

ESTUDIO DE AEROSOL Y CENIZAS DISPERSADOS DURANTE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN POPOCATEPETL DEL 21 DE DICIEMBRE DE 1994.- RESULTADOS PRELIMINARES*

L. S. Ivlev^{1,2}, I. Galindo² y V. I. Kudryashov¹

RESUMEN

La erupción de baja energía térmica del 21 de diciembre de 1994 del volcán Popocatepetl brindó una oportunidad única para llevar a cabo varias investigaciones para determinar el espectro total de tamaños de cenizas y aerosoles volcánicos, su composición elemental, microestructura, y finalmente, análisis de dispersión.

Se efectuaron mediciones en superficie y por medio de avión utilizando: Un contador fotoeléctrico de partículas ($d > 0.4 \mu\text{m}$ a $d < 50 \mu\text{m}$), la concentración y dispersividad para $d > 0.01 \mu\text{m}$ a $d < 20 \mu\text{m}$ se midieron con un impactor de dos cascadas, las muestras se sujetaron a análisis de microscopía electrónica y de óptica para detectar partículas $d \approx 500 \mu\text{m}$. Se usaron filtros de Petryanov para determinación posterior de la composición de elementos químicos por medio de activación de neutrones, fluorescencia de rayos-X y espectroscopía de absorción atómica. Para la composición química se utilizaron espectroscopía de infrarrojo y espectrometría de masas. El contenido de carbón se determinó con un etalómetro. También se colectó ceniza volcánica para análisis posterior de dispersión utilizando un sedimentómetro y microscopio óptico. Los análisis morfológicos y de dispersividad se realizaron utilizando un microscopio electrónico.

Los resultados preliminares muestran que la intensidad del flujo de partículas de aerosoles ($d \leq 20 \mu\text{m}$) durante el 27 de diciembre era cerca de $5 \cdot 10^3$ tons/día decayendo durante enero a cerca de 10^2 tons/día. Durante todo el periodo de mediciones (dic. 27, 1994-enero 28, 1995) se observó una inhomogeneidad espacio-temporal del contenido del aerosol y de su microestructura. La distribución de las partículas es polimodal con tres modos en el intervalo $d \leq 2 \mu\text{m}$ y dos para $d \geq 2 \mu\text{m}$. La masa de azufre convertida en aerosoles de sulfato y ácido sulfúrico ($d \leq 1.0 \mu\text{m}$) en diciembre era de $\approx 0.5\%$, el resto del S, ca 99% se transformó en partículas grandes de ceniza, sin embargo durante enero se notó un incremento de las partículas pequeñas alcanzando 20-25%. El coeficiente de enriquecimiento para azufre durante diciembre fue de 50 y en enero de 100-150. Los coeficientes de enriquecimiento para los elementos Pb, Cu, Zn, Ni, Rb, y Se, cambiaron con el tiempo por un factor de 10. Finalmente, el contenido de substancia orgánica no excedió de $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

1. INTRODUCCION

La reciente erupción del volcán Popocatepetl (México: 19.02°N , 98.62°W), de baja energía térmica y larga duración, presentó una oportunidad única para llevar a cabo diversas investigaciones cuyos resultados pueden ser posteriormente utilizados en el modelado de éste tipo de procesos en futuras erupciones similares; en mejoras a los métodos utilizados y, en la predicción de los cambios ambientales producidos por el impacto de los productos volcánicos emanados.

* Patrocinada parcialmente por CONACYT, FOMES (SEP) y CENAPRED.

¹ Instituto de Física, Universidad Estatal de San Petersburgo, Rusia, Profesor Visitante² Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad de Colima, 28000 Colima, México.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Para estudiar la presencia de aerosoles y cenizas volcánicas y los procesos heterogéneos que se llevan a cabo en la atmósfera inducidos por su presencia, es de lo más importante resolver los siguientes problemas:

- i) Determinar las características físicas de la fuente:
La potencia de emisión de las partículas y la altura de la eyección
- ii) Determinar la variabilidad espacio-temporal de las formaciones de aerosoles: La permanencia en la atmósfera de partículas de diferentes tamaños (diámetros) y, la intensidad de deposición así como el tamaño del área de deposición;
- iii) Determinar las características físicas de las partículas: Dispersividad y estructura morfológica de las mismas.
- iv) Determinar la composición química de las partículas: polvos y cenizas así como el contenido de gases formadores de aerosoles; la composición elemental de las partículas y sus factores de enriquecimiento.
- v) Estimar la participación de los aerosoles y las cenizas volcánicas en los procesos atmosféricos de condensación (formación de nubes y precipitación).

Algunos de los problemas antes mencionados no pueden ser resueltos completamente debido a factores objetivos, como son:

La irreproducibilidad de los fenómenos naturales y, la gran variabilidad de las características de los procesos que se están investigando.

Existen además razones subjetivas que impiden la solución completa como son:

Las imperfecciones técnicas de la instrumentación empleada, dificultades propias de las condiciones experimentales y, la complejidad de la teoría y sus aproximaciones teóricas.

Los resultados que aquí presentamos son preliminares y deberán ser más precisos en el futuro.

3. INSTRUMENTACION, METODOS EXPERIMENTALES, DATOS INDIRECTOS UTILIZADOS EN LAS ESTIMACIONES

3.1 El complejo instrumental

Los siguientes instrumentos han sido utilizados para la medición directa (*in situ*) de los aerosoles:

- a) Contador fotoeléctrico tipo AZ-5M de partículas de aerosoles. Mide concentración de partículas y su dispersividad en un intervalo de $d > 0.4 \mu\text{m}$ a $d < 20 \mu\text{m}$, d , representa el diámetro de las partículas.
- b) Impactor de dos cascadas, para estudiar partículas $d > 0.01 \mu\text{m}$,
- c) Filtros de Petryanov, los cuales, una vez expuestos, se utilizan para realizar varios análisis: De composición de las partículas, con técnicas de fluorescencia de rayos-X y espectroscopía de absorción atómica.

De composición química, se utilizaron espectroscopía de infrarrojo y espectrometría de masas;

Para determinar el contenido de carbón se utilizó un etalómetro.

3.2 Datos Indirectos utilizados

Además de la instrumentación y las técnicas de medición antes mencionadas, se utilizaron las imágenes AVHRR del canal 1 (visible) de los satélites GOES-7 y GOES-8 (GVN, 19, 11, 1994) y fotografías tomadas en superficie y a bordo del avión utilizado para efectuar los muestreos de partículas y mediciones del flujo de SO_2 (Galindo et al., 1995).

Los mejores datos sobre la dinámica y evolución de la nube de aerosol volcánico se obtuvieron de las imágenes satelitales de la evolución de la pluma correspondientes del 26 al 28 de diciembre de 1994. El análisis de las imágenes permitió derivar ciertas conclusiones sobre la naturaleza de la eyección y la expansión inicial del jet de materia orgánica.

3.3 Métodos experimentales

3.3.1 Mediciones aéreas

Las mediciones aéreas de aerosoles volcánicos se llevaron a cabo el 27 y 29 de diciembre de 1994 y los días 6, 14 y 21 de enero de 1995. La aeronave utilizada puede considerarse ideal para el muestreo de aerosoles puesto que la velocidad constante del avión de 65 m/s es mucho menor que la de 100 m/s, velocidad a la que se manifiesta la compresibilidad del gas apareciendo remolinos y turbulencia. Por otra parte, las características aerodinámicas del avión son muy adecuadas, no existiendo prácticamente zonas de estancamiento. En nuestro caso se puede considerar que el flujo de aire a la entrada del tubo de aspiración es continuo y sin turbulencia. Las distorsiones en la aspiración, con un diámetro de entrada de 3 mm y el aire siendo bombeado a 60 l/m, pueden considerarse ligeras, cuando menos para partículas $d < 5 \mu\text{m}$. Un pequeño aumento en el coeficiente de aspiración se compensó por pérdidas de las partículas grandes en la pipa de entrada. Como apoyo a lo anterior, los análisis de las mediciones muestran que el aspecto cualitativo de la estructura del aerosol se refleja correctamente en los datos. Un cálculo de la sobrestimación en los tres primeros intervalos de tamaños de las partículas 10, $> 7 \mu\text{m}$ y $> 4 \mu\text{m}$ fue del orden de 3, 2 y 1.5, respectivamente lo cual es mucho menor que las variaciones observadas en la concentración de partículas dentro de los intervalos mencionados.

En la Figura 1 se presenta, sobre un mapa base de la región, el trayecto perpendicular a la pluma que siguieron los vuelos efectuados en un loop que se iniciaba aproximadamente sobre San Nicolás de los Ranchos al noreste del volcán, hasta Atlixco al suroeste.

El día 27 de diciembre, las observaciones se efectuaron principalmente en las regiones de $d > 0.4 \mu\text{m}$ y $0.5 \mu\text{m}$ (ver Apéndice, tabla 1A), sin embargo, las inhomogeneidades espaciales del aerosol y su rápida variación ($t \geq 30$ segundos), considerando la inercia del instrumento, dió por resultado un bajo contenido de información en los datos obtenidos. En particular, las variaciones de la concentración de partículas en las regiones de $d > 0.4 \mu\text{m}$ y $0.5 \mu\text{m}$ fueron pequeñas y alisadas (smoothed) no siempre indicaron la posición en el centro de la fumarola. Los datos sobre concentraciones de partículas grandes, son sin embargo, mucho más interesantes y confiables; en este intervalo de tamaños de partículas ($d > 0.9 \mu\text{m}$), se observaron variaciones en las concentraciones de las partículas por factores de 10-20, y obviamente estas variaciones se encontraron relacionadas con la estructura del jet en la fumarola (ver Tabla 1A).

Se notó que durante las mediciones en vuelo, para la misma altura, 3,600 m., s.n.m., se observaron tres tipos muy diferentes de distribuciones de tamaños de partículas: En el centro del jet, a una distancia desde el jet y, por afuera de la fumarola. Por fuera de la fumarola, la concentración de partículas gigantes ($d > 2 \mu\text{m}$) decaía abruptamente; en un número de casos, las partículas con $d > 4 \mu\text{m}$ se encontraban prácticamente ausentes. La descripción de las distribuciones se efectuó de acuerdo con el siguiente principio:

Distribución de valores medios dN/dr (ó $dN(r_0 - r)$ y dV/dr), con máximos y mínimos para el caso de un número suficientemente grande de distribuciones observadas del mismo tipo ($n > 3$) Sin embargo, en casos individuales, para el centro del jet, el número de distribuciones fue reducido (27 de diciembre, 1994).

En las mediciones efectuadas el 29 de diciembre se observó la mayor inestabilidad de la estructura dispersa del aerosol, los valores extremos de ΔN maxmax y minmin se presentan en la Tabla 2A.

En las mediciones aéreas subsecuentes efectuadas en enero 6, 14 y 21, se observó un marcado descenso de la distribución de partículas dispersadas tanto dentro del jet en la fumarola como fuera de ella. Los valores más bajos de las mayores concentraciones de partículas se observaron en una fumarola muy débil el 21 de enero. Por otra parte, a juzgar por las observaciones visuales y el pronóstico meteorológico así como las imágenes satelitales, una porción considerable de material volcánico se había transportado a otras regiones, encontrándose una acumulación disminuída de cenizas volcánicas o polvo en el entorno atmosférico

La estructura vertical de los aerosoles se registró durante el ascenso de la aeronave y durante el acercamiento a la fumarola, tres puntos de referencia aproximada se tomaron: 2,800, 3,000 y 3,300 m. s.n.m. En todos los vuelos, se observó un marcado descenso de la concentración de partículas cerca de los 3,000 m. s.n.m. y un incremento en la vecindad de la fumarola (3,600 m. s.n.m.).

III.3.2 Estructura de las cenizas y el aerosol volcánico en superficie

Las mediciones de dispersividad del aerosol volcánico y la toma de muestras con filtros se efectuaron en el trayecto de Cholula a Tlamacas a diferentes distancias del volcán y en el aeropuerto de los Hermanos Serdán en Atlixco, Puebla.

Las mediciones de dispersividad (Tabla A3) se efectuaron con un contador fotoeléctrico en la ruta Cholula-Tlamacas el día 28 de diciembre de 1994: Se hicieron dos muestreos de ceniza volcánica sedimentada en la vecindad de Cholula, la primera muestra se colectó a una distancia de 10 Km de San Nicolás de Los Ranchos y la segunda en un lugar cercano a San Gregorio Atzompa. Posteriormente, en el punto más cercano al cráter, en Tlamacas (4,200 m. s.n.m.) se efectuaron mediciones de dispersividad de partículas entre las 14:00 p.m. a las 15:40 p.m., durante las observaciones el cielo estaba despejado y no se apreciaba viento, puesto que Tlamacas está situado en una pendiente opuesta al cráter, la fumarola no estaba visible.

La concentración de partículas para $d > 0.4 \mu\text{m}$ fue muy baja y suficientemente estable de 24 a 35 cm^{-3} . Al mismo tiempo, se observó una concentración anormalmente alta de partículas de tamaños grandes: $\Delta N (d > 10 \mu\text{m}) = 16-37 \text{cm}^{-3}$. Por otra parte, las mediciones efectuadas con el mismo aparato en San Gregorio Atzompa a 30 Km del volcán, revelaron concentraciones mucho más bajas de las mismas partículas pero con una dispersión considerable de $\Delta N (d > 10 \mu\text{m}) = 175 \text{cm}^{-3}$, ésto último es debido al arrastre de partículas gigantes por el viento.

La concentración total de partículas para $d \geq 0.4 \mu\text{m}$ no se encontró muy alta $\Delta N (d \geq 0.4 \mu\text{m}) = 44-47 \text{cm}^{-3}$ con el máximo de la distribución de partículas dN/dr en el intervalo $[0.4 \leq d \leq 0.6 \mu\text{m}]$.

Las mediciones en el aeropuerto se realizaron con el mismo contador fotoeléctrico, después de los vuelos efectuados los días: Diciembre 27 y 29, 1994 y enero 6, 14 y 21, 1995, además se realizó un ciclo continuo de 24 horas de mediciones entre el 27 y el 28 de enero de 1995. Los muestreos con filtros se realizaron dejando trabajando el

instrumento en el aeropuerto mientras se efectuaban los vuelos, adicionalmente se tomaron tres muestras entre el 27 y 28 de enero. Aparte de lo anterior, el día 27 de enero se tomó una muestra de ceniza volcánica sedimentada durante una explosión ocurrida el 24 de enero (los análisis revelan que al menos otra explosión anterior pudo haber ocurrido). Las observaciones visuales de enero 27-28 y testigos presenciales (empleados del aeropuerto) indican que la noche del 24 de enero, el volcán emitía de tiempo en tiempo una gran cantidad de ceniza y otras sustancias (vapor de agua y SO_2), es decir los llamados "puffs". El mejor tiempo para observar los puffs desde el aeropuerto son las primeras horas de la mañana, pues la visibilidad decrece abruptamente, para después formarse nubes convectivas que cubren al volcán.

Debe hacerse notar que el máximo de caída de cenizas ocurrió durante la noche (de 2 a 3 a.m.), es decir, antes del puff registrado a las 8:00 a.m. de enero 28. El contador fotoeléctrico también registró un aumento súbito (por un factor de 3) de la concentración de partículas para $d > 10 \mu\text{m}$, sin embargo, la concentración total permaneció sin cambio.

En la Tabla 1A se presentan los resultados de mediciones continuas espaciadas horariamente de dispersividad de aerosol efectuadas en el aeropuerto entre el 27 y 28 de enero. Se tomaron cuatro muestras de filtros, una de ellas de 12 horas de duración.

Las concentraciones de masa del aerosol en la zona del aeropuerto excedieron, en todos los casos a 0.5 mg/m^3 , éste valor está por arriba de la norma aceptada internacionalmente, siendo el exceso debido a una gran cantidad de partículas de cenizas volcánicas. Debe notarse que prácticamente no se encontró carbón en las muestras de diciembre, mientras que en enero su concentración se incrementó abruptamente.

III 4 Datos de otras observaciones

El análisis del abundante material fotográfico de la erupción del Popocatepetl del 26 de diciembre de 1994 indica que la explosión alcanzó una altura de $7.5 \pm 0.3 \text{ Km}$, es decir el ancho de la fúcula. El jet de material volcánico tuvo inicialmente una forma cónica, la expansión inicial fue de 2.5-3.0 Km, prácticamente hasta el tope de ascensión de la fúcula (Fig. 3). No se observó dispersión (washout) turbulenta del jet; esto significa que el material eyectado poseía una gran energía cinética. Más aún, las primeras imágenes del satélite GOES de la propagación de la nube de aerosol volcánico revelan un comportamiento similar.

Se observó una dispersión turbulenta por difusión del jet en la región en donde el jet está en transición a una posición horizontal (cross-wind). En esta región, la razón entre la sección transversal del jet y la del cráter es cercana a 40, mientras que la velocidad del jet es de 6-7 m/s. Lo cual hace posible suponer que el material fue eyectado con una velocidad circunsónica, en este caso, en el estado de ascensión del jet, no se observó separación de las partículas dispersadas y el gas. Ambos se movían como una unidad debido a la energía cinética acumulada.

Las imágenes satelitales hicieron posible la estimación del grado de cobertura de superficie terrestre por la nube de aerosol volcánico, la razón se determina por dos procesos, la difusión de la nube y su transporte por los flujos de viento horizontales. Dependiendo de la turbulencia del aire, el segundo proceso predomina sobre el primero durante las primeras 48 horas, después de las cuales el proceso de expansión de la nube del aerosol, considerando una emisión constante por la fuente, será aproximadamente lineal con el tiempo.

El proceso eruptivo del volcán Popocatepetl durante diciembre 26-27, 1994, es decir 36 horas después de su inicio, tuvo un área de cobertura $S = 6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ con una velocidad promedio de desplazamiento del frente de la nube de 3.7 m/s. Esto último coincide satisfactoriamente con la velocidad media local del jet de la fumarola cercana al volcán, la cual es de 6-7 m/s. Aunque si bien, durante las siguientes 12 horas, ocurrió una expansión abrupta del área debido a flujos de viento perpendiculares a la dirección del movimiento de la nube sobre su extensión total. El modelo calcula transporte y dispersión de cenizas volcánicas utilizando datos de viento y presión atmosférica, suponiendo que las cenizas se forman de partículas esféricas ($0.3 \leq d \leq 30 \mu\text{m}$) con densidad de $2.5 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ y que producen una carga de masa atmosférica de 1 gramo.



Figura 3. Fotografía del volcán Popocatépetl del 26 de diciembre de 1994 mostrando esquemáticamente la ascensión de la fábula.

El área de cobertura observada por los satélites de la NOAA corresponde en gran medida a la concentración de la nube de partículas de aerosol volcanico sobre la concentración de partículas de fondo (background). Si consideramos que la concentración del aerosol de fondo es $m = 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la altura de la atmósfera homogénea $H = 1.5 \text{ Km}$, luego la masa de aerosol de fondo por metro cuadrado será de $7.5 \text{ g}/\text{m}^2$, considerando un área de cobertura $S = 6.0 \cdot 10^4 \text{ Km}^2$ (ver Fig. 4), la masa M de aerosol de fondo será de $4.5 \cdot 10^5$ toneladas. Este valor estimado se encuentra exagerado, en caso de una superficie oceánica, y también para regiones terrestres muy limpias, la masa

de aerosol de fondo por metro cuadrado es del orden de 1 g/m^2 y para el aerosol estratosférico de fondo es de $0.1-0.2 \text{ g/m}^2$. Las masas relevantes de aerosol de fondo serán $M = 6.0 \times 10^4$ toneladas y $M = (0.6-1.2) \times 10^4$ toneladas.

En relación con la composición y estructura del aerosol volcánico se tienen adicionalmente otras evidencias indirectas:

i) Las fotografías expuestas durante los vuelos efectuados para realizar las mediciones revelan imágenes de cristales de sulfato de amonio amplificadas muchas veces, esto significa que las cámaras fotográficas funcionaron como microscopios, y esto es solamente posible si la concentración de partículas de sulfatos es muy alta. El máximo de SO_2 -gas medido con el espectrómetro de correlación COSPEC fue cercano a las 5,000 toneladas/día (Galindo et al., 1995);

ii) Durante el mes de enero ocurrieron nuevamente emisiones simultáneas altas de partículas de cenizas y SO_2 -gas, al mismo tiempo la concentración de partículas de aerosol con $d < 15 \mu\text{m}$ fue mucho menor.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Microestructura de las partículas de aerosoles

Para estudiar la microestructura de las partículas de aerosoles, se efectuaron varias muestras de prueba con el impactor de dos cascadas; el análisis subsecuente se realizó utilizando el microscopio electrónico transluciente del Laboratorio de Física de Aerosoles de la Universidad Estatal de San Petersburgo, Rusia. Las partículas de aerosoles se sedimentaron sobre un substrato orgánico (íornar) el cual tiene una gran resistencia mecánica y firme adherencia.

Los resultados de los análisis de microscopía electrónica de los aerosoles y las cenizas volcánicas permiten inferir algunas conclusiones sobre los mecanismos de la explosión del material volcánico y su transformación ulterior en la atmósfera.

En general se observó que las partículas (aerosoles y ceniza) tienen un contenido mayoritario de roca pulverizada y un bajo contenido de sulfatos y ácido sulfúrico, también se observó una pequeña cantidad de cristales en forma de paralelepípedos alargados en una relación aproximada de tamaños de sus caras de $5.1:1$ y aún más alargados.

En las Figs. 4 se presentan algunas fotografías del análisis de microscopía electrónica. Las Figs. 4a,b se refieren a fragmentos de ceniza, posiblemente de origen basáltico, mientras que las Figs. 4c,d muestran aerosoles de sulfatos y ácido sulfúrico con rastros de evaporación del agua y del ácido debida al rayo de electrones.

Otro resultado obtenido con el microscopio electrónico es la morfología de los aerosoles, se observan tres tipos morfológicos: Esferas, no-esferas (forma mayoritaria) y cadenas. Estas últimas con esferas de tamaños muy pequeñas. El máximo (85%) se presentó con partículas no esféricas $d > 0.85 \mu\text{m}$ (ver Tabla 1).

4.1 Análisis Químico - Composición elemental

En las Figuras 5a,b se representan los espectros de fluorescencia de rayos X para aerosoles y cenizas volcánicas, mientras que las Tablas 2 a 5 muestran las concentraciones de los diferentes elementos químicos encontrados y sus factores de enriquecimiento (Tablas 6 y 7) tanto para ceniza como para aerosoles.

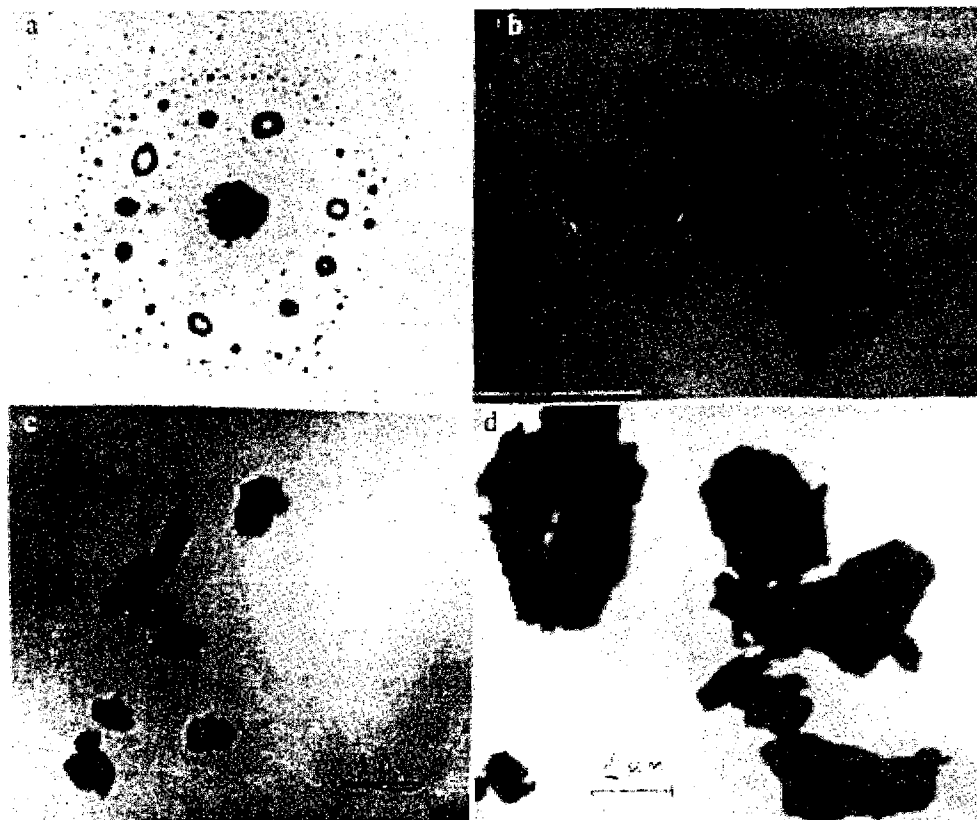


Figura 4. Microscopía electrónica.

| Tamaños d, μm | Tipos morfológicos (%) | | |
|--------------------------|------------------------|-----------|--------|
| | Esfera | No-esfera | Cadena |
| 0.02 - 0.05 | 20 | 78 | 2 |
| 0.05 - 0.1 | 25 | 70 | 5 |
| 0.1 - 0.015 | 30 | 40 | 30 |
| 0.15 - 0.45 | 18 | 45 | 37 |
| 0.45 - 0.75 | 12 | 33 | 55 |
| 0.75 - 0.85 | 13 | 61 | 26 |
| > 0.85 | 5 | 85 | 10 |

Tabla 1. Estructura Morfológica de los Aerosoles (27.12.94, Volcán Popocatépetl).

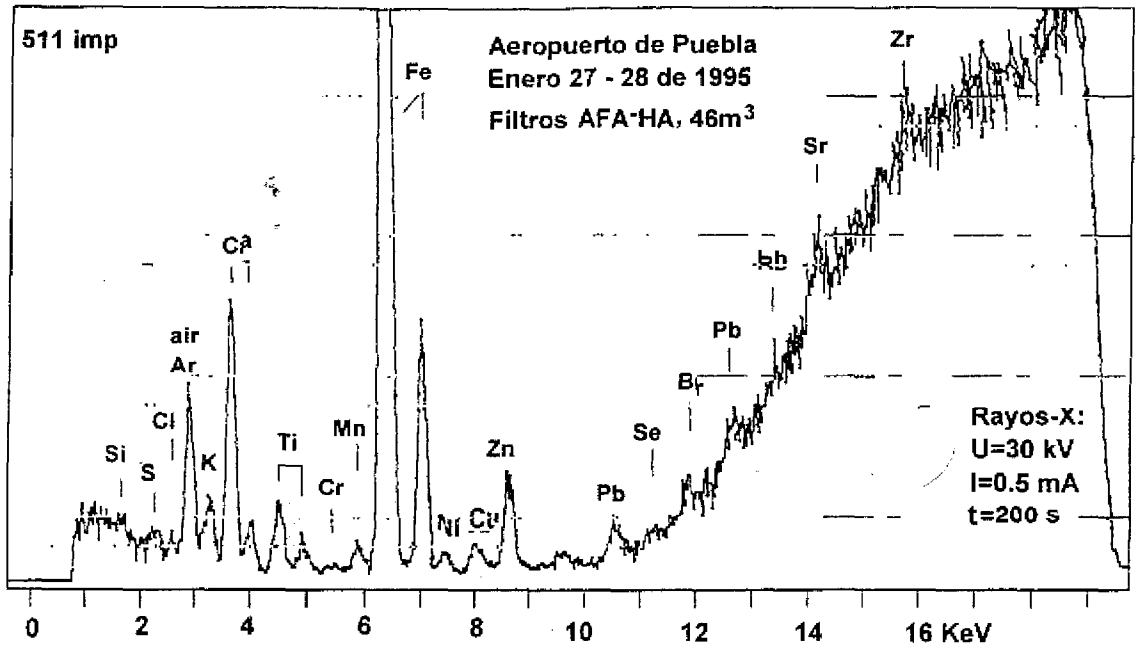


Figura 5a. Aerosoles.

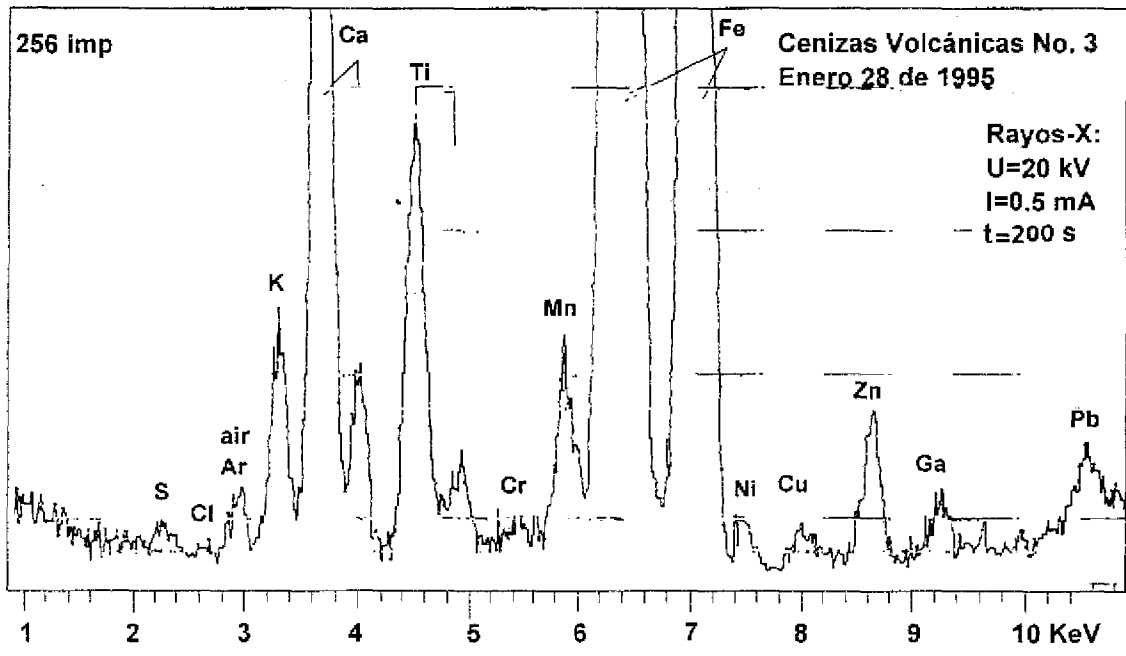


Figura 5b. Cenizas.

Figura 5. Espectros de fluorescencia de rayos-X.

| * | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Si | 1027.000 | 624.000 | 216.000 | 448.000 | 450.000 | 132.000 | 245.000 |
| Al | 75.900 | 52.500 | 24.600 | 2.600 | 35.100 | 11.200 | 26.900 |
| Ca | 15.080 | 9.990 | 5.790 | 9.440 | 9.380 | 2.730 | 4.280 |
| Fe | 10.240 | 5.760 | 6.280 | 6.330 | 7.310 | 2.070 | 3.010 |
| S | 105.000 | 114.000 | 50.000 | 87.000 | 43.000 | 42.000 | 57.000 |
| P | < 4.000 | < 4.000 | 4.100 | < 3.000 | < 2.000 | < 700 | 1.500 |
| Cl | 4.250 | 3.860 | 4.500 | 6.400 | 1.700 | 1.000 | 2.400 |
| K | 3.260 | 2.810 | 930 | 1.060 | 2.950 | 760 | 1.340 |
| Ti | 1.614 | 631 | 466 | 1.036 | 994 | 275 | 462 |
| Cr | 134 | 51 | 115 | 174 | 49 | 29 | 33 |
| Mn | 170 | 110 | 101 | 54 | 98 | 34 | 47 |
| Ni | 41 | 22 | 52 | 39 | 27 | 13 | 21 |
| Cu | 545 | 81 | 251 | 89 | 27 | 13 | 37 |
| Zn | 104 | 36 | 138 | 93 | 63 | 31 | 53 |
| Ga | 4 | 2 | 9 | 12 | 4 | < 1 | 5 |
| Se | 10 | 8 | 16 | 9 | 2 | 1 | 8 |
| Br | 19 | 14 | 18 | 15 | 18 | 3 | < 4 |
| Rb | 24 | 18 | 63 | 78 | 28 | 11 | 35 |
| Sr | 96 | 61 | 22 | 98 | 62 | 22 | 26 |
| Y | < 20 | 21 | < 20 | 48 | < 10 | < 5 | 27 |
| Zr | 57 | 30 | 58 | 56 | 59 | 17 | 23 |
| Hg | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 | < 5 | < 2 | < 5 |
| Pb | 78 | 66 | 111 | 87 | 47 | 24 | 41 |

* Elements

- 1 29.12.94 [12:00-14:30] 9m³
2 06.01.95 [11:20-13:40] 10m³
3 14.01.95 [11:20-13:40] 10m³
4 21.01.95 [11:20-13:40] 7m³
5 27.01.95 [11:40-17:40] 21m³
6 27-28.01.95 [18:00-7:00] 46m³
7 28.01.95 [7:00-13:00] 21m³

Tabla 2. Concentraciones de elementos químicos de muestreos de superficie (aeropuerto Hnos. Serdán) ng/m³ (Dic. 94 - Ene. 1995).

| Elemento | Contenido de elementos (%) | | |
|----------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Muestra 1 28.12.94 | Muestra 2 28.12.94 | Muestra 3 28.01.95 |
| Si | 28.0 ± 1.0 | 27.5 ± 1.2 | 27.0 ± 0.8 |
| Al | 9.4 ± 0.7 | 10.5 ± 0.8 | 11.8 ± 0.9 |
| Fe | 4.44 ± 0.04 | 3.73 ± 0.03 | 3.35 ± 0.03 |
| Ca | 4.22 ± 0.12 | 3.10 ± 0.09 | 2.74 ± 0.08 |
| Na | 2.6 ± 0.3 | 2.1 ± 0.3 | 2.3 ± 0.2 |
| K | 2.16 ± 0.16 | 1.16 ± 0.11 | 1.45 ± 0.12 |
| Mg | 2.2 ± 0.2 | 2.1 ± 0.15 | 2.2 ± 0.15 |
| Ti | 0.61 ± 0.03 | 0.38 ± 0.02 | 0.37 ± 0.02 |
| Sr | 0.059 ± 0.002 | 0.065 ± 0.001 | 0.059 ± 0.001 |
| Mn | 0.045 ± 0.005 | 0.025 ± 0.004 | 0.035 ± 0.003 |
| Cr | 0.032 ± 0.009 | 0.12 ± 0.003 | 0.013 ± 0.003 |
| Zn | 0.0100 ± 0.0006 | 0.0089 ± 0.0005 | 0.0052 ± 0.0005 |
| Zr | 0.018 ± 0.003 | 0.010 ± 0.002 | 0.017 ± 0.002 |
| Ni | 0.004 ± 0.0008 | 0.0030 ± 0.0005 | 0.0040 ± 0.0005 |
| Cu | 0.0040 ± 0.0006 | 0.0046 ± 0.0005 | 0.0013 ± 0.0004 |
| Rb | 0.0032 ± 0.0006 | 0.0031 ± 0.0005 | 0.0038 ± 0.0005 |
| Y | 0.0038 ± 0.0010 | 0.0037 ± 0.0010 | 0.0034 ± 0.0010 |
| Ga | 0.0013 ± 0.0004 | 0.0015 ± 0.0003 | 0.0015 ± 0.0003 |
| S | 2.6 ± 0.7 | 2.1 ± 0.5 | 2.2 ± 0.5 |
| Cl | 0.9 ± 0.4 | 0.9 ± 0.3 | 0.8 ± 0.3 |
| Pb | 0.0138 ± 0.0012 | 0.0271 ± 0.0011 | 0.0040 ± 0.0006 |
| Se | ≤0.0004 | 0.0007 ± 0.0002 | 0.0007 ± 0.0002 |
| Br | ≤0.0006 | 0.0006 ± 0.0002 | 0.0006 ± 0.0002 |
| Hg | ≤0.002 | ≤0.001 | ≤0.001 |

Tabla 3 Contenido de elementos químicos en las muestras de las cenizas volcánicas (Diciembre 1994 - Enero 1995).

| Elemento | Variaciones | Error |
|----------|-------------|--------|
| Mn | 0.5 - 0.3 | ± 0.04 |
| Na | 1.1 - 0.9 | ± 0.13 |
| Si | 1.0 | ± 0.10 |
| Fe | 1.0 - 0.8 | ± 0.01 |
| Sr | 0.5 - 0.9 | ± 0.01 |
| Ca | 1.2 - 0.7 | ± 0.03 |
| Mg | 1.0 - 1.1 | ± 0.08 |
| Zr | 0.9 - 0.5 | ± 0.17 |
| Rb | 0.2 | ± 0.04 |
| Ni | 0.4 - 0.3 | ± 0.07 |
| Ga | 0.7 - 0.8 | ± 0.15 |
| Al | 1.2 - 1.5 | ± 0.1 |
| Cr | 1.5 - 0.6 | ± 0.2 |
| Y | 1.0 | ± 0.25 |
| Cu | 0.7 - 0.2 | ± 0.1 |
| Pb | 17 - 3 | ± 0.8 |
| Br | 1.5 - 3.5 | ± 1.0 |
| Se | 5 - 9 | ± 3.0 |
| Cl | 5 - 6 | ± 2.0 |
| Hg | ≤ 300 | ± 150 |
| S | 43 - 38 | ± 10 |

Tabla 5. Factores de enriquecimiento del aerosol volcánico (el silicio se toma como referencia)

| * | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|----------------|
| K | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.8 | 0.07 | 0.07 | 0.05/ 0.07 |
| Mn | 0.03 | 0.055 | 0.15 | 0.37 | 0.068 | 0.08 | 0.06 | 0.07 |
| Fe | 0.06 | 0.057 | 0.18 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.09 |
| Ti | 0.09 | 0.06 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.10/ 0.12 |
| Sr | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.23 | 0.14 | 0.17 | 0.11 | 0.14 |
| Ca | 0.12 | 0.13 | 0.21 | 0.17 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.16/ 0.18 |
| Zr | 0.077 | 0.067 | 0.38 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.13 | 0.18/ 0.16 |
| Rb | 0.044 | 0.054 | 0.54 | 0.33 | 0.12 | 0.16 | 0.27 | 0.22 |
| Ni | 0.093 | 0.082 | 0.56 | 0.20 | 0.14 | 0.23 | 0.20 | 0.22 |
| Ga | 0.057 | 0.047 | 0.61 | 0.39 | 0.13 | ≤ 0.11 | 0.30 | 0.25/ 0.20 |
| Al | 0.26 | 0.30 | 0.41 | 0.34 | 0.28 | 0.31 | 0.40 | 0.32/ 0.36 |
| Cr | 0.18 | 0.11 | 0.71 | 0.54 | 0.15 | 0.31 | 0.19 | 0.35/ 0.25 |
| Y | ≤ 0.16 | 0.27 | ≤ 0.74 | 0.86 | ≤ 0.18 | ≤ 0.30 | 0.88 | ≤ 0.44/ ≤ 0.60 |
| Zn | 0.28 | 0.16 | 1.8 | 0.58 | 0.39 | 0.66 | 0.61 | 0.64 |
| Cu | 2.1 | 0.52 | 4.5 | 0.79 | 0.24 | 0.39 | 0.60 | 1.6/ 0.5 |
| P | ≤ 1.1 | ≤ 1.8 | 5.3 | ≤ 1.9 | ≤ 1.2 | ≤ 1.5 | 1.7 | ≤ 2.3/ ≤ 1.6 |
| Pb | 1.3 | 1.9 | 9.0 | 3.4 | 1.8 | 3.2 | 2.9 | 3.5/ 3.0 |
| Br | 2.6 | 3.1 | 12.0 | 4.7 | 5.6 | 3.2 | 2.3 | 5.6/ 2.8 |
| Se | 3.4 | 4.5 | 26.0 | 7.0 | 1.6 | 2.7 | 11.00 | 8.5/ 6.9 |
| Cl | 7.2 | 11 | 36 | 25 | 6.6 | 13.0 | 17.0 | 17/ 15 |
| Hg | ≤ 39 | ≤ 64 | ≤ 185 | ≤ 89 | ≤ 44 | ≤ 61 | ≤ 82 | ≤ 84/ ≤ 72 |
| S | 48 | 85 | 108 | 91 | 45 | 148 | 109 | 75/ 128 |

* Element.

1 29.12.94

5 27.01.95

2 06.01.95

6 27.-28.01.95

3 14.01.95

7 28.01.95

4 21.01.95

8 Media por días y noches

Tabla 5. Factores de enriquecimiento del aerosol volcánico (el silicio se toma como referencia).