayos-x, se requirió cortar un segmento de 2cm<sup>2</sup> de filtro; el equipo cuantificó las concentraciones para: K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Cu y Pb, del Sr sólo pudo determinarse cualitativamente su existencia, dando positivo para la mayoría de los filtros en ambas locaciones, pero debido a la falta de una muestra patrón en el equipo utilizado no se pudo determinar su concentración. Del equipo se obtuvo un espectro característico para cada filtro como el siguiente, que es obtenido del filtro del día 4 de noviembre del 2001 en Paso de Cortés.

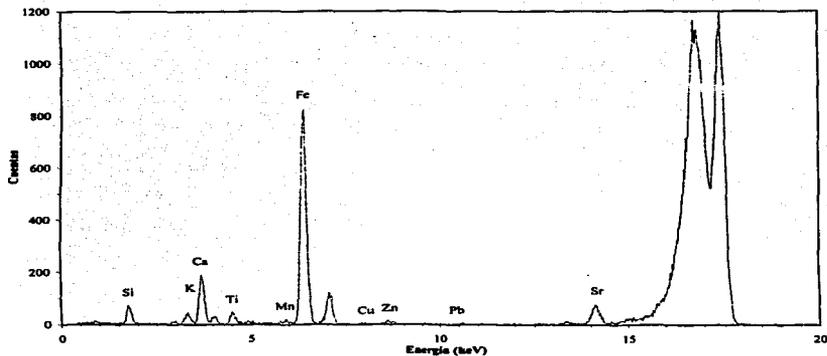


Fig. 12. Espectro de emisión de FRX.

Los resultados del análisis dan directamente el peso del elemento contenido en el segmento de filtro analizado de  $2\text{cm}^2$ ; las concentraciones se reportan en nanogramos por centímetro cuadrado de filtro ( $\text{ng}/\text{cm}^2$ ) y son las siguientes:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FRX Filtro Blanco (ng/cm <sup>2</sup> )									
Filtro	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F021604	<	<	<	<	<	<	<	72	<

FRX Puerto Nacional (ng/cm <sup>2</sup> )										
Filtro	Fecha	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F21616	20-Feb-01	5467	10537	1161	864	22071	160	<	<	<
F21615	21-Feb-01	3427	8390	1104	345	13136	<	144	<	nc
F21614	22-Feb-01	7221	18665	1776	896	28031	<	100	41	nc
F21613	23-Feb-01	10200	20812	2544	1328	38362	<	139	<	nc
F21612	24-Feb-01	10567	20658	2208	1328	48791	<	65	61	<
F21611	25-Feb-01	7997	11063	1517	734	23847	<	141	<	nc
F21610	26-Feb-01	5712	10318	1181	<	20230	<	65	<	nc
F21609	27-Feb-01	5763	9091	989	777	19530	133	137	55	nc
F21608	28-Feb-01	9098	15335	1901	918	35297	<	<	<	nc
F21607	01-Mar-01	16401	29837	4300	2851	82696	193	197	58	nc

FRX Paso de Cortés (ng/cm <sup>2</sup> )										
Filtro	Fecha	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F021601	11-Ago-01	<	<	<	<	<	237	<	35	<
F021602	18-Ago-01	<	2015	<	<	<	<	<	<	nc
F021603	25-Ago-01	<	2256	<	<	<	<	<	<	nc
F021605	01-Sep-01	<	2760	<	<	1200	<	80	<	nc
F021606	09-Sep-01	<	1678	230	248	1322	70	<	<	nc
F021617	22-Sep-01	1305	4907	<	<	670	<	38	<	<
F021618	29-Sep-01	<	2147	<	<	716	567	95	<	nc
F021619	06-Oct-01	<	2344	<	<	1375	<	<	77	nc
F021620	13-Oct-01	<	3067	<	<	2925	<	<	47	nc
F021621	20-Oct-01	1550	5960	339	<	5791	452	57	94	nc
F021622	04-Nov-01	11913	28504	3187	1188	43041	78	128	90	nc

Tabla 4. Resultados de FRX.

En las tablas con '<' se indica que la concentración del elemento está por debajo del límite de detección del equipo, para el estroncio 'nc' significa: no cuantificado, lo que indica que el elemento está presente en el filtro en cantidades apreciables como para cuantificarse en caso de que se cuente con el patrón de concentración conocida, para calibrar la señal del equipo.

En las muestras de 'Paso de Cortés' se observa que desde el día 29 de septiembre comienzan a aparecer de manera significativa el Fe, Cu y Pb; desde ese día se conectó por primera vez el Hi-Vol a la corriente eléctrica del albergue; que al tener un voltaje más alto que la planta de luz, incrementó la potencia del motor del Hi-Vol y por lo tanto también el volumen de aire y las

partículas recolectadas en los filtros, haciéndose éstas lo suficientemente abundantes; como para que el equipo detectara la señal de un mayor número de elementos presentes en los filtros.

Posteriormente con el área total muestreada del filtro ( $A$ ), que es ligeramente menor que el área total del filtro, ya que el filtro queda limpio aproximadamente 1cm alrededor en el borde donde lo cubre el marco del Hi-Vol, con el dato anterior y el volumen de aire filtrado ( $V$ ) se obtienen los valores para la composición de la fracción metálica en el aire de Puerto Nacional y Paso de Cortés; en el siguiente ejemplo se obtiene la concentración del Fe, utilizando el mismo filtro del ejemplo anterior:

$$x_A = \frac{(x_F - x_B) \cdot A}{V}$$

$$x_A = \frac{\left( 2925 \frac{\text{ng}}{\text{cm}^2} - 0 \frac{\text{ng}}{\text{cm}^2} \right) \cdot \frac{1 \mu\text{g}}{1000 \text{ng}} \cdot \frac{(100 \text{cm})^2}{1 \text{m}^2} \cdot 0.04094 \text{m}^2}{2582.168 \text{m}^3}$$

$$x_A = 0.4638 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

Donde  $x_F$  es la concentración del elemento en el filtro ( $\text{ng}/\text{cm}^2$ ),  $x_B$  es la concentración del elemento en el filtro blanco y  $x_A$  es la concentración en el aerosol ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la tabla a continuación contiene los resultados de todos los muestreos:

Composición Metálica en Puerto Nacional ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Muestra	Fecha	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F21616	20-Feb-01	0.369	0.710	0.078	0.058	1.488	0.011	<	<	<
F21615	21-Feb-01	0.231	0.567	0.075	0.023	0.889	<	0.010	<	nc
F21614	22-Feb-01	0.493	1.275	0.121	0.061	1.915	<	0.007	<	nc
F21613	23-Feb-01	0.722	1.473	0.180	0.094	2.715	<	0.010	<	nc
F21612	24-Feb-01	0.694	1.357	0.145	0.087	3.203	<	0.004	<	<
F21611	25-Feb-01	0.528	0.731	0.100	0.048	1.575	<	0.009	<	nc
F21610	26-Feb-01	0.360	0.651	0.075	<	1.276	<	0.004	<	nc
F21609	27-Feb-01	0.375	0.592	0.064	0.051	1.272	0.009	0.009	<	nc
F21608	28-Feb-01	0.753	1.270	0.157	0.076	2.923	<	<	<	nc
F21607	01-Mar-01	1.571	2.859	0.412	0.273	7.923	0.018	0.019	<	nc

Composición Metálica Paso de Cortés ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Muestra	Fecha	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F021601	11-Ago-01	<	<	<	<	<	0.039	<	<	<
F021602	18-Ago-01	<	0.218	<	<	<	<	<	<	nc
F021603	25-Ago-01	<	0.251	<	<	<	<	<	<	nc
F021605	01-Sep-01	<	0.359	<	<	0.156	<	0.010	<	nc
F021606	09-Sep-01	<	0.202	0.028	0.030	0.159	0.008	<	<	<
F021617	22-Sep-01	0.200	0.751	<	<	0.103	<	0.006	<	<
F021618	29-Sep-01	<	0.158	<	<	0.053	0.042	0.007	<	nc
F021619	06-Oct-01	<	0.228	<	<	0.134	<	<	0.0005	nc
F021620	13-Oct-01	<	0.486	<	<	0.464	<	<	<	nc
F021621	20-Oct-01	0.183	0.703	0.040	<	0.583	0.053	0.007	0.003	nc
F021622	04-Nov-01	1.183	2.812	0.317	0.118	4.276	0.008	0.013	0.002	nc

Tabla 5. Composición elemental en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

También se obtuvieron las concentraciones en partes por billón (ppb). Para obtener las ppb de los elementos primero se calculó la masa de aire filtrado ( $M_A$ ) a las condiciones de presión (P) y temperatura (T) promedio del muestreo:

$$M_A = \frac{PM_A \cdot P \cdot V}{R \cdot T}$$

$$P = 0.6186 \text{ atm}$$

$$T = 12.6^\circ\text{C}$$

$$M_A = \frac{29 \text{ mol} \cdot 0.6186 \text{ atm} \cdot 2582.168 \text{ m}^3}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot (12.6 + 273)^\circ\text{K}}$$

$$M_A = 1978.049 \text{ kg}$$

Para calcular las ppb de Fe ( $y_{Fe}$ ) en el aerosol, se divide la masa del metal ( $m_{Fe}$ ), entre la masa total del aire ( $M_A$ ), mas la masa de las partículas que este ( $M_P$ ) que contiene.

---

**Masa del Fe ( $m_{Fe}$ ):**

$$m_{Fe} = x_{Fe} \cdot V$$

$$m_{Fe} = 0.4638 \frac{kg}{m^3} \cdot 2582.168 m^3$$

$$m_{Fe} = 1197.495 \mu g$$

**Para obtener las ppb de Fe ( $y_{Fe}$ ):**

$$y_{Fe} = \frac{m_{Fe}}{M_A + M_P}$$

$$y_{Fe} = \frac{1197.495 \mu g}{1978.049 kg + 13.09 \mu g \cdot 1 \times 10^{-9} \frac{kg}{\mu g}}$$

$$y_{Fe} = 0.6054 ppb$$

**La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para todos los filtros:**

Composición Metálica en Puerto Nacional (ppb)										
Muestra	Fecha	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F21615	20-Feb-01	0.4361	0.8406	0.0926	0.0689	1.7607	0.0128	<	<	<
F21615	21-Feb-01	0.2743	0.6717	0.0884	0.0276	1.0532	<	0.0115	<	nc
F21614	22-Feb-01	0.5771	1.4916	0.1419	0.0716	2.2401	<	0.0080	<	nc
F21613	23-Feb-01	0.8066	1.6457	0.2012	0.1050	3.0335	<	0.0110	<	nc
F21612	24-Feb-01	0.8413	1.6451	0.1758	0.1058	3.8855	<	0.0052	<	<
F21611	25-Feb-01	0.6290	0.8702	0.1193	0.0377	1.8757	<	0.0111	<	nc
F21610	26-Feb-01	0.4517	0.8159	0.0934	<	1.5997	<	0.0051	<	<
F21609	27-Feb-01	0.4565	0.7201	0.0783	0.0615	1.5471	0.0105	0.0109	<	nc
F21608	28-Feb-01	0.7194	1.2126	0.1503	0.0726	2.7911	<	<	<	nc
F21607	01-Mar-01	1.2923	2.3510	0.3388	0.2246	6.5160	0.0152	0.0155	<	nc

Composición Metálica Paso de Cortés (ppb)										
Muestra	Fecha	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Sr
F021601	11-Ago-01	<	<	<	<	<	0.0504	<	<	<
F021602	18-Ago-01	<	0.2807	<	<	<	<	<	<	nc
F021603	25-Ago-01	<	0.3240	<	<	<	<	<	<	nc
F021605	01-Sep-01	<	0.4628	<	<	0.2012	<	0.0134	<	nc
F021606	09-Sep-01	<	0.2615	0.0358	0.0387	0.2060	0.0109	<	<	<
F021617	22-Sep-01	0.2591	0.9741	<	<	0.1330	<	0.0075	<	<
F021618	29-Sep-01	<	0.2035	<	<	0.0679	0.0537	0.0090	<	nc
F021619	06-Oct-01	<	0.2948	<	<	0.1729	<	<	0.0006	nc
F021620	13-Oct-01	<	0.6348	<	<	0.6054	<	<	<	nc
F021621	20-Oct-01	0.2361	0.9078	0.0516	<	0.8820	0.0688	0.0087	0.0034	nc
F021622	04-Nov-01	1.5200	3.6113	0.4066	0.1516	5.4916	0.0100	0.0163	0.0023	nc

Tabla 6. Composición en ppb.

### 3.6 Resultados

Se realizaron un total de 21 muestreos, 10 realizados en la localidad de 'Puerto Nacional' a las faldas del Volcán Pico de Orizaba y 11 en 'Paso de Cortés' a las faldas del Volcán Popocatepetl.

Los muestreos en Puerto Nacional fueron llevados a cabo de manera diaria y continua durante 10 días, del 20 de febrero al 1° de marzo del 2001, de donde se obtuvieron un total de 10 filtros con depósitos de aerosol; cada muestreo tuvo una duración de 13.5hr, es decir se muestrearon un total 135.3 horas. Los muestreos en Paso de Cortés, se realizaron de manera semanal, durante el periodo del 11 de agosto al 4 de noviembre del 2001, obteniéndose 11 filtros, con un total de 103.1, un promedio de 9.4 horas de muestreo promedio por filtro. Si bien el tiempo de muestreo por filtro fue menor en Paso de Cortés, la cantidad de materia depositada en los filtros de Paso de Cortés fue menor a la de los filtros de Puerto Nacional; más bien debido a que en los primeros

muestras de Paso de Cortés el equipo se operó con una planta de corriente y sólo cuando se dotó al albergue con corriente eléctrica constante y voltaje adecuado, aumentaron los depósitos de partículas (ver Tabla 6, para los datos desde el 29-Sep-01). A continuación se muestran 2 gráficas con los resultados del análisis de PST en  $\text{mg}/\text{m}^3$  de aire muestreado, obtenidos en cada filtro para ambos sitios, durante los días muestreados durante el 2001:

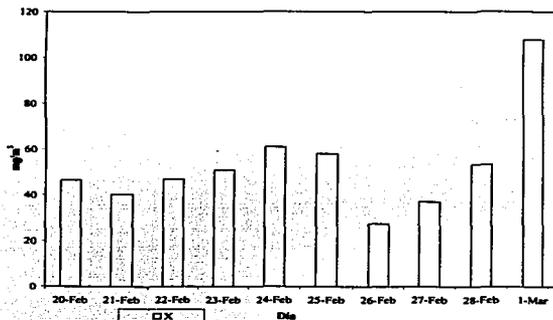
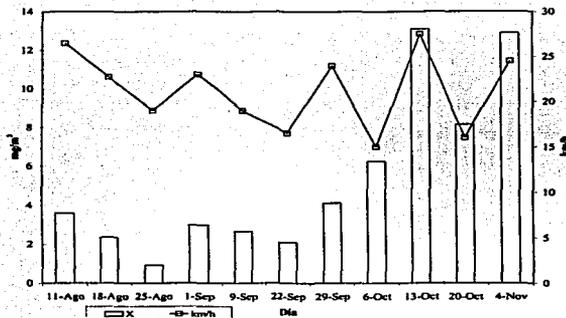


Fig. 13. Concentración de PST en Puerto Nacional.



**Fig. 14. Concentración de PST e intensidad del viento en Paso de Cortés.**

Como puede verse las concentraciones de aerosoles en Puerto Nacional fueron, aproximadamente 1 orden mayores que en Paso de Cortés.

Para estudiar la composición se determinaron las concentraciones promedio en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de los elementos: K, C, Ti, Mn, Fe, Zn, Pb y Sr. Como se observa en la Tabla 5, no para todos los elementos analizados por filtro se tuvieron concentraciones mayores que el límite de detección, sobre todo para los muestreos en Paso de Cortés. A continuación se muestra la gráfica que compara las concentraciones promedio obtenidas en Puerto Nacional y Paso de Cortés:

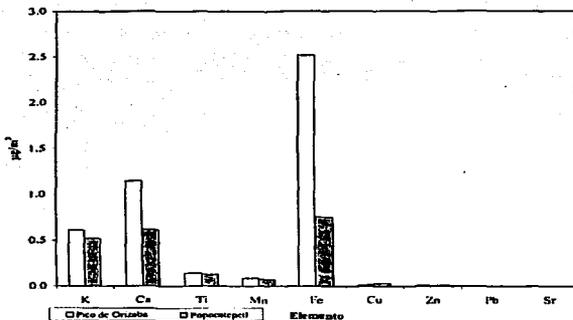


Fig. 15. Composición metálica promedio.

También se calcularon las concentraciones relativas a la concentración de calcio en los filtros de ambas locaciones, en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y en ppb. Se seleccionó el calcio como referencia ya que este elemento fue lo suficientemente abundante como para que apareciera en el análisis de la mayoría de los filtros.

En la Fig. 16, se ve que sólo las concentraciones de potasio y hierro son significativamente mayores en Puerto Nacional que en Paso de Cortés, estos 2 elementos están muy relacionados con la actividad humana, por lo que seguramente es la causa de la diferencia en las concentraciones, para los demás elementos las concentraciones fueron similares.

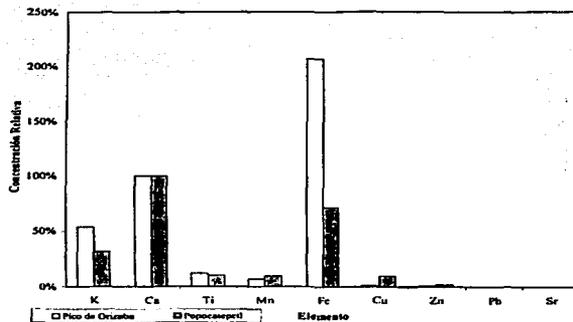


Fig. 16. Concentraciones relativas al Ca.

A continuación se grafican las concentraciones relativas de los metales, en el aerosol de Puerto Nacional, Paso de Cortés y como componentes en la corteza terrestre (composición global para los datos de la corteza terrestre).

TEST  
 FALLA DE ...

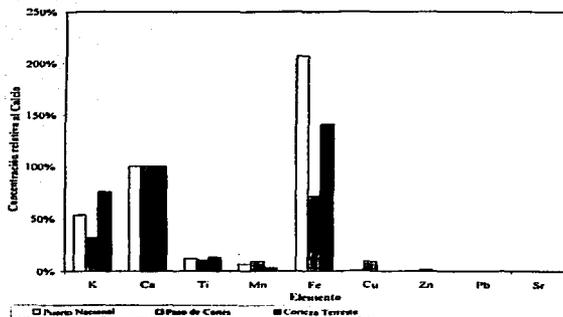


Fig. 17. Concentraciones relativas a partir de ppb.

Como se ve las proporciones de los metales son similares, excepto la del Fe en Puerto Nacional, seguramente también por las razones similares del caso anterior. En el caso del Cu, parece estar relativamente abundante en el aerosol del Paso de Cortés en comparación con el de Puerto Nacional y de su composición en la corteza terrestre.

También se graficó la actividad volcánica del volcán Popocatepetl contra la concentración relativa de Fe respecto al Ca, esto se realizó para ver la relación entre un componente en el aerosol que fuese no metálico y uno que si lo es.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

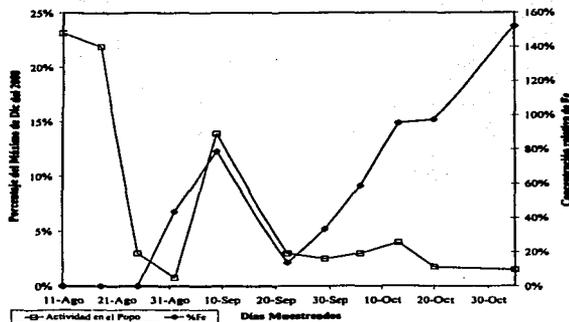


Fig. 18. Actividad volcánica vs. concentración relativa.

En la escala de la izquierda se ve el porcentaje de actividad volcánica respecto al máximo de actividad de diciembre del 2000, publicado en la página del CENAPRED, a grandes rasgos, el Ing. Enrique Guevara, Director de Instrumentación del CENAPRED explica este valor: "Para determinar el nivel diario de actividad sísmica de la página web, se toman en consideración el número de exhalaciones en las últimas 24 horas, así como su intensidad, se contabilizan también el número de eventos volcanotectónicos y su magnitud, la presencia de señales de tremor (duración y amplitud), emisiones con ceniza, explosiones, etc. Se tiene ya definido un criterio para sumar estos factores y obtener un número (adimensional) que es el que publicamos en la página". De lado derecho se graficó en la escala vertical secundaria la concentración relativa del Fe respecto al Ca, los valores para los cuales el Fe tiene 0% de concentración, indica que su concentración relativa cayó por debajo del límite de detección del equipo de fluorescencia de rayos-x, pero no para el de Ca en el mismo muestreo, por lo que sí pudo estar pero en

---

concentraciones muy bajas respecto al Ca que si apareció. Cabe denotar que se seleccionó el Ca como referencia ya que este apareció positivo en los análisis en la mayoría de los filtros, a parte de que tiene una concentración más estable que la del Fe durante los días muestreados, también las concentraciones son únicamente para el día señalado y el valor de la actividad volcánica es un valor promedio de las 36 horas previas al día señalado de muestreo.

---

#### 4 CONCLUSIONES

La concentración de las partículas muestreadas dependió de factores ambientales, sobre todo de la lluvia y el viento; en ambos sitios de muestreo las condiciones atmosféricas fueron muy similares en cuanto a temperatura, y en ambos lugares se tuvieron días parcialmente nublados. Dada la similitud en altitud de ambas locaciones, de 3246msn en Puerto Nacional y 3845msn en Paso de Cortés, las concentraciones de partículas son comparables en cuanto a la cantidad de partículas recolectadas en ambos sitios pero, como se vió en el punto 3.6, las concentraciones en Puerto Nacional fueron en promedio de un orden mayor que en Paso de Cortés. La diferencia se debió principalmente a la influencia de la actividad humana en el primer caso, donde el sitio de muestreo se localizó al borde de un poblado, mientras que Paso de Cortés se encuentra dentro de la reserva natural Itzla-Popo libre de asentamientos. Lo ideal es ubicar los muestreos lejos del cono, pero dentro de la influencia sísmico-volcánica y cerca de un acceso a la corriente eléctrica para el funcionamiento del Hi-Vol, ya que la planta de luz, que se uso en un principio para realizar los muestreos, resultó ser muy problemática y poco útil.

En varios de los filtros de Paso de Cortés, la concentración de partículas cayó por debajo del límite de detección del equipo de FRX; como se vio en el punto 3.4.2, una de las principales razones de esto fue el poco tiempo con que se contaba para realizar los muestreos, debido a la falta de seguridad e infraestructura que se encontró en Paso de Cortés, desaprovechándose así condiciones favorables para el muestreo y por otro lado factores como lluvia y vientos demasiado fuertes también terminaron por impedir completar el muestreo. A continuación se muestran, en

---

base a la experiencia obtenida en los muestreos, varias mejoras a implementarse para mejorar los resultados:

- Cambiar el tipo de toma del Hi-Vol para utilizar filtros circulares estándar de 4in de diámetro, ya que estos al tener una menor área que los usados de 8×10in y al muestrearse con estos el mismo volumen de aire, se capturarán la misma cantidad de partículas pero en un área menor, incrementándose las partículas por  $\text{cm}^2$  de filtro, lo que las hace mucho más fácil de detectar por el equipo de FRX y así se evitaría que el análisis resulte en concentraciones por debajo del límite de detección.
- Incrementar la frecuencia del muestreo a uno por día, durante un periodo de por lo menos un mes, para lograr abarcar eventos volcánicos completos. Teniendo más resolución en los datos, se podrán observar de manera más clara las relaciones que tiene el aerosol con la actividad volcánica y filtrar los efectos meteorológicos sobre el aerosol, como los provocados por el viento y la lluvia.
- Monitorear factores meteorológicos básicos, como temperatura, humedad y velocidad del viento, instalando una estación meteorológica portátil junto al Hi-Vol.
- Una conclusión importante es la de poder obtener más propiedades del aerosol, como la distribución de radios de las partículas, que puede ser monitoreada continuamente con contadores de partículas ópticos, lo que podría establecer el origen de las partículas; el Radón también puede ser monitoreado fácilmente, colocando detectores pasivos de radón [15] en el mismo lugar del muestreo.
- En cuanto a la localización del muestreador, este deberá colocarse cerca de equipo de monitoreo sísmico-volcánico, y eficientemente aislado de otras fuentes de aerosoles que no

---

sean los relacionados con el aerosol de origen sísmico-volcánico (Por ejemplo: Los aerosoles emanados de la pluma del volcán y los de origen antropogénico).

Hacer el muestreo dentro de una caseta cerrada, con el piso expuesto directamente al suelo. Esto permitiría muestrear únicamente el aerosol emanado directamente del subsuelo, eliminando así el efecto del viento y la lluvia sobre los muestreos, muestreos de radón, realizados de esta manera, resultan mas efectivos para la obtención datos independientes al clima<sup>4</sup>.

En conclusión, los resultados presentados, muestran la necesidad de mejorar significativamente la metodología del muestreo, principalmente para poder: Discernir entre las partículas emanadas a través de la superficie terrestre y las partículas arrastradas al muestreador desde otros sitios por el viento, o bien por la lluvia, y finalmente, implementar el monitoreo de datos, como la distribución de radios, la concentración de radón, la temperatura y la humedad del aire, como complemento de los datos que se obtienen del Hi-Vol.

---

<sup>4</sup>SEGOVIA, N.; MENA, M. "Soil Radon Pulses Related to the Initial Phase of Volcanic Eruptions" [16].

---

## 5 REFERENCIAS

1. ALLOWAY, B. *Heavy Metals in Soils*, Londres: 1990, Willey & Sons.
2. BUTCHER, S.; CHARLESTON, R. *An Introduction to Air Chemistry*, New York: 1972, Academic Press.
3. CENTRO NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN DE DESASTRES. *Monitoreo volcánico*, México: CENAPRED, <http://www.cenapred.unam.mx/>.
4. CHOW, J.; WATSON, J. *Guideline on Speciated Particulate Monitoring - Office of Air Quality Planning and Standards*, Reno N.: 1998, EPA, <http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/pm25/spec/drispec.pdf>.
5. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Quality Assurance Handbook*, USA: 1997, EPA, vol. II, parte II, <http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/qaqc/2-11meth.pdf>.
6. ESPÍNDOLA, J. *La Actividad Volcánica - Cuadernos del Instituto de Geofísica*, México D.F.: 1997, Instituto de Geofísica UNAM.
7. HINDS, W. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, And Measurement Of Airborne Particles*, New York: 1999, Willey & Sons.
8. INEGI. *Información topográfica digital - Información geográfica, Sistemas de Consulta* México: INEGI, <http://www.inegi.gob.mx/>.

- 
9. KHILYUK, L. *Gas Migration: Events Preceding Earthquakes*, Houston T.X.: 2000, Gulf Publishing, Co., pp. 69:73, 159:161, 195:199.
  10. NATIONAL MUSEUM OF HISTORY. *Global Vulcanism Program*, USA: Smithsonian Institution, <http://www.volcano.si.edu/gvp/>.
  11. ORETC Co. *Nuclear Data Tables*, USA, NY: 1971, Academic Press, vol. 8, núm. 5:6.
  12. ORTEC Co. *Ortec Application Note AN34, Experiments in Nuclear Science*, USA, Oak Rich: 1976, Ortec.
  13. PULINETS, S.; Boyarchuk, K.; Hegai, V.; Kim, V.; Lomonosov A. "Quasi Electrostatic Model Of Atmosphere-Thermosphere-Ionosphere Coupling", *Adv. Space. Res.*, Gran Bretaña: 2000, Elsevier, vol. 26, núm 8, pp. 1209:1218.
  14. SALAZAR, S.; BRAVO, J.; FALCÓN Y. "Sobre la Presencia de Algunos Metales Pesados Sobre la Atmósfera de la Ciudad de México", *Geofísica Internacional*, México: 1981, UNAM, vol. 20, núm. 1, pp. 41:49.
  15. SEGOVIA, N.; ARMIENTA, M. "Radon in Soil and Chemical Composition of Spring Water Near Popocatepetl Volcano", *Geofísica Internacional*, México: 2002, UNAM, vol. 41, núm. 4, pp. 339:405.
  16. SEGOVIA, N.; MENA, M. "Soil Radon Pulses Related to the Initial Phase of Volcanic Eruptions", *Il Nuovo Cimento*, Italia: 1999, vol. 22-C, núm. 3-4, pp. 275:279.

- 
17. SEGOVIA, N.; MENA, M.; PEÑA P.; TAMÉZ E. "Soil Radon Time Series", *Surveys in Seismic and Volcanic Areas*, Gran Bretaña: 1999, Elsevier, vol. 31, pp. 307:312.
  18. TWOMEY, S. *Atmospheric Aerosols - Developments in Atmosphere Science*, Amsterdam: 1997, Elsevier, tomo 7.
  19. WOLDSETH, R. *X-Ray Energy Spectrometry, All you ever wanted to know about*, USA, Ca.: 1973, Kevex Co.

---

## 6 RELACIÓN DE ILUSTRACIONES

### 6.1 Índice de Tablas

Tabla 1. Relación histórica de erupciones del Pico de Orizaba.	8
Tabla 2. Relación histórica de erupciones del Popocatepetl.	11
Tabla 3. Resultados de PST.	42
Tabla 4. Resultados de FRX.	48
Tabla 5. Composición elemental en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .	50
Tabla 6. Composición en ppb.	52

### 6.2 Índice de Figuras

Fig. 1. Mapa volcán Pico de Orizaba.	21
Fig. 2. Cara noreste del Pico de Orizaba desde Puerto Nacional.	21
Fig. 3. Mapa volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl.	22
Fig. 4. Cara norte del Popocatepetl desde Paso de Cortes.	22
Fig. 5. Cara sur del Iztaccihuatl desde Paso de Cortes.	22
Fig. 6. Muestreador para altos volúmenes Hi-Vol.	23
Fig. 7. Calibrador para Hi-Vol de resistencia variable.	28
Fig. 8. Curva de regresión para el calibrador.	32
Fig. 9. Curva de ajuste de manómetros.	34
Fig. 10. Curvas de flujo del Hi-Vol.	35
Fig. 11. Curva del contador de tiempo.	36
Fig. 12. Espectro de emisión de FRX.	47
Fig. 13. Concentración de PST en Puerto Nacional.	53
Fig. 14. Concentración de PST e intensidad del viento en Paso de Cortés.	54
Fig. 15. Composición metálica promedio.	55
Fig. 16. Concentraciones relativas al Ca.	56
Fig. 17. Concentraciones relativas a partir de ppb.	57
Fig. 18. Actividad volcánica vs. concentración relativa.	58