

11



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERIA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS Y MODALES EN  
CENIZAS EMITIDAS POR EL VOLCÁN  
POPOCATEPETL DE 1994 A 1998

299833

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**I N G E N I E R O      G E O L O G O**

P R E S E N T A :

**C A R L O S   L I N A R E S   L O P E Z**



MEXICO, D.F.

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-1152

**SR. CARLOS LINARES LOPEZ**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Hugo Delgado Granados y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

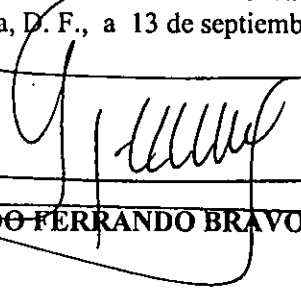
**ANALISIS GRANULOMETRICOS Y MODALES EN CENIZAS EMITIDAS POR EL  
VOLCAN POPOCATEPETL DE 1994 A 1998**

- I INTRODUCCION**
- II MARCO CONCEPTUAL**
- III METODOLOGIA**
- IV ERUPCIONES DEL VOLCAN POPOCATEPETL**
- V RESULTADOS Y DISCUSION**
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**
- APENDICES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 13 de septiembre de 2001  
EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg

*p*

*A Dios*

*A mis Padres*

*A mi Familia...*

*Gracias.*

*“Como una pintura  
nos iremos borrando,  
como una flor  
hemos de secarnos  
sobre la tierra,  
cual ropaje de plumas  
del quetzal, del zacuan  
del azulejo, iremos pereciendo.  
Iremos a su casa”*

.....  
*¡Ah, solamente aquí en la Tierra:  
con flores se da uno a conocer,  
con flores se manifiesta uno,  
oh amigo mío!*

.....  
*¿Adónde en verdad iremos  
que nunca tengamos que morir?  
Aunque fuera yo piedra preciosa,  
aunque fuera oro,  
seré yo fundido,  
allá en el crisol seré perforado.  
Sólo tengo mi vida.*

NEZAHUALCÓYOTL  
(1402-1472)

## Agradecimientos

Agradezco a mi asesor, Dr. Hugo Delgado Granados, por la dirección y comentarios para la realización de la presente tesis profesional. Al M. C. Gilberto Silva Romo e Ing. Claudia Cristina Mendoza Rosales que revisaron el presente trabajo, enriqueciéndolo con sus comentarios y sugerencias. Al Ing. Jorge Nieto Obregón, por sus consejos y comentarios, más que de profesor, de amigo.

Agradezco especialmente a la M.C. Adela Margarita Reyes Salas por su disposición y entusiasmo para realizar el análisis cualitativo y semicuantitativo de las muestras de ceniza volcánica en una etapa inicial durante el desarrollo del presente trabajo y posteriormente, por la capacitación que me proporciono para la operación del microscopio electrónico, para concluir yo mismo, el análisis de las cenizas en una etapa posterior.

Gracias al Dr. José Ortega por realizar el análisis granulométrico en la fracción fina de 6 muestras con un contador láser de partículas modelo SpectrexPC-2000, y a la Dra. María Aurora Armienta, que proporcionó una gran parte de las muestras de ceniza, objeto de estudio en ésta tesis.

### A MIS AMIGOS:

Elsa Ibeth Chávez L., Lilia Arana S., Esther Romero T., Alberto González H., Patricia Morales G., Alma Delia Rosillo G., Rubén Darío Rodríguez R., Enrique Moreno H., Norma Rodríguez C., Leticia Galván C., Oscar Ernesto Pardo C., Marco Antonio Sandoval M., Ariadna Aceituno., Víctor Damián Pinilla M., Arturo Gómez T., Jorge Rivera L., Héctor Ortega S., Alicia Rivera P., Guadalupe Castillo M., José Luis Rojas G., Juan José Carreto N., José Luis Arce S., Karina Elizabeth Cervantes C., Roberto Villalpando C., Ignacio Hernández J., Miguel Alatorre, Abel Cortés, Patricia Julio M., Tomas De la Mora C., Lizeth Caballero, Blanca Estela Chávez O. Alberto Santillán L., Ana Lilia Yáñez L., Elizabeth Reyes H., Raúl Arambula M., Claudia Ibeth Velasco R., Elizabeth Lozano F., Daniel Valentín López B., Renato Castro G., Beatriz Oropeza V., Karla Rosillo G., Isaac Abimelec Montes F., Marcos Luna A., Adriana Viveros., Lucio Cárdenas M., Armando Altamira A., Ana Lilia López J., Héctor Carvajal, Noé Piedad S., Sara Ivonne Franco.

*Gracias.*



## CONTENIDO

Figuras  
Tablas  
Resumen

### I. INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades.....	2
I.2 Planteamiento del problema.....	3
I.3 Hipótesis.....	4
I.4 Objetivos.....	4
I.5 Localización.....	5
I.6 Acceso.....	7

### II. MARCO CONCEPTUAL

II.1 Vulcanología.....	9
II.1.1 Definición de volcán.....	9
II.1.2 Tipos de volcanes.....	10
II.1.3 Definición de erupción.....	10
II.1.4 Tipos de erupciones.....	11
II.1.5 Magmas.....	15
II.1.6 Contenidos de gases.....	18
II.1.7 Características físicas de los magmas.....	19
II.1.8 Procesos magmáticos.....	20
II.2 Volcanismo explosivo.....	24
II.2.1 Desgasificación.....	24
II.2.2 Exsolución.....	25
II.2.3 Fragmentación.....	26
II.2.4 Columnas eruptivas.....	31
II.2.5 Transporte.....	33
II.2.6 Dispersión.....	36
II.3 Peligro y riesgo volcánico.....	36
II.3.1 Peligro volcánico.....	36
II.3.2 Riesgo volcánico.....	37

### III. METODOLOGÍA

III.1 Muestreo y tratamiento de las muestras.....	41
III.2 Granulometría y análisis modal.....	43
III.3 Microscopía electrónica.....	50

### IV. ERUPCIONES DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

IV.1 Geología general.....	64
IV.2 Historia eruptiva reciente.....	66
IV.3 Cronología de la erupción actual.....	67

**V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

V.1 Resultados.....	77
V.1.1 Granulometría.....	77
V.1.2 Geoquímica.....	81
V.2 Discusión	
V.2.1 Significado de los análisis granulométricos.....	84
V.2.2 Significado de los análisis modales.....	91
V.2.3 Significado de los análisis de microscopía electrónica.....	94

**VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

VI.1 Conclusiones.....	101
VI.2 Recomendaciones.....	101

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>104</b>
--------------------------	------------

**APENDICES**

Apéndice I	Resultados granulométricos.....	110
Apéndice II	Curvas de frecuencia de diámetro de grano.....	115
Apéndice III	Curvas acumulativas probabilísticas.....	120
Apéndice IV	Separación modal.....	128
Apéndice V	Histogramas de separación composicional mineralógica.....	135

**Lista de Figuras**

Figura 1.1 Localización del volcán Popocatépetl.....	6
Figura 1.2 Vías de acceso al volcán Popocatépetl.....	7
Figura 2.1 Clasificación de depósitos de caída de piroclastos.....	12
Figura 2.2 Serie de reacciones de Bowen.....	23
Figura 3.1 Formato de papel utilizado para graficar la curva acumulativa probabilística...	49
Figura 3.2 Esquema de un microscopio electrónico de barrido.....	53
Figura 3.3 Esquema de un cañón electrónico típico, cámara de alto vacío y componentes asociados.....	58
Figura 3.4 Escape de los electrones secundarios del interior de la muestra.....	59
Figura 3.5 Dispersión del haz de electrones en el interior de la muestra.....	59
Figura 5.1 Dirección preferencial de los vientos.....	80
Figura 5.2 Diagramas TAS y AFM de análisis químicos de muestras de pómez.....	83
Figura 5.3 Número de modas contra distancia.....	86
Figura 5.4 Tamaño de moda contra distancia.....	86
Figura 5.5 Separación granulométrica en fracción gruesa y fina de la ceniza.....	87
Figura 5.6 Histogramas de fracciones más abundantes en cada muestra.....	89
Figura 5.7 Parámetros estadísticos contra distancia.....	92
Figura 5.8 Curvas acumulativas probabilísticas por año.....	95
Figura 5.10 Resumen de análisis modal.....	96





## Lista de Tablas

Tabla 2.1 Resumen de temperaturas de erupción características estimadas de rocas volcánicas.....	17
Tabla 3.1 Correlación entre tamaños de productos sedimentarios y productos piroclásticos.....	44
Tabla 3.2 Categorías relativas de Clasificación, Asimetría y Curtosis.....	47
Tabla 3.3 Serie de tamices utilizados.....	42
Tabla 3.4 Comparación de algunas características del microscopio óptico y los dos tipos de microscopios electrónicos.....	52
Tabla 3.5 Comparación del poder de resolución y la amplificación mínima requerida para generar correctamente la imagen del espécimen seleccionado.....	57
Tabla 5.1 Lista de muestras.....	78
Tabla 5.2 Resumen de muestras estudiadas.....	79
Tabla 5.3 Análisis semicuantitativos de cenizas con SEM.....	82
Tabla 5.4 Distancia y número de modas.....	85
Tabla 5.4 Resultados estadísticos de los análisis granulométricos.....	90

## RESUMEN

El volcán Popocatepetl está localizado en el centro de la República Mexicana. Dada la cercanía a la que se encuentran distintas poblaciones, en especial la Ciudad de México, ha revestido importancia fundamental la vigilancia y monitoreo de la actividad eruptiva iniciada en 1994. Por otra parte, el volcán da la oportunidad de realizar estudios multidisciplinarios por medio de métodos directos e indirectos de los procesos que causan dicha actividad eruptiva.

Desde el 21 de diciembre de 1994 el volcán Popocatepetl ha emitido ceniza que ha sido transportada a diferentes distancias del cráter de acuerdo con los patrones de viento predominantes en el momento de la erupción.

Durante el periodo de 1995 a 1998, se colectaron muestras de ceniza en los estados de Morelos, Puebla, México, Tlaxcala y el Distrito Federal. En el presente estudio se consideraron 60 muestras que representan a 33 eventos con emisión de ceniza.

Los análisis granulométricos se realizaron utilizando tamices en la parte gruesa de las cenizas que comprende el intervalo de tamaño que va de  $-2\phi$  a  $4\phi$ . Los análisis estadísticos se realizaron con los datos obtenidos de la separación granulométrica. Los análisis granulométricos de partículas finas realizados en algunas de las muestras con tamaños de partícula superior a  $4\phi$  fueron obtenidos mediante la utilización de un contador láser de partículas modelo SpectrexPC-2000.

Se establecieron tres facies considerando las distancias mínima y máxima de recolección de muestras con respecto a la fuente, así como el número de modas de cada muestra con respecto a la distancia. Éstas facies resultantes son: a) facies proximal (distancia de 0 km a 10 km), b) facies media (distancia  $>10$  km y  $<50$  km) y c) facies distal (distancia  $>50$  km).

El aumento en el carácter explosivo de la presente etapa eruptiva del volcán, se pone de manifiesto si consideramos que la fragmentación del material emitido ha sido más eficaz con el paso del tiempo.

En la fracción más abundante de la separación granulométrica de las muestras se realizaron análisis modales de partículas utilizando un microscopio binocular; algunas de las partículas separadas se analizaron con un microscopio electrónico marca JEOL equipado con un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva.

Los resultados obtenidos en el análisis modal, ponen en evidencian los cambios en los componentes mineralógicos de las cenizas emitidas por el volcán Popocatépetl, cambios tales como el aumento en el porcentaje de la pómez de 1995 a 1997. Otro cambio importante en la pómez, observado con el microscopio electrónico de barrido, es el aumento de la vesicularidad de las partículas, la cual se relaciona directamente con el aumento en la explosividad de los eventos eruptivos.

En cristales de olivino también se observan cambios importante en color, angulosidad y composición química; que comprueban la presencia de material juvenil en las cenizas volcánicas del Popocatépetl.

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1 Generalidades

Un gran número de asentamientos humanos se encuentra en zonas volcánicas activas, donde la tierra es enriquecida con ceniza volcánica que favorece la fertilidad del suelo y en consecuencia se obtienen abundantes cosechas.

Existe la posibilidad de que en el transcurso de varias generaciones no se presencie actividad volcánica alguna; pero más de 1,300 volcanes han entrado en erupción en los últimos 10,000 años; aproximadamente la mitad de éstos ha registrado erupciones en tiempos históricos. Dos tercios de los volcanes subaéreos activos se ubican en o cerca de los límites de las placas tectónicas en la región circumpacífica (Cinturón de Fuego del Pacífico). Típicamente, unos 50 volcanes entran en erupción anualmente, este promedio no ha variado apreciablemente en tiempos históricos (Simkin et al., 1981).

Un volcán activo representa un peligro en mayor o menor grado, debido a eventos tales como flujos de lava y domos de lava, corrientes piroclásticas de densidad, lahares, colapso estructural, caídas de tefra y proyectiles balísticos, gases volcánicos, sismos volcánicos, etc. La naturaleza, mediante fenómenos volcánicos que han provocado pérdidas humanas y materiales a lo largo de la historia de la humanidad, nos obliga a buscar respuestas acerca de los procesos geológicos que imperan durante la actividad volcánica.

Cada volcán es único, con su propio pulso y ciclo de vida; por ende, para lograr pronosticar el comportamiento futuro de un volcán en actividad, es fundamental estudiar a detalle su pasado y realizar un monitoreo sistemático de la actividad presente del mismo.

En particular, México es un país con actividad volcánica que de ninguna manera puede pasar inadvertida y los volcanes que en la actualidad presentan actividad eruptiva son

una oportunidad inigualable para realizar estudios diversos; entre ellos, el análisis de cenizas emitidas por el volcán Popocatépetl que presentan una gran variedad de morfología y características físicas y químicas. Su estudio puede incrementar la comprensión del volcán y la actividad actual.

Existe una gran preocupación por parte de autoridades y académicos, comprometidos a salvaguardar la integridad física y patrimonial de las personas que habitan las zonas de alto riesgo volcánico. Para ello es necesario estudiar la actividad eruptiva y una forma es mediante la caracterización de ceniza volcánica y su relación con el fenómeno eruptivo. Hoy en día existe un notable progreso es el estudio de cenizas volcánicas debido a la incorporación de técnicas como la microscopía electrónica y avances de otras ciencias relacionadas como lo son la geología, las ciencias de la atmósfera y la estadística entre otras, de tal manera que se puede realizar un estudio minucioso de cada grano de ceniza para el entendimiento de los procesos que le dan origen. Los resultados obtenidos pueden aplicarse en general para el incremento del conocimiento científico, y en particular, para la reducción de riesgos volcánicos.

### I.2 Planteamiento del problema

El volcán Popocatépetl ha venido teniendo actividad eruptiva desde diciembre de 1994. La actividad explosiva ha generado nubes de cenizas de grandes altitudes, que pueden distribuirse a lo largo de varios kilómetros e incluso miles de kilómetros. Sin embargo aún no existe un seguimiento detallado de las características físicas y químicas de las cenizas volcánicas emitidas a la fecha.

### I.3 Hipótesis

La caracterización del material eyectado por el volcán Popocatepetl durante episodios explosivos, aunado a datos de monitoreo tales como sismicidad y emisión de gases, son fundamentales para identificar y entender el carácter explosivo de la presente etapa eruptiva del volcán. Todo esto puede ser enfocado a realizar una cuantificación en momentos de crisis del riesgo volcánico latente al que se encuentran sujetas las distintas poblaciones aledañas al volcán y de aquéllas que guardan cierta distancia como la Ciudad de México pero que también pueden ser afectadas por algún evento volcánico.

### I.3 Objetivos

El objetivo principal es reconocer la explosividad de los eventos y evolución de los procesos involucrados durante la presente etapa eruptiva, tomando como base el análisis granulométrico de las muestras de cenizas, así como su análisis modal.

Adicionalmente, mediante análisis químicos cualitativos y semi-cuantitativos por microscopía electrónica se procurará identificar procesos eruptivos.

Como información adicional, el presente trabajo pretende obtener características morfológicas de los granos de ceniza emitidos por el volcán Popocatepetl en distintos eventos explosivos que se han presentado entre 1994 y 1998.

#### I.4 Localización

El volcán Popocatepetl está localizado entre los estados de México, Puebla y Morelos, aproximadamente a 65 km en línea recta del Distrito Federal; las coordenadas del cráter son 19° 01' 02" latitud norte y 98° 37' 31" longitud oeste. La altitud del volcán es de 5452 msnm en la parte más alta conocida como labio superior. Las muestras de ceniza analizadas en el presente estudio fueron colectadas en distintas localidades ubicadas alrededor del volcán en los estados de México, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Distrito Federal, e inclusive en el propio edificio volcánico (Figura 1.1).

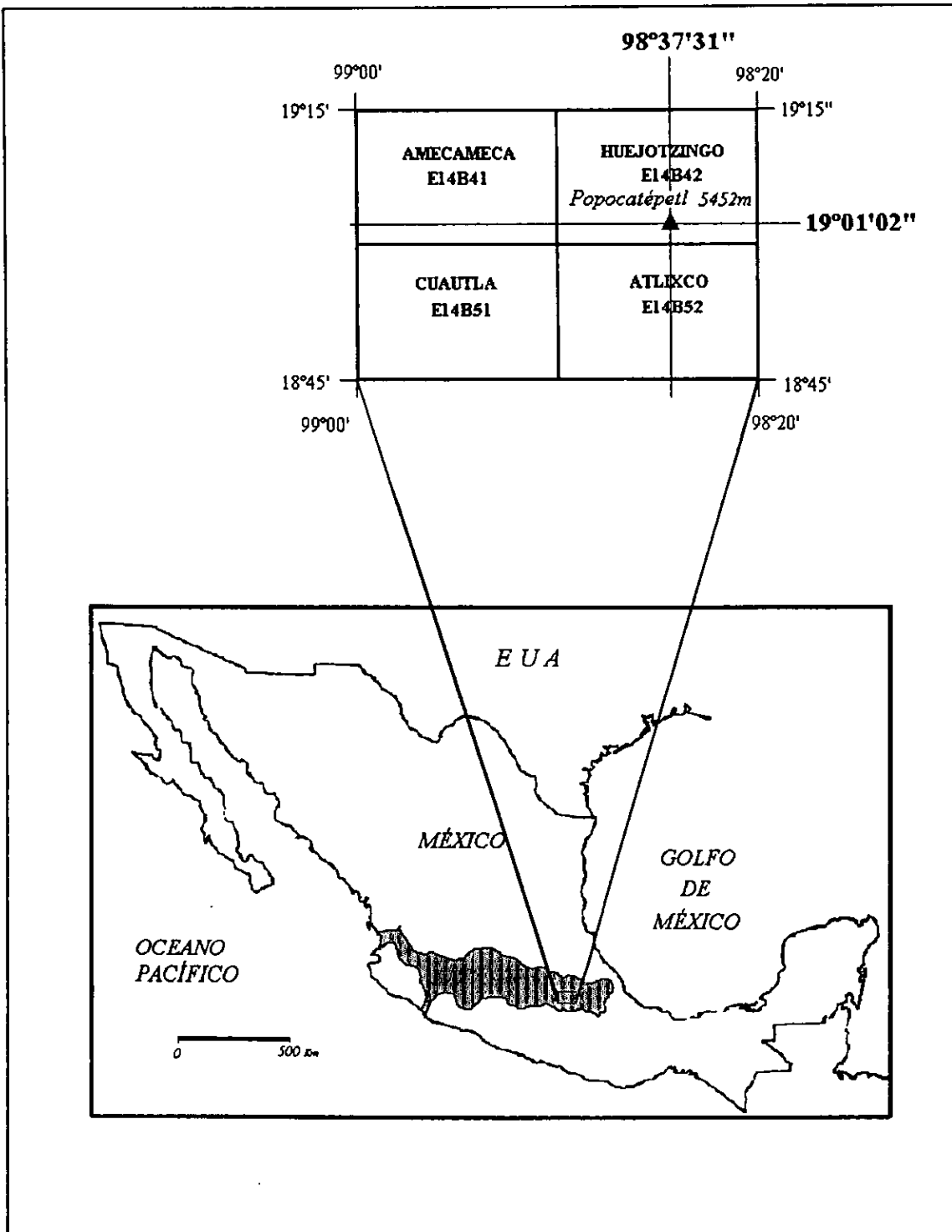


Figura 1.1 Localización del Volcán Popocatepetl dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y con referencia al sistema cartográfico de INEGI.



I.5 Acceso

Existen diversas vías de acceso al volcán Popocatépetl, la más rápida desde la Ciudad de México, es tomando la autopista México-Puebla, en el km 32, se sigue por la desviación hacia el poblado de Chalco, continuando por la carretera federal No.115 hacia la Ciudad de Cuautla, Morelos; habiendo recorrido poco más de un kilómetro después de salir del poblado de Amecameca, en el entronque se toma la desviación para continuar por la carretera que llega a Paso de Cortés. Desde este punto se sigue hasta el final de la carretera pavimentada que lleva al albergue de Tlamacas, que se localiza dentro del Parque Nacional Iztá-Popo, en este lugar, podemos elegir la vereda que nos conduzca al cráter (Figura 1.2).

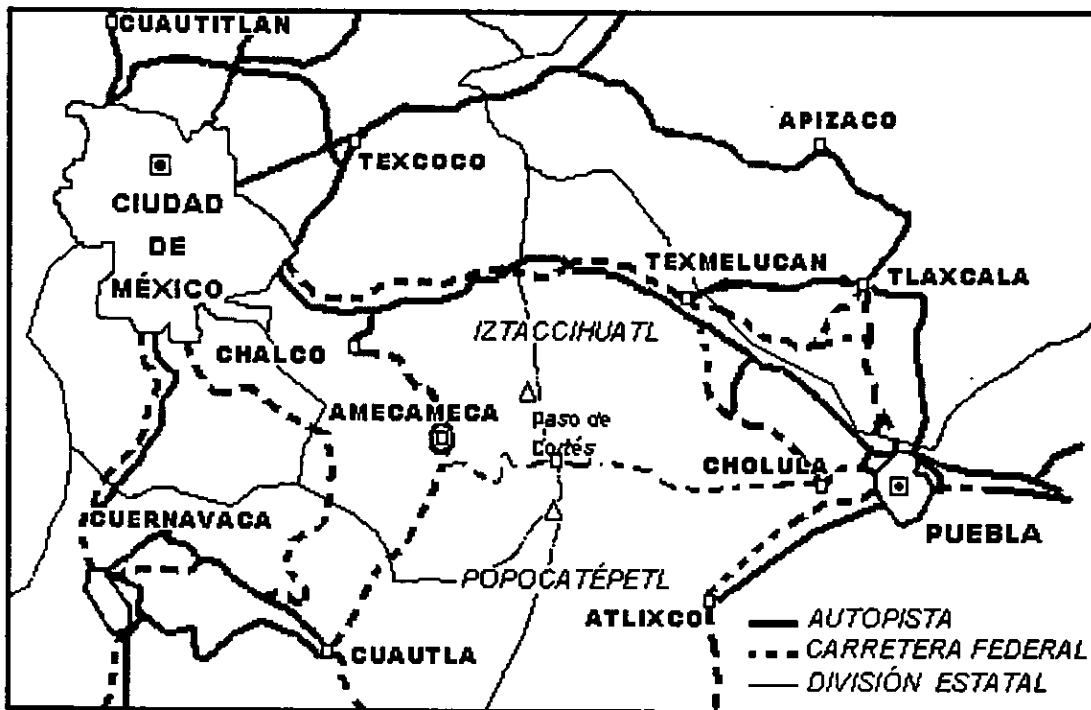


Figura 1.2. Vías de acceso al volcán Popocatépetl

## II. MARCO CONCEPTUAL

### II.1 Vulcanología

El volcanismo es un proceso resultante de la tectónica global. Se presenta tanto en márgenes constructivas de placas (dorsales oceánicas y cuencas tras-arco), en márgenes destructivas de placas (arcos insulares y márgenes continentales activas), así como dentro de las placas (islas oceánicas, dorsales continentales, magmatismo alcalino y provincias toleíticas continentales).

Las rocas volcánicas, productos directos del proceso, se pueden agrupar de acuerdo al ambiente tectónico y con base en sus características químicas y petrológicas, en varias series magmáticas. Las tres principales series magmáticas son: la serie toleítica caracterizada por rocas ricas en hierro; la serie calcialcalina caracterizada por un contenido relativamente pobre en hierro pero enriquecida en sílice y alúmina; y la serie alcalina caracterizada por tener un alto contenido en álcalis (Cas y Wright, 1987).

#### II.1.1 Definición de volcán

##### Volcanes

Los volcanes son acumulaciones de material magmático que surge a la superficie de la Tierra, este material se acumula alrededor de la fuente de emisión.

Los volcanes difieren notablemente en su geometría, volumen, y cantidad de rocas piroclásticas y flujos de lava, con diferencias principalmente en los mecanismos de erupción y régimen de extrusión. Estos dependen principalmente de la composición del magma. La composición química del magma es también responsable o puede estar relacionada con las propiedades físicas de componentes tales como volátiles y viscosidad, que gobiernan en gran parte la naturaleza de muchas erupciones piroclásticas (Fisher y Schmincke, 1984).

### II.1.2 Tipos de volcanes

Podemos considerar a los tipos de volcanes de acuerdo con sus erupciones y tomando en cuenta su espaciamiento en el tiempo, se pueden clasificar en monogenéticos y poligenéticos. Los volcanes poligenéticos son aquellos que resultan de varias erupciones separadas por largos periodos de tiempo y que incluyen magmas diferentes (Cas y Wright, 1987). Se caracterizan por tener varias o varios centros eruptivos. Los volcanes monogenéticos resultan de una sola erupción o fase eruptiva, pudiendo durar varios años pero involucrando solamente un tipo de magma y sólo un sistema de conductos simples que se usan sólo durante la erupción o la fase eruptiva (Cas y Wright, 1987).

Los volcanes también pueden ser clasificados a partir de la geometría que presenten, básicamente existen tres formas: conos, escudos, y capas o mesetas. El cono puede ser simétrico, como muchos volcanes andesíticos; puede ser truncado por una caldera central, o puede ser un cono corto y grueso con un cráter central grande. El volcán escudo puede quedar definido simplemente como un montículo de poca altura y con laderas muy alargadas, aunque el volcán escudo puede llegar a ser de una altura considerable, un claro ejemplo es el volcán hawaiano Mauna Loa. La composición química, periodicidad eruptiva, contenido de volátiles, duración de las fases eruptivas, y el del tipo de mecanismo explosivo son los factores responsables de las distintas formas de construcción de los aparatos volcánicos. (Fisher y Schmincke, 1984).

### II.1.3 Definición de erupción

Se define como fase eruptiva a la actividad volcánica esencialmente continua pero de intensidad variable y que por lo general dura de unas horas a varios días. Una erupción es un grupo de fases eruptivas relacionadas generalmente por la homogeneidad en la composición, cambios sistemáticos en la composición, o la manera en que fueron eruptados o emplazados los productos volcánicos (Carey y Sparks, 1986).

Una erupción volcánica es un evento o fenómeno por medio del cual, material magmático surge hacia la superficie de la Tierra, pudiéndose clasificar de acuerdo a varios parámetros. Cuando los materiales que salen a la superficie terrestre son productos lávicos, se habla de erupciones efusivas; cuando los gases adquieren una mayor importancia y las erupciones son violentas se denominan explosivas. En el presente estudio nos ocuparemos principalmente de las erupciones explosivas dado que de este tipo de erupciones se originan las cenizas volcánicas.

La actividad eruptiva puede ser apreciada en diferentes escalas. Los estilos de actividad y tipos de productos pueden cambiar al transcurrir algunos minutos u horas, esto depende de los cambios en la composición del magma, contenido de volátiles, o cambio de las condiciones en la cámara magmática. Algunos tipos de erupción son caracterizados por una fase eruptiva esencial y única (por ejemplo actividad pliniana, estromboliana, etc.), periodos de baja actividad se pueden presentar entre periodos de actividad severa de días, semanas o meses, en volcanes basálticos hasta de 2 años o más.

Las erupciones volcánicas y fases eruptivas son tradicionalmente clasificadas de acuerdo con la amplitud del rango del criterio cualitativo, muchos volcanes tienen nombres asignados por quien observo por vez primera o con una mayor ocurrencia cierta característica eruptiva (Lacroix, 1904; Mercalli, 1907; Macdonald, 1972; en Fisher y Schmincke, 1984). De este modo, nombres familiares como Peleano, tipo St. Vincent, o Krakatoan, se refieren a fases eruptivas observadas en dichas entidades y que produjeron flujos de piroclastos característicos. (Fisher y Schmincke, 1984).

#### II.1.4 Tipos de erupciones

Existe una serie de nombres tradicionales para las erupciones así como para las formas de los edificios volcánicos tales como hawaiano, estromboliano, pliniano y vulcaniano estos son ampliamente usados, pero la mayor parte son definiciones pobres. Walker, (1973) desarrolló una clasificación basada en la caída de tefra, datos cuantitativos de campo y de laboratorio, además de la observación de erupciones recientes.

Walker (1973) clasifico arbitrariamente dos parámetros que son: el área de dispersión y el grado de fragmentación del material emitido. Una de las medidas del área de dispersión es el área de confinamiento, dada por el contorno de la isopaca que representa el 1% del espesor máximo ( $0.01 T_{Max}$ ) denominado D. El valor de D tiene cierto rango, que va de 10 km<sup>2</sup> en depósitos de erupciones en el cono del edificio volcánico a más de 1000 km<sup>2</sup> en depósitos en forma de sábana, de erupciones plinianas tales como la del Monte Mazama. Una medida del grado de fragmentación, denominado F, es el valor del porcentaje de material más fino que 1 mm, determinado de muestras del entorno de la isopaca que representa 10% del espesor máximo ( $0.1 T_{max}$ ) y cruza el eje principal de dispersión. En la figura 2.1, el 1% y 10% son arbitrarios, adquieren los respectivos parámetros, y Walker (1973, 1980) ha caracterizado varios géneros de depósitos de caída de piroclastos basados en su tasa D y F. Uno de los principales inconvenientes a este sistema es la dificultad en determinar el espesor máximo; otro es la necesidad de análisis tediosos en cedazos o tamices, que limita el uso de la clasificación en erupciones bajo observación.

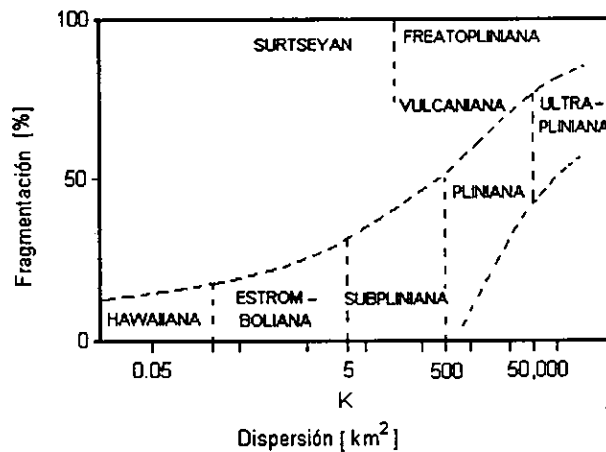


Figura 2.1 Clasificación de depósitos de caída de piroclastos. F es el porcentaje en peso del depósito más fino que 1 mm a lo largo de un eje de dispersión donde se cruza con la línea de la isopaca que es 10% del espesor máximo ( $0.1 T_{max}$ ); D es el área del entorno ( $0.01 T_{max}$ ) de la línea de isopaca. (Tomada de Fisher y Schmincke, 1984).

## Erupciones Hawaianas y Estrombolianas

Los depósitos de este tipo, son producto de erupciones y explosiones tranquilas de magmas basálticos o casi basálticos que eyectan escorias y plastas que comúnmente se encuentran acompañados de efusión de lavas. Las fuentes de emisión para este tipo de eventos pueden ser fisuras o conductos sencillos aunque la actividad para las fisuras se suelen localizar rápidamente en algunos puntos. Walker (1973) diferencia a estos dos tipos de volcanismo diciendo que las erupciones hawaianas tienen actividad efusiva con baja explosividad, una dispersión menor a  $0.05 \text{ km}^2$  y con un índice de explosividad muy bajo mientras que las de tipo estromboliano tienen una explosividad un poco mayor y una dispersión mayor a  $0.05 \text{ km}^2$ . La actividad estromboliana es intermitente y de magmas más viscosos, los productos piroclásticos consisten en bombas, escorias y cenizas con una dispersión mayor, y además abundancia de tefra de tamaño fino (Fisher y Schmincke, 1984). Por su parte, las erupciones hawaianas presentan mucho material juvenil con superficies lisas y tefra formada a partir de aerosol de lava solidificado (cabellos y lágrimas de Peleé).

El mecanismo en las erupciones hawaianas es esencialmente de fuentes de lava, formadas por borbotones de magmas casi continuos. Las erupciones estrombolianas consisten de una serie de explosiones diferentes separadas por períodos de unos cuantos segundos a varias horas, estas explosiones se piensa que se dan en el momento en que una o varias burbujas grandes de gas estallan en la superficie del magma en la fuente.

## Erupción Pliniana

Los depósitos de caída plinianos son productos de erupciones muy explosivas de magmas altamente viscosos de tipo félsico. Se presentan capas de pómez con una distribución muy amplia derivada de una columna eruptiva alta que resulta de una erupción voluminosa rica en gases con un alto índice eruptivo. Son, esencialmente, eventos relativamente continuos de alta energía en donde un flujo continuo y turbulento de gas y magma fragmentado se libera a la atmósfera a través de un conducto. La alta velocidad de

eyección resulta en una columna eruptiva alta que forma depósitos casi homogéneos y prácticamente sin estratificación interna, predominantemente compuestos de pómez.

#### Erupción Subpliniana

Los depósitos resultantes se asemejan a los depósitos plinianos pero tienen una distribución menor (5 y 500 km<sup>2</sup>) según Walker (1973). Los mecanismos y dinámica son los mismos que en los plinianos pero en menor escala.

#### Erupción Ultraplinaiana

Depósitos plinianos con una distribución extrema en los que la columna eruptiva alcanza alturas mayores de 55 km.

#### Erupción Vulcaniana

Sus depósitos son delgados de poco volumen (1 km<sup>3</sup>), estratificados, de ceniza que contiene grandes bloques y bombas cercanas a la fuente. Son de composición intermedia (basáltico- andesítico, andesítico, dacítico). La actividad se da como explosiones discretas a intervalos de 10 minutos a horas (Cas y Wright, 1987) que producen una serie de columnas eruptivas entre 5 y 10 kilómetros de altura. Tienen una dispersión grande pero son de grano fino. En general, el material es en su mayor parte accesorio o cognado. Se pueden dar flujos piroclásticos de pequeño volumen. Fisher y Schmincke (1984) consideran a las erupciones vulcanianas como erupciones explosivas caracterizadas por la interacción agua-magma. Esta interacción produce el calentamiento y la evaporación del agua del subsuelo, sin que esta sea una mezcla violenta como en el caso de las erupciones freatomagmáticas. Hace que se acumule la presión hasta que la capa superior falle haciendo que el material sea eyectado verticalmente a velocidades de hasta 200 m/s.

## Erupciones Surtseyana y Freatoplíniana

Se usan para describir depósitos de caída resultantes de erupciones en el mar, en un lago o por el contacto con el agua del subsuelo. Presentan un grado de fragmentación extrema debido a la interacción explosiva y violenta entre el agua y el magma. Walker (1973) las diferencia con base en la dispersión, teniendo en las Surtseyanas una dispersión moderada mientras que las freatoplínianas presentan una dispersión muy grande. Se asocian generalmente a magmas de composiciones específicas, basálticas para las surtseyanas y riolíticas para las freatoplínianas, aunque dadas las condiciones necesarias, cualquier magma puede producir la dispersión y fragmentación que definen a estos dos tipos.

### II.1.5 Magmas

El magma es un sistema multicomponente compuesto de una fase líquida que contiene elementos en solución, varias fases sólidas en forma de cristales en suspensión, como el olivino, piroxenos, plagioclasas, etc. y bajo ciertas condiciones, puede estar presente también una fase gaseosa, constituida esencialmente de vapor de agua, con cantidades variables de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{BO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , etc.

Las temperaturas que han sido medidas en forma directa en lavas de composición basáltica, basanítica y andesítica, indican que las temperaturas de formación varían entre los 700 °C y 1100 °C. En magmas más ricos en sílice y álcalis, los intervalos de temperatura son inferiores que van de los 700 °C a los 900 °C.

La viscosidad de los magmas varía con su temperatura y su composición. Así, los magmas máficos son más calientes y menos viscosos que los félsicos (Cepeda, 1985).

La mayoría de los magmas se diferencia químicamente, ya sea durante su camino hacia la superficie o durante su nivel final de intrusión. Los estudios sobre equilibrio de fases explican cómo pueden generarse los magmas con un amplio rango de composición y



temperatura a partir de una composición inicial por procesos como la cristalización fraccionada. Cuando este proceso se combina con otros, como la mezcla de magmas y la asimilación, la diversidad de los magmas es incluso mayor. La causa fundamental de la diferenciación es la pérdida de calor desde las cámaras magmáticas.

La información sobre su tamaño, forma y condiciones físicas se obtiene a partir de observaciones geofísicas en volcanes activos y a partir de las observaciones geológicas en intrusiones ígneas (Martí y Araña, 1993).

Los magmas se clasifican basándose en dos parámetros: 1) En la química del magma o de la roca, y 2) basándose en la mineralogía modal (Cas y Wright, 1987).

Inicialmente las rocas volcánicas pueden subdividirse químicamente en:

- a) félsicas (alto contenido de sílice > 63% SiO<sub>2</sub>)
- b) intermedias (52-63% SiO<sub>2</sub>)
- c) máficas (45-52% SiO<sub>2</sub>)
- d) ultramáficas (<45% SiO<sub>2</sub>)

Estas rocas se pueden distinguir con base en su contenido de álcalis y sílice. Una subdivisión complementaria de las rocas ígneas se realiza por la composición química en las rocas intermedias en donde se evalúa la abundancia relativa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molecular, con los álcalis y el calcio total (Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O, CaO).

La variación en los contenidos de sílice y álcalis se refleja en la mineralogía. Mineralógicamente los magmas se pueden clasificar de acuerdo a la abundancia modal relativa de sus minerales félsicos. Las rocas máficas y ultramáficas (aquellas con un alto contenido de minerales ferromagnesianos), se distinguen por la abundancia de los minerales máficos.

Las rocas volcánicas pueden ser agrupadas dentro de varias "asociaciones", "series", "suites" o "clanes" basados en su distribución química y petrológica. Los ejemplos incluyen la serie toleítica, alcalina y calcialcalina (Cas y Wright, 1987).

La temperatura de las lavas puede abarcar un amplio espectro, mediciones directas de la temperatura en flujos de lava con instrumentos especiales; por ejemplo la información obtenida de las temperaturas de flujos de lava en Hawai por (MacDonald en 1972 en Cas y Wright, 1987) y otros mas, han permitido estimar las temperaturas típicas de erupción de la mayor parte de los tipos de magmas (Cas y Wright, 1987).

Tipo de roca	Temperatura (°C)
Riolita	700-900
Dacita	800-1100
Andesita	950-1200
Basalto	1000-1200

Tabla 2.1 Muestra un resumen de temperaturas de erupción características estimadas de rocas volcánicas (Cas y Wright, 1987).

La serie calcialcalina presenta variaciones geoquímicas que pueden derivarse en cada caso, de su relación genética con alguna otra serie; de hecho; los términos calcialcalinos más básicos son escasos. Las andesitas, en sentido estricto, son los constituyentes mayoritarios de la serie y corresponden a un magma ya evolucionado, especialmente en el volcanismo de margen continental, más silíceo ( $\text{SiO}_2 > 55\%$ ), aunque podría relacionarse con un origen o una contaminación cortical.

Entre los rasgos geoquímicos de la serie, destaca la disminución de Fe y la relación casi constante FeO/MgO. Su mineralogía se caracteriza por la presencia de hiperstena y augita. También aparecen plagioclasa, cristobalita y tridimita, desde los términos menos

evolucionados; siendo frecuentes como fenocristales, el cuarzo, la biotita y la hornblenda, en los términos más diferenciados, que suelen ser también muy vítreos.

La complejidad de esta serie, estriba principalmente en la mayor o menor riqueza en sílice de los términos andesíticos y en su contenido de potasio (alto, medio o bajo) que es más significativo en los términos diferenciados.

La contaminación de los magmas además de su evolución interna, pueden modificar su composición al contaminarse con las rocas corticales que engloba y funde, especialmente en los magmas que atraviesan lentamente la corteza continental o se emplazan en la misma. (Araña y Ortiz, 1984).

#### II.1.6 Contenidos de gases

Los gases mas comunes en la mayoría de los magmas son  $H_2O$ ,  $CO_2$ , y  $SO_2$ . La solubilidad de estos componentes está en función de la temperatura del magma y de la presión ambiente, es la más importante en el control de la dinámica de la erupción. A medida que un cúmulo de magma migra hacia la superficie desde la zona profunda donde se origina en el manto, experimenta una progresiva disminución de la presión ambiente. Finalmente se alcanza una presión a la que sus componentes volátiles se saturan y comienza la nucleación de burbujas conteniendo dicho volátil como una fase de vapor libre. Debido a la tensión superficial, los diámetros iniciales de las burbujas son del orden de las 20  $\mu m$  (Sparks, 1978). Una disminución progresiva de la presión permite la expansión de las burbujas existentes, en parte por la descompresión pura y en parte debido a la difusión del volátil a través del líquido hacia las burbujas, y a la nucleación de nuevas burbujas. Este proceso se ve incrementado por el enfriamiento del magma en reservorios superficiales o en diques cerca de la superficie, ya que cualquier cristalización produce la concentración de volátiles en el líquido residual. La cantidad de los volátiles presentes y su solubilidad determinarán cual de los volátiles se saturará primero en el magma. (Martí y Araña, 1993).

## II.1.7 Características físicas de los magmas

### Densidad

La densidad en los magmas es marcadamente diferente dependiendo de la composición del magma que se trate, pero además, la densidad depende de la temperatura y la presión del mismo. La densidad es inversamente proporcional a la temperatura y directamente proporcional a la presión de confinamiento según Walker (1980) y Kushiro (1980) en Cas y Wright (1987).

### Viscosidad

En sentido estricto, la viscosidad es la medida de la consistencia de una sustancia. Pero para los propósitos de este estudio, la viscosidad refleja la resistencia interna al flujo de una sustancia cuando se aplica un esfuerzo cortante. Se ve afectada por la cohesión del magma, la presencia de sólidos, el ascenso y la liberación de presión, la cristalización, el enfriamiento y la desgasificación, por lo que un magma cambia su viscosidad durante su historia. La viscosidad afecta la movilidad y la forma de lavas y tasa de vesiculación. La viscosidad se considera un factor significativo inminente en la fragmentación explosiva al tiempo de la erupción. (Cas y Wright, 1987).

Factores principales que controlan la viscosidad en los magmas son:

- Presión.- La viscosidad baja conforme aumenta la presión.
- Temperatura.- La viscosidad aumenta con el enfriamiento.
- Contenido de volátiles.- la viscosidad baja conforme aumenta el contenido de agua.

La solubilidad del agua en el magma está controlada por:

- la temperatura.- aumenta la solubilidad conforme aumentan la temperatura y la presión.
- la presión.- aumenta la solubilidad conforme aumenta la presión.
- los volátiles.- disminuye la solubilidad conforme aumenta el contenido de otros volátiles

La resistencia mecánica de una roca disminuye rápidamente conforme el grado de fusión aumenta. Conforme un magma cristaliza, incrementa su resistencia con base en el lento crecimiento de cristales.

- Composición química.- aumenta la viscosidad con el aumento de sílice.
- Contenido de cristales.- aumenta la viscosidad efectiva del magma.
- Contenido de burbujas.- depende del grado de vesiculación, tamaño y distribución de las burbujas y de la viscosidad del magma intersticial (Cas y Wright, 1987).

#### II.1.8 Procesos magmáticos

Las circunstancias causantes de una erupción pueden ser variadas, tales como variación del grado de mezcla de los magmas que pueden ser producidos por transferencia turbulenta de calor, y por cambios de densidad en el o los magmas causados por la cristalización y exsolución de volátiles; aunque aún existe la necesidad de estudiar y documentar mejor las erupciones explosivas (Cas y Wright, 1987).

#### Diferenciación Magmática

La diferenciación magmática es el conjunto de procesos mediante los cuales un magma inicial, más o menos homogéneo, se separa en fracciones que llegan a formar rocas de composiciones diferentes (Cepeda, 1985; Wilson, 1989).

Se distinguen en general, dos tipos de diferenciación:

- A. La diferenciación magmática en sentido estricto, o sea la separación de una o varias fases líquidas a partir del magma inicial, antes de la cristalización.
- B. Cristalización fraccionada, que es la separación consecutiva de una o varias fases sólidas a partir del magma inicial.

A.- Separación de fases líquidas antes de la cristalización.

Las soluciones que se pueden separar de acuerdo con varios procesos que han sido discutidos y criticados por Bowen (1928), son los siguientes:

Miscibilidad limitada -. Al observar el comportamiento de las escorias de fundición de los metales, en particular sulfuros, Vogt en Cepeda (1985) dedujo que al descender la temperatura, una mezcla homogénea de sulfuros líquidos se separaba parcialmente en forma de gotitas inmiscibles que se depositan como fracción fundida. En consecuencia, según este proceso, un magma líquido homogéneo, se separa en dos o más fracciones líquidas homogéneas al enfriarse. Se ha comprobado que los silicatos en fusión son miscibles entre si en todas sus proporciones, en este caso, la generación de diferentes magmas por este proceso es dudosa.

Gravedad.- En un magma completamente líquido se puede producir el hundimiento de los iones y moléculas de mayor peso, bajo la acción de la gravedad. Bowen demostró que en los magmas viscosos tal fenómeno se produce con extrema lentitud.

Difusión y convección.- Según el principio de Ludwig y Soret en Cepeda (1985) en una solución cuyas partes se encuentran a la misma temperatura, los elementos disueltos están en equilibrio unos con otros, si este equilibrio se rompe, dichos elementos se desplazan a la parte fría en cantidades proporcionales a la diferencia de temperatura. En la naturaleza, las partes frías de una cámara magmática son las paredes de las rocas encajonantes; en consecuencia, la cristalización comenzaría en los bordes y, al formarse los primeros cristales, el magma se empobrecerá de los constituyentes de éstos produciéndose una diferencia de composición. Los primeros cristales del borde, esencialmente máficos continuarán creciendo por difusión, desde el interior hacia el borde, de las partículas que los componen, de modo que se formará una fase de borde o "frente básico", cuya composición difiere de la del magma restante.

Transferencia gaseosa.- Se ha podido comprobar que el vapor de agua es capaz de disolver y transportar la sílice y las sales alcalinas. De manera análoga, una corriente gaseosa que atravesase una cámara magmática podría actuar como colector y vehículo de transporte de los constituyentes más volátiles del magma. En la proximidad de la superficie,

la emisión de gases magmáticos se puede producir a gran escala y contribuir notoriamente al proceso de diferenciación.

Transferencia acuosa.- Es un proceso parecido al anterior, mediante el cual el agua disuelta en un magma tendería a concentrarse en zonas de menores presiones y temperaturas, llevando consigo a los elementos alcalinos y algunos metales (Fisher y Schmincke, 1984).

#### B.- Cristalización fraccionada

Ciertos minerales de las rocas ígneas se encuentran normalmente asociados debido a que cristalizan casi a la misma temperatura y presión, por ejemplo la ortoclasa con la oligoclasa, el olivino con labradorita, la hornblenda con la andesina, etc. Por el contrario, es muy raro encontrar juntos algunos minerales, como son el cuarzo y la anortita, la moscovita y los piroxenos, el olivino y la ortoclasa, etc. Estas relaciones implican cristalizaciones fraccionadas, es decir separación de una o varias fases sólidas a partir del magma inicial.

La cristalización fraccionada, propuesta por Bowen en 1928, es el proceso de diferenciación más importante. Mediante este proceso, las sustancias que primero cristalizan, son en general, los minerales accesorios, tales como la magnetita, ilmenita, cromita, esfena, apatito, zircón, rutilo, etc. El olivino, los piroxenos y las plagioclasas cálcicas figuran entre los minerales esenciales que cristalizan primero, seguidos por la hornblenda, plagioclasas sódico-cálcicas, biotita, feldespatos alcalinos, moscovita y cuarzo. Se observa que debido a la sustracción de minerales ferromagnesianos y cálcicos, el magma residual se vuelve cada vez más rico en sílice, álcalis y elementos ligeros (Cepeda, 1985).

De acuerdo con Bowen (1928), a medida que se produce la cristalización, tiende a mantenerse el equilibrio entre las fases líquida y sólida, de modo que al descender la temperatura, los primeros cristales reaccionan con el líquido y cambian de composición. La reacción puede ser progresiva, de tal modo que se producen series de reacción continua, como es el caso de las plagioclasas, en donde los términos cálcicos que cristalizaron primero se vuelven más ricos en sodio al descender la temperatura, ciertos minerales ferromagnesianos se transforman en otros minerales de estructuras cristalinas diferentes, por

ejemplo el olivino en piroxenos y éstos a su vez, en anfíboles; tales cambios constituyen las series de reacción discontinua. Estas dos series de reacciones principales se muestran en la figura 2.2, original de Bowen (1928) modificada por Barth (1952).



Figura 2.2, Serie de reacciones de Bowen según Barth (1952).

Por lo general, cristalizan juntos los primeros minerales de alta temperatura en ambas series. Los minerales de baja temperatura también tienden a asociarse. Cuando la reacción de los cristales y el líquido llega a ser completa, los minerales de la roca final no son los que se formaron inicialmente, sino precisamente los opuestos. Si la reacción es incompleta debido a un enfriamiento rápido o a otras causas, los primeros miembros de la serie de reacción pueden persistir como vestigios o relictos en la roca final.

Una variación de la cristalización fraccionada es la *presión filtrante* que tiene lugar cuando un magma que ha cristalizado solo parcialmente se ve sujeto a presión por efecto de ciertos procesos tectónicos; el líquido residual es expulsado e inyectado en la porción cristalizada del mismo magma o en las rocas encajonantes, en donde dará lugar a rocas muy diferentes de las que resultarían de la consolidación del magma original. (Cepeda, 1985).



## II.2 Volcanismo explosivo

Las erupciones explosivas se pueden dividir en explosiones magmáticas, explosiones freáticas y explosiones freatomagmáticas.

Las explosiones freáticas y freatomagmáticas se deben a la interacción entre magma y agua y se agrupan en lo que se llama actividad hidrovulcánica. El agua que interviene en este tipo de explosiones puede ser agua superficial (agua de lago) o agua del subsuelo y dependiendo del grado de interacción entre el magma y el agua se darán distintos tipos de erupciones y productos.

### II.2.1 Desgasificación

Los magmas son soluciones predominantemente silicatadas que contienen una cantidad variable de cristales y volátiles. A altas presiones, los volátiles son disueltos, pero a bajas presiones, cuando un magma se aproxima a la superficie, los volátiles se exsuelven y quedan libres en forma de vapor. Los componentes volátiles forman cerca del 5 % en peso del total de la mayoría de los magmas, pero los pesos moleculares son más bajos que los porcentajes en peso de los silicatos y los óxidos metálicos (Cas y Wright, 1987).

La descompresión de un magma ascendente es otro mecanismo potencial por el cual el vapor magmático se puede formar, pero la solubilidad del  $H_2O$  y  $CO_2$  depende fuertemente de la presión (Wallace y Gerlach, 1994).

Existen fuentes potenciales para el exceso de gases como el  $SO_2$  para el Monte Pinatubo por ejemplo, incluyen las siguientes: 1) una separación de C-O-H-S presente en fase de vapor como burbujas en el magma después de la erupción. 2) rápida desgasificación de un gran volumen de magma en el reservorio subvolcánico. 3) descomposición de anhídrita durante la erupción. 4) vaporización instantánea de fluidos hidrotermales ricos en sulfuro (Wallace y Gerlach, 1994).

## II.2.2 Exsolución

Estudios de concentraciones pre-eruptivas de volátiles disueltos de especies como (C-O-H-S) en lavas de volcanes se han llevado a cabo en inclusiones de fundidos que fueron atrapadas dentro de fenocristales en magma antes de la erupción y posteriormente encontradas en vidrios, comúnmente tienen contenido de sulfuro que está lejano de ser bajo, considerando la gran masa de  $\text{SO}_2$  simplemente liberado por exsolución de sulfuro de la fusión durante la erupción.

Inclusiones de vidrio en fenocristales de cuarzo proporcionan un registro de las condiciones pre-eruptivas, debido a que el vidrio representa el líquido magmático atrapado en la disolución volátil original. Análisis espectroscópicos infrarrojos de estas inclusiones indican que concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}$  (6.1 a 6.6% en peso) y  $\text{CO}_2$  (280 a 415 ppm) son relativamente altas. La temperatura y presión pre-eruptivas determinadas son de 780 °C y entre 250 y 290 MPa respectivamente.

La composición del vapor magmático pre-eruptivo puede ser estimado a partir de las disoluciones de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y sulfuro contenidos en inclusiones de vidrio en conjunto con limitados experimentos sobre las presiones de vapor de estas especies (Wallace y Gerlach, 1994).

La transición de la disolución a la exsolución de los volátiles, la concentración de los volátiles en los magmas y teorías resultantes de la vesiculación y formación de ceniza; son explicados con aspectos mineralógicos y petrológicos de volátiles magmáticos que fueron revisados por Carmichael et al. (1974), Burnham (1979) y Fisher y Schmincke (1984).

Los análisis en rocas volcánicas comúnmente reportan concentraciones de S, F y Cl, pero estas concentraciones no son representativas en un magma porque el magma pierde los volátiles durante la erupción y cristalización. Además, a menos que las rocas sean extremadamente frescas y vítreas, los elementos volátiles pudieron ser ganados o perdidos por alteración (Fisher y Schmincke, 1984).

### II.2.3 Fragmentación

Los fragmentos piroclásticos, también conocidos como piroclastos, son producidos por múltiples procesos relacionados con explosiones volcánicas donde se lleva a cabo la fragmentación en fase sólida o líquida del material ígneo; los piroclastos son partículas expelidas a través de los aparatos volcánicos sin referirse a las causas de la erupción u origen de las partículas. Los componentes piroclásticos son cristales, vidrio, pómez y fragmentos líticos en proporciones variables, que depende de la composición del magma y origen de los flujos (Fisher y Schmincke, 1984).

Los fragmentos hidroclásticos son una variedad de piroclastos formados de explosiones de vapor en la interface de magma-agua y también por rápido enfriamiento y granulación mecánica de lava en el contacto con el agua o agua saturada con sedimentos (Fisher y Schmincke, 1984).

Las explosiones magmáticas son el resultado del escape súbito del magma confinado bajo presión. Otro tipo de explosiones, denominadas freáticas, resultan de la transformación en vapor del agua subterránea por la acción del contacto con el magma y si se deben a la mezcla de gases magmáticos y vapor no magmático se llaman freatomagmáticas (González, 2000).

#### Tamaño y distribución del grano

El tamaño de una partícula es definido por su longitud, ancho, espesor y volumen. Estas características se miden por medio de tamices y balanzas. Cuando el tamaño de las partículas es muy pequeño se toman en cuenta las características hidrodinámicas de la muestra. Estas se miden por medio de la velocidad de caída de las partículas, en lugar de utilizar tamices. Los métodos de medida también se deben escoger dependiendo del grado de consolidación y tipos de fragmentos presentes en la tefra. Métodos que dependen de la colocación de los fragmentos en agua, por ejemplo, obviamente no resultan prácticos si

existen fragmentos de pómez, porque estos flotarán y el resto de los fragmentos no según Fisher (1965) y Walker et al., (1971) en Fisher y Schmincke, (1984).

Técnicas para medir los tamaños de granos, parámetros estadísticos y maneras de presentar datos son explorados en muchos textos e informes de rocas sedimentarias. En el presente trabajo, la separación por medio de tamices resultó ser adecuada para los propósitos del estudio de las muestras de ceniza.

Las medidas de distribución del tamaño máximo de piroclastos son usados para:

- 1) Estimar la energía de la erupción.
- 2) Determinar la dirección a la fuente.
- 3) Determinación de la capacidad de transporte del sistema.

Las medidas de la distribución del tamaño se usan para determinar la clasificación, y otras características más se usan para interpretar:

- 1) El flujo hidrodinámico del proceso.
- 2) Transporte y deposición de las partículas.
- 3) Diferentes géneros de procesos del transporte, direcciones y desarrollo de deposición. Cambios verticales y laterales en composición son influenciados por procesos de clasificación.

#### Fragmentación debida a Explosiones Magmáticas

Los volátiles disueltos en el magma no sólo afectan la viscosidad y las temperaturas de fusión y de enfriamiento de éste, sino que también afectan la naturaleza de las erupciones volcánicas influenciando que sean explosivas o no explosivas.

El componente volátil asociado con la mayoría de la actividad volcánica es el agua, aunque el dióxido de carbono es un volátil importante en la exsolución temprana para los basaltos. La solubilidad de los volátiles en el magma está controlada, por lo menos en parte,

por la presión de confinamiento y decrece mientras el magma sube a niveles corticales más someros con menores presiones de confinamiento. A una cierta profundidad, la solubilidad decrece lo suficiente para que el dióxido de carbono y el agua comiencen a exsolverse del magma y formen fases fluidas separadas. La profundidad a la cual esto ocurre depende del tipo de magma, del contenido de volátiles en ese momento y de la presión de vapor del agua disuelta en el magma y del dióxido de carbono con relación a la presión confinante.

La exsolución ocurrirá cuando la presión de vapor iguale a la presión confinante. A mayor contenido de volátiles magmáticos, mayor será la profundidad a la cual comenzará la exsolución.

Si la exsolución de los componentes volátiles no es inducida por cristalización se llama primer hervor (first boiling) o exsolución-vesiculación descompresional. Su efecto inmediato es el de aumentar la viscosidad y la resistencia crítica del magma, porque en el caso del agua, ésta ya no contribuye a disminuir la viscosidad. Este primer hervor se ve reflejado por la presencia de vesículas. Esta fase exsuelta tiene una presión de vapor con un potencial explosivo capaz de fraccionar el magma de manera explosiva si sigue aumentando. La presión de vapor está en función del contenido inicial de volátiles del magma y de la temperatura. En magmas máficos, el dióxido de carbono y el agua se estiman relevantes; en magmas más félsicos, el agua es más importante debido a que es el más abundante.

La cristalización concentra los volátiles disueltos en el resto del magma que aún está líquido, lo cual causa que las presiones de vapor aumenten. Asimismo, el calor latente liberado a través de la cristalización mantendrá la temperatura y las presiones de vapor altas. Si la presión de vapor es igual a la presión confinante se da una ebullición (segundo hervor o exsolución-vesiculación inducida por la cristalización). La fase exsuelta causa un incremento muy grande en la presión de la cámara magmática y un aumento potencial del volumen. Una vez que un magma ha alcanzado este estado, se pueden dar dos condiciones en las que puede ocurrir una fragmentación del magma debido a la exsolución de volátiles:

- a) Una cámara magmática o conducto sellado cercano a la superficie
- b) Una fuente abierta que emite magma en vesiculación.

a) En el caso de un conducto sellado, si la presión de la cámara magmática es igual o excede al esfuerzo principal mínimo de la roca encajonante, el techo de la cámara magmática y el edificio volcánico fallará dándose un evento explosivo.

b) En el caso de una fuente abierta, esta puede ser subaérea o subacuosa. En el caso de una fuente abierta *subaérea*, si el magma se sobrecalienta ligeramente de volátiles ocurrirá una nucleación de burbujas. El crecimiento de una burbuja estará controlado por la difusión de volátiles disueltos en el magma hacia la burbuja y por la tasa a la que se reduce la presión de confinamiento conforme asciende el magma y las burbujas. En este caso, la presión confinante es esencialmente la presión "magmaestática" de volátiles disueltos en el magma que no sólo afectan la viscosidad y las temperaturas de enfriamiento de éste, sino que también afectan la naturaleza de las erupciones en el hecho de que sean explosivas o no explosivas. El componente volátil asociado a la actividad volcánica es el agua, aunque el dióxido de carbono es un volátil en la exsolución temprana para los basaltos. La solubilidad de los volátiles en el magma aumenta mientras el magma sube a niveles corticales más someros con menores presiones de confinamiento. A una cierta profundidad, la solubilidad decrece lo suficiente para que el dióxido de carbono y el agua comiencen a exsolverse del magma y formen fases fluidas concentradas. La profundidad a la cual esto ocurre depende del tipo de magma, del contenido de volátiles en ese momento y de la presión de vapor del agua disuelta y del dióxido de carbono y, por último, a la acción de la presión confinante. La exsolución ocurrirá cuando la presión de vapor iguale la presión confinante.

El crecimiento de las burbujas por descompresión (disminución en la presión magmaestática debido al ascenso de burbujas y/o magma) está controlada por la velocidad de ascenso del magma, por la razón de que el magma se fracciona y se remueve hacia la superficie de la fuente y por el ascenso de las burbujas dentro del magma; otros factores que afectan el crecimiento de burbujas son las propiedades del magma como la densidad, la tensión superficial, la viscosidad y los coeficientes de solubilidad y la difusión del gas en el magma (Cas y Wright, 1987).

La difusión depende de la viscosidad. Las burbujas no pueden crecer indefinidamente (ya que no pueden crecer separadas unas de otras), esto se puede deber a que el magma tiene que pasar entre las burbujas a través de canales muy complicados. La exsolución rápida de volátiles hace que haya un aumento rápido en la resistencia viscosa hacia el crecimiento de las burbujas, y un aumento en el esfuerzo tensil del magma. Además, las burbujas no se revientan debido a que no hay un gradiente de presión significativo a través de las paredes de las burbujas. Bajo estas condiciones, los volátiles continuarán difundiendo del magma a la burbuja hasta que se alcance el equilibrio entre la presión de fluido en la burbuja y la presión de vapor de los volátiles disueltos en el magma. El magma se fragmenta explosivamente en la superficie libre de la fuente debido a que existe un gradiente de presión muy grande entre el magma en vesiculación y la atmósfera.

En el caso de fuentes abiertas *subacuosas*, los mismos parámetros físicos controlan la expansión explosiva de volátiles, pero hay que agregarles los efectos de la presión hidrostática y la interacción magma-agua.

La mayoría de los magmas no son sistemas cerrados simples por lo que su química e historia eruptiva están controlados por la mezcla de magmas formados o evolucionados separadamente.

La mezcla de magmas puede dar lugar a erupciones cuando dos magmas a diferente temperatura y con diferente contenido de volátiles entran en contacto en una cámara magmática. La erupción puede ser iniciada por:

- La adición de un magma a una cámara magmática que puede producir que la presión de fluidos total de la cámara magmática exceda el esfuerzo mínimo principal y al esfuerzo tensil de la roca encajonante llevando al rompimiento del techo de la cámara y salida del magma. Si el contenido de volátiles combinado es suficientemente alto, entonces la disminución en la presión confinante puede dar una exsolución y crecimiento de burbujas rápido produciendo una erupción explosiva; si el contenido de volátiles es bajo puede ocurrir una erupción de lava con poca actividad explosiva.

- Si un magma riolítico con contenido moderado de volátiles es inyectado por un magma básico en la parte inferior, el calentamiento excesivo de la base del magma causará un levantamiento convectivo del magma riolítico, además de incrementar la presión de vapor de los volátiles en el magma. Conforme asciende se descomprime y los volátiles se exsuelven aumentando la presión de gases y de fluidos en la cámara (Cas y Wright, 1987).

- El ascenso del magma máfico inyectado puede tener un alto contenido de volátiles que se exsuelven durante el ascenso y se transfieren durante la convección, difusión y mezcla a un magma riolítico con bajo contenido de volátiles lo cual lleva a un aumento de presión de fluidos y a una erupción explosiva.

- Conforme un magma máfico caliente entra en contacto con un magma riolítico más frío, la transferencia de calor del magma básico al riolítico causará un enfriamiento rápido del magma máfico, que puede causar cristalización y llevar a una exsolución en el fluido máfico residual aumentando la presión total de fluidos en la cámara (Cas y Wright, 1987).

#### II.2.4 Columnas eruptivas

Un sistema eruptivo piroclástico consiste de: a) una mezcla de gases y piroclastos que se extiende desde el nivel de desintegración de la columna magmática hasta la superficie de la tierra y b) una columna eruptiva visible que se extiende desde la superficie hasta alturas de 50 kilómetros.

Una columna eruptiva se puede definir como una dispersión sólido-gas, que forma la columna de un sistema eruptivo que se extiende en la atmósfera desde la superficie de la fuente antes de que ocurra una dispersión lateral. Las propiedades físicas y los procesos dinámicos dentro de una columna eruptiva afectan a muchos de los atributos físicos de los depósitos piroclásticos. Se puede dividir una columna eruptiva en dos partes principales: la parte inferior (empuje gaseoso) y la parte superior (empuje convectivo).



En la parte inferior de la columna, la fuerza principal es la expansión de los gases volcánicos y la presión del vapor que se expande. La velocidad inicial para esta parte va de 100 m/s a 600 m/s y la densidad de masa (densidad total) depende de las densidades combinadas de los gases y de cada componente sólido así como de la relación entre el gas y las partículas sólidas. Al salir de la fuente, la densidad de la columna es mayor que la del aire (proporcional a la relación sólido-gas). Con la caída de los clastos de mayor tamaño y la entrada de aire a la columna eruptiva, la densidad se reduce y cuando esta densidad es menor a la de la atmósfera, da lugar a un ascenso convectivo, formando así la segunda parte (empuje convectivo) de la columna eruptiva. Conforme los clastos sean de menor tamaño, se tendrá un mayor intercambio de calor por lo tanto, la columna será más alta. El empuje convectivo forma alrededor del 90% de la altura de la columna. Los cambios en la temperatura, especialmente en la tropopausa, hacen que las plumas convectivas adquieran una forma de hongo, asimismo, el desplazamiento lateral es muy pronunciado en esta zona caracterizada por vientos muy fuertes (corrientes de chorro) (Fisher y Schmincke, 1984).

La base de una columna eruptiva es una región de empuje de gases dominada por momentum, donde las velocidades son altas (cientos de m/s) y hay gran desaceleración. En la región baja de la columna, los clastos de mayor tamaño son inicialmente acelerados por el gas y desarrollan trayectorias balísticas que están influenciadas muy claramente por el movimiento de la desaceleración de gases a su alrededor. El comportamiento de estos clastos balísticos está determinado por procesos que ocurren en la base de la columna y su alcance depende de la velocidad inicial, el ángulo de expulsión, el tamaño, la forma y la densidad del balístico y la densidad del aire.

La región convectiva de la columna es donde dominan las fuerzas de flotación; típicamente ocupa la mayor parte de la altura de la columna. Aunque las velocidades son menores que en la región anterior, pueden ser desde decenas hasta 200 m/s. La velocidad de la columna decrece constantemente con la altura. Los datos obtenidos por observación y por modelos sugieren que a través de la mayor parte de la altura de la columna, la velocidad media en el eje central decrece aproximadamente en forma lineal con respecto a la altura. Las velocidades convectivas a una altura determinada también aumentan sistemáticamente con la tasa de descarga de magma y por ende con la altura total de la columna (Carey y

Sparks, 1986). Las velocidades convectivas en las columnas son suficientemente grandes para que, en la mayoría de las situaciones, la mayor cantidad de los fragmentos expulsados sean cargados hasta la parte alta de la zona de convección. Algunos clastos son cargados al borde de la columna donde las velocidades son pequeñas y las partículas caen. Sin embargo, exceptuando las erupciones más débiles, las velocidades convectivas en la línea central son suficientemente grandes para cargar clastos del tamaño de un puño hasta cerca de la parte más alta de la columna. La mayoría de los clastos son llevados dentro de la columna ascendente y no siguen trayectorias balísticas. La parte más alta de la columna es caracterizada por la intrusión lateral dentro de la atmósfera para formar una región de sombrilla, la base de esta región está definida por el nivel de densidad neutral. La altura (HB) es la altura donde la pluma ascendente tiene la misma densidad que la atmósfera que la rodea. La cima de esta región (altura HT) está controlada por el momento de la columna a la altura HB, que causa que la columna se levante considerablemente arriba de HB. Si la relación típica  $(HT - HB) / HT$  está entre 0.25 y 0.30, bajo situaciones estables puede ocurrir poca entrada de aire sobre HB pero la continuidad demanda que la nube fluya lateralmente en forma radial. Los clastos que entran a la región de sombrilla serán transportados lateralmente por el flujo en grandes columnas, las velocidades pueden ser grandes y el transporte lateral substancial debido también a la influencia de los vientos. El rango máximo alcanzado por un clasto de un determinado tamaño y densidad está determinado por los movimientos en esta región (Carey y Sparks, 1986).

## II.2.5 Transporte

La actividad volcánica explosiva puede expresarse en diferentes formas, pero las podemos agrupar en tres categorías principales (Sparks y Walker, 1973; Wright, 1980b).

Caída (fall) de piroclastos

Oleadas (surge) piroclásticas

Flujos o coladas (flow) piroclásticas

### Caída de Piroclastos

La caída de piroclastos implica que el material eruptado a la atmósfera desde el centro emisor es transportado a gran altura para formar una columna eruptiva que después es transportada lateralmente lejos del volcán por los vientos atmosféricos. El material cae en forma de lluvia desde la nube eruptiva para cubrir homogéneamente la topografía de la zona, dando lugar a depósitos bien clasificados debido a su paso a través del aire.

En erupciones freatomagmáticas la presencia de grandes cantidades de agua o vapor en la columna eruptiva puede causar la separación prematura de ceniza fina para formar depósitos mal clasificados. Los depósitos de caída son los depósitos volcánicos más extensos; pueden cubrir extensiones de varios millones de kilómetros cuadrados; algunos depósitos de ceniza de erupciones prehistóricas tienen extensiones de varios centenares o miles de kilómetros de distancia respecto al centro emisor.

### Oleadas piroclásticas

Una oleada piroclástica se genera cuando el material fragmentado durante la erupción es expulsado lateralmente y fluye a través del terreno a modo de bocanada o de un huracán cargado de ceniza. Las observaciones directas, el estudio de los depósitos y la utilización de modelos teóricos muestran que las oleadas piroclásticas son altamente turbulentas y diluidas, ricas en gases y con un contenido en partículas sólidas relativamente bajo. Las oleadas piroclásticas deben en gran parte su elevada energía a los procesos explosivos que acontecen en la boca de emisión.

Al tratarse de flujos turbulentos, las oleadas piroclásticas generan depósitos que por lo general están mal clasificados, aun más que los depósitos de caída, aunque su naturaleza diluida hace que estos últimos estén algo mejor clasificados que los de las coladas piroclásticas y que muestran una gran variedad de formas de fondo.

Como en los depósitos de caída, los depósitos de oleadas piroclásticas pueden dividirse en dos variedades: 1) secos.- calientes sin cohesión de partículas y 2) húmedos.- relativamente calientes a fríos, con la existencia de vapor húmedo o agua que favorece la cohesión de las partículas, esto depende de la presencia o no de agua en el proceso eruptivo y la extensión del depósito. La naturaleza y el tipo de estructuras sedimentarias presentes en los depósitos de oleadas piroclásticas están fuertemente influenciadas por el hecho de si existe o no cohesión de partículas. Los depósitos de oleadas piroclásticas no sobrepasan distancias de más de unos pocos kilómetros desde su punto de origen, siendo mucho menos voluminosos y extensos que las coladas piroclásticas (Martí y Araña, 1993).

#### Flujos o coladas piroclásticas

Las coladas piroclásticas, consisten en material que se desplaza lateralmente. Son flujos de material volcánico mucho más denso, con una alta concentración de partículas sólidas, y están formadas por una mezcla mal clasificada de material, desde ceniza fina (<1 mm de diámetro) hasta grandes bloques (de un metro o más de diámetro). Las coladas piroclásticas pueden desplazarse a gran velocidad recorriendo distancias considerables hasta de 60 km/h y viajando a más de 25 km de distancia del centro emisor. Debido a su elevada densidad y alta concentración de partículas sólidas, los depósitos de coladas piroclásticas tienden a ser masivos y estar mal clasificados, presentando tenues variaciones granulométricas. El material juvenil, es decir el magma recién solidificado, presente en las coladas piroclásticas puede ser de cualquier densidad, desde roca no vesicular a pómez muy ligera.

Los tres tipos de procesos asociados a la actividad explosiva descritos en este punto, pueden aparecer conjuntamente o formando una secuencia durante una misma erupción. De igual forma, en la mayoría de erupciones, un tipo de actividad puede acompañar a uno o los otros dos tipos de depósitos, independientemente de las condiciones en el centro emisor. (Martí y Araña, 1993).

## II.2.6 Dispersión

La dispersión de las partículas piroclásticas contenidas en una nube piroclástica está controlada principalmente por los siguientes factores:

- 1) Características de la erupción.
- 2) Velocidad y dirección de los vientos.
- 3) Gravedad
- 4) Topografía de la zona.

La caída de piroclastos implica que el material eruptado a la atmósfera desde el centro emisor es transportado a gran altura para formar una nube eruptiva que después es transportada lateralmente lejos del volcán por los vientos atmosféricos. El material cae en forma de lluvia desde la pluma eruptiva para cubrir homogéneamente la topografía de la zona, dando lugar a depósitos bien clasificados debido a su paso a través del aire.

## II.3 Peligro y riesgo volcánico

### II.3.1 Peligro volcánico

La ciencia de la vulcanología ha estado asociada con los peligros volcánicos y los desastres; el volcanismo ha jugado un papel de suma importancia en el pasado geológico de nuestro planeta.

El peligro se define como la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo de tiempo (Tilling, 1993).

En caso de una erupción del Popocatépetl, los tres posibles tipos de peligro serían:

- 1) Flujos calientes de material volcánico: viajan a alta velocidad, sólo en algunos minutos descienden del volcán y destruyen todo a su paso.
- 2) se concentran esencialmente en las barrancas y en los arroyos y les toma de 10 a 30 minutos descender del volcán.
- 3) Caída o lluvia de material volcánico: es peligrosa, especialmente si el peso del depósito excede la resistencia de los techos de las casas, ya que ello puede ocasionar que se colapsen. En algunos casos, la acumulación de más de 10 cm de material puede producir el derrumbe del techo, sobre todo si el material se encuentra húmedo (Macias, et al. 1995).

Dentro del marco de los eventos volcánicos peligrosos también se encuentran entre otros, la emisión de ceniza y los gases que son lanzados a la atmósfera por las explosiones volcánicas y dispersados por los vientos; las cenizas y gases pueden cubrir áreas extensas, dependiendo de los patrones de viento existentes durante la emisión de estos.

Por último, si las tefras o cenizas se movilizan durante la erupción o después de su depósito pueden originar los lahares, cuyo paso arrastra y destruye a lo que se interpone en su camino.

### II.3.2 Riesgo volcánico

Un volcán activo tiene el potencial de hacer erupción en un futuro cercano y se caracteriza por haber tenido una erupción en los últimos 10,000 años.

La República Mexicana cuenta con más de una docena de volcanes que han presentado actividad eruptiva en los últimos 500 años. No obstante esta actividad, según Medina, (1980) se han realizado pocos estudios detallados de riesgo volcánico. Por tanto, es

recomendable realizar estudios de riesgo volcánico para controlar el acelerado crecimiento urbano en zonas volcánicas.

En la actualidad, las zonas aledañas al volcán Popocatepetl se encuentran densamente pobladas y grandes núcleos urbanos como las ciudades de México y Puebla se encuentran a unas decenas de kilómetros de distancia (González, 2000).

El riesgo se define como la posibilidad de pérdida de vidas humanas, propiedades, capacidad productiva, etc., dentro de un área determinada sujeta a peligros.

La contaminación del ambiente por erupciones puede ocurrir de dos formas: por lavas y cenizas, cuyo impacto al medio está sujeto al tipo de erupción, composición de los elementos en disolución, volumen y duración de ésta. En los dos casos, tales materiales pueden destruir la economía de la región que afectan y pueden llegar a inutilizar el terreno agrícola y afectar o destruir la obra civil de la localidad (Tilling, 1993).

En cuanto a la salud pública relacionada a la emisión de gases volcánicos, los riesgos van desde la afectación económica hasta aquellos que ponen en peligro la vida (Piedad, 2000).

Si el material expulsado es gaseoso (dióxido de carbono, cloro, fluor, etc.) o algún elemento en su fase de vapor que al contacto con la atmósfera se precipite, estos pueden sorprender a los habitantes de la localidad ocasionando en ellos daños a su salud en menor o mayor grado, pues los gases y vapores pueden ser incoloros, inodoros, y altamente tóxicos.

La actividad volcánica es un fenómeno natural que contamina, por lo tanto es nocivo siempre y cuando lo acotemos a la escala temporal del ser humano, pues con el tiempo, su efecto es otro. En México los ejemplos del impacto de las erupciones más recientes son: el Chichonal 1982, Colima (1997-?) y Popocatepetl (1994-?).

Otro riesgo que implican las nubes de cenizas volcánicas emitidas por un volcán es que no son detectables por la actual generación de instrumentos de radar con que van

equipados los aviones y es poco probable que en un futuro próximo puedan ser sustituidos por equipos que si lo hagan. La detección completa de nubes de cenizas volcánicas es el único procedimiento que garantiza la seguridad del vuelo, y esta detección requiere de la visibilidad del piloto o de la comunicación entre el piloto de la nave y observadores al nivel de superficie (Casadevall, 1991).

Actividades aeronáuticas han sido suspendidas en diversas ocasiones en los aeropuertos de la ciudad de México y Puebla debido a nubes de cenizas emitidas durante erupciones del volcán Popocatépetl, lo que evidencia la necesidad de estudios de riesgo volcánico en México.



### III. METODOLOGÍA

El término piroclasto se aplica a los materiales producidos por fragmentación durante las explosiones de un volcán en actividad. Tales materiales se acumulan sobre la tierra firme o en el fondo del mar (Pettijohn, 1975).

Otro término utilizado es volcaniclástico, que puede involucrar a un amplio espectro de fragmentos de rocas volcánicas formadas por cualquier mecanismo u origen, que se emplaza en cualquier tipo de ambiente fisiográfico (sobre la tierra firme, dentro del agua o sobre el hielo), o mezclas con muchos tipos de fragmentos no volcánicos en proporciones variadas (Pettijohn, 1975).

#### III.1 Muestreo y tratamiento de las muestras

##### Recolección de Muestras

Cada muestra de ceniza volcánica se colectó de un área aproximada de 1 m<sup>2</sup> de superficie, de terreno horizontal, y habiendo transcurrido el menor tiempo posible después de su deposición, esto para evitar principalmente la contaminación de la muestra y alteración en su contenido mineralógico. Se colocaron en una bolsa de plástico o papel encerado la cual se rotuló con el nombre de la fuente, localidad, fecha y hora de la erupción.

Es pertinente mencionar, qué antes de realizar la colecta de las muestras de ceniza, se hacia una cuidadosa selección de los sitios, resultando ser éstos, cofres de automóviles, banquetas con limpieza diaria y áreas predestinadas para ésta actividad. En los casos en que las muestras se colectaron en el campo, aumenta la incertidumbre del estado inalterado de éstas. Las localidades de colecta se muestran en la tabla 5.1 y figura 5.1 y el peso colectado de cada muestra se especifica en el apéndice I.

La colección de 60 muestras de cenizas emitidas por el volcán Popocatepetl, se reunió entre los años de 1995 y 1998, personalmente y con la cooperación del Dr. Hugo Delgado, Dra. María Aurora Armienta, Ing. Lucio Cárdenas y personal del equipo de monitoreo de emisiones de SO<sub>2</sub> en el volcán Popocatepetl (COSPEC) del CENAPRED. También se contó con la ayuda del Ing. Enrique Moreno, el Sr. Eduardo Mosqueda, Marcos Galicia, Roberto Villalpando y la Srita. Alicia Rivera Picasso.

#### Tratamiento de muestras

La muestra se vacía en un vaso de precipitados de 250 ml (que en la mayor parte de las muestras resulto de un tamaño adecuado para no fraccionarlas), se agrego agua desionizada o bidestilada, se agito ligeramente con agitador de vidrio para que las posibles impurezas flotaran a la superficie del agua y pudieran ser retiradas fácilmente. Esta operación se repitió hasta que no existió impureza alguna; se retiró el agua mediante decantación, la muestra de ceniza volcánica se escurrió y la desecación se realizó en un horno durante 12 horas a una temperatura <60 °C.

Tamizado

Después de secarse la muestra perfectamente, se utilizaron tamices U.S.A. standard testing sieve A.S.T.M.E.-11 specification para separar las distintas fracciones de tamaños de grano que corresponden a los que podemos observar en la tabla 3.1.

Orden	No. de Tamiz	Apertura en mm	Escala $\phi$
1	No.10	1	0
2	No.25	0.71	0.5
3	No.35	0.5	1
4	No.45	0.355	1.5
5	No.60	0.25	2
6	No.80	0.177	2.5
7	No100	0.125	3
8	No.120	0.088	3.5
9	No.230	0.0625	4
10	Finos	<0.0625	>4

Tabla 3.1 Muestra la serie de tamices, apertura en mm y apertura en la escala  $\phi$  de cada uno de los tamices utilizados para realizar la separación granulométrica de las muestras de ceniza.

### III.2 Granulometría

El análisis granulométrico tiene por objeto determinar el tamaño de partículas clásticas tal como se depositaron (Folk, 1969). En este caso, se estudian las cenizas emitidas por el volcán Popocatépetl de 1994 a 1998. Para realizar la clasificación de tamaños de las cenizas volcánicas fue utilizada la escala desarrollada por Udden en 1914, ampliamente difundida por Wentworth en 1922 y complementada por Krumbein en 1934. Como podemos observar en la tabla 3.2 se realizó una correlación entre tamaños de productos sedimentarios y productos piroclásticos, en este caso cenizas volcánicas.

U.S. Standard Sieve Mesh	$\phi$	mm	Wentworth (1922)	National Research Council	Piroclastos			
	-12	4096	Canto rodado	Canto rodado muy grande	GRAVAS	BOMBAS Y BLOQUES		
	-11	2048		Canto rodado grande				
	-10	1024		Canto rodado medio				
	-9	512		Canto rodado pequeño				
	-8	256						
	-7	128	Guijarro	Guijarro grande		LAPILLI		
	-6	64		Guijarro pequeño				
	-5	32	Matatena	Grava muy gruesa				
	-4	16		Grava gruesa				
	5/16	8		Grava media				
	5	4		Grava fina	ARENAS	CENIZA GRUESA		
	10	2	Gránulo	Grava muy fina				
	18	1	Arena muy gruesa	Arena muy gruesa				
	35	1/2	Arena gruesa	Arena gruesa				
	60	1/4	Arena media	Arena media				
	120	1/8	Arena fina	Arena fina		ARCILLA	CENIZA FINA	
	230	1/16	Arena muy fina	Arena muy fina				
	5	1/32	Limo	Limo grueso				LIMOS
	6	1/64		Limo medio				
	7	1/128		Limo fino				
	8	1/256		Limo muy fino				
	9	1/512	Arcilla	Arcilla gruesa	ARCILLA			
	10	1/1024		Arcilla media				
	11	1/2048		Arcilla fina				
	12	1/4096		Arcilla muy fina				

Tabla 3.2 Correlación entre tamaños de productos sedimentarios y productos piroclásticos.

Parámetros estadísticos

Para realizar la cuantificación de las distribuciones de tamaño de granos, es necesario determinar varios parámetros estadísticos (Fisher y Schmincke, 1984). Para obtener los parámetros estadísticos, el método más utilizado consiste en trazar la curva acumulativa de la muestra en papel probabilístico y leer en ella los diámetros que corresponden a determinados porcentajes acumulativos llamados percentiles que están dados en unidades Phi ( $\phi$ ) (Folk, 1969).

Moda ( $M_o$ ): Es el tamaño de partículas que ocurre con mayor frecuencia; corresponde al punto más alto de la curva de frecuencia; no es raro que se presente más de una moda en algunas distribuciones de tamaño.

Media ( $M_d$ ): Es el diámetro que corresponde a la ordenada del 50% en la curva acumulativa.

$$M_d = \phi_{50}$$

Mediana Gráfica ( $M_z$ ): Es el promedio gráfico, es decir, es el punto medio de la curva de frecuencia; esta puede ser calculada a partir de la fórmula:

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Clasificación ( $\sigma$ ): Es la medida de uniformidad que tiene la distribución de tamaño de grano y es equivalente a la desviación estándar de la distribución, los valores de la clasificación son siempre proporcionados en unidades  $\phi$ , su cálculo se realiza por medio de la expresión:

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

Asimetría (Sk): Es una medida de la “inclinación” de la distribución de tamaño de partículas, o la “tendencia” de la gráfica a estar hacia el lado fino o grueso de las partículas, a diferencia de la clasificación, los valores de asimetría están dados por números simples, en esencia mide el desplazamiento de la mediana de la media y usa 90% de la curva en la determinación, esto, utilizando la fórmula:

$$S_k = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Curtosis (Kg): Es una medida referente a qué tan estrecha o amplia es la curva de la distribución de tamaños, en otras palabras, que tanto se encuentra concentrado el sedimento en un rango pequeño o si está disperso. Consiste en una comparación de la clasificación en las colas de la distribución y la clasificación en la porción central de la distribución. Si la porción central se encuentra mejor clasificada, la curva es “leptocúrtica” (es decir puntiaguda), si las colas son las que se encuentran mejor clasificadas, la curva es “platicúrtica” (es decir de punta aplanada). La curtosis la calculamos con:

$$K_g = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Tanto la clasificación ( $\sigma$ ), asimetría ( $Sk$ ) y curtosis ( $Kg$ ) pueden ser descritas en categorías relativas, dependiendo de los valores obtenidos a partir de las fórmulas desarrolladas por Folk y Ward en 1957. Estas categorías las podemos observar en la tabla 3.3.

Clasificación ( $\sigma$ )

Valor	Categoría
$<0.35 \phi$	Muy bien clasificada
$0.35 \phi - 0.49 \phi$	Bien clasificada
$0.50 \phi - 0.70 \phi$	Moderadamente bien clasificada
$0.71 \phi - 0.99 \phi$	Moderadamente clasificada
$1.00 \phi - 1.99 \phi$	Pobremente clasificada
$2.00 \phi - 3.99 \phi$	Muy pobremente clasificada
$\geq 4.00 \phi$	Extremadamente mal clasificada

Asimetría ( $Sk$ )

Valor	Categoría
$-1.00 - -0.31$	Altamente Asimétrico Grueso
$-0.30 - -0.11$	Asimétrico grueso
$-0.10 - 0.09$	Casi simétrico
$0.10 - 0.29$	Asimétrico fino
$0.30 - 0.99$	Altamente asimétrico fino

Curtosis ( $Kg$ )

Valor	Categoría
$<0.67$	Muy Platicúrtico
$0.67 - 0.89$	Platicúrtico
$0.90 - 1.09$	Mesocúrtico
$1.10 - 1.49$	Leptocúrtico
$1.50 - 2.99$	Muy leptocúrtico
$\geq 3.00$	Extremadamente leptocúrtico

Tabla 3.3 Categorías relativas de clasificación ( $\sigma$ ), Asimetría ( $Sk$ ) y Curtosis ( $Kg$ ).

### Curva de Distribución

La distribución de tamaños de la muestra es comúnmente ilustrada por la curva de frecuencia acumulativa o numéricamente por parámetros de tendencia central (mediana, media o moda), o por otros parámetros que describen las formas de la curva (clasificación, asimetría o kurtosis (Pettijohn, 1975). Los parámetros numéricos son graficados y leídos desde la curva de frecuencia o calculados directamente como medida de momento.

La curva acumulativa es el método de representación más comúnmente usado; la ventaja de ésta curva es que en ella se pueden leer exactamente todos los parámetros estadísticos, pudiéndose así comparar cuantitativamente las muestras por medio de su mediana, su grado de asimetría, etc. (Folk, 1969).

### Curva Acumulativa Probabilística

Las curvas acumulativas se construyen mediante la graficación de los porcentajes de los pesos acumulativos contra el diámetro del grano registrado en milímetros o en unidades  $\phi$  (Figura 3.1). Muchos sedimentos clasificados durante el transporte desarrollan una distribución normal (Gaussiana) que típicamente tiene una curva acumulativa en forma de S o línea recta en papel probabilístico normal. Se han inferido subpoblaciones (con limitado éxito) de discontinuidades angulares graficando en papel probabilístico Sheridan, (1971); Kittleman, (1964) en Fisher y Schmincke, (1984). Las curvas acumulativas, tablas o gráficas de dispersión de depósitos de piroclastos pueden ser comparados y analizados en las diferentes presentaciones (Fisher y Schmincke, 1984).

Este tipo de gráfica es muy útil para estudiar que tanto se aleja la distribución de tamaños de un sedimento de la ley normal de probabilidad (Folk, 1969). Además, ya que en este papel "las colas" se enderezan y la muestra tiende a representarse con una línea recta, es posible leer los parámetros estadísticos con una mayor exactitud, debido a la



facilidad de interpolar y extrapolar. En consecuencia, ésta es la curva que debe emplearse para determinar los parámetros estadísticos (Folk, 1969).

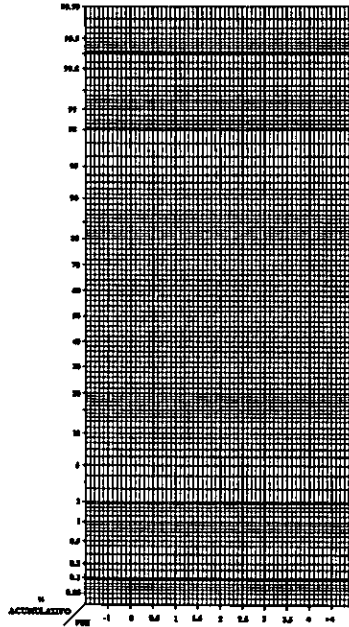


Figura 3.1 Formato de papel probabilístico utilizado para graficar la curva acumulativa de las 60 muestras de ceniza emitida por el volcán Popocatépetl.

### Análisis Modal

**Fragmentos líticos:** el término lítico generalmente describe los componentes sólidos de los piroclastos. Los líticos pueden ser subdivididos en fragmentos magmáticos juveniles no vesiculares (líticos cognados), fragmentos de la roca adyacente a la emisión explosiva durante la erupción (líticos accesorios) y clastos levantados y arrastrados localmente por flujos piroclásticos y surges (líticos accidentales), (Cas y Wright, 1987).

**Cognados:** se refiere a los fragmentos magmáticos juveniles no vesiculares que solidifican durante la erupción magmática. Los líticos accidentales y accesorios son comúnmente llamados xenolitos. En la mayoría de los casos es difícil identificar los líticos accidentales de los accesorios (Cas y Wright, 1987).

Los fragmentos líticos son angulares por lo general, pero en algunas circunstancias, pueden llegar a ser redondeados por abrasión durante la erupción (Cas y Wright, 1987).

El análisis modal consistió en la separación y conteo de los distintos componentes de las muestras de ceniza, que se realizó al haber concluido la separación granulométrica; se tomo la fracción más abundante de cada una de ellas. Esta fracción se cuarteo hasta tener una parte homogénea, representativa y similar en cantidad a todas y cada una de las demás muestras.

El análisis modal se realizó con el auxilio de un microscopio estereoscópico binocular Nikon, con una fuente de luz de alta intensidad, en una primera etapa se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) para identificar los componentes y así calibrar la separación modal realizada en el microscopio estereoscópico.

Los componentes identificados son: Pómez, olivino, piroxeno, vidrio, feldespato, líticos, obsidiana y óxidos. Estos conteos se procesaron en una hoja de cálculo (Excel de Microsoft) obteniendo los porcentajes individuales correspondientes a cada componente. Teniendo la totalidad de estos análisis modales, se pudo realizar el análisis del total de la población de muestras de cenizas volcánicas.

### III.3 Microscopía electrónica

El microscopio electrónico se define como un sistema óptico en el cual la ciencia y la tecnología hacen uso de un rayo de electrones para formar imágenes magnificadas de muestras o especímenes muy pequeños (Flegler et al. 1993).

La principal ventaja de utilizar electrones, sobre el uso de luz natural o artificial, es que las imágenes formadas por el haz de electrones están provistas de mayor profundidad de campo e incremento en el poder de resolución; así como la habilidad de distinguir los más finos detalles que no serían posibles obtener por medio de otra técnica (Flegler et al. 1993).

La resolución se puede expresar en términos del mínimo espacio entre dos puntos que pueden ser vistos claramente como entidades separadas; el poder de resolución de un moderno microscopio óptico es hasta de 200 nm (igual a la longitud de onda de la luz, esto es 6,000 Angstroms) y el de un SEM, Microscopio Electrónico de Barrido o SEM por sus siglas en ingles) es de aproximadamente 3 nm.

Por otra parte, un SEM tiene un significativo rango de aumentos más altos (10x - 180,000x) y la preparación de las muestras es relativamente fácil.

El poder de resolución de un SEM depende de factores como lo es, el enfoque del rayo de electrones a un punto muy estrecho sobre la muestra que barre la superficie de la misma y la interacción del rayo con la muestra que genera electrones secundarios, que son usados para crear la imagen, es decir, que la imagen no se produce de una manera óptica como en el microscopio óptico, esto es, en un microscopio electrónico la imagen se produce en un tubo de rayos catódicos.

En un SEM, el diámetro del rayo es el que determina la resolución, ningún rasgo o característica en el espacio interlínea (barrido) que sea más pequeña que el diámetro del haz puede tener resolución. Las ventajas proporcionadas por el poder de resolución y amplificación a menudo son intercambiadas incorrectamente. La capacidad de alta amplificación es frecuentemente citada como la primera razón para usar un microscopio electrónico, pero la amplificación se logra aumentando el poder de resolución lo que provee realmente la ventaja. De cualquier modo, es usual considerar que el poder de resolución y amplificación son inseparables. Resumiendo, como la necesidad de poder de resolución existe, el técnico puede escoger la amplificación apropiada para distinguir los rasgos deseados del especimen dado que un detalle más pequeño requiere mayor amplificación para ser visible al ojo del humano.

Básicamente existen dos tipos de microscopios; el microscopio electrónico (SEM) y el microscopio óptico, en la tabla 3.4 tenemos algunas características de ambos.

Comparación de características principales del microscopio óptico y electrónico		
Característica	Microscopio óptico	M. Electrónico de Barrido
Uso general	morfología de superficie y secciones delgadas (1-40 $\mu$ mm)	Morfología superficial
Fuente de Iluminación	Luz visible	Electrones de alta velocidad
Mejor Resolución	ca. 200 nm	ca. 3-6 nm
Rango de aumento	10-1,000x	20-150,000x
Profundidad de campo	0.002-0.05nm (N.A. 1.5)	0.003-1mm
Tipo de lentes	Vidrio	Electromagnético
Lugar de formación de la imagen	En el ojo por lentes	Sobre tubo catódico por barrido

Tabla 3.4 Comparación de algunas características del microscopio óptico y los dos tipos de microscopios electrónicos (Flegler et al. 1993).

Los especímenes para el SEM a menudo requieren una preparación más extensa que la necesitada para un microscopio óptico. La adecuada preparación del espécimen redonda directamente en la calidad de la imagen.

A partir del hecho de que el microscopio electrónico usa electrones en vez de luz, una mayor información es generada durante la formación de las imágenes, todas las imágenes son formadas en blanco y negro. El color está en función del espectro de luz visible, y las imágenes generadas por un microscopio electrónico se realiza a partir de un espectro de luz no visible. Las imágenes en color pueden ser generadas usando imágenes computarizadas en un SEM equipado con monitor en color, aunque estas no son indicativas del color real del espécimen; consecuentemente, el uso de colores que es de mucha utilidad en los microscopios ópticos no es importante en la información de las imágenes de los microscopios electrónicos (Flegler et al. 1993).

El primer microscopio electrónico de barrido (SEM), se introdujo al mercado comercial en 1965 y la estructura básica del microscopio electrónico de barrido no ha cambiado significativamente.

Esquema de un Microscopio Electrónico de Barrido

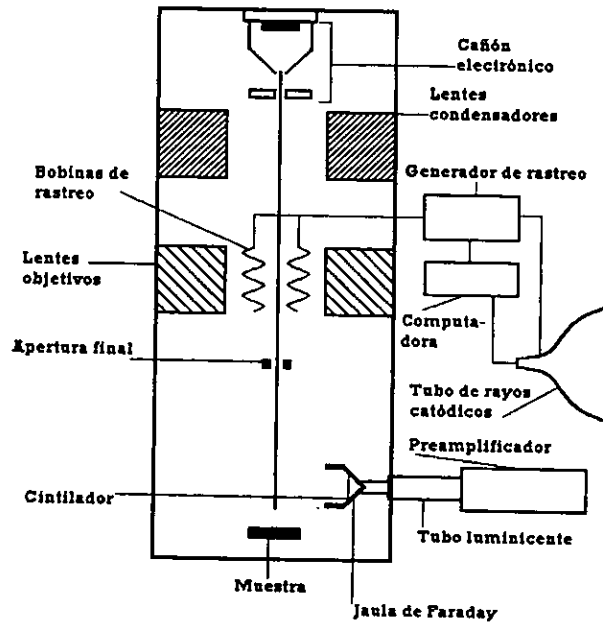


Figura. 3.2 Esquema de un microscopio electrónico de barrido (Flegler et al. 1993).

En la figura 3.2 se muestra un diagrama básico de un SEM, donde el cañón electrónico produce un rayo de electrones que es atraído hacia el ánodo, este rayo es condensado por lentes condensadores y enfocado como un punto fino sobre la superficie del espécimen por el lente del objetivo. Un juego de pequeños rollos de alambre, llamados bobinas de rastreo, se localiza dentro del lente del objetivo; los rollos son energizados por un voltaje variante producido por el generador examinador creando un campo magnético que desvía el rayo de electrones de un lado a otro con un patrón controlado llamado barrido, el barrido es muy similar al barrido en un receptor de televisor.

### Preparación de muestras

La preparación de especímenes para el SEM, no es complicada, porque se trabaja con muestras enteras en lugar de secciones delgadas para ser examinadas. La capacidad de examinar diferentes tipos de muestras en el SEM ha estimulado el desarrollo de un vasto campo de métodos de preparación de la muestra.

A continuación se mencionan algunos de los métodos más comunes para preparar las muestras: casi todas las muestras requieren de una preparación previa al examen en el SEM para reunir las siguientes características: La muestra debe ser (1) desprovista de agua, solventes, u otros materiales que puedan vaporizarse al vacío y contaminar la columna o causar problemas de vacío, (2) la muestra debe estar firmemente montada y (3) debe ser eléctricamente conductiva.

### Montaje del espécimen

La mayoría de las muestras para SEM se montan en porta muestras de metal, usualmente de aluminio. Los talones tienen una amplia variedad de diseños y tamaños.

Se deben sujetar las muestras al porta-muestra por medio de una montura; pegamentos y cintas son los más comunes. El material de la montura debe tener las características siguientes: (1) estabilidad bajo el bombardeo de electrones del haz, (2) que no interfiera con la apariencia o morfología de la muestra, (3) mínimo desprendimiento de aire o solventes (liberación de gases) en el vacío de la columna, (4) estabilidad mecánica, (5) química aceptable del elemento de fondo si se usa analizador de rayos X, y (6) buena conductividad eléctrica, si es posible, que ayude a reducir problemas de cargas eléctricas.

Las resinas epóxicas de secado rápido son pegamentos excelentes, son viscosos y secan rápidamente, tienen buena estabilidad mecánica, son estables bajo el haz de electrones y tienen una liberación mínima de gases

Varios tipos de cinta se usan para montar muestras y ser analizadas en un SEM, estas tienen algunas ventajas sobre los pegamentos: (1) Porque no son líquidos, (2) nunca se daña la muestra por absorción, además, (3) la muestra puede ser removida de su lugar y manipularse con gran facilidad. Las cintas son especialmente útiles para montar partículas pequeñas, tales como cristales químicos, polen y cenizas volcánicas.

### Capa conductiva

Una muestra para SEM debe ser conductiva, los metales son conductivos, y la mayoría de semiconductores no presentan problemas. Las muestras no conductivas o las que tienen porciones no conductivas, eventualmente, pueden causar problemas severos durante la generación de la imagen y procesos fotográficos.

Las muestras que serán examinadas por analizadores de rayos X, no se deben cubrir con un metal pesado como el oro, porque absorberá los rayos X emitidos por la muestra. En cambio se debe usar una capa de carbono, que tiene un factor de absorción de rayos X muy bajo.

Uno de los mejores métodos para formar la capa de carbono, es el uso de un vaporizador de carbono. El aparato es similar a un rociador en apariencia y operación.

### Unidades de longitud usadas en el microscopio electrónico

Varias unidades de medida son usadas comúnmente en microscopía electrónica. Estas unidades son basadas en el Sistema Internacional de Unidades (SI), que fueron divididas en 1960 para lograr una estandarización de unidades de medida. Las unidades más extensamente usadas son las micrométricas (comúnmente usadas en microfotografías en SEM) y las nanométricas (comúnmente usadas en grandes magnificaciones de microfotografías). Las relaciones entre estas unidades son las siguientes:

1mm = 1,000  $\mu\text{m}$  ( $10^{-3}$  mm)

1 $\mu\text{m}$  = 1,000 nm ( $10^{-6}$  mm)

Un micrómetro ( $\mu\text{m}$ ) también es llamado micra, pero ésta denominación está en desuso. Un nanómetro (nm) es igual a una milimicra que equivale a  $10^{-9}$ m (Vázquez y Echeverría, 2000). El Angstrom ( $\text{Å}$ ; 1 nm = 10 $\text{Å}$ ) es usado en literatura científica avanzada y ocasionalmente en la literatura moderna. En el moderno Sistema Internacional la terminología el Angstrom es referido como un decinómetro (dnm) (Flegler et al. 1993).

Comparación del poder de resolución y la mínima magnificación requerida para la imagen del espécimen seleccionado		
Especimen	Poder de resolución requerido	Rango mínimo de magnificación requerido
Bacteria	1-2 $\mu\text{m}$	1,000-1,500X
Virus	20-60 nm	20,000-80,000X
Átomos Grandes	0.1 nm	2,000,000X

Tabla 3.5 Comparación del poder de resolución y la amplificación mínima requerida para generar correctamente la imagen del espécimen seleccionado (Flegler et al. 1993).

### Generación de Imágenes

La primera etapa para la generación de imágenes en un microscopio electrónico es la producción del haz de electrones. Los electrones son generados en el cañón de electrones, que consiste del ánodo y el escudo protector (Figura 3.3). El cañón electrónico está localizado en la cámara del cañón, que usualmente se encuentra en la parte superior de la columna, la columna es de estructura cilíndrica compuesta por el cañón electrónico, las



lentes electromagnéticas y la cámara para las muestras; los tres mejores tipos de cañones electrónicos que son usados en microscopios electrónicos son:

Cañones con filamento de tungsteno

Cañones de lantano

Cañones de campo de emisión

Los cañones más comúnmente usados en los microscopios electrónicos son los de filamento de tungsteno, siendo estos considerados como un estándar en la microscopía electrónica; la fuente de electrones es una vuelta de hilo de tungsteno encorvado hacia dentro en forma de gancho, la vuelta del hilo de tungsteno es llamada "filamento" y tiene la función de un cátodo.

Durante la operación, un pequeño voltaje diferencial es aplicado entre las terminales del filamento, causando calentamiento del hilo de tungsteno por la resistencia eléctrica del flujo de corriente a través del hilo (llamado corriente de filamento). A través de un proceso llamado emisión termiónica, una nube de electrones es producida en la punta del filamento. La razón de ser llamado cañón de cátodo caliente es porque el filamento es calentado.

Aunque un pequeño voltaje diferencial es mantenido en el hilo del filamento, el filamento entero contiene un elevado potencial negativo comparado con el ánodo y el resto del microscopio, el ánodo es de este modo, positivo con respecto al filamento y ejerce una fuerza de atracción de los electrones negativos emitidos por el filamento de tungsteno. Los electrones son acelerados hacia el ánodo, algunos electrones pasan a través de la apertura del ánodo produciendo de esta manera el haz de electrones; el haz de electrones es dirigido hacia la parte inferior de la columna donde es condensada y enfocada por las lentes electromagnéticas.

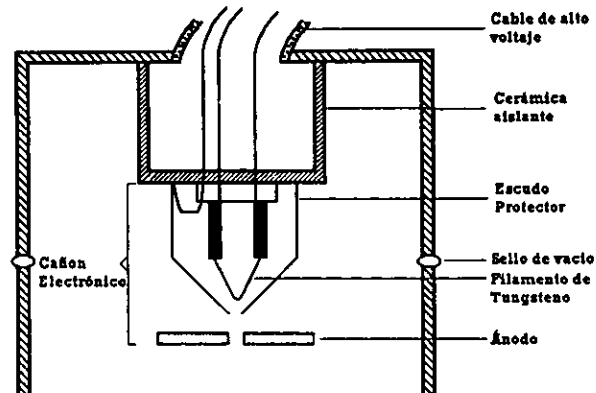


Figura 3.3 Esquema de un cañón electrónico típico, cámara de alto vacío y componentes asociados (Flegler et al. 1993).

### Interacciones entre el especimen y el haz de electrones

Cuando un electrón del haz golpea la superficie de una muestra, sufre una serie compleja de interacciones con los núcleos y electrones de los átomos de la muestra (Figura 3.4 y 3.5), las interacciones producen una variedad de productos secundarios, tal como electrones de diferente energía, rayos X, calor y luz. Muchos de estos productos secundarios se usan para producir las imágenes de la muestra y coleccionar datos adicionales de la misma.

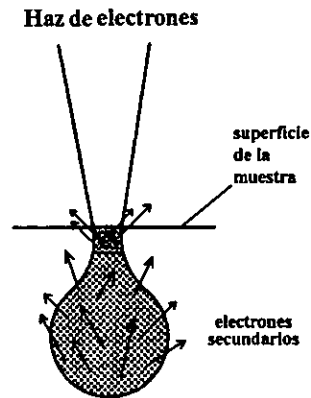


Figura 3.4 Escape de los electrones secundarios del interior de la muestra. Los electrones secundarios son producidos en el interior de la región de interacción de la muestra y el haz de electrones. Estos solo son producidos en la región sombreada que se observa en la figura, de cualquier modo, la capacidad de los electrones secundarios de escapar de la muestra contribuye con la formación de la imagen. Los electrones secundarios que se producen más profundamente en la muestra son absorbidos por la misma y no son capaces de escapar para ser detectados.

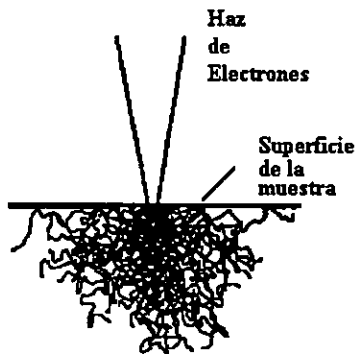


Figura 3.5 Dispersión del haz de electrones en el interior de la muestra. Electrones individuales tienen ángulos de dispersión y longitudes de camino diferentes cuando actúan recíprocamente con los átomos de la muestra.

### Análisis por rayos X

Los rayos X se producen en todos los microscopios electrónicos (SEM, TEM, y STEM), causados por la interacción del espécimen con el haz de electrones. La detección y análisis de los rayos X con accesorios adicionales permiten la determinación de la

presencia, cantidad, y distribución de los elementos en la muestra. La principal ventaja del análisis de rayos X es que no se destruye la muestra; la composición de una parte de la muestra puede ser comparada con otra adyacente a ella.

El análisis por rayos X tiene la capacidad de diferenciar la composición basándose en la resolución analítica espacial, es probablemente su más grande ventaja por encima de otros métodos de análisis elementales. La resolución analítica espacial (la capacidad de diferenciar dos o más elementos como entidades separadas) por ejemplo la resolución de los SEM puede ser 4 nm.

Los rayos X se producen en el área de interacción del especimen con el haz de electrones, así como los electrones secundarios, los electrones retrodispersados y los electrones Auger. En un mejor sentido, los rayos X son fotones, no electrones y tienen poca probabilidad de perder su energía. La profundidad de escape de los rayos X es esencialmente la misma como la del área entera de interacción del haz de electrones y el especimen. La gran resolución analítica espacial en una sección delgada es debido a dos factores; al escaso grosor de la sección y a la profundidad de área de la interacción del especimen y el haz de electrones.

El análisis por rayos X no es tan sensible como muchas otras técnicas analíticas, tales como activación de neutrones y la absorción atómica, que tiene límites de detección hasta partes de por millón, el límite de detección del analizador de rayos X es de partes por mil. Un valor típico de concentración de un elemento dado que se puede detectar en una muestra entera en un SEM es 0.08% en peso.

El detector de rayos X está colocado junto al detector de electrones secundarios. Cada elemento de la muestra produce rayos X con energías y longitudes de onda características. Estos rayos X pueden ser analizados usando un detector sensible a la energía como es el de Si (Li) en un sistema de energía dispersiva (EDX). En general este sistema es usado para obtener un análisis rápido de elementos de número atómico arriba de  $(Z)=11$  (Sodio) en los métodos anteriores; en los modernos puede detectarse desde boro (Reyes, 1993).

En el EDX, el haz electrónico primario del microscopio electrónico de barrido ioniza los átomos del mineral que se está analizando por excitación y proyección electrónica en los orbitales más cercanos de los átomos. Para recobrar la estabilidad, los electrones de las órbitas más exteriores reemplazan las vacantes de los orbitales más cercanos. Estas transiciones de las órbitas más externas a más internas liberan cantidades específicas de energía en la forma de rayos X. La energía de cada rayo es determinado por las diferencias de energía entre los orbitales electrónicos involucrados y las diferencias en el espín electrónico y el número de protones en el núcleo.

La corriente que fluye entre los electrodos cuando un rayo entra al detector, normalmente es referida como un pulso; cada pulso es amplificado y entonces pasa a un analizador multicanal (AMC) en donde el pulso es registrado, de esta forma, el AMC, colecta un histograma de todas las energías que llegan al detector. El histograma es desplegado en un monitor y en un minuto o menos puede ser obtenido un espectro. El sistema EDX es controlado por una computadora que almacena las energías de los rayos X de todos los elementos, consecuentemente es muy simple para la computadora, identificar el elemento que da origen a una línea en el espectro, o alternativamente indicar sobre el monitor las posiciones sobre el espectro para la aparición de cualquier elemento. Así, el análisis cualitativo es extremadamente rápido con el sistema; el sistema de computo tiene programas que permiten hacer análisis cuantitativos mediante dos formas: (1) por comparación del espectro obtenido con estándares internos y (2) por comparación con estándares externos (Reyes y Martiny, 1993).

### Grabación de Imagen

Las imágenes del microscopio electrónico de barrido se producen en tubo de rayos catódicos (CRT). La mayoría de los SEMs emplean dos tipos de CRTs, uno para visualizar la imagen y otro para fotografiar a la misma. Los CRTs para visualizar la imagen tiene un fósforo persistente que brilla por varios segundos después de los movimientos de barrido

que cruzan la pantalla, desde la imagen que permanece, es fácil ver los detalles de la muestra.

La mayoría de los fabricantes usan registros CTRs con una capacidad de resolución de 2,500 líneas. La imagen en el registro CRT es difícil de observar porque solo permanecen las líneas del barrido y ninguna imagen es duradera. Se monta una cámara en el frente del CRT, y la imagen es registrada línea por línea en película fotográfica esto hace que no se requiera la persistencia de la imagen; muchos laboratorios usan película instantánea para saber inmediatamente si han obtenido una imagen aceptable. Los adaptadores son posibles, de tal modo que se puede usar rollo de película de formato grande o película de 35mm (Reyes y Martiny, 1993).

#### IV. ERUPCIONES DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

En el volcán Popocatépetl comenzó un nuevo episodio de actividad explosiva el 21 de diciembre de 1994 (Global Volcanism Network Bulletin (GVNB), 1994).

La etapa eruptiva actual del volcán Popocatépetl se debe evaluar dentro del amplio espectro de modos de actividad ocurridos a lo largo de su historia. Estudios geológicos de su estructura demuestran eventos eruptivos de gran magnitud; el último de éstos sucedió hace aproximadamente 1,200 años. Por otro lado, testimonios de los últimos 600 años revelan que la actividad actual (catalogadas como erupciones menores por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)) es análoga a los últimos 13 episodios; el más reciente antes del actual sucedió de 1919 a 1927.

##### IV.1 Geología general

El edificio o estructura volcánica del Popocatépetl, es la segunda montaña más alta de la República Mexicana con 5,452 m de altitud (Delgado et al. 1988), solo detrás del Pico de Orizaba. Se trata de un gran cono truncado hacia su cima, en un corte de sección elíptica alineada NE-SW, cuyos ejes varían de 600 a 800 m. Su cráter presenta un desnivel de cerca de 300 m desde el "labio inferior" hasta "el labio superior". Internamente se trata de una forma cilíndrica, hasta llegar a un nivel de pendiente fuerte, constituido por depósitos de talud. La traza horizontal del volcán tiene un diámetro aproximado de 25 km.

En la porción noroccidental del cráter, se tiene una prominente estructura, conocida como "El Ventorrillo" cuyos rasgos característicos reflejan una intensa y prolongada erosión, sugiriendo que se trata de un antiguo edificio volcánico que antecedió al emplazamiento del cono actual (Carrasco, 1985).

El Popocatépetl es un estrato-volcán constituido por una secuencia de flujos de lava, tobas, brechas y depósitos piroclásticos. La gran estructura cónica que presenta este volcán

hace pensar que se han suscitado un gran número de eventos eruptivos que han actuado en el pasado hasta darle su configuración actual (Carrasco, 1985).

Los depósitos volcánicos representan periodos repetitivos de construcción y destrucción del edificio volcánico.

En el complejo volcánico se han reconocido tres conos volcánicos súper impuestos: volcán Nexpayantla (cono basal), volcán El Fraile y volcán Popocatépetl (cono reciente). Los edificios construidos durante las diferentes etapas fueron identificados a partir de los remanentes de los antiguos volcanes y de las discontinuidades angulares.

La primera etapa puede estar caracterizada por diversos flujos de lava de composición andesítica, dacítica y riolítica. La edad no es completamente conocida pero se ha estimado para la formación Nexpayantla, una edad no mayor a 730,000 años A.P. (Carrasco, 1985; Delgado et al. 1988; Delgado et al. 1999) en base a dataciones de roca.

La segunda etapa comienza después con periodos de actividad explosiva, de quietud y erosión alternada con periodos de emisión de flujos de lava andesítica-dacítica y material piroclástico. La edad del volcán El Fraile fue estimada en cerca de 300,000 A.P. usando el método K-Ar. Esta etapa terminó con la destrucción del cono El Fraile, cerca de los 20,000 años A.P. (Delgado et al. 1999).

La tercera etapa incluye la construcción del presente cono por la sucesiva acumulación de lavas andesíticas-dacíticas y los depósitos plinianos reportados por Siebe et al. (1995). El inicio de la época eruptiva del Popocatépetl es muy joven, cercano a los 22,000 años A.P. (Siebe et al. 1995). Las características de todas las rocas muestran una afinidad calcialcalina, típica del vulcanismo de subducción (Delgado et al. 1999).



#### IV.2 Historia eruptiva reciente

Estudios geológicos muestran que el Popocatépetl ha tenido erupciones explosivas en los últimos 15,000 años, resultando en prolongadas erupciones plinianas (Siebe et al. 1996; Goff et al. 1998). Una prolongada erupción pliniana cubrió una extensa área hace 14,000 años (Siebe et al. 1995) incluyendo el área ahora ocupada por la Ciudad de México. Más recientemente, durante los últimos 5,000 años otra severa erupción pliniana ocurrió, devastando extensas áreas incluyendo asentamientos humanos en el flanco noreste del Popocatépetl (Delgado et al. 1994; Siebe et al. 1996).

Los registros históricos eruptivos no incluyen erupciones plinianas durante los últimos 800 años. Los registros muestran que estas erupciones son relativamente moderadas comparadas con las erupciones previas y no produjeron ningún tipo de destrucción. Las erupciones más prolongadas ocurridas en las últimas centurias fueron en el año de 1663 y produjeron algunos flujos de ceniza que no alcanzaron áreas pobladas.

La última erupción del Popocatépetl ocurrió en 1920 durando siete años. Consistió en eventos explosivos severos que produjeron columnas eruptivas que no alcanzaron los 7,000 msnm, y no generaron flujos piroclásticos. Un domo de lava se formó en el interior del cráter en 1921 el cual fue destruido en 1922 por un evento explosivo. Esta erupción continuó por cinco años más, pero no existe documentación adicional sobre eventos explosivos fuertes, por lo tanto se asume que no ocurrieron eventos importantes durante los últimos años de la erupción.

Los periodos de reposo son aproximadamente de 70 años (Delgado et al. 1988). Después de la última erupción, el volcán permaneció por debajo de una condición fumarólica. El volcán presentó signos de reactivación desde 1990, tales como un incremento en su actividad fumarólica, decremento del pH en el agua del lago en el cráter, y sismicidad bajo el volcán (Delgado et al. 1994; Werner et al. 1997; Goff et al. 1998). La presente erupción comenzó el 21 de diciembre de 1994 y ha continuado hasta la fecha.

Muchos factores controlan las erupciones explosivas, tales como nuevo aporte de magma, presión interna que actúa sobre el edificio volcánico, viscosidad del magma, contenido de gases (Stix et al. 1993), el agua magmática o meteórica (Heiken y Wohletz, 1987) y si el sistema de conductos es obstruido o no. Para el mejor conocimiento de estos procesos, se monitorea el comportamiento del índice de emisión de SO<sub>2</sub> y se complementa con otras fuentes de información tales como la sismicidad. Respecto al contenido de SO<sub>2</sub>, las emisiones dan algunas indicaciones de cuanto gas contiene el magma (Wallace y Gerlach, 1994), pero éstos no pueden ser directamente correlacionados con la explosividad como es ejemplificado por la cuantiosa emisión de SO<sub>2</sub> por el Popocatépetl durante los periodos de erupción efusiva. Un diferente comportamiento de desgasificación en los volcanes se puede describir como permeable ("leaky") y cerrado ("tight") (Newhall et al. 1994). Las diferencias entre los dos tipos de volcanes es crucial en el entendimiento de la evolución de una erupción. En el caso del Popocatépetl, entender los procesos internos es relevante no sólo con fines científicos sino también por los riesgos latentes de asentamientos humanos y sus propiedades (Delgado et al. 2000).

#### IV.3 Cronología de la erupción actual (1994-1998)

##### Actividad eruptiva (1994-1998)

##### Diciembre de 1994

El 21 de diciembre de 1994 el volcán Popocatépetl comenzó hacer erupción con eventos iniciales consistentes principalmente de explosiones de tipo vulcaniano que produjeron columnas de ceniza con alturas que alcanzaron hasta 7,000 msnm. Explosiones individuales que tuvieron duración de 3 a 10 minutos cada una emitida continuamente por casi una semana. La ceniza producida durante estas explosiones se depositó en el flanco oriental y sector noreste del volcán, alcanzaron distancias hasta de 50 km (ciudad de Tlaxcala). La fase más fuerte de la erupción inicial ocurrió en diciembre 24 y 25 después de

la cual comenzó a declinar. Aunque la columna de ceniza no era lo bastante densa como para generar flujos piroclásticos debido a una baja de la erupción. Altas velocidades de los vientos presentes a la altitud de la pluma de ceniza eficientemente redujeron la densidad, una ligera lluvia de ceniza fue reportada sobre pueblos cercanos. Durante esta fase, el volcán abrió su sistema de conductos después de casi 70 años de reposo. El lago en el interior del cráter fue destruido, pero no se reportaron cambios particulares en la morfología del edificio volcánico durante la fase inicial de la actividad eruptiva.

#### Limpieza del sistema de canalización (enero de 1995- marzo de 1996)

Las explosiones llegaron a ser intermitentes durante enero-marzo de 1995. Los períodos entre explosiones gradualmente aumentaron. También, las plumas volcánicas llegaron a ser pobres en ceniza y empezó a dominar el contenido de gases. La ceniza principalmente constó de material alterado del antiguo domo de 1920 o de las canalizaciones; el material juvenil fue raro (menor al 2%) el cual fue identificado por cristales de olivino. Estos cristales son muy frescos y no muestran reacción en los bordes, así se asume que la fuente es una pequeña porción de magma nuevo. El sistema de canalización se desarrollo a lo largo de un conducto central y cuatro nuevas bocas en el sector oriental en el piso del cráter. A principios de agosto de 1995, las emisiones de ceniza se detuvieron completamente y otros signos volcánicos disminuyeron fuertemente. La actividad llegó a ser tan baja que inicialmente se pensó que la fase eruptiva llegaba a su fin. Estos periodos de actividad reducida persistieron hasta marzo de 1996. El 5 de marzo de 1996 la actividad explosiva retorno al volcán Popocatepetl. Una explosión de tipo vulcaniano marcó el principio de la nueva fase, esto por producir ceniza continuamente por varias horas. Esta actividad más tarde llegó a ser intermitente, sujeta a la actividad eruptiva de 1994-1995.

Actividad explosiva y efusiva (marzo de 1996 a enero de 1998)

El 27 de marzo, durante un vuelo de medición de SO<sub>2</sub> sobre el volcán, se observó por primera vez un cuerpo de lava. Los registros sísmicos indican que el domo de lava probablemente comenzó su extrusión; el 25 de marzo, esto basado en las señales de tremor identificadas (GVNB, 1996). El domo de lava fue extruido inicialmente a una velocidad entre 1-3 m<sup>3</sup>/s, con una velocidad máxima de efusión de 7 m<sup>3</sup>/s durante abril de 1996 (Delgado et al. 2000). El 5 de marzo una serie de explosiones produjeron largas lenguas de material (< 2 km), que pudieron ser flujos piroclásticos que se dirigieron hacia el este.

La actividad efusiva y explosiva alternada fue común durante este periodo. Otra explosión grande ocurrió el 30 de abril de 1996 (perdieron la vida cinco alpinistas por ignorar las advertencias oficiales). La tefra emitida constó de baja a moderada vesicularidad en los clastos de pómez. El rasgo más notable fue la presencia de cristales de olivino embebidos en la pómez.

Lóbulos diferentes de lava crecían dentro del cráter y la cantidad total de lava emitida ascendió a  $8 \times 10^6$  m<sup>3</sup> para el 26 de mayo de 1996 (GVNB, 1998a).

El índice de efusión de la lava decreció gradualmente en julio-agosto y en septiembre de 1996 el domo dejó de crecer. Explosiones y emisiones de ceniza llegaron a ser menos frecuentes pero más vigorosas.

El 28 de octubre, 27 de noviembre, 5 de diciembre y 29 de diciembre de 1996 ocurrieron explosiones fuertes. Las tres primeras no produjeron cambios morfológicos significativos en el domo de lava a pesar de su intensidad (la altura de algunas columnas de cenizas alcanzaron casi los 10,000 msnm); pero las últimas explosiones destruyeron el domo de lava. Algunas de esta explosiones también produjeron flujos piroclásticos que se dirigieron hacia el este y sudeste.

Un nuevo domo de lava comenzó a crecer entre el 17 y 19 de enero de 1997. Las emisiones de ceniza y la intensidad de eventos explosivos decayó. Algunos eventos produjeron material incandescente que fue expelido del cráter, estos causaron incendios en los bosques cercanos.

El 11 de mayo, ocurrió una fuerte explosión produciendo una columna que casi alcanzó los 14,000 msnm. De nuevo, la ceniza consistió principalmente de pómez. El domo de lava pudo haber sido destruido durante esta explosión o alguna explosión subsiguiente (otras dos explosiones fuertes ocurrieron en mayo 15 y junio 14).

El 30 de julio ocurrió la explosión más fuerte hasta la fecha. La columna de ceniza alcanzó casi 15,000 msnm. El rasgo más interesante del material que fue arrojado fue la presencia de dos tipos de magma: pómez silícico de color claro mezclado con pómez de apariencia máfica de color oscuro. La vesiculación en la pómez fue más desarrollada que la previamente observada en pómez emitidas con anterioridad. Cristales de olivino fueron identificados en la pómez, aunque estos cristales no fueron muy abundantes. La ceniza emitida en este evento explosivo llegó a la Ciudad del México obligando que el Aeropuerto Internacional "Benito Juárez" cerrara. La explosión fue dirigida hacia el sur en ese momento. El flujo piroclástico alcanzó 4 km de distancia del cráter sobre uno de los flancos del volcán.

Cuatro días más tarde, se observó un nuevo domo de lava formado en el piso del cráter. No fueron observados abundantes fragmentos de lava fresca en el material eyectado en junio 30, se asume que el domo de lava comenzó a crecer después de tan fuerte explosión. Varias explosiones casi alcanzaron 12,000 msnm de altitud acompañadas de fragmentos del nuevo cuerpo de lava. El índice de efusión no pudo ser calculada con precisión, pero es estimado mayor a las previas (mayor a  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En julio de 1996, fuertes explosiones ocurrieron mientras el domo de lava crecía lentamente.

Para fines de julio y principios de agosto de 1996 la columna de magma se encuentra subsidiendo en el interior del conducto central. Esta subsidencia fue evidenciada por la

aparición de fallas de apariencia circular dirigidas hacia la abertura central y fracturas radiales, ambos afectando al domo de lava. Explosiones y tremor volcánico acompañaron este evento. Esta actividad continuó, hasta que el 19 de agosto fue confirmado el crecimiento de un nuevo domo que crecía en la depresión antes formada. El índice de efusión fue bajo en este momento comparado con los previamente estimados.

El 10 de septiembre, el nuevo cuerpo de la lava casi llenó la depresión y el 22 de octubre de 1997 la lava emitida desde el 22 de mayo de 1996 fue de  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . La lava emitida desde el 22 de octubre hasta el 29 de noviembre de 1997 resultó  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  adicionales (GVNB, 1998a).

Durante noviembre y diciembre, la actividad fue distinguida por diferentes patrones en la actividad sísmica. (Tremor volcánico acompañado de la emisión de nuevos flujos a principios de diciembre). El 7 de diciembre se produjeron adicionalmente  $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  de lava (GVNB, 1998a) haciendo un total acumulado de lava extruida de  $13.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , de 1996 hasta diciembre de 1997.

El 24 de Diciembre de 1997, ocurrió otra fuerte explosión. Esta última explosión emitió bloques incandescentes, que produjeron incendios en los arbustos que rodean al volcán. El 1 de enero de 1998, una explosión destruyó el domo de la lava. Esta última explosión produjo una depresión, que se estima removi6  $10^6 \text{ m}^3$  de lava (GVNB, 1998a).

#### Actividad explosiva (enero - octubre de 1998)

La relativa calma que mantuvo el volcán del 7 al 24 de diciembre terminó con una serie de explosiones que duró 30 minutos y la emisión moderada de ceniza. Sismos tectonovolcánicos que tuvieron lugar durante los últimos días de 1997, precedieron una gran explosión el 1° de enero de 1998 (GVNB, 1998b).

El 1 de enero, el volcán Popocatépetl, después de presentar durante varios días una actividad relativamente baja, a las 14:02 (20:02 GMT) y a las 14:12 (20:12 GMT) ocurrieron

dos sismos tectónicos precursores de la erupción explosiva que ocurrió a las 18:27 (00:27 GMT, ene. 2) percibida en varias poblaciones alrededor del Popocatepetl. Este evento generó una columna de ceniza que alcanzó una altura aproximada de 5 km por arriba de la cima del volcán. Poco después de la erupción se reportó caída de ceniza al sureste del volcán, en poblaciones como San Baltasar Atlimeyaya, Metepec y Atlixco (CENAPRED).

Material incandescente fue arrojado sobre el flanco noroeste del volcán. Este material provocó varios incendios de la vegetación particularmente en diversas zonas de la Barranca de Nexpayantla.

El domo emplazado en el interior del cráter, que fue medido el 22 octubre de 1997, creció hasta alcanzar un diámetro máximo de 380 m y excedido por 20 m la altura del domo que le precedió; fue destruido parcialmente y cubierto por debris volcánico, esto se pudo confirmar por medio de observaciones aéreas realizadas el 6 de enero de 1998 (GVNB, 1998a).

Durante las semanas siguientes, el volcán se mantuvo con niveles bajos de actividad. La actividad fumarólica consistió de continuas emisiones de gas y vapor de agua; esta fumarola fue controlada por vientos con una dirección predominantemente hacia el este y noreste del volcán (CENAPRED).

Del 21 de enero al 12 de febrero, el volcán mantuvo niveles bajos de sismicidad, una intensidad de exhalaciones de baja a moderada y emisiones moderadas de gas y vapor de agua (GVNB, 1998b).

Aunque la actividad del volcán en general se mantuvo baja durante las últimas semanas, el 13 y 14 de marzo se observó un ligero incremento en la sismicidad, se registraron emisiones de gas y vapor de agua con mayor frecuencia y el 21 de marzo ocurrieron dos explosiones (GVNB, 1998b), una a las 05:11 (11:11 GMT) que produjo una exhalación de mediana intensidad con duración de 5 minutos, acompañada de una ligera emisión de ceniza que precipitó algo de ceniza en la ciudad de Puebla. A las 15:59 (21:59 GMT) de la tarde, ocurrió nuevamente emisión de gas, vapor de agua y ceniza con mayor

intensidad, aunque con menor duración (2 minutos en su fase intensa), la cual provocó una columna de ceniza que alcanzó 2 km por encima del cráter y fue desplazada inmediatamente por fuertes vientos hacia el noreste; fragmentos de rocas incandescentes fueron expulsados del interior del cráter durante el evento, los cuales cayeron en las laderas provocando algunos incendios de los pastizales (CENAPRED).

El 23 de marzo, el volcán regresó a los niveles de actividad similares a los registrados el pasado 21 de marzo. Ocurrió una emisión importante a las 10:02 (16:02 GMT) con duración de 15 minutos, que produjo una pluma de ceniza que los vientos dominantes arrastraron al suroeste (GVNB, 1998c).

El 28 de marzo a las 17:59 (23:59 GMT), se registró una emisión moderadamente grande, similar a la ocurrida en la madrugada del 21 de marzo pasado. El evento tuvo una duración de 8 minutos y produjo una pluma de gas, vapor de agua y quizá algo de ceniza que alcanzó 1.5 km de altura.

La actividad del volcán al principiar abril, mostró un incremento con respecto a la actividad registrada en marzo, se presentaron emisiones de gas, vapor de agua y moderada emisión de ceniza, así como tremores armónicos de corta duración; esta actividad caracterizó los meses de abril y mayo (GVNB, 1998d).

El 21, 23 y 27 de abril, el volcán aumentó su estado de actividad. Presentó explosiones que produjeron nubes de ceniza hasta de 4 km de altura. Fragmentos incandescentes lanzados por las explosiones produjeron algunos incendios en los pastizales de las partes altas del volcán.

El 12 de mayo, el volcán presentó un aumento en su nivel general de actividad. La sismicidad se caracterizó por la ocurrencia de un mayor número de emisiones de moderada intensidad, acompañadas de emisiones de vapor de agua y gas, y algunas más grandes con ligeras emisiones de ceniza como el eventos ocurrido a las 17:55 (22:55 GMT) que produjo una columna de 2 km de altura.



Durante junio y julio el volcán se mantuvo estable con baja y moderada actividad sísmica, algunas emisiones de vapor de agua, y ocasionalmente ligera emisión de ceniza (GVNB, 1998e).

Durante el 14, 15 y 16 de agosto la actividad del volcán se incremento. En la madrugada del 16 de agosto a las 00:11 (05.11 GMT) se registró un episodio de tremor armónico de baja amplitud por espacio de 25 minutos. A lo largo del día sólo se registraron algunas emisiones de baja intensidad y corta duración produciendo fumarolas variables de gas y vapor de agua, a las 18:50 (23:50 GMT) se registró en el volcán una emisión de baja explosividad, pero relativamente larga duración, que se prolongó por 15 minutos. La emisión y la baja velocidad del viento causaron una columna de vapor, gas y cantidades moderadas de ceniza, que se elevó hasta una altitud estimada de 4 a 5 km sobre la cima del volcán y que tomó una dirección preferente hacia el noroeste. A las 19:59 (00:59 GMT) se presentó una segunda exhalación, de menor duración que la primera, la cual duró tres minutos. Se reportó leve lluvia de ceniza muy fina en poblaciones cercanas al volcán.

El 15 de agosto, el volcán se mantuvo estable con niveles de actividad en general bajos. Sólo se registraron algunas emisiones de baja intensidad y corta duración. Desde la mañana se mantuvo una fumarola de vapor de baja altitud.

La actividad del volcán se incrementó nuevamente. Ocurrieron pequeñas emisiones de vapor y gas, de baja intensidad. A las 21:49 (02:49 GMT), se registró una emisión de baja explosividad, pero de relativamente larga duración, que se prolongó por 15 minutos, similar a la ocurrida el viernes 14 de agosto. La emisión y la baja velocidad del viento (8 km/h hacia el noroeste) generaron una columna de vapor, gas y ceniza, que se elevó hasta una altitud estimada de 2 a 3 km sobre la cima del volcán (CENAPRED).

Posteriormente al incremento eruptivo a mediados de agosto, el Popocatépetl retorno al bajo nivel de actividad que prevaleció durante el mes de mayo (GVNB, 1998f).

Después de un periodo de varios días con niveles bajos de actividad, a las 05:39 (09:39 GMT) del 8 de septiembre, ocurrió una exhalación moderadamente grande. Su fase

intensa duró cerca de 6 minutos, seguida por una señal de tremor que duró 15 minutos. Aunque por la hora no pudo observarse el volcán, el radar detectó la presencia de ceniza en la fase inicial del evento. A las 08:44 (13:44 GMT) ocurrió otra exhalación, mucho más pequeña que la anterior y con una duración de 2 minutos. No se registró emisión de ceniza.

Posterior a la emisión del 8 de septiembre, la actividad eruptiva del Popocatepetl decreció en intensidad y duración. El CENAPRED reportó moderadas emisiones durante septiembre que causaron caída de ceniza en poblaciones cercanas (GVNB, 1998g).

El volcán Popocatepetl permaneció generalmente estable en niveles bajos de actividad eruptiva durante el mes de octubre, presentó casi diariamente emisión de gas y vapor de agua (GVNB, 1998h).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### V.1 Resultados

#### V.1.1 Granulometría

En el presente trabajo se realizó la separación granulométrica de 60 muestras de cenizas, emitidas por el volcán Popocatépetl entre los años de 1995 y 1998. Las distancias de los puntos de recolección van de 0 km (cráter del volcán) a una distancia máxima de 56.6 km (Distrito Federal) (tabla 5.1).

Cada muestra está clasificada de acuerdo a su fecha de emisión y distancia que existe entre la fuente y el punto de recolección de ésta. Considerando las distancias mínima y máxima de recolección, así como el número de modas de cada muestra con respecto a la distancia, se pudo simplificar la clasificación con respecto a la distancia, esto es, se contemplan 3 facies que son: a) facies proximal (distancia de 0 km a 10 km), b) facies media (distancia >10 km y <50 km) y c) facies distal (distancia >50 km) (mapa adjunto). En cuanto a fechas de emisión, podemos simplificar a 60 muestras con 33 fechas de emisión diferentes (tabla 5.2).

La dirección preferencial de vientos que transportaron las cenizas emitidas por el Popocatépetl, es hacia el NE con un 46.8% de ocurrencia, al NW un 27.7%, al SW un 17% y al SE un 8% (figura 5.1) para su posterior depósito en superficie.

Tabla 5.1 Lista de muestras

Muestra	Fecha	Localidad	Estado	Distancia al cráter (Km)	Azimut c/r al cráter	Dir. del viento c/r al cráter	Facies	
1995	M1	14-Ene-95	Atlixco	Puebla	23	148°	Sureste	Media
	M2	02-Feb-95	Aeropuerto	Puebla	46.7	1.5°	Noreste	Media
	M3	03-Feb-95	Aeropuerto	Puebla	46.7	1.5°	Noreste	Media
	M4	06-Feb-95	Aeropuerto	Puebla	46.7	1.5°	Noreste	Media
	M5	09-Feb-95	Aeropuerto	Puebla	46.7	1.5°	Noreste	Media
	M6	10-Feb-95	Aeropuerto	Puebla	46.7	1.5°	Noreste	Media
1996	M7	05-Mar-96	Atlixco	Puebla	23	148°	Sureste	Media
	M8	10-Mar-96	Cholula	Puebla	35	8°	Noreste	Media
	M9	10-Mar-96	Estación Canario	Puebla	2.3	105°	Noroeste	Proximal
	M10	12-Mar-96	Atlixco	Puebla	23	148°	Sureste	Media
	M11	30-Mar-96	Queretano	Edo.Mex.	1.16	135°	Noroeste	Proximal
	M12	11-Abr-96	Crater del Volcán	Puebla	-	-	-	Proximal
	M13	20-Abr-96	Costado N. Volcán	Puebla	1	-	-	Proximal
	M14	20-Abr-96	Costado S. Volcán	Puebla	1	-	-	Proximal
	M15	30-Abr-96	Tlaxcala	Tlaxcala	54	34°	Noreste	Distal
	M16	30-Abr-96	Calpan	Puebla	19	28°	Noreste	Media
	M17	21-Jun-96	Turbina de Avión	-	-	-	-	-
	M18	18-Sep-96	Estación Canario	Puebla	1.16	105°	Noroeste	Proximal
	M19	28-Oct-96	Col. Delicias	Edo.Mex.	17.6	162°	Noroeste	Media
	M20	29-Oct-96	Atautla	Edo.Mex.	25.6	179°	Noroeste	Media
M21	28-Nov-96	Estación Canario	Puebla	1.16	105°	Noroeste	Proximal	
1997	M22	06-Mar-97	P. D. Arenas	Puebla	21	36°	Noreste	Media
	M23	07-Mar-97	Sta. Ma. Atexcac	Puebla	18	42°	Noreste	Media
	M24	29-Abr-97	S.N. de los Ranchos	Puebla	15.3	19°	Noreste	Media
	M25	29-Abr-97	S.N. de los Ranchos	Puebla	15.3	19°	Noreste	Media
	M26	08-May-97	Ent. Ch. Pue. Oax.	Puebla	49.4	2°	Noreste	Media
	M27	11-May-97	Cholula	Puebla	35	8°	Noreste	Media
	M28	11-May-97	S. B. Nealtican	Puebla	20.7	7°	Noreste	Media
	M29	11-May-97	Cholula	Puebla	35	8°	Noreste	Media
	M30	11-May-97	S. B. Nealtican	Puebla	20.7	7°	Noreste	Media
	M31	11-May-97	S M Acuexcomac	Puebla	24.7	4°	Noreste	Media
	M32	11-May-97	Cholula	Puebla	34	8°	Noreste	Media
	M33	11-May-97	Cholula	Puebla	34	8°	Noreste	Media
	M34	11-May-97	Cholula	Puebla	34	8°	Noreste	Media
	M35	11-May-97	UDLA	Puebla	36	6°	Noreste	Media
	M36	11-May-97	S. B. Nealtican	Puebla	20.7	7°	Noreste	Media
	M37	11-May-97	S. B. Nealtican	Puebla	20.7	7°	Noreste	Media
	M38	11-May-97	Biv.Hnos.Sedan	Puebla	49.4	2°	Noreste	Media
	M39	11-May-97	S. B. Nealtican	Puebla	20.7	7°	Noreste	Media
	M40	11-May-97	S. B. Nealtican	Puebla	20.7	7°	Noreste	Media
	M41	11-May-97	S.N. de los Ranchos	Puebla	15.3	19°	Noreste	Media
	M42	11-May-97	F. Cholollan S. Agustín	Puebla	49.4	2°	Noreste	Media
	M43	12-May-97	F. Cholollan S. Agustín	Puebla	49.4	2°	Noreste	Media
	M44	14-Jun-97	Cuautla	Morelos	40	214°	Suroeste	Media
	M45	14-Jun-97	Nepantla	Edo.Mex.	23.6	190°	Suroeste	Media
	M46	15-Jun-97	Tetela del Volcán	Morelos	18.5	233°	Suroeste	Media
	M47	15-Jun-97	Yautepec	Morelos	47	199°	Suroeste	Media
	M48	30-Jun-97	Amecameca	Edo.Mex.	19	125°	Suroeste	Media
	M49	30-Jun-97	Amecameca	Edo.Mex.	19	125°	Noroeste	Media
	M50	30-Jun-97	Sta. Cruz M., D.F.	D. F.	56.6	140°	Noroeste	Distal
	M51	30-Jun-97	Amecameca	Edo.Mex.	19	155°	Noroeste	Media
	M52	30-Jun-97	Col. S. D. Miron	Puebla	49.4	2°	Noreste	Media
	M53	30-Jun-97	Amecameca	Edo.Mex.	19	125°	Noroeste	Media
	M54	30-Jun-97	Tetela del Volcán	Morelos	18.5	233°	Suroeste	Media
	M55	12-Ago-97	Ecatzingo	Edo.Mex.	15	207°	Suroeste	Media
1998	M56	29-Ago-98	Amecameca	Edo.Mex.	19	145°	Noroeste	Media
	M57	09-Sep-98	Tochimilco	Puebla	15.8	290°	Sureste	Media
	M58	21-Sep-98	Desv. Ecatzingo	Edo.Mex.	15	207°	Suroeste	Media
	M59	26-Sep-98	Paso de Cortés	Edo.Mex.	7.2	112°	Noroeste	Proximal
	M60	06-Oct-98	Paso de Cortés	Edo.Mex.	7.2	112°	Noroeste	Proximal

**Tabla 5.2 Resumen de muestras estudiadas**

1995		1996		1997		1998	
Fecha	Muestras	Fecha	Muestras	Fecha	Muestras	Fecha	Muestras
14-Ene-95	1	05-Mar-96	1	06-Mar-97	1	29-Ago-98	1
02-Feb-95	1	12-Mar-96	1	07-Mar-97	1	09-Sep-98	1
03-Feb-95	1	10-Mar-96	2	29-Abr-97	2	21-Sep-98	1
06-Feb-95	1	30-Mar-96	1	08-May-97	1	26-Sep-98	1
09-Feb-95	1	11-Abr-96	1	11-May-97	16	06-Oct-98	1
10-Feb-95	1	20-Abr-96	2	12-May-97	1		
		30-Abr-96	2	14-Jun-97	2		
		21-Jun-96	1	15-Jun-97	2		
		18-Sep-96	1	30-Jun-97	7		
		28-Oct-96	1	12-Ago-97	1		
		29-Oct-96	1				
		28-Nov-96	1				
		12	15	10	34	5	5
6	6						

33 fechas, 60 muestras

**ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA**

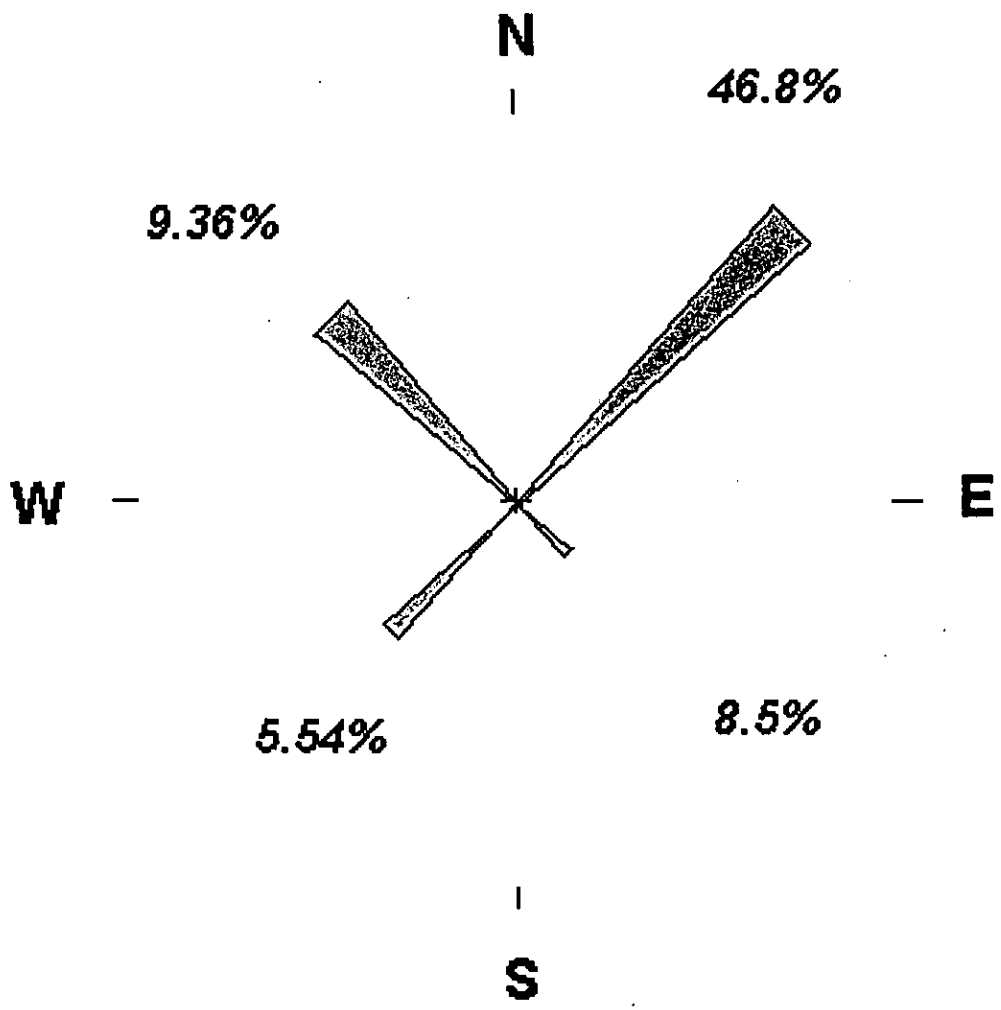


Figura 5.1. Dirección preferencial de los vientos

### V.1.2 Geoquímica

En la fracción más abundante de la separación granulométrica de las muestras se realizaron análisis modales de partículas utilizando un microscopio binocular; algunas de las partículas separadas se observaron con un microscopio electrónico marca JEOL equipado con un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva. Éste análisis en las partículas, proporcionó datos semicuantitativos de la composición elemental de cada una de ellas (tabla 5.3), con la cual se puede determinar la variación química del material que da origen a las cenizas volcánicas.

Se agruparon para su estudio en el SEM: granos de vidrio, pómez, piroxenos, anfíboles y olivinos.

Los vidrios en su gran mayoría fueron muy silíceos y en el diagrama TAS (Le Bas et al. 1978). Caen en el campo riolítico, en cambio las pómez en la misma gráfica barían más en composición y hay desde andesitas hasta riolitas y en el diagrama AFM, la gran mayoría tanto de pómez como vidrios están en el campo calcialcalino a excepción de tres análisis que caen en el campo toleítico (figura 5.2).

Con respecto a los feldespatos todos los análisis resultaron ser plagioclasas que varían en un %Ab de 27.5-64.84 (andesina hasta labradorita).

Los piroxenos analizados fueron pocos y de manera general se clasifican como augita y otros dos análisis son similares a las augitas más típicas.

También son pocos los granos de anfíboles analizados, pero en general podemos decir que dos de los análisis resultaron ser muy ricos en magnesio y otro rico en calcio.

Los olivinos han cambiado en composición con respecto al tiempo, la cantidad de magnesio va de 81.5 a 59.7; las muestras correspondientes a los primeros años son más ricos en magnesio y en las muestras más recientes disminuye el contenido del mismo.

Tabla 5.3 Análisis semicuantitativo de cenizas con microscopio electrónico de barrido

Óxido	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M30	M39	M49	M49	M49	M50	M60
Grano	12	10	5	9	4	1	8	2	3	31	22	23	24	26	1	6
SiO <sub>2</sub>	42.89	43.23	43.43	44.23	45.02	45.21	45.54	46.04	46.42	45.78	46	33.47	42.98	44.93	46.1	41
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.12	0	0	0.14	0.07	0	0.22	0.01	0	0	0.19	0.11	0	0	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.51	0	0	0.34	1.47	0	0	0	0.6
MgO	40.31	44.41	45.83	40.91	42.42	42.69	43.77	38.45	44.07	43.19	32.87	31.81	33.07	40.8	41.79	23.06
MnO	0.3	0.28	0.24	0.29	0.16	0.4	0.25	0.38	0.1	0.43	0	0.78	0.07	0	0	0.75
FeO	15.6	11.58	10.18	14.12	12.03	11.31	9.82	13.79	9.18	9.77	18.28	30.83	22.87	13.81	11.83	32.85
CaO	0.27	0.06	0.23	0.19	0.23	0.31	0.18	0.63	0.22	0.1	0.56	0.81	0.18	0.06	0	0.27
Na <sub>2</sub> O	0.49	0.33		0.28			0.65			0.22	0	0	0.51	0	0.31	0.57
K <sub>2</sub> O	0.13	0		0.01						0	0.14	0.29	0.03	0	0.03	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0		0			0			0	0	0	0	0.12	0	0
C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>										0	0.04	0.09	0.19	0.33	0.14	0
SO <sub>2</sub>										0.51	0.79	0.45	0	0.15		

Amfibol	M10	M28	M28	M60
Grano	21	6	11	9
SiO <sub>2</sub>	57.79	61.81	64.56	49.17
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.27	1	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.27	25.18	18.5	2.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.8	1.32	4.6	11.22
MnO	0.29	0	0.17	0.74
MgO	23.35	0	1.11	35.07
CaO	1.14	6.98	6.04	0.73
Na <sub>2</sub> O	0.39	3.85	2.32	0
K <sub>2</sub> O	0.34	0.51	1.69	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0.03

Pirroxeno	M30	M60	M60
Grano	28	5	11
SiO <sub>2</sub>	80.04	53.06	46.77
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.98	3.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23	1.65	12.57
MgO	26.78	10.05	13.68
MnO	0.22	0	0.47
FeO	9.41	10.52	10.39
CaO	1.29	22.88	10.69
Na <sub>2</sub> O	0	0.2	1.62
K <sub>2</sub> O	0	0	0.35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0.01
C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.045	0.66	0.14
SO <sub>2</sub>	0.13		

Feldespato	M3	M17	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M28	M60
Grano	13	19	3	9	6	5	8	1	4	10	11	10
SiO <sub>2</sub>	64.25	63.77	59.21	60.24	61.04	61.21	61.55	62.44	64.31	68.45	68.78	61.45
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.36	0	0	0	0	0.19	0.4	0.39	0.6	0.49	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.74	21.82	27.08	26.42	25.86	25.98	25.37	23.28	11.48	19.65	25.57	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	0.75	0.88	0.83	0.83	0.5	0.65	0.46	0.76	3.56	1.65	0.88
MnO	0.06	0.15	0	0.05	0	0	0	0.12	0.32	0.14	0	0
MgO	0.01	0.47	0.54	0.41	0.44	1.8	0	0.38	0.68	4.26	0.4	0
CaO	4.25	8.63	8.59	7.39	7.78	6.73	7.35	8.96	6.06	5.57	4.95	7.4
Na <sub>2</sub> O	5.35	2.09	3.26	4.34	3.05	3.41	4.1	3.5	3.35	2.7	2.78	3.83
K <sub>2</sub> O	0.84	1.13	0.45	0.35	0.44	0.5	0.18	0.37	0.84	1.82	1.33	0.57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.33	0	0

Pómez	M27	M27	M27	M27	M27	M27	M30	M41	M49	M50	M60
Grano	1.3	1.2	1.1	1.6	1.4	1.5	32	36	25	3	8
SiO <sub>2</sub>	77.06	75.75	74.81	69.33	62.4	60.26	68.14	78.31	61.14	65.25	63.83
TiO <sub>2</sub>	1.27	0.54	0.98	1.32	0	2.18	0.71	0.84	0.45	2.02	0.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.32	12.29	10.99	12.38	19.49	12.44	17.09	12.89	16.28	13.98	24.31
MgO	0.23	0.2	0	0.29	0	1.67	0.76	0.25	2.01	2.05	0.73
MnO	0.27	0	0	2.25	0	0.66	0.08	0	0.51	0.14	0
FeO	2.45	2.27	4.02	2.66	1.92	10.12	3.28	1.78	2.69	7.15	3.5
CaO	1.41	1.78	1.083	9.11	12.05	6.89	4.83	0.65	4.85	5.43	2.72
Na <sub>2</sub> O	2.06	2.06	2.42	1.84	2.54	2.1	2.9	2.55	4.25	1.69	2.01
K <sub>2</sub> O	4.82	4.3	4.5	4.8	1.56	1.39	1.85	2.82	5.94	2.17	2.83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0	0	0	0	2.3	0	0	0	0.06	0
C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							0	0.11	0.24	0.06	0
SO <sub>2</sub>							0.35	0	1.55	0	0.02

Vidrio	M28	M28	M28	M30	M30	M41	M49	M50	M50	M60
Grano	12	2	7	29	33	34	27	2	4	7
SiO <sub>2</sub>	75.68	76.69	77.66	75.43	62.22	79.23	74.14	74.87	78.71	75.78
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.29	0.66	0.87	2.26	0.17	0.95	0.8	0.45	0.84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.18	13.27	13	12.58	12.69	12.15	13.41	13.69	12.69	13.22
MgO	0.9	1.88	0.54	0.87	3.85	0.23	0.46	0.53	0.22	0.93
MnO	0.28	0	0.34	0.04	0.2	0	0.07	0.38	0.06	0.06
FeO	1.81	1.7	1.74	2.69	14.48	1.36	2.66	2.62	1.65	2.42
CaO	1.04	1.28	0.73	1.67	6.6	0.68	2.57	1.66	0.81	1.68
Na <sub>2</sub> O	2.79	2.02	2.42	2.67	1.71	2.55	1.84	2.36	2.71	1.84
K <sub>2</sub> O	2.86	2.86	2.93	3.1	2.21	3.12	3.88	2.79	2.65	3.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0.42	0	0	0	0	0
C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				0.28	0.21	0.31	0.15	0	0.03	0
SO <sub>2</sub>				0	0.36	0.16	0.02			



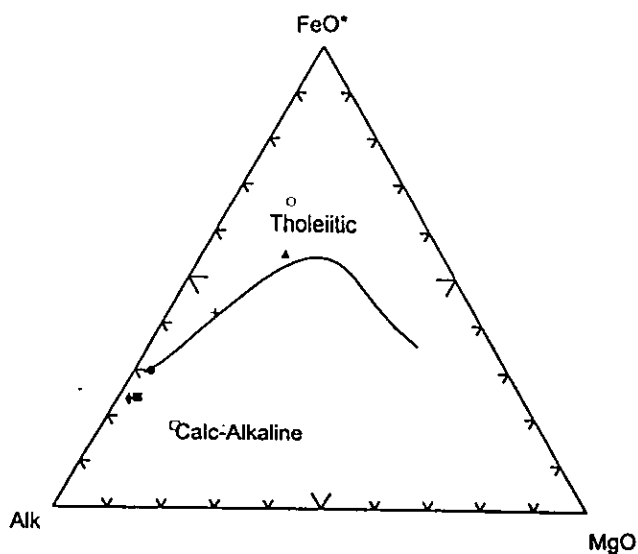
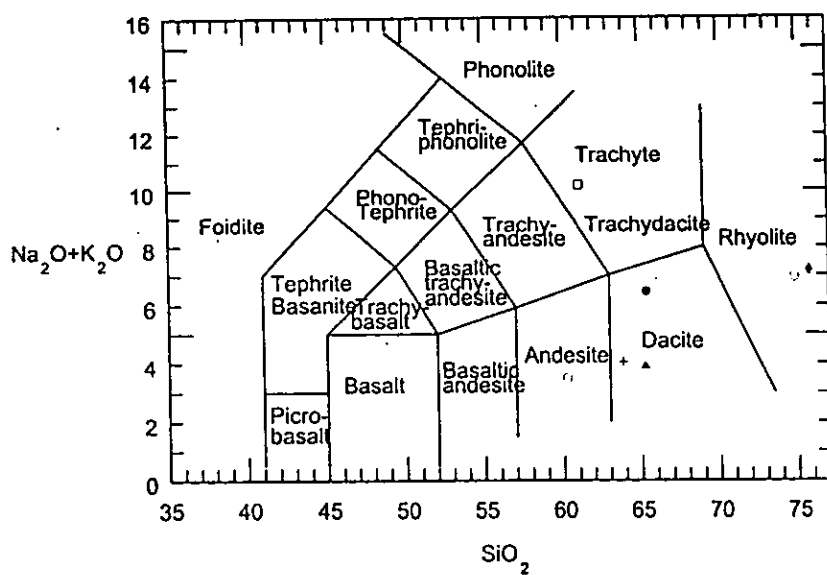


Figura 5.2 Diagramas TAS y AFM con los resultados de los análisis químicos realizados en muestras de pómez.

## V.1.2 Discusión

### V.2.1 Significado de los análisis granulométricos

El análisis granulométrico se practicó en la totalidad de las muestras de ceniza volcánica emitidas en 33 eventos eruptivos del volcán Popocatepetl (apéndice I). Éste análisis granulométrico se realizó en la parte gruesa de las cenizas que comprende el intervalo de tamaño que va de  $-1\phi$  a  $4\phi$  (tamaños de ceniza gruesa a ceniza fina) de las 60 muestras.

Podemos observar que en facies proximales se define sólo una moda con tamaños que van desde arena media hasta limo, pero conforme se aleja del volcán, en facies medias, se definen dos y hasta tres modas con tamaños que van de arena gruesa a limo. Por último, en facies distales, se define nuevamente sólo una moda con tamaños que van de arena media hasta arena fina (tabla 5.4, figura 5.3, figura 5.4 yapéndice II). Esto justifica plenamente los intervalos de distancia utilizados para definir las tres facies que se manejan en éste trabajo.

En algunas muestras, también se realizaron análisis granulométricos de partículas finas con tamaños de partícula superior a  $4\phi$  (ceniza fina) con un contador láser de partículas modelo PC-2000.

En la figura 5.5 podemos observar el comportamiento multimodal en la parte gruesa de las seis muestras y en la parte fina un comportamiento unimodal en (a) y (d) y bimodal en (b), (c), (e) y (f). Sólo en (c) se tuvieron tamaños de arcilla.

#### Análisis estadístico

En las muestras de 1995, la fracción más abundante fue de tamaños de grano de  $4\phi$  con el 83.33% de ocurrencia, es decir que predominó el tamaño de limo en estas muestras. En las muestras de 1996, se tuvo un 40% de ocurrencia de la fracción con tamaño de grano

Tabla 5.4 Distancia y número de modas

Muestra	Fecha	Localidad	Distancia al cráter (km)	Número de Modas	Moda (Mo)			Facies	
					1	2	3		
1995	M1	14-Ene-95	Atlixco	23	1	4		Media	
	M2	02-Feb-95	Aeropuerto	467	1	4		Media	
	M3	03-Feb-95	Aeropuerto	467	1	4		Media	
	M4	06-Feb-95	Aeropuerto	467	1	4		Media	
	M5	09-Feb-95	Aeropuerto	467	1	4		Media	
	M6	10-Feb-95	Aeropuerto	467	1	4		Media	
1996	M7	05-Mar-96	Atlixco	23	1	4		Media	
	M8	10-Mar-96	Cholula	35	1	4		Media	
	M9	10-Mar-96	Estación Canario	23	1	2.5		Pproximal	
	M10	12-Mar-96	Atlixco	23	1	2.5		Media	
	M11	30-Mar-96	Queretano	116	1	4		Proximal	
	M12	11-Abr-96	Crater del Volcán	116	1	1.5		Proximal	
	M13	20-Abr-96	Costado N. Volcán	116	1	4		Proximal	
	M14	20-Abr-96	Costado S. Volcán	116	1	4		Proximal	
	M15	30-Abr-96	Tlaxcala	54	1	1.5		Distal	
	M16	30-Abr-96	Calpan	19	1	10		Media	
	M17	21-Jun-96	Turbina de Avión	19	1	4		-	
1997	M18	18-Sep-96	Estación Canario	116	1	4		Proximal	
	M19	28-Oct-96	Col. Delicias	176	1	1.5		Media	
	M20	29-Oct-96	Atautla	25.6	1	2		Media	
	M21	28-Nov-96	Estación Canario	116	1	4		Proximal	
	M22	06-Mar-97	P. D. Arenas	21	2	1.5	4	Media	
	M23	07-Mar-97	Sta. Ma. Atexcac	18	2	1.5	4	Media	
	M24	29-Abr-97	S.N. de los Ranchos	153	1	2.5		Media	
	M25	29-Abr-97	S.N. de los Ranchos	153	1	2.5		Media	
	M26	08-May-97	Ent. Ch. Pue. Oax.	94	1	4		Media	
	M27	11-May-97	Cholula	35	3	1.5	2.5	4	Media
	M28	11-May-97	S. B. Nealtican	207	3	2	0.5	4	Media
M29	11-May-97	Cholula	35	3	2.5	1.5	4	Media	
M30	11-May-97	S. B. Nealtican	207	1	2			Media	
M31	11-May-97	S M Acuexcomac	247	2	1.5	4		Media	
M32	11-May-97	Cholula	34	1	2.5			Media	
M33	11-May-97	Cholula	34	1	1.5			Media	
M34	11-May-97	Cholula	34	1	1			Media	
M35	11-May-97	UDLA	36	2	2	4		Media	
M36	11-May-97	S. B. Nealtican	207	3	2	0.5	4	Media	
M37	11-May-97	S. B. Nealtican	207	3	2	4	0.5	Media	
M38	11-May-97	Blv.Hnos.Sedan	94	1	1.5	4		Media	
M39	11-May-97	S. B. Nealtican	207	1	4			Media	
M40	11-May-97	S. B. Nealtican	207	1	2			Media	
M41	11-May-97	S.N. de los Ranchos	153	1	2			Media	
M42	11-May-97	F. Cholollan S. Agustín	94	1	1.5			Media	
M43	12-May-97	F. Cholollan S. Agustín	94	1	1.5			Media	
M44	14-Jun-97	Cuautla	40	1	2.5	3		Media	
M45	14-Jun-97	Nepantla	23.6	1	1.5			Media	
M46	15-Jun-97	Tetela del Volcán	18.5	2	2.5	1		Media	
M47	15-Jun-97	Yautepec	47	2	2.5	4		Media	
M48	30-Jun-97	Amecameca	19	2	4	1		Media	
M49	30-Jun-97	Amecameca	19	2	1.5	4		Media	
M50	30-Jun-97	Sta. Cruz M., D.F.	56.6	1	2.5			Distal	
M51	30-Jun-97	Amecameca.	19	1	1.5			Media	
M52	30-Jun-97	Col. S. D. Miron	49.4	1	2.5			Media	
M53	30-Jun-97	Amecameca	19	1	1.5			Media	
M54	30-Jun-97	Tetela del Volcán	18.5	1	2			Media	
M55	12-Ago-97	Ecatzingo	15	3	2	0.5		Media	
1998	M56	29-Ago-98	Amecameca	19	1	4		Media	
	M57	09-Sep-98	Tochimilco	153	2	2		Media	
	M58	21-Sep-98	Desv. Ecatzingo	15	1	2.5		Media	
	M59	26-Sep-98	Paso de Cortés	72	1	2.5		Proximal	
M60	06-Oct-98	Paso de Cortés	72	1	2		Proximal		

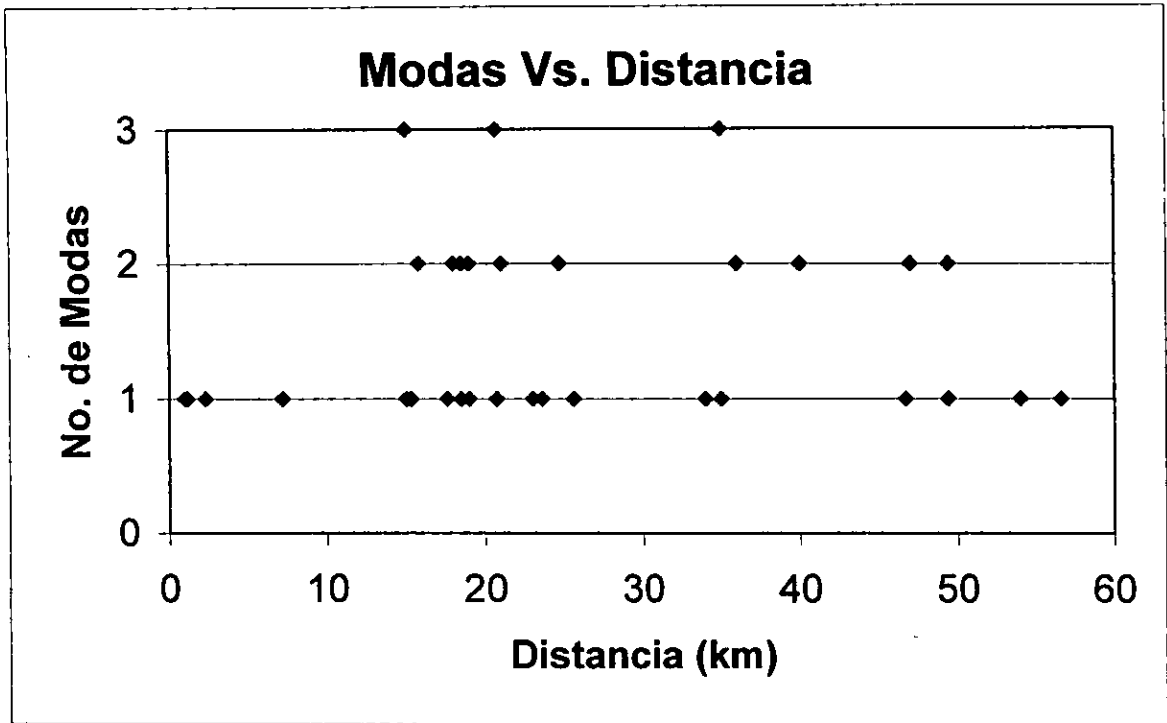


Figura 5.3 Número de modas contra distancia

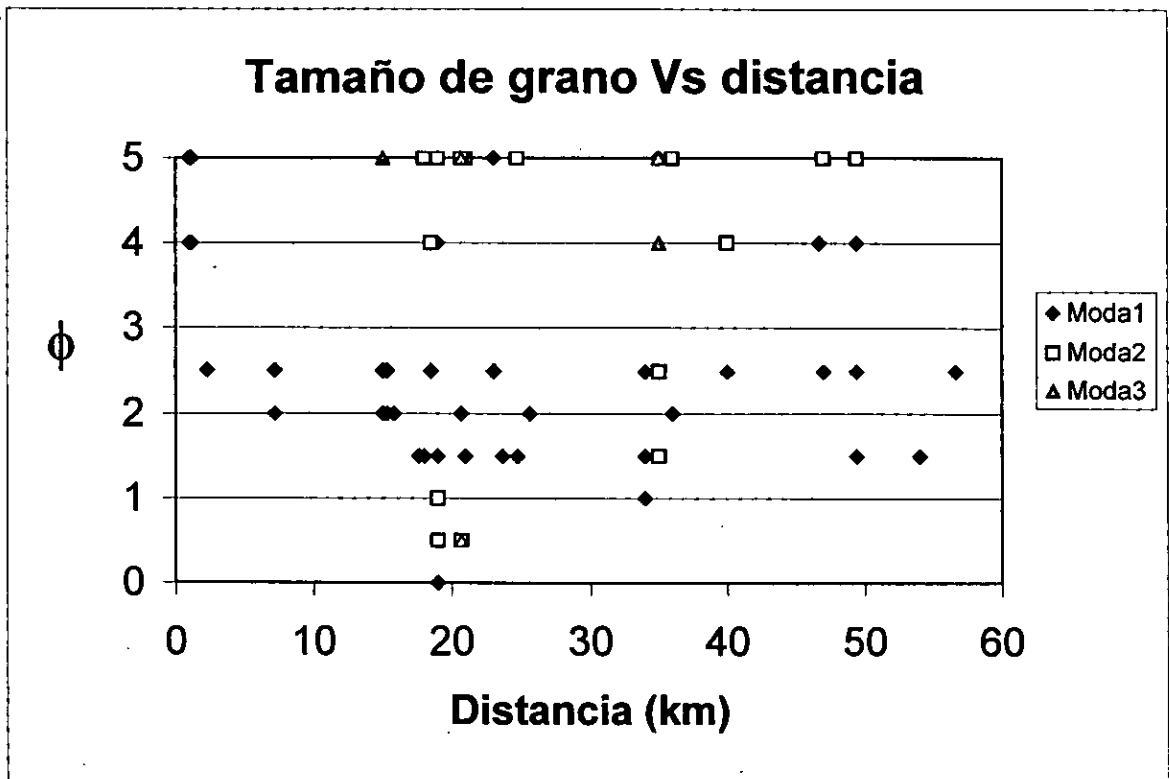
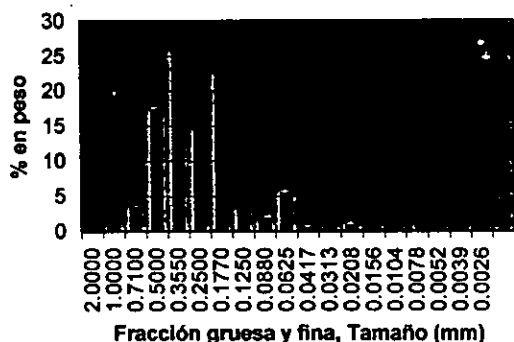


Figura 5.4. Tamaño de moda contra distancia

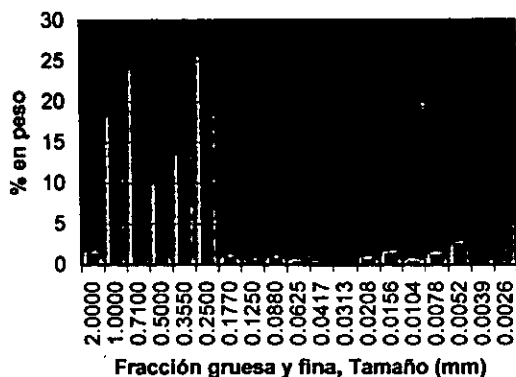
Figura 5.5 Separación granulométrica en fracción gruesa y fina en las cenizas

**M27 Cholula, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 34 Km



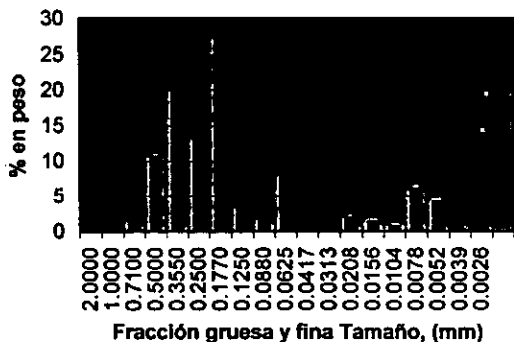
(a)

**M28 Nealtican, Pue. (11/May/97)** Distancia al Cráter 20.7 km



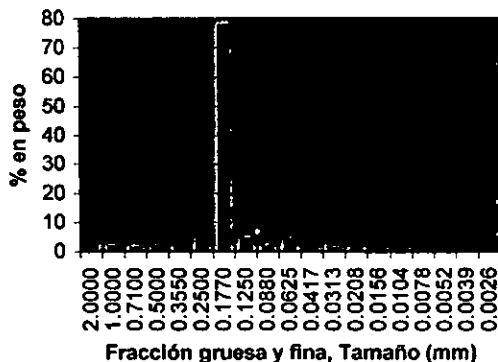
(b)

**M29 Cholula, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 34Km



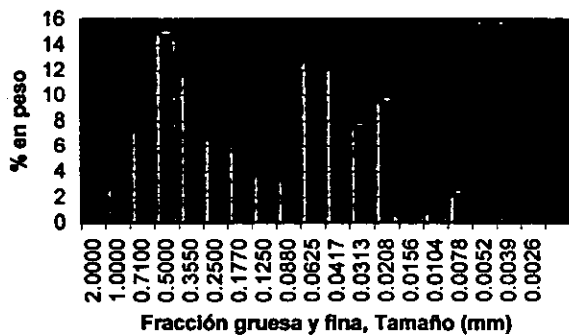
(c)

**M46 Tetela del Volcán, Mor. (15/Jun/97)**  
Distancia al Cráter 18.5 Km



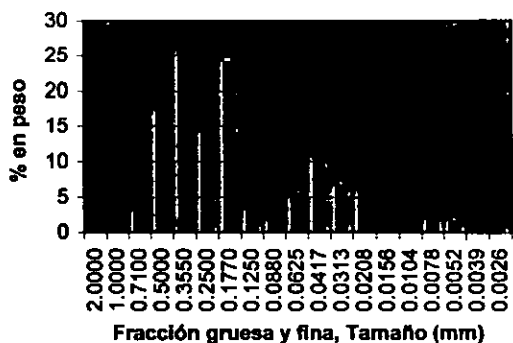
(d)

**M48 Amecameca, Edo. de Mex. (30/Jun/97)**  
Distancia al Cráter 19 km



(e)

**M49 Amecameca, Edo. de Mex. (30/Jun/97)**  
Distancia al Cráter 19 Km



(f)

mayor a  $4\phi$ , que resulto ser la fracción más abundante. Al igual que en 1995, en 1996 también predominó el tamaño de limo (figura 5.6).

Las muestras de 1997, tuvieron el tamaño de grano de  $1.5\phi$  en la fracción más abundante, con una ocurrencia del 35.29%, es decir que predominó el tamaño de la arena fina. En tanto que, en muestras de 1998 predominó la fracción con tamaño de grano de  $2\phi$  con 60% de ocurrencia, es decir que predominó el tamaño de grano entre arena media y arena fina (figura 5.6).

En muestras que corresponden a 1995, 1996 y 1998 solamente observamos el comportamiento unimodal de éstas. Muestras correspondientes a 1997, muestran un comportamiento bimodal en el 47% y en el 17.6% de los casos tienen hasta tres modas (tabla 5.5).

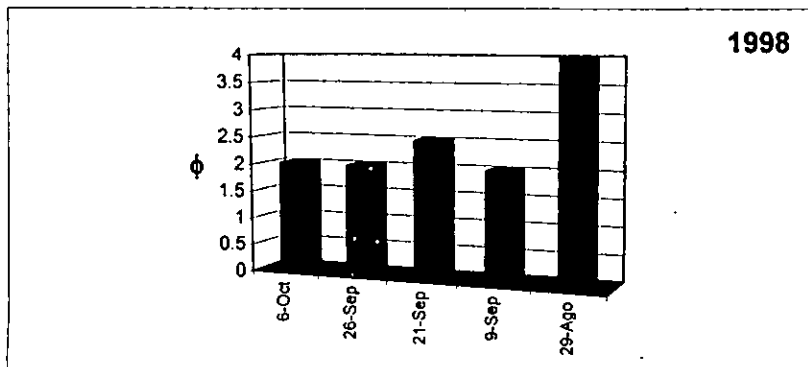
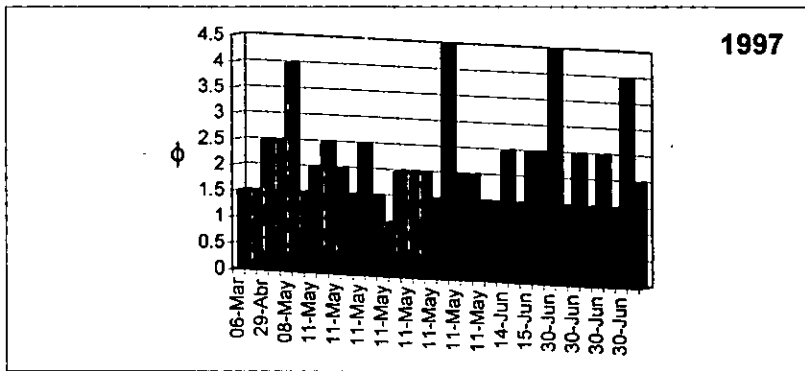
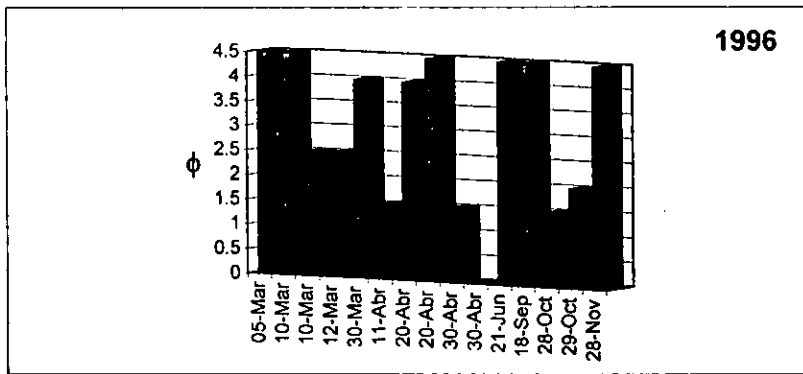
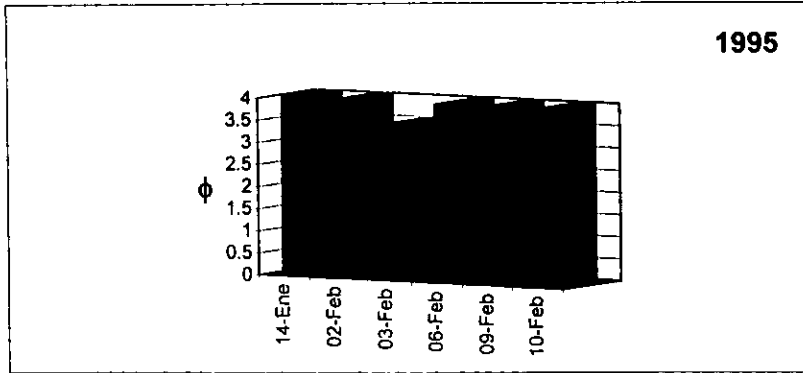
Por otra parte, es preciso hacer notar que todas las muestras que presentan tres modas, pertenecen a la clasificación de facies media. El 33.33% de las muestras que pertenecen a las facies medias tienen más de una moda y comúnmente 2 a 3 modas (tabla 5.5).

En la figura 5.7, observamos que la moda principal de cada muestra de 1995 se encuentra dispersa en la facies media, las modas de 1996 se encuentran en el intervalo de distancia de la facies proximal, las modas de 1997 se concentran a lo largo de todo el intervalo de la facies media y las modas de 1998 se concentran en el primer tercio del intervalo de distancia de la facie media.

La mediana gráfica, que es el promedio gráfico, es decir, es el punto medio de la curva de frecuencia, es muy similar a la media gráfica cuya concentración está entre los 15 y 25 kilómetros de distancia y  $0.5$  a  $4\phi$  (tabla 3.2 del capítulo III y figura 5.7).

La clasificación de las muestras de la facies proximal es de moderadamente bien clasificada a hasta pobremente clasificada, en la facies media la clasificación está entre muy bien clasificada a pobremente clasificada y la clasificación en la facies distal es de

Figura 5.6 Histogramas de fracciones más abundantes en cada muestra



**Tabla 5.5 Resultados estadísticos de los análisis granulométricos**

Muestra	Fecha	Distancia	Facies	PERCENTILES						Número de Modas	Moda (Mo)			Mediana	Media Gráfica	Clasificación	Asimetría	Curtosis	
				Phi 5	Phi 16	Phi 25	Phi 50	Phi 75	Phi 84		Phi 95	1	2	3	(Md)	(Mz)	(r)	(Sk)	(Kg)
M1	14-Ene-95	23	Media	0.65	0.90	1.00	1.60	2.35	2.50	4.00	1	>4	-	-	1.60	1.67	0.91	0.28	1.02
M2	02-Feb-95	48.7	Media	-0.80	-0.90	0.10	0.35	1.60	1.80	4.00	1	4	-	-	0.35	0.42	1.40	0.30	1.31
M3	03-Feb-95	46.7	Media	1.30	2.10	2.20	2.30	2.35	2.40	3.70	1	4	-	-	2.30	2.27	0.44	-0.08	6.56
M4	06-Feb-95	46.7	Media	0.15	0.70	1.00	2.70	4.10	4.20	4.40	1	4	-	-	2.70	2.53	1.52	-0.17	0.56
M5	09-Feb-95	46.7	Media	0.10	0.50	0.70	1.25	2.60	4.10	4.35	1	4	-	-	1.25	1.95	1.54	0.52	0.92
M6	10-Feb-95	46.7	Media	0.75	1.10	1.30	2.10	2.30	4.00	4.30	1	4	-	-	2.10	2.40	1.26	0.27	1.45
M7	05-Mar-96	23	Media	2.00	2.20	2.25	2.40	2.90	3.50	3.90	1	>4	-	-	2.40	2.70	0.61	0.64	1.20
M8	10-Mar-96	35	Media	-0.20	0.30	0.45	0.50	0.80	1.00	1.50	1	>4	-	-	0.50	0.60	0.43	0.30	1.99
M9	10-Mar-96	2.3	Proximal	0.00	0.45	0.70	1.00	1.35	1.60	3.90	1	2.5	-	-	1.00	1.02	0.88	0.27	2.46
M10	12-Mar-96	23	Media	-0.60	0.00	0.20	1.00	1.55	2.00	2.80	1	2.5	-	-	1.00	1.00	1.02	0.03	1.03
M11	30-Mar-96	1.16	Proximal	0.00	0.45	0.70	1.05	1.45	1.65	2.00	1	4	-	-	1.05	1.05	0.60	-0.03	1.09
M12	11-Abr-96	-	Proximal	0.50	0.90	1.10	2.00	2.20	2.30	2.60	1	1.5	-	-	2.00	1.73	0.67	-0.50	0.78
M13	20-Abr-96	1	Proximal	0.80	1.30	1.50	2.00	2.20	2.30	2.60	1	4	-	-	2.00	1.87	0.52	-0.37	1.05
M14	20-Abr-96	1	Proximal	0.10	0.50	0.85	1.00	1.40	1.60	2.00	1	>4	-	-	1.00	1.03	0.56	0.07	1.04
M15	30-Abr-96	54	Distal	0.20	0.50	0.60	0.90	1.30	1.50	2.20	1	1.5	-	-	0.90	0.97	0.55	0.25	1.17
M16	30-Abr-96	19	Media	1.00	1.35	1.50	1.75	2.00	2.10	3.00	1	0	-	-	1.75	1.73	0.49	0.09	1.64
M17	21-Jun-96	-	-	-0.80	0.20	0.80	1.70	2.20	3.50	4.30	1	>4	-	-	1.70	1.80	1.60	0.06	1.49
M18	18-Sep-96	1.16	Proximal	-0.20	0.30	1.00	1.90	2.70	4.10	4.20	1	>4	-	-	1.90	2.10	1.82	0.10	1.06
M19	28-Oct-96	17.6	Media	1.00	1.20	1.35	1.75	2.20	2.85	4.25	1	1.5	-	-	1.75	1.87	0.85	0.39	1.57
M20	29-Oct-96	25.6	Media	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.35	3.50	1	2	-	-	2.10	2.12	0.37	0.38	3.48
M21	28-Nov-96	1.16	Proximal	1.40	1.60	1.80	2.20	2.45	2.80	4.00	1	>4	-	-	2.20	2.20	0.69	0.19	1.64
M22	06-Mar-97	21	Media	1.70	2.20	2.45	3.50	4.00	4.05	4.30	2	1.5	>4	-	3.50	3.25	0.88	-0.40	0.69
M23	07-Mar-97	18	Media	1.05	1.25	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	2	1.5	>4	-	1.40	1.42	0.19	0.03	1.33
M24	29-Abr-97	15.3	Media	1.90	2.10	2.15	2.30	2.40	2.50	2.60	1	2.5	-	-	2.30	2.30	0.21	-0.07	1.15
M25	29-Abr-97	15.3	Media	2.50	3.80	3.90	4.10	4.30	4.35	4.40	1	2.5	-	-	4.10	4.06	0.43	-0.39	1.95
M26	08-May-97	49.4	Media	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.55	1.70	1	4	-	-	1.30	1.32	0.22	0.13	1.43
M27	11-May-97	35	Media	2.70	3.80	4.00	4.30	4.40	4.45	4.49	3	1.5	2.5	4	4.30	4.18	0.43	-0.66	1.83
M28	11-May-97	20.7	Media	0.70	2.50	3.30	3.90	4.10	4.20	4.40	3	2	0.5	>4	3.90	3.53	0.99	-0.69	1.90
M29	11-May-97	35	Media	-0.40	0.15	0.55	1.70	2.10	2.70	4.10	3	2.5	1.5	>4	1.70	1.52	1.32	-0.07	1.19
M30	11-May-97	20.7	Media	3.00	3.80	3.90	3.95	4.10	4.20	4.30	1	2	-	-	3.95	3.98	0.30	-0.11	2.66
M31	11-May-97	24.7	Media	2.50	3.10	3.50	3.85	4.10	4.15	4.30	2	1.5	>4	-	3.85	3.70	0.54	-0.46	1.23
M32	11-May-97	34	Media	2.50	3.25	3.50	3.70	3.95	4.00	4.20	1	2.5	-	-	3.70	3.65	0.45	-0.31	1.55
M33	11-May-97	34	Media	3.60	3.75	3.80	4.00	4.10	4.20	4.40	1	1.5	-	-	4.00	3.98	0.23	-0.06	1.09
M34	11-May-97	34	Media	3.00	3.40	3.60	3.80	4.00	4.20	4.40	1	1	-	-	3.80	3.80	0.41	-0.07	1.43
M35	11-May-97	36	Media	1.60	1.90	2.05	2.30	2.80	3.50	4.00	2	2	>4	-	2.30	2.57	0.76	0.46	1.31
M36	11-May-97	20.7	Media	1.30	1.50	1.70	2.20	3.40	3.85	4.30	3	2	0.5	>4	2.20	2.52	1.04	0.40	0.72
M37	11-May-97	20.7	Media	1.80	2.00	2.05	2.20	3.60	4.00	4.30	3	2	>4	0.5	2.20	2.73	0.88	0.74	0.66
M38	11-May-97	49.4	Media	0.50	1.00	1.10	1.50	1.90	2.20	3.90	2	1.5	>4	-	1.50	1.57	0.82	0.29	1.74
M39	11-May-97	20.7	Media	2.40	3.00	3.30	3.80	4.00	4.10	4.20	1	>4	-	-	3.80	3.63	0.55	-0.51	1.05
M40	11-May-97	20.7	Media	0.20	0.60	0.70	1.20	1.50	2.20	4.10	1	2	-	-	1.20	1.33	0.99	0.37	2.00
M41	11-May-97	15.3	Media	2.10	2.30	2.40	2.50	2.55	2.60	4.45	1	2	-	-	2.50	2.47	0.43	0.16	6.42
M42	11-May-97	49.4	Media	0.00	1.25	2.05	2.90	3.90	4.10	4.40	1	1.5	-	-	2.90	2.75	1.38	-0.24	0.97
M43	12-May-97	49.4	Media	1.80	2.10	2.20	3.50	4.00	4.10	4.30	1	1.5	-	-	3.50	3.23	0.88	-0.38	0.57
M44	14-Jun-97	40	Media	-0.10	0.30	0.70	1.50	2.20	3.40	4.20	2	2.5	4	-	1.5	1.73	1.43	0.24	1.17
M45	14-Jun-97	23.6	Media	1.70	2.20	2.40	3.60	4.00	4.20	4.40	1	1.5	-	-	3.6	3.33	0.91	-0.40	0.69
M46	15-Jun-97	18.5	Media	0.85	1.05	1.10	1.20	1.30	1.50	1.60	2	2.5	4	-	1.2	1.25	0.23	0.20	1.54
M47	15-Jun-97	47	Media	-1.00	-0.80	-0.60	-0.20	-0.10	0.00	0.10	2	2.5	>4	-	-0.2	-0.33	0.37	-0.48	0.90
M48	30-Jun-97	19	Media	1.80	2.25	2.75	4.00	4.30	4.35	4.45	2	>4	1	-	4	3.53	0.93	-0.66	0.70
M49	30-Jun-97	19	Media	1.40	1.55	1.65	1.90	2.10	2.20	2.70	2	1.5	>4	-	1.9	1.88	0.36	0.08	1.18
M50	30-Jun-97	56.6	Distal	1.20	1.75	2.00	3.90	4.20	4.30	4.40	1	2.5	-	-	3.9	3.32	1.12	-0.69	0.60
M51	30-Jun-97	19	Media	0.10	0.50	0.70	1.10	1.50	3.50	4.30	1	1.5	-	-	1.1	1.70	1.39	0.56	2.15
M52	30-Jun-97	49.4	Media	0.80	1.70	2.20	3.60	3.95	4.00	4.20	1	2.5	-	-	3.6	3.10	1.09	-0.65	0.80
M53	30-Jun-97	19	Media	2.50	3.70	3.80	4.15	4.30	4.35	4.40	1	1.5	-	-	4.15	4.07	0.45	-0.56	1.56
M54	30-Jun-97	18.5	Media	2.70	3.75	3.85	4.00	4.10	4.20	4.30	1	4	-	-	4.00	3.98	0.35	-0.37	2.62
M55	12-Ago-97	15	Media	2.20	2.80	3.10	3.90	4.20	4.30	4.40	3	2	0.5	>4	3.90	3.67	0.71	-0.51	0.82
M56	29-Ago-98	19	Media	1.60	2.20	2.50	3.30	3.90	4.00	4.25	1	4	-	-	3.30	3.17	0.85	-0.25	0.78
M57	09-Sep-98	15.8	Media	1.70	1.75	1.80	1.90	2.30	3.50	4.10	2	2	-	-	1.90	2.38	0.80	0.83	1.97
M58	21-Sep-98	15	Media	1.90	2.00	2.10	2.50	4.10	4.30	4.45	1	2.5	-	-	2.50	2.93	0.96	0.55	0.52
M59	26-Sep-98	7.2	Proximal	1.30	1.50	1.55	1.70	2.50	3.30	4.30	1	2.5	-	-	1.70	2.17	0.90	0.76	1.29
M60	06-Oct-98	7.2	Proximal	1.50	1.70	1.80	1.90	2.00	2.20	3.30	1	2	-	-	1.90	1.93	0.40	0.38	3.69



moderadamente bien clasificada a pobremente clasificada (tabla 3.2 del capítulo III y figura 5.7).

La asimetría para la mayor parte de las muestras en la facies proximal se encuentra en la categoría de casi simétrico; la facies media, la asimetría de las muestras abarca casi todo el rango de categorías y la facies distal, la categoría va de altamente asimétrico grueso hasta asimétrico fino (tabla 3.2 del capítulo III y figura 5.7).

Para el mayor entendimiento del carácter granulométrico de las cenizas, la mejor manera puede ser la comparación directa de las curvas acumulativas de cada una de las muestras, y posteriormente comparar el comportamiento por año; mediante este método podemos observar el cambio de la fragmentación de 1995 a 1998. La fragmentación al paso de los años ha sido más eficaz, es decir que el mayor porcentaje de las partículas se encuentra en un rango de tamaños más reducido, resultado directo del aumento del nivel de explosividad de los eventos (figura 5.8).

#### V.2.2 Significado de los análisis modales

Las rocas ígneas contienen sólo una docena de minerales esenciales, como el olivino, piroxenos, feldespatos, anfíboles, cuarzo, micas y feldespatoides, los cuales pueden estar asociados en todas proporciones y combinaciones diversas.

Por tal razón, una clasificación adecuada es la cualitativa mineralógica, en la cual sólo se considera la presencia o ausencia de ciertos minerales considerados característicos.

En la clasificación mineralógica cuantitativa, en cambio, interviene los porcentajes de esos minerales; en el caso del presente estudio, el conteo de los granos de ceniza se realizó auxiliados de un microscopio estereoscópico binocular y un pincel.

Figura 5.7 Parametros estadísticos contra distancia

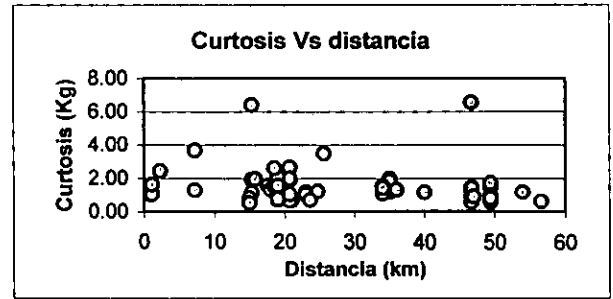
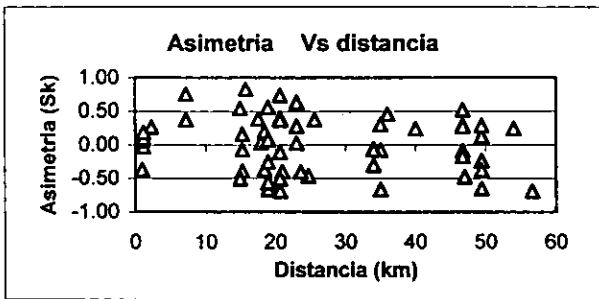
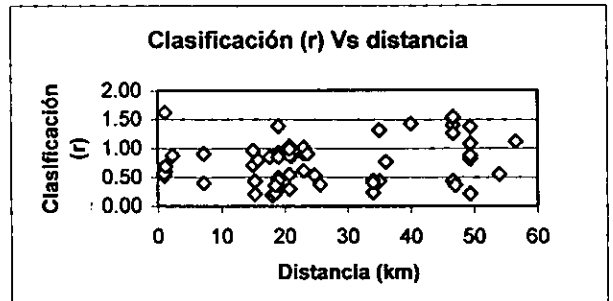
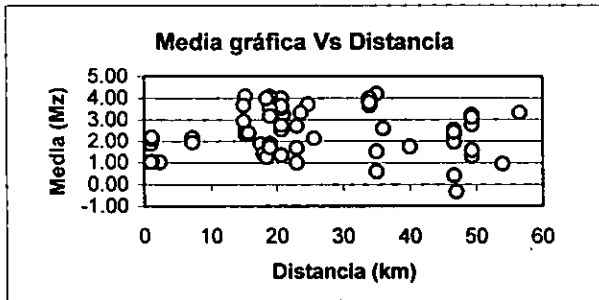
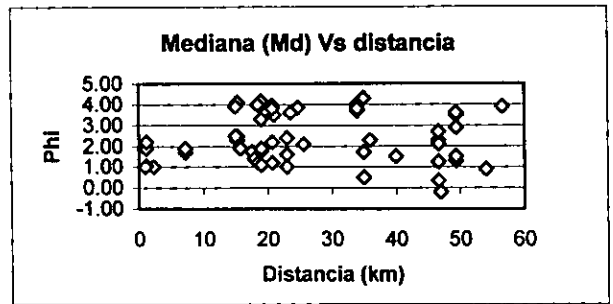
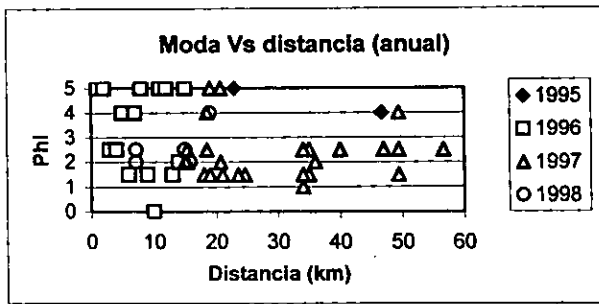
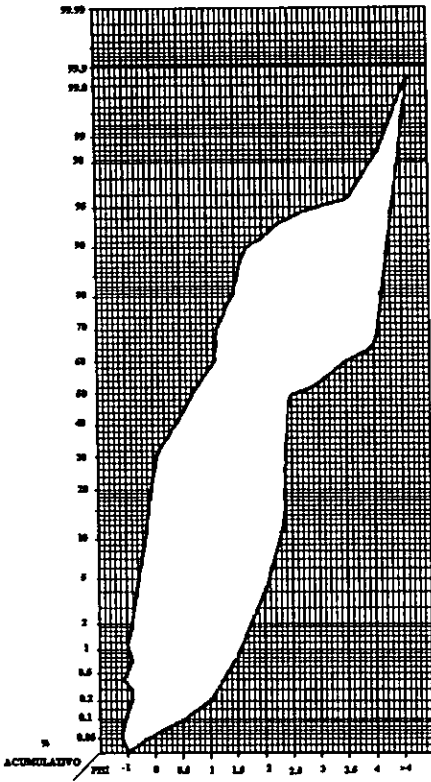
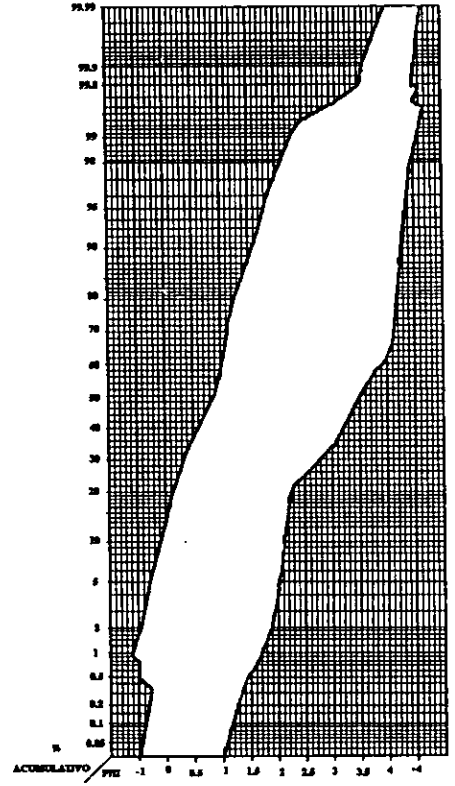


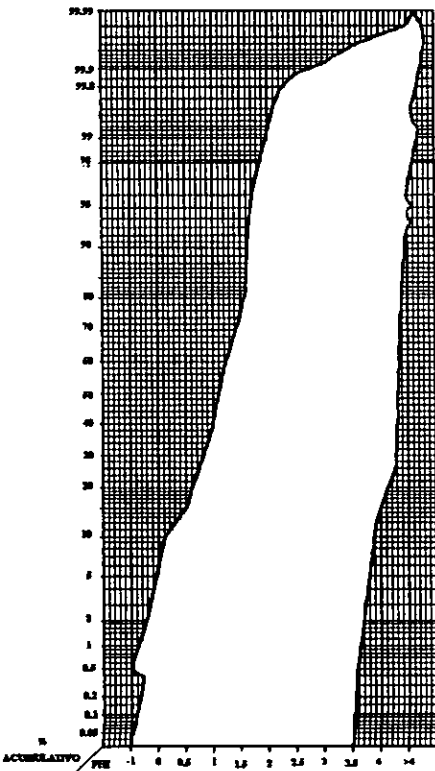
Figura 5.8 Curvas acumulativas probabilísticas por año



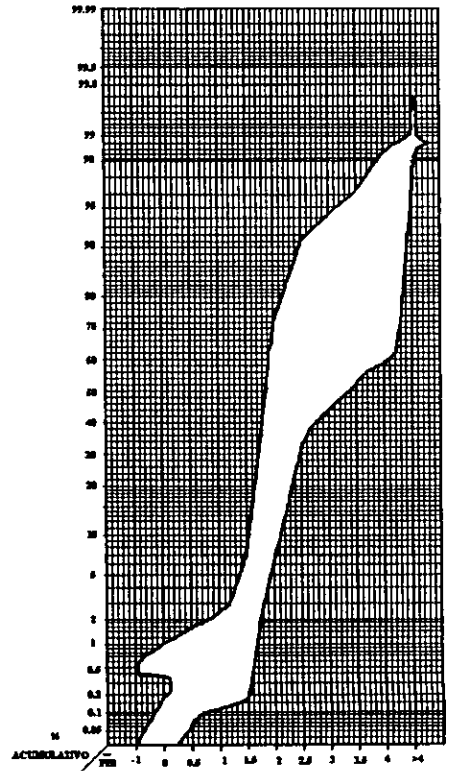
1995



1996



1997



1998

Para optimizar resultados, el presente estudio contempló la identificación de los minerales presentes en las cenizas volcánicas para posteriormente clasificarlos cuantitativamente (apéndices IV y V).

El análisis modal se realizó en 51 muestras de ceniza volcánica; algunas de las observaciones más relevantes en este análisis es que en los primeros años, 1995 y 1996 los porcentajes de pómez no supera el 13% de ocurrencia en cada muestra, para 1997 en algunas muestras el porcentaje de pómez alcanzó el 40%, pero en 1998 el porcentaje de pómez decrece nuevamente asta el 1.15% (figura 5.9 y 5.10).

Los líticos, en la totalidad de las muestras analizadas alcanzó el mayor porcentaje, en algunos casos este porcentaje superó el 80%, reflejo obvio de la destrucción de los domos existente previo a las fases explosivas (figura 5.9).

En la figura 5.10 tenemos el resumen de las características generales de la composición modal de las muestras por año, en la cual observamos un comportamiento cuantitativo con poca variación excepto en la pómez, que como se mencionó anteriormente, aumento el contenido en las muestras de 1997.

### V.2.3 Significado de los análisis de microscopía electrónica.

Como se mencionó anteriormente, algunos granos de ceniza fueron analizados con un microscopio electrónico equipado con un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva.

En la tabla 5.3 se muestra la variación de composición mineral con el tiempo de las partículas de cenizas volcánicas, como son el olivino, la pómez y el vidrio. Los análisis en los cristales de olivino, muestran una composición forsterítica, pero con el paso del tiempo tiende a disminuir su porcentaje de magnesio. Los olivinos más ricos en magnesio son de más alta temperatura.

Figura 5.9 Resumen de análisis modal

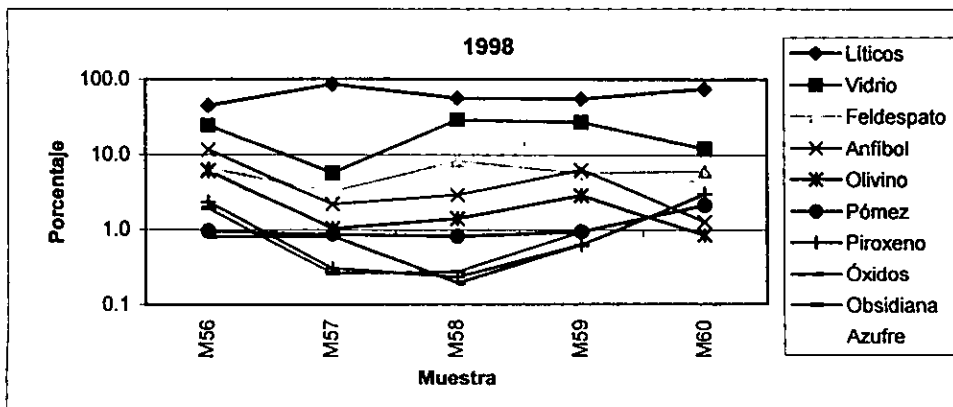
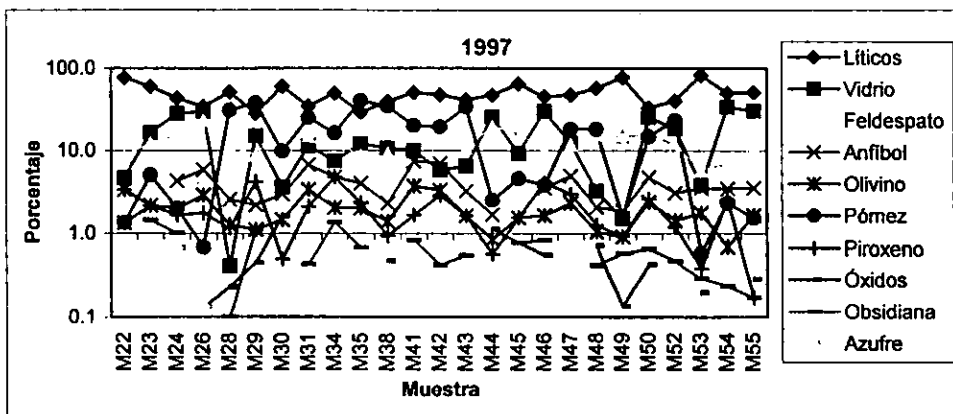
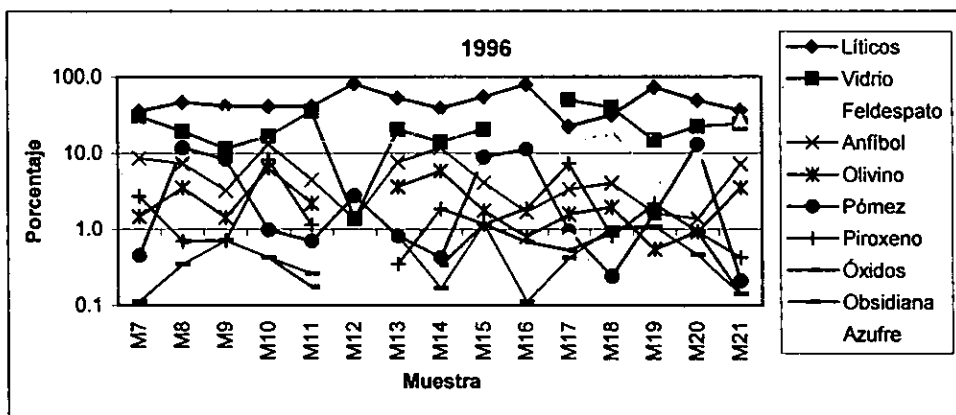
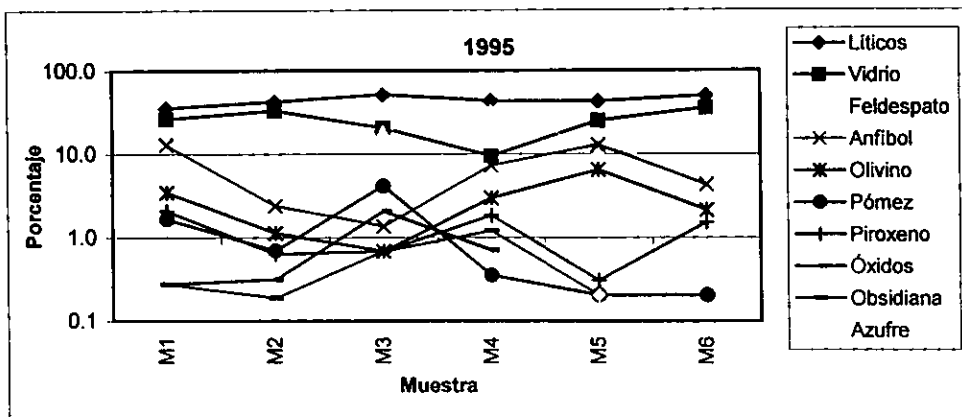
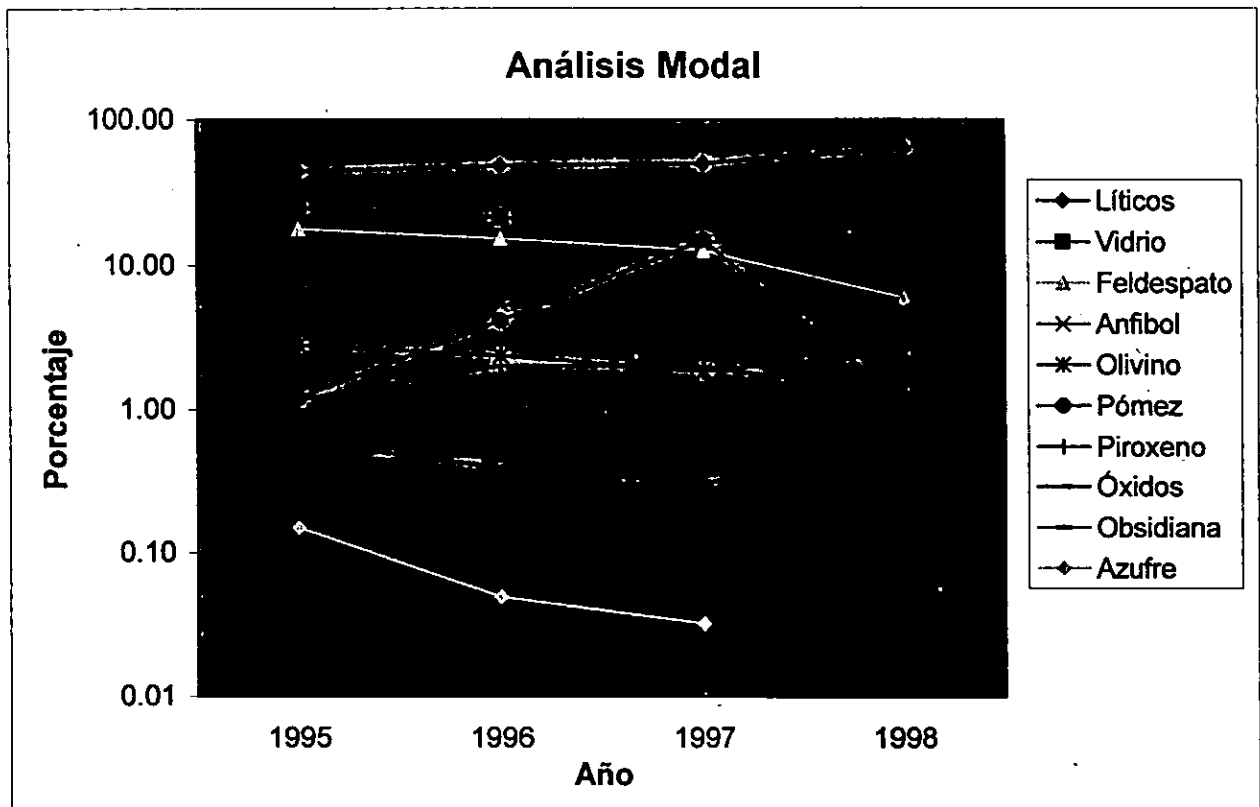
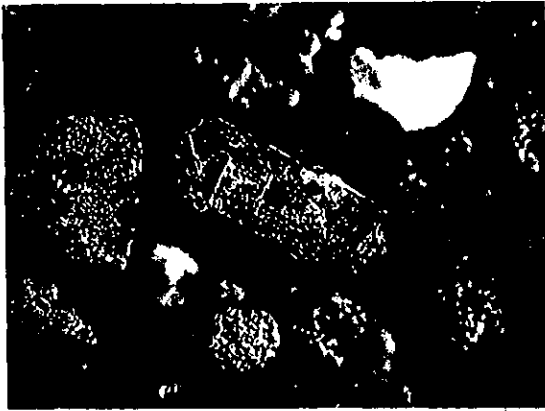


Figura 5.10 Resumen de análisis modal por año



En las composiciones químicas no se observan tendencias de variación claras, pero la composición de los vidrios tienden a ser más constantes, mientras que las pómez son más variables en cantidad de sílice y álcalis, en cuanto a la morfología de las pómez observamos cambios en textura y vesicularidad, es decir, que conforme pasa el tiempo éstas son más vesiculares. La mayoría de los feldespatos tienden a ser algo más anortíticos que albiticos

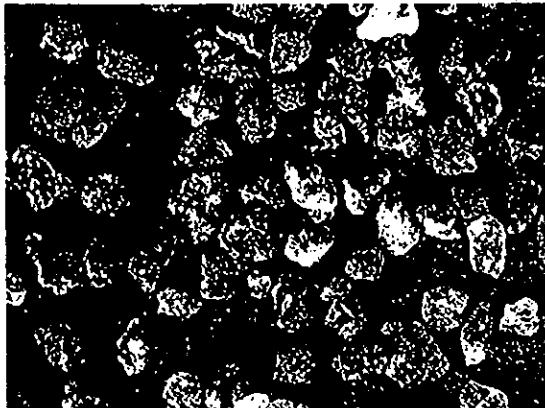
Gran parte de los granos de olivino, anfíbol, piroxeno y feldespato son euedrales que presentan mayor angulosidad por ruptura de los mismos al momento de su emisión. En imágenes obtenidas con el microscopio electrónico se revelan éstas características morfológicas de gran importancia en las partículas de cenizas; de las cuales destacan la angulosidad y la vesicularidad de algunas de ellas (ver sección de fotografías y fotomicrografías); las fotografías fueron tomadas de ceniza volcánica de tamaño 2φ.



Aspecto general de ceniza volcánica sin haber realizado la separación granulométrica.



Vidrio



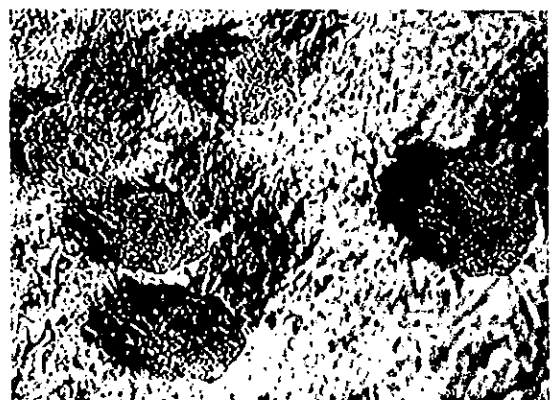
Granos de ceniza volcánica, en este caso tenemos la fracción más abundante, con tamaño de grano de 4 Phi.



Pómez

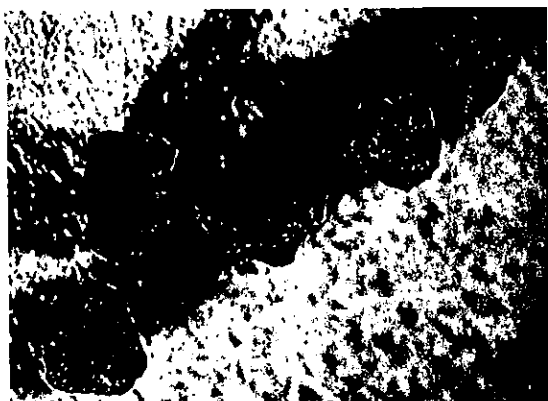


Olivino



Feldespato

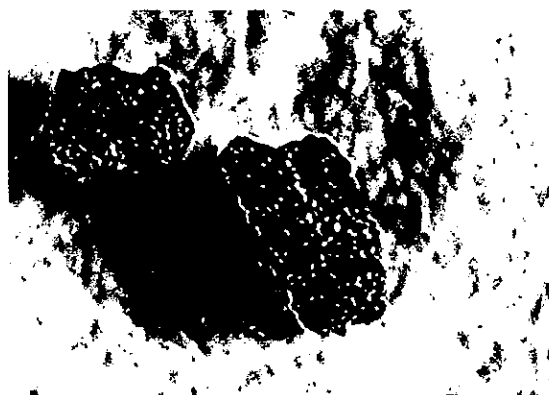




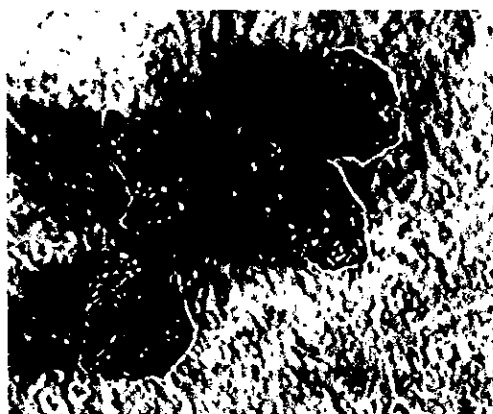
Lítico



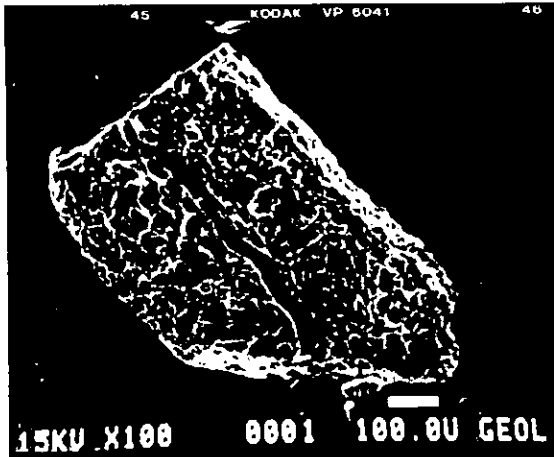
Oxido



Anfíbol

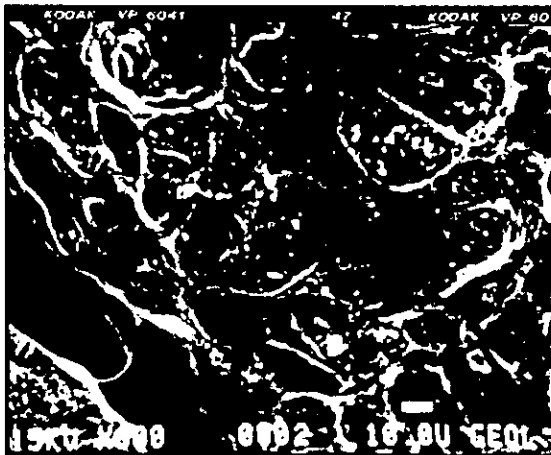


Obsidiana



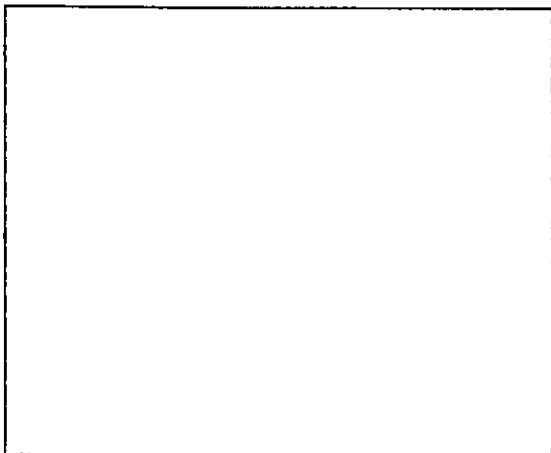
**Microfotografía No.1**  
Muestra M2 Nealtican, Pue. 11 de mayo de 1997  
Fracción 1.5 $\Phi$ , 0.35mm

Granos de feldespato, se aprecia la morfología tabular característica de esta especie mineralógica; la superficie del grano se encuentra cubierta de una capa vítrea. El análisis semi-cuantitativo se realizó en la fractura longitudinal que se observa en grano.



**Microfotografía No.2**  
Muestra M2 Nealtican, Pue. 11 de mayo de 1997  
Fracción 1.5 $\Phi$ , 0.35mm

Observamos las vesículas en la superficie del grano de feldespato mostrado en la microfotografía 1, pero ahora a un mayor aumento. Los fragmentos adheridos a la superficie también son de composición vítrea.



## VI. Conclusiones y recomendaciones

### VI.1 Conclusiones

- La dirección preferencial de vientos que transportaron las cenizas volcánicas es hacia el NE con respecto al volcán, en mas de 46% de los casos.
- Todas las muestras analizadas tienen tamaños que van de  $-1\phi$  (2mm) a  $4\phi$  (0.0625mm).
- Las muestras que se analizaron en su parte fina tienen tamaños  $>4\phi$  y  $<9\phi$ , y presentan hasta tres modas en dicha fracción fina.
- Se definieron tres facies en base al número de modas con respecto a la distancia:
  - a) facies proximal (distancia de 0 a 10 km) (1 moda)
  - b) facies media (distancia  $>10$  km y  $<50$  km) ( $\geq 1$  moda)
  - c) facies distal (distancia  $>50$  km) (1 moda)
    - Las muestras de 1995 tienen  $> 83\%$  de sus tamaños mas abundantes en  $4\phi$
    - Las muestras de 1996 tienen el 40% de sus tamaños mas abundantes en  $>4\phi$
    - Las muestras de 1997 tienen  $> 35\%$  de sus tamaños mas abundantes en  $1.5\phi$
    - Las muestras de 1998 tienen el 60% de sus tamaños mas abundantes en  $2\phi$
    - Comportamiento unimodal en muestras de 1995, 1997 y 1998.
    - Las muestras de 1997 tienen una, dos y hasta tres modas.
    - Las facies proximal y distal presentan únicamente una moda.
    - Todas las muestras que tienen tres modas pertenecen a la facie media.
- La fragmentación ha sido más eficaz con el paso del tiempo, reflejo directo de mayor explosividad.

- El análisis modal indica que la pómez de 1995 es diferente a la de 1996, 1997 y 1998; aumenta de 1995 a 1997 y para 1998 disminuye.
- La pómez de 1996 a 1998 varía poco en color y aumenta en vesicularidad.
- El olivino se mantiene en un porcentaje bajo de incidencia (1.5-3%) pero se observa un cambio de coloración de verde oscuro en los primeros años a verde claro para 1997 y 1998. Los cristales de olivino tienen una composición forsterítica, pero con el paso del tiempo, tiende hacia una composición fayalítica.
- En todas las muestras, los fragmentos líticos mantuvieron el porcentaje más alto de incidencia.
- El vidrio, feldespatos y anfíbol; alcanzan porcentajes considerables sin pasar del 30%.
- Los análisis químicos indican que la mayor parte de los granos de pómez analizados con EDX presenta una composición andesítica y dacítica.
- En general la explosividad volcánica va en aumento

### VI.2 Recomendaciones

- Concluir los análisis granulométricos de la parte fina de las muestras que se revisaron en el presente trabajo.
- Realizar el análisis granulométrico y modal de cenizas emitidas por el volcán Popocatepetl que no se hayan contemplado en el presente trabajo (después de 1998); para completar el registro de cambios en tamaños, composición mineralógica y química.

**Bibliografía**

Araña S. V. y Ortiz R. R.; 1984: "Volcanología", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. p81-85

Barth, T. F. W. ; 1952: "Theoretical petrology", John Wiley & Sons, Inc., New York.

Burnham, C.W., 1979; "The importance of volatile constituents". In Yoder, H.S. , Jr., ed., The evolution of igneous rocks. Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 3, p439-482.

Bowen, N. L., 1928; "The evolution of igneous rocks", Princeton University Press, Princeton, N. J.

Carey, Steven, and Sparks R.S.J., 1986: "Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns", Bull. Volcano., p48,109-125

Carrasco Núñez G., 1985, "Estudio geológico del volcán Popocatépetl" Facultad de Ingeniería, UNAM, México D. F. p. 28, 29, 35

Cas, V. A. and Wright F.; 1987: "Volcanic Successions modern and ancient" ed. Allen & Un win London first published in. p19,20,21, 33-41, 54

Casadevall J.T., 1991, "Volcanic ash and aviation safety": Proceedings of the first international symposium on volcanic ahs and safety, Seattle, Washington,. U. S. Geological Survey Bulletin 2047

Cepeda D. L.; 1985: "Apuntes de Petrología Ígnea", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F. p.9,10-14

Carmichael, I. S. E., Turner, F.J. , Verhoogen, J., 1974: "Igneous petrology. McGraw-Hill Book Co. New York. P89

Deer W.A., Howie R.A., and Zussman J., 1966: "An Introduction to the Rock Forming Minerals", Longman Group Limited; London.

Delgado-Granados, H., Carrasco, N. G., Urrutia, F. J., Casanova, M., 1988. "Analysis of the Eruptive Records of the Popocatépetl Volcano, Mexico". Kagoshima International Conference on Volcanoes. Proceedings. 510-513.

Delgado H., Panfil, M., González, E.A., Uruñuela, G., Plunket, P., Gardner, T., Abrams, M., 1994. Lessons From Popocatépetl Volcano (México): Ancient Settlement Buried by Lavas, Mudflows, and Air-fall Deposits. American Geophysical Union Annual Meeting, EOS; 75,44, 737.

- Delgado-Granados, H., Carrasco, N. G., Urrutia, F. J.; 1999. "Geology of Popocatepetl volcano". Simposio Internacional Volcán Popocatepetl. Resumen. Instituto de Geofísica UNAM, pp12.
- Delgado-Granados, H., Cárdenas-González, L., Piedad-Sánchez.; 2000: "Sulfur dioxide emissions from Popocatepetl volcano (Mexico): Case study of a High-emission rate, passively-degassing erupting volcano". Journal of Volcanology and Geothermal research, 2000. p. 3-7
- Fisher R. V. and Schmincke H. U.; 1984: "Pyroclastic Rocks", Springer-Verlag. P. 11, 15, 35, 36, 59, 60, 61, 116-118, 197
- Flenger S.L., Heckman J.W., and Klomparens K.L., 1993: "Scanning and transmission electron microscopy and introduction", W. H. Freeman and Company, New York.
- Folk L. Robert; 1969: "Petrología de las rocas sedimentarias" Traducción, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F. p. 45,63
- Gerald M. Friedman, John E. Sanders, and David C. Kopaska-Merkel, 1992: "Principles of Sedimentary Deposits Stratigraphy and Sedimentology" ed. Macmillan p. 63-69
- Global Volcanism Network Bulletin, 1994. Small eruption on 21 December ends decades-long slumber. 19, 2-4.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1996. Explosion on 30 April kills five climbers near the crater rim. 21, 4.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998a. Minor ash ejections on 26 January and 11 February. 23, 1, 5.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998b. Cyclical dome extrusion that by late 1997 filled one-third of crater capacity. 23, 2, 8-10.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998c. Moderate activity continues, smoke hinders observation. 23, 5, 8-9.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998d. Stable with moderate steam, gas, and occasional ash plumes during June. 23, 6, 6.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998e. Ongoing exhalations; mid-August earthquake and 4-5 km ash plume. 23, 7, 6-7.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998f. Moderate intermittent ash emissions continue. 23, 8, 6.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1998g. Several episodes of ash emission during September. 23, 9, 8.

Global Volcanism Network Bulletin, 1998h. Moderate eruptions, 17 October ashfall in Mexico City. 23, 10, 9.

Guía Verdi, S.A de C.V., 2000, "Atlas de carreteras", México. p. 31

Goff, F., Janik, C.J., Delgado, H., C., Counce, D., Stimac, J.A., Siebe, C., Love, S.P., Williams, S.N., Fischer, T., Johnson, L., 1998. Geochemical Surveillance of Magmatic Volatiles at Popocatepetl Volcano, México. Geological Society of America Bulletin. 110, 695-710.

González H. A. E., 2000: "Estudios de detalle estratigráfico y sedimentológico del lahar de San Nicolás en el flanco noreste del volcán Popocatepetl", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. p. 30, 96,

Heiken Grant and Wohletz Kenneth; 1987: "Tephra deposits associated with silicic domes and lava flows", Geological Society of America, Special paper 212, 1987. p.55,56

Heiken Grant and Wohletz Kenneth; 1992: "Volcanic Ash", Los Alamos National Laboratory, University of California Press, Second Printing.

Macias Vázquez J.L., Carrasco Nuñez G., Delgado Granados H., Martín Del Pozzo A. L., Siebe Grabach C., Hoblitt R. P., Sheridan M. F., Tilling R.I.; 1995 " Mapa de peligros del volcán Popocatepetl", Instituto de Geofísica, UNAM.

Martí Joan y Araña Vicente; 1993: "La volcanología actual", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. p. 22,70, 198

Martin del Pozzo, A. L.; 1982: "Monogenetic Vulcanism in the Sierra Chichinautzin, México", Bulletin of Volcanology, V. 45(1), p.9-29

Medina N. F.; 1980: "Volcanología y evaluación del riesgo volcánico en México", Anales Instituto de Geofísica, UNAM.

Newhall, C.G., Punongbayan R.S., Gerlach T.M., 1994. Tight and Leaky Volcanoes Implications for Forecasting Explosive Eruptions. Accademia Nazionale Dei Lincei. 112, 13-21.

Piedad S. N., 2000: Aplicación de la espectrometría de correlación en la evaluación de peligros volcánicos: "El caso del volcán Popocatepetl". Escuela superior de ingeniería y arquitectura, IPN. p. 19, 20, 37

Pettijohn F. J.; 1975: "Sedimentary Rocks" Third Edition ed. Harper y Row Publishers

Reyes S. A. M.; 1993: "Microscopía electrónica de barrido y microanálisis aplicado a geoquímica", Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México. p. 4, 7

- Reyes S. A. M. y Martiny B., 1993: "Instructivo básico para el manejo del microscopio electrónico de barrido Jeol-35 y el equipo de energía dispersiva Tracor Northern", Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Siebe, C., Abrams, M., Macias, J.L., 1995 "Derrumbes Gigantes, Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatepetl": Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995. CENAPRED-UNAM, 195-220.
- Siebe, C., Abrams, M., Macias, J.L., Obenholzner J., 1996 "Repeated Volcanic Disaster in Prehispanic Time at Popocatepetl, Central Mexico: Pasta Key to the Future?", *Geology* 24, 399-402.
- Simkin, T., Siebert L., McClelland L., Bridge D., Newhall C., and Latter J.H.; 1981: "Volcanoes of the World: A Regional Directory, Gazetteer, and Chronology of Volcanism During the Last 10,000 Years", 240 pp., Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pennsylvania,.
- Sparks, R.S.J. and Walker, G.P.L.; 1973: "The ground surge deposit: a third type of pyroclastic rock". *Nature* 241. p8, 62-64.
- Sparks, R.S.J.; 1978: "The dynamics of bubble formation and growth in magmas", A review and análisis. *J. Volcanol. Geotherm.* p3, 4, 1-37
- Stix, J., Zapata G., J. A., Calvache V., M.L., Cortés J., G.P., Fischer, T.P., Gómez M., D., Narváez M., L., Ordóñez V., M., Ortega E., A.m Torres C., R., Williams, S. N., 1993. "A model of degassing at Galeras volcano", Colombia, 1998-1993. *Geology* 21, 963-967.
- Tilling, R. I., 1993: "Los peligros volcánicos", Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos. p.13
- Vázquez Nin G. y Echeverría O.; 2000: "Introducción a la microscopía electrónica aplicada a las ciencias biológicas" Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias; Fondo de Cultura Económica. México, D. F. p13
- Wright, J.V.; 1980: "Stratigraphy and geology of the welded air fall tuffs of Pantelleria, Italy". *Geol. Rundsch.* p8, 69, 263, 291
- Walker, G.P.L.; 1973: "Explosive volcanic eruptions: a new classification scheme". *Geol. Rundsch.*, p4, 6, 9, 62
- Walker, G.P.L.; 1980: "Lengths of the lava flows, phil". *Trans. Royal Soc. London.*
- Walker, G.P.L.; 1980: "The Taupo Pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption *J. Volcano*". *Geotherm.* p4, 6, 8, 69
- Wallace P.J. and Gerlach T.M.; 1994: "Magmatic vapor source for sulfur dioxide released during volcanic eruptions: evidence from Mount Pinatubo". *Science* 265. p497, 498.



Werner C., C. Janik, F. Goff D. Counce, L. Johnson, C. Siebe, H. Delgado, S. Williams, and T. Fischer, 1997. Geochemistry of summit fumarole vapors and franking thermal/mineral waters at Popocatepetl volcano, Mexico. Los Alamos National Laboratory, Series report LA-13289-MS, 33.

Wilson, M.; 1989: "Igneous petrogenesis", Unwin Hyaman, London, 466

Yacamán Miguel José y Reyes J.; 1995: "Microscopía electrónica, Una visión del microcosmos" CONACYT, Fondo de Cultura Económica, México.

### Separación Granulométrica

Phi	M1		M2		M3		M4		M5	
	P. Total: 3.12 g		P. Total: 1.1 g		P. Total: 0.23 g		P. Total: 0.22 g		P. Total: 0.32 g	
	P. Tamizado: 3.12 g		P. Tamizado: 1.1 g		P. Tamizado: 0.23 g		P. Tamizado: 0.22 g		P. Tamizado: 0.32 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	0.00	0.00	0.91	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2.56	2.56	0.91	1.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	2.88	5.45	0.91	2.73	4.35	4.35	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.92	7.37	2.73	5.45	8.70	13.04	10.00	10.00	0.00	0.00
3.5	4.81	12.18	0.91	6.36	13.04	26.09	10.00	20.00	0.00	0.00
4	28.53	40.71	48.18	54.55	47.83	73.91	70.00	90.00	71.88	71.88
>4	58.65	99.36	44.55	99.09	26.09	100.00	10.00	100.00	25.00	96.88
TOTAL	99.36		99.09		100.00		100.00		96.88	

Phi	M6		M7		M8		M9		M10	
	P. Total: 0.23 g		P. Total: 1.87 g		P. Total: 0.45 g		P. Total: 18.93 g		P. Total: 2.56 g	
	P. Tamizado: 0.23 g		P. Tamizado: 1.87 g		P. Tamizado: 0.45 g		P. Tamizado: 10.81 g		P. Tamizado: 2.56 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	5.09	0.55	0.00	0.00
0	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	4.53	5.08	0.00	0.00
0.5	-	-	0.00	0.00	0.29	0.29	2.22	7.30	0.00	0.00
1	-	-	0.00	0.00	0.67	0.96	1.67	8.97	0.00	0.00
1.5	-	-	0.23	0.23	0.24	1.20	2.59	11.56	0.00	0.00
2	-	-	1.07	1.30	4.96	6.16	9.90	21.46	1.95	1.95
2.5	-	-	2.14	3.44	85.82	91.98	22.66	44.12	8.98	10.94
3	4.35	4.35	3.21	6.64	7.40	99.38	8.51	52.63	10.55	21.48
3.5	17.39	21.74	4.28	10.92	0.40	99.78	7.12	59.75	10.16	31.64
4	52.17	73.91	41.18	52.10	0.11	99.89	17.85	77.61	25.78	57.42
>4	26.09	100.00	47.06	99.16	0.00	99.89	16.93	94.54	41.80	99.22
TOTAL	100.00		99.16		99.89		99.07		99.22	

Phi	M11		M12		M13		M14		M15	
	P. Total: 47.63 g		P. Total: 18.35 g		P. Total: 12.77 g		P. Total: 33.67 g		P. Total: 37.14 g	
	P. Tamizado: 11.90 g		P. Tamizado: 9.16 g		P. Tamizado: 12.77 g		P. Tamizado: 8.80 g		P. Tamizado: 12.16 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	-	-	6.88	6.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	-	-	5.79	12.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.16
0.5	-	-	6.99	19.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.58
1	-	-	14.19	33.84	0.00	0.00	0.00	0.00	8.80	9.38
1.5	0.42	0.42	19.98	53.82	1.17	1.17	0.91	0.91	76.40	85.77
2	9.08	9.50	15.94	69.76	8.54	9.71	8.64	9.55	13.65	99.42
2.5	23.87	33.36	10.59	80.35	18.48	28.19	20.00	29.55	0.16	99.59
3	7.90	41.26	3.17	83.52	9.87	38.06	9.20	38.75	0.08	99.67
3.5	8.49	49.75	2.18	85.70	8.14	46.20	8.41	47.16	0.08	99.75
4	25.97	75.71	5.90	91.59	35.08	81.28	25.45	72.61	0.08	99.84
>4	23.78	99.50	7.53	99.13	17.85	99.14	26.82	99.43	0.08	99.92
TOTAL	99.50		99.13		99.14		99.43		99.92	

### Separación Granulométrica

Phi	M16		M17		M18		M19		M20	
	P. Total: 12.14 g		P. Total: 3.15 g		P. Total: 28.08 g		P. Total: 2.57 g		P. Total: 127.92 g	
	P. Tamizado: 6.31 g		P. Tamizado: 3.15 g		P. Tamizado: 12.35 g		P. Tamizado: 2.57 g		P. Tamizado: 10.10 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	7.61	7.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	78.61	86.21	0.00	0.00	0.16	0.16	0.00	0.00	0.10	0.10
0.5	13.31	99.52	0.00	0.00	0.24	0.40	0.19	0.19	0.50	0.59
1	0.16	99.68	0.32	0.32	0.65	1.05	5.26	5.46	0.79	1.39
1.5	0.16	99.84	0.63	0.95	1.94	3.00	71.78	77.24	8.81	10.20
2	0.16	100.00	1.27	2.22	6.07	9.07	22.53	99.76	53.47	63.66
2.5	0.00	100.00	1.90	4.13	14.66	23.72	0.14	99.90	31.09	94.75
3	0.00	100.00	1.90	6.03	4.86	28.58	0.05	99.95	2.28	97.03
3.5	0.00	100.00	1.59	7.62	4.86	33.44	0.02	99.97	1.39	98.42
4	0.00	100.00	19.37	26.98	16.03	49.47	0.18	100.15	1.39	99.80
4	0.00	100.00	72.38	99.37	49.72	99.19	0.00	100.15	0.20	100.00
TOTAL	100.00		99.37		99.19		100.15		100.00	

Phi	M21		M22		M23		M24		M25	
	P. Total: 13.84 g		P. Total: 40.09 g		P. Total: 77.60 g		P. Total: 37.07 g		P. Total: 3.33 g	
	P. Tamizado: 6.87 g		P. Tamizado: 10.60 g		P. Tamizado: 10.3 g		P. Tamizado: 37.07 g		P. Tamizado: 3.33 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.38	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.73	0.73	8.21	8.58	4.56	4.56	0.11	0.11	0.00	0.00
0.5	0.58	1.31	17.92	26.51	12.52	17.09	0.05	0.16	0.30	0.30
1	2.33	3.64	28.11	54.62	25.53	42.62	0.51	0.67	0.30	0.60
1.5	6.84	10.48	30.75	85.38	37.48	80.10	8.23	8.90	2.70	3.30
2	10.33	20.82	9.72	95.09	10.39	90.49	25.87	34.77	18.62	21.92
2.5	10.04	30.86	1.32	96.42	1.46	91.94	42.89	77.66	49.55	71.47
3	3.64	34.50	0.38	96.79	0.49	92.43	7.69	85.35	6.91	78.38
3.5	3.35	37.85	0.28	97.08	0.49	92.91	2.40	87.75	3.60	81.98
4	13.54	51.38	0.57	97.64	2.82	95.73	9.04	96.79	14.11	96.10
4	47.74	99.13	1.70	99.34	3.79	99.51	2.99	99.78	3.60	99.70
TOTAL	99.13		99.34		99.51		99.78		99.70	

Phi	M26		M27		M28		M29		M30	
	P. Total: 1.51 g		P. Total: 1055 g		P. Total: 1010 g		P. Total: 489.08 g		P. Total: 21.56 g	
	P. Tamizado: 1.51 g		P. Tamizado: 33.44 g		P. Tamizado: 23.45 g		P. Tamizado: 14.42 g		P. Tamizado: 21.56 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	1.15	0.00	0.00	1.25	1.25
0	1.99	1.99	0.69	0.69	18.17	19.32	0.14	0.14	15.49	16.74
0.5	1.99	3.97	3.23	3.92	24.31	43.62	1.39	1.53	21.06	37.80
1	2.65	6.62	17.22	21.14	9.94	53.56	10.55	12.07	11.09	48.89
1.5	1.99	8.61	25.51	46.65	13.43	66.99	19.57	31.64	12.99	61.87
2	2.65	11.26	14.41	61.06	25.37	92.37	13.32	44.97	24.77	86.64
2.5	5.30	16.56	23.86	84.93	0.72	93.09	27.62	72.59	8.30	94.94
3	3.31	19.87	3.11	88.04	0.34	93.43	3.47	76.06	1.11	96.06
3.5	6.62	26.49	1.64	89.68	0.64	94.07	1.73	77.79	0.60	96.66
4	44.37	70.86	5.26	94.95	0.21	94.29	7.98	85.77	1.11	97.77
4	29.14	100.00	4.07	99.01	5.42	99.70	14.09	99.86	2.09	99.86
TOTAL	100.00		99.01		99.70		99.86		99.86	

### Separación Granulométrica

Phi	M31		M32		M33		M34		M35	
	P. Total: 70.80 g		P. Total: 1.65 g		P. Total: 45.56 g		P. Total: 3.46 g		P. Total: 38.44 g	
	P. Tamizado: 13.00 g		P. Tamizado: 1.65 g		P. Tamizado: 10.22 g		P. Tamizado: 3.46 g		P. Tamizado: 38.44 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	1.23	1.23	0.61	0.61	4.50	4.50	2.31	2.31	0.03	0.03
0.5	4.49	5.72	1.82	2.42	12.04	16.54	13.58	15.90	0.36	0.39
1	15.29	21.01	5.45	7.88	27.20	43.74	39.31	55.20	3.93	4.32
1.5	33.04	54.06	18.79	26.67	35.32	79.06	32.37	87.57	23.65	27.97
2	29.64	83.70	24.24	50.91	16.73	95.79	5.49	93.06	47.61	75.57
2.5	9.20	92.90	42.42	93.33	1.86	97.65	5.78	98.84	18.73	94.30
3	0.87	93.77	4.24	97.58	0.39	98.04	0.58	99.42	0.60	94.90
3.5	0.72	94.49	0.61	98.18	0.29	98.34	0.29	99.71	0.13	95.03
4	1.74	96.23	1.21	99.39	0.88	99.22	0.29	100.00	0.52	95.55
>4	3.41	99.64	0.61	100.00	0.49	99.71	0.00	100.00	3.59	99.14
TOTAL	99.64		100.00		99.71		100.00		99.14	

Phi	M36		M37		M38		M39		M40	
	P. Total: 53.40 g		P. Total: 42.17 g		P. Total: 46.17 g		P. Total: 37.88 g		P. Total: 34.79 g	
	P. Tamizado: 53.40 g		P. Tamizado: 42.17 g		P. Tamizado: 46.17 g		P. Tamizado: 37.88 g		P. Tamizado: 34.79 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.64	0.64	0.43	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	9.42	10.06	7.11	7.54	0.02	0.02	0.00	0.00	11.73	11.73
0.5	12.53	22.58	11.64	19.18	0.35	0.37	0.00	0.00	12.01	23.74
1	4.33	26.91	4.62	23.81	5.67	6.04	0.32	0.32	5.23	28.97
1.5	7.81	34.72	6.21	30.02	31.21	37.25	0.63	0.95	11.35	40.33
2	27.08	61.80	28.01	58.03	29.04	66.30	1.27	2.22	29.23	69.56
2.5	17.75	79.55	15.46	73.49	16.16	82.46	1.90	4.13	14.11	83.67
3	3.73	83.28	3.01	76.50	6.09	88.54	1.90	6.03	2.16	85.83
3.5	2.00	85.28	2.09	78.59	1.82	90.36	1.59	7.62	1.41	87.24
4	4.76	90.04	5.57	84.16	2.25	92.61	19.37	26.98	5.55	92.79
>4	9.33	99.36	15.27	99.43	7.00	99.61	72.38	99.37	6.41	99.20
TOTAL	99.36		99.43		99.61		99.37		99.20	

Phi	M41		M42		M43		M44		M45	
	P. Total: 3.25 g		P. Total: 3.58 g		P. Total: 57.30 g		P. Total: 177.69 g		P. Total: 27.14 g	
	P. Tamizado: 3.25 g		P. Tamizado: 3.58 g		P. Tamizado: 13.90 g		P. Tamizado: 11.63 g		P. Tamizado: 27.14 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.00	0.00	0.00	0.00	3.67	3.67	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	4.75	4.75	13.24	16.91	0.09	0.09	0.07	0.07
1	0.00	0.00	12.01	16.76	27.63	44.53	0.17	0.26	3.50	3.57
1.5	10.46	10.46	32.12	48.88	33.45	77.99	0.43	0.69	62.23	65.81
2	32.00	42.46	30.17	79.05	18.06	96.04	4.47	5.16	32.87	98.67
2.5	24.31	66.77	8.10	87.15	2.45	98.49	55.89	61.05	0.55	99.23
3	6.15	72.92	2.51	89.66	0.43	98.92	16.60	77.64	0.07	99.30
3.5	3.69	76.62	1.96	91.62	0.22	99.14	7.74	85.38	0.07	99.37
4	11.38	88.00	5.03	96.65	0.36	99.50	11.69	97.08	0.44	99.82
>4	11.08	99.08	3.07	99.72	0.50	100.00	2.75	99.83	0.18	100.00
TOTAL	99.08		99.72		100.00		99.83		100.00	

### Separación Granulométrica

Phi	M46		M47		M48		M49		M50	
	P. Total: 9.83 g		P. Total: 32.05 g		P. Total: 8.76 g		P. Total: 132 g		P. Total: 27.63 g	
	P. Tamizado: 9.83 g		P. Tamizado: 32.05 g		P. Tamizado: 8.76 g		P. Tamizado: 8.95 g		P. Tamizado: 27.63 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00	0.00
0	1.42	1.42	0.12	0.12	2.97	3.31	3.46	3.80	0.00	0.00
0.5	1.12	2.54	0.41	0.53	7.19	10.50	11.51	15.31	0.00	0.00
1	1.32	3.87	0.72	1.25	14.73	25.23	22.91	38.21	0.04	0.04
1.5	1.83	5.70	1.09	2.34	11.76	36.99	26.03	64.25	0.29	0.33
2	5.09	10.78	29.27	31.61	6.39	43.38	7.49	71.73	15.16	15.49
2.5	77.52	88.30	59.84	91.45	6.16	49.54	2.46	74.19	46.07	61.56
3	4.17	92.47	3.31	94.76	3.77	53.31	1.34	75.53	5.25	66.81
3.5	1.42	93.90	0.34	95.10	3.31	56.62	1.23	76.76	5.68	72.49
4	3.87	97.76	0.53	95.63	12.56	69.18	5.36	82.12	11.36	83.86
>4	2.03	99.80	3.74	99.38	30.25	99.43	17.43	99.55	15.67	99.53
TOTAL	99.80		99.38		99.43		99.55		99.53	

Phi	M51		M52		M53		M54		M55	
	P. Total: 3.40 g		P. Total: 1.42 g		P. Total: 1055 g		P. Total: 177.69 g		P. Total: 3.13 g	
	P. Tamizado: 3.40 g		P. Tamizado: 1.42 g		P. Tamizado: 33.44 g		P. Tamizado: 11.63 g		P. Tamizado: 3.13 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00
0	2.35	2.35	0.00	0.00	3.52	3.52	0.11	0.16	0.64	0.64
0.5	10.88	13.24	0.00	0.00	12.15	15.67	0.22	0.38	0.32	0.96
1	24.12	37.35	0.00	0.00	24.54	40.21	0.43	0.81	0.32	1.28
1.5	35.29	72.65	0.00	0.00	32.85	73.06	13.12	13.93	0.32	1.60
2	10.00	82.65	4.23	4.23	8.47	81.53	6.32	20.25	0.96	2.56
2.5	2.35	85.00	74.65	78.87	2.24	83.77	13.07	33.32	3.83	6.39
3	0.88	85.88	11.27	90.14	0.88	84.65	4.21	37.53	7.99	14.38
3.5	0.29	86.18	2.11	92.25	0.40	85.05	9.56	47.08	15.97	30.35
4	6.18	92.35	2.11	94.37	3.36	88.41	35.42	82.51	54.95	85.30
>4	7.06	99.41	0.70	95.07	10.79	99.20	16.52	99.03	14.06	99.36
TOTAL	99.41		95.07		99.20		99.03		99.36	

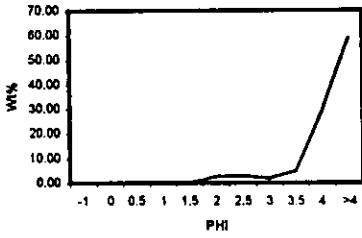
Phi	M56		M57		M58		M59		M60	
	P. Total: 46.49 g		P. Total: 62.12 g		P. Total: 26.45 g		P. Total: 15.52 g		P. Total: 22.44 g	
	P. Tamizado: 10.88 g		P. Tamizado: 15.15 g		P. Tamizado: 13.22 g		P. Tamizado: 15.52 g		P. Tamizado: 11.42 g	
	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo	Wt%	Acumulativo
-1	0.37	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.55	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.18	0.18
0.5	0.46	1.38	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.26	0.26	0.44
1	0.64	2.02	0.13	0.20	0.08	0.15	0.08	1.48	0.70	1.14
1.5	2.11	4.14	1.52	1.72	0.08	0.23	0.08	20.54	6.35	7.49
2	7.35	11.49	58.88	60.59	11.57	11.80	11.57	61.33	64.62	72.12
2.5	17.28	28.77	17.10	77.69	38.20	50.00	38.20	77.76	19.44	91.56
3	11.76	40.53	3.83	81.52	3.33	53.33	3.33	83.37	2.80	94.36
3.5	12.59	53.13	3.04	84.55	2.27	55.60	2.27	86.39	2.01	96.37
4	36.40	89.52	7.66	92.21	10.06	65.66	10.06	91.61	2.19	98.56
>4	9.56	99.08	7.46	99.67	33.51	99.17	33.51	99.02	0.53	99.09
TOTAL	99.08		99.67		99.17		99.17		99.09	

## APÉNDICE II

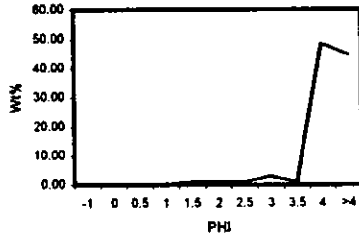
# **CURVAS DE FRECUENCIA DE DIÁMETRO DE GRANO**

## Curvas de frecuencia de diámetro de grano

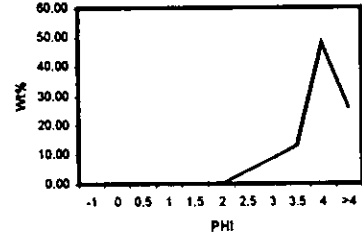
**M1**



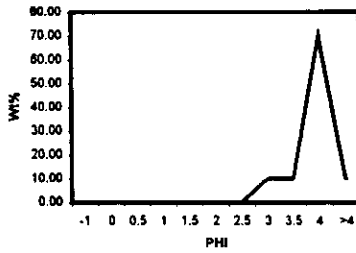
**M2**



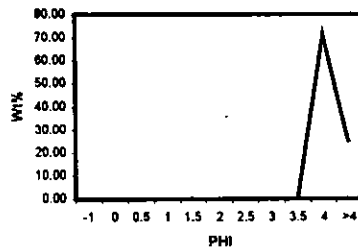
**M3**



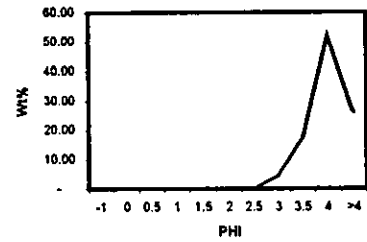
**M4**



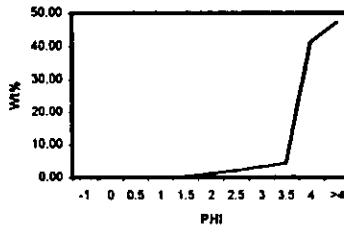
**M5**



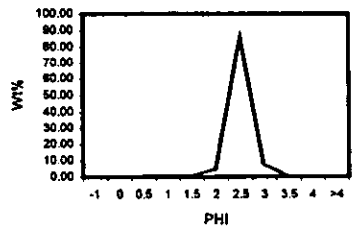
**M6**



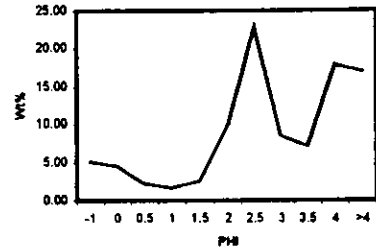
**M7**



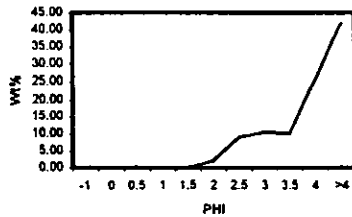
**M8**



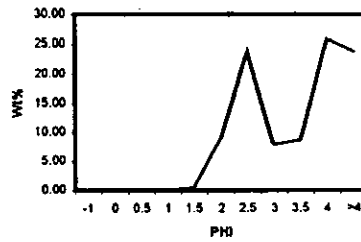
**M9**



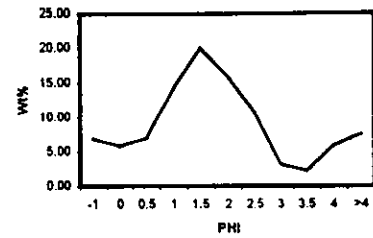
**M10**



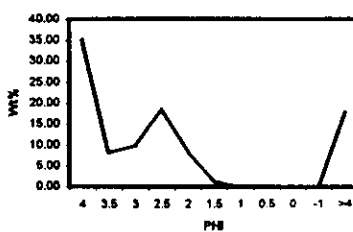
**M11**



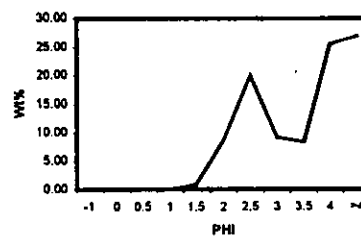
**M12**



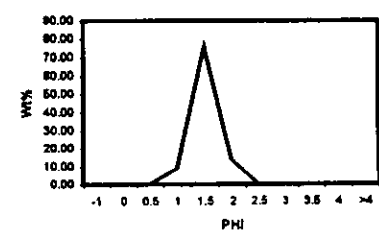
**M13**



**M14**

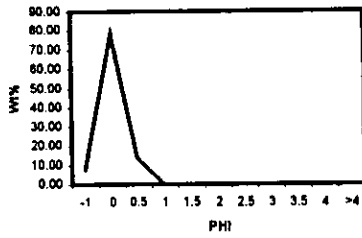


**M15**

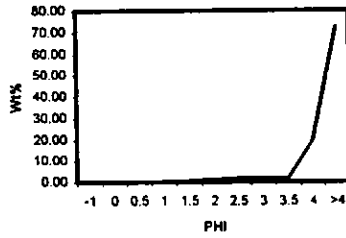


## Curvas de frecuencia de diámetro de grano

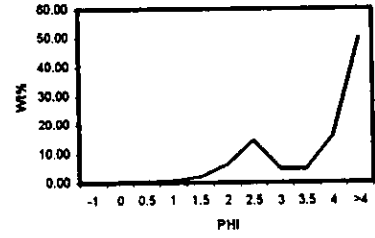
**M16**



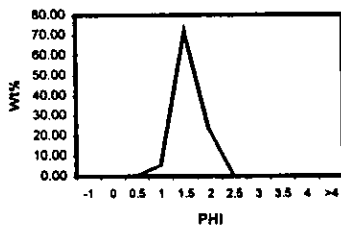
**M17**



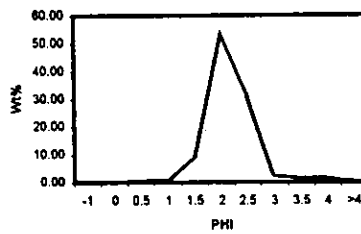
**M18**



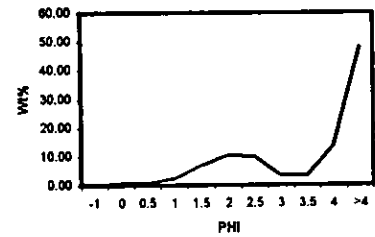
**M19**



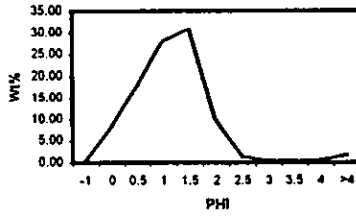
**M20**



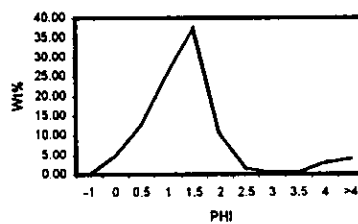
**M21**



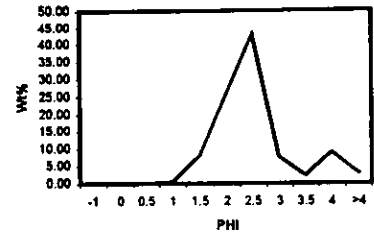
**M22**



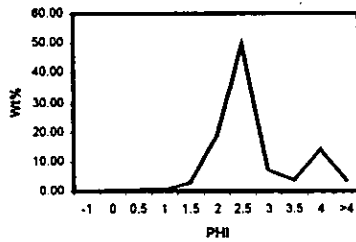
**M23**



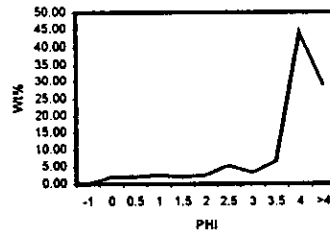
**M24**



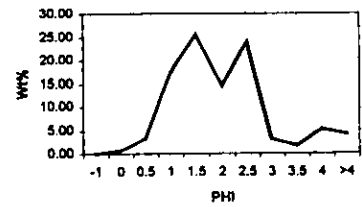
**M25**



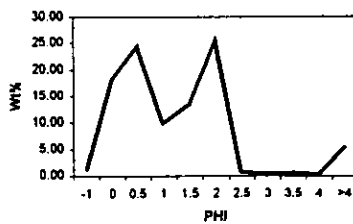
**M26**



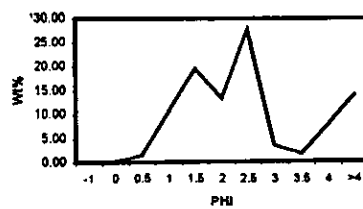
**M27**



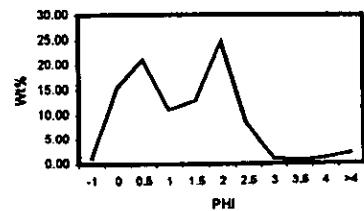
**M28**



**M29**



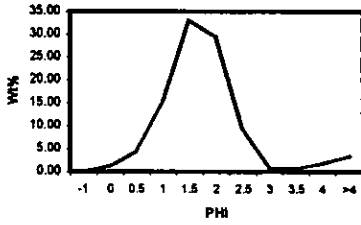
**M30**



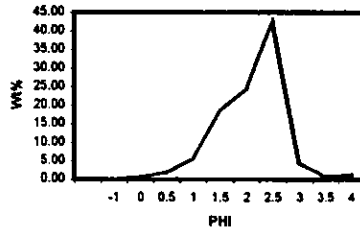


Curvas de frecuencia de diámetro de grano

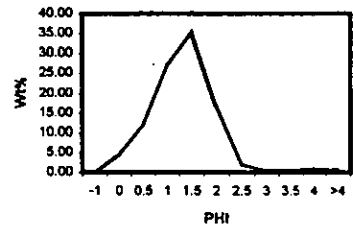
M31



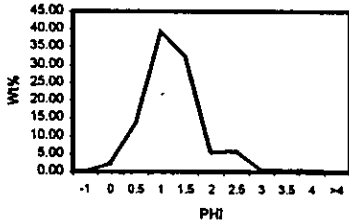
M32



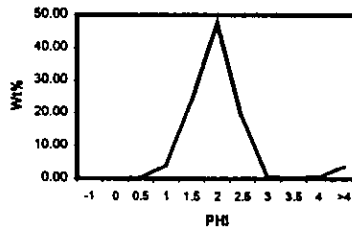
M33



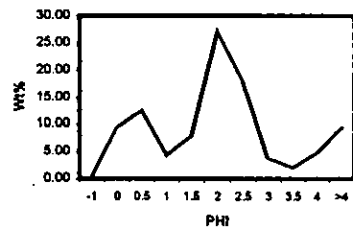
M34



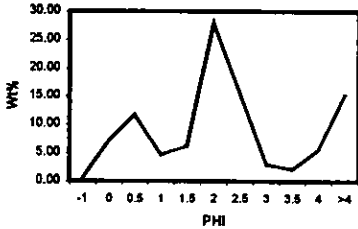
M35



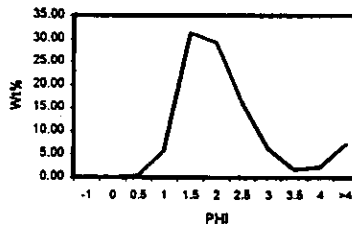
M36



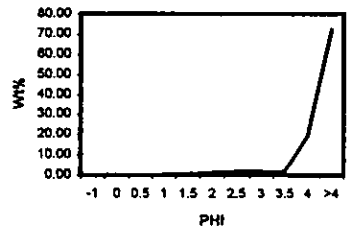
M37



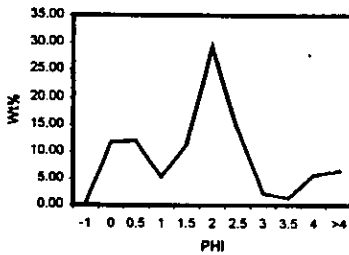
M38



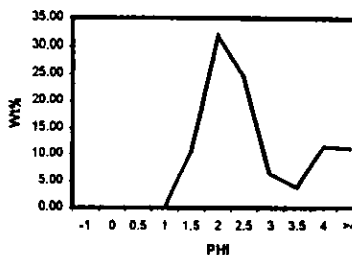
M39



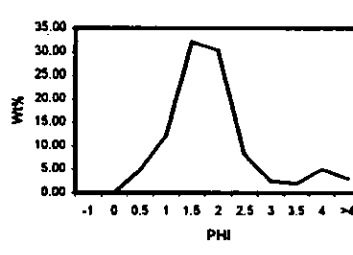
M40



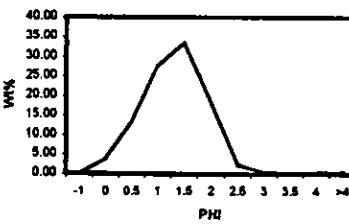
M41



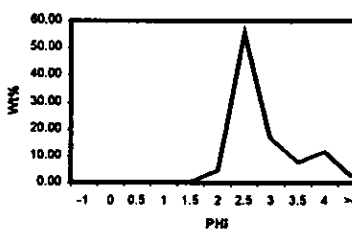
M42



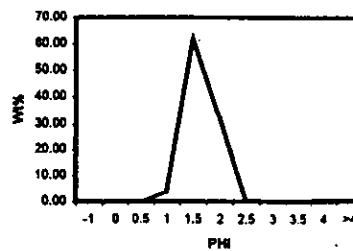
M43



M44

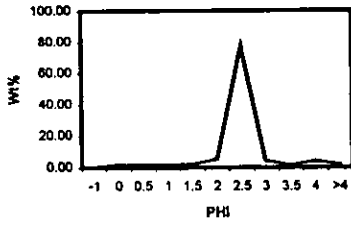


M45

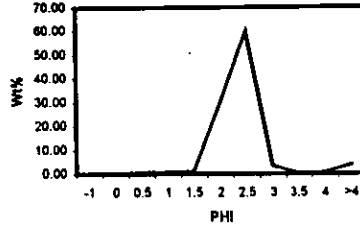


Curvas de frecuencia de diámetro de grano

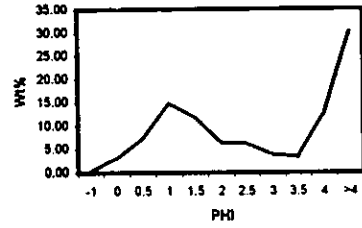
M46



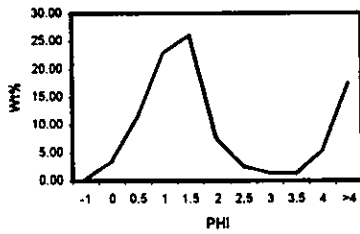
M47



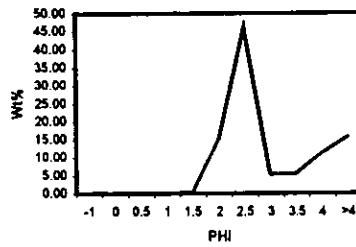
M48



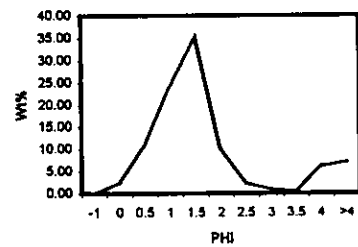
M49



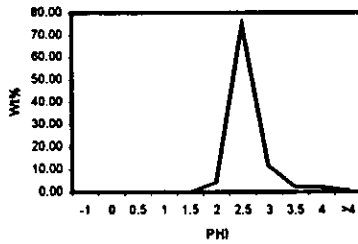
M50



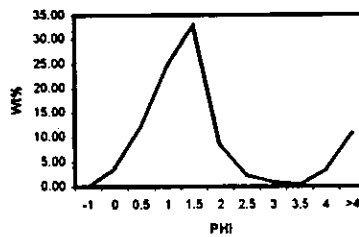
M51



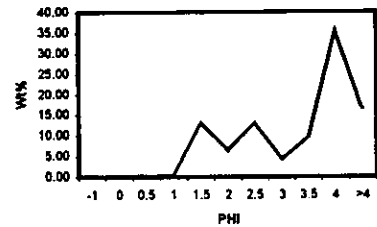
M52



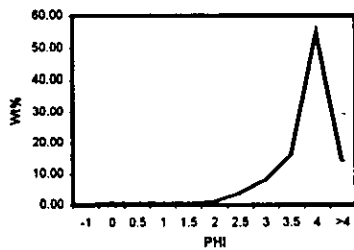
M53



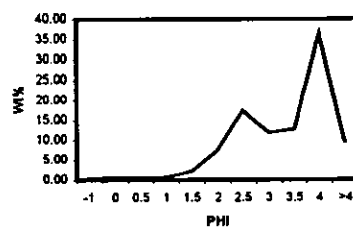
M54



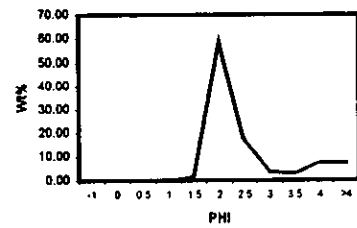
M55



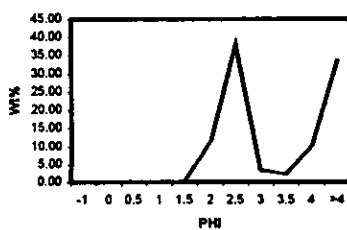
M56



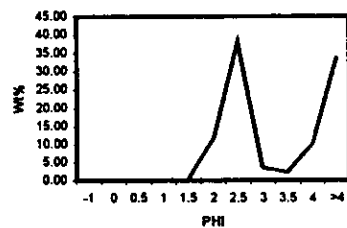
M57



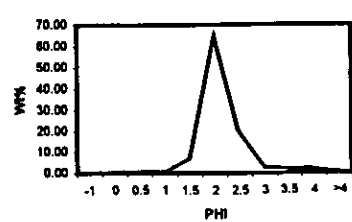
M58



M59



M60



## APÉNDICE III

# **CURVAS ACUMULATIVAS PROBABILÍSTICAS**

### Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M1	23 Km	14-Ene-95	Atlixco	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	12	1.660	1.660
2	Olivino	25	3.458	5.118
3	Piroxeno	15	2.075	7.192
4	Vidrio	190	26.279	33.472
5	Feldespatos	122	16.874	50.346
6	Líticos	257	35.546	85.892
7	Obsidiana	2	0.277	86.169
8	Óxidos	2	0.277	86.445
9	Azufre	5	0.692	87.137
10	Anfibol	93	12.863	100.000
	Total	723	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M2	46.7 Km	02-Feb-95	Aerop.,Pue	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	11	0.69	0.69
2	Olivino	18	1.13	1.83
3	Piroxeno	10	0.63	2.46
4	Vidrio	520	32.77	35.22
5	Feldespatos	310	19.53	54.76
6	Líticos	672	42.34	97.10
7	Obsidiana	3	0.19	97.29
8	Óxidos	5	0.32	97.61
9	Anfibol	38	2.39	100.00
10				
	Total	1587	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M3	46.7 Km	03-Feb-95	Aerop.,Pue	3.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	66	4.11	4.11
2	Olivino	11	0.68	4.79
3	Piroxeno	11	0.68	5.48
4	Vidrio	327	20.36	25.84
5	Feldespatos	300	18.68	44.52
6	Líticos	825	51.37	95.89
7	Obsidiana	11	0.68	96.58
8	Óxidos	33	2.05	98.63
9	Anfibol	22	1.37	100.00
10				
	Total	1606	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M4	46.7 Km	06-Feb-95	Aerop.,Pue	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	5	0.35	0.35
2	Olivino	42	2.96	3.31
3	Piroxeno	28	1.83	5.15
4	Vidrio	135	9.52	14.67
5	Feldespatos	470	33.15	47.81
6	Líticos	610	43.02	90.83
7	Obsidiana	17	1.20	92.03
8	Óxidos	10	0.71	92.74
9	Anfibol	103	7.26	100.00
10				
	Total	1418	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M5	46.7 Km	09-Feb-95	Aerop.,Pue	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	2	0.20	0.20
2	Olivino	63	6.42	6.63
3	Piroxeno	3	0.31	6.93
4	Vidrio	244	24.87	31.80
5	Feldespatos	119	12.13	43.93
6	Líticos	420	42.81	86.75
7	Obsidiana	2	0.20	86.95
8	Óxidos	0	0.00	86.95
9	Azufre	2	0.20	87.16
10	Anfibol	126	12.84	100.00
	Total	981	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M6	46.7 Km	10-Feb-95	Aerop.,Pue	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	2	0.20	0.20
2	Olivino	21	2.13	2.34
3	Piroxeno	15	1.52	3.86
4	Vidrio	350	35.53	39.39
5	Feldespatos	63	6.40	45.79
6	Líticos	490	49.75	95.53
7	Obsidiana	0	0.00	95.53
8	Óxidos	2	0.20	95.74
9	Anfibol	42	4.26	100.00
10				
	Total	985	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M7	23 Km	05-Mar-96	Atlixco	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	4	0.451	0.451
2	Olivino	13	1.466	1.917
3	Piroxeno	24	2.706	4.622
4	Vidrio	270	30.440	35.062
5	Feldespatos	183	20.631	55.693
6	Líticos	315	35.513	91.206
7	Obsidiana	1	0.113	91.319
8	Óxidos	0	0.000	91.319
9	Anfibol	77	8.681	100.000
10				
	Total	887	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M8	35 Km	10-Mar-96	Cholula,Pue.	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum
1	Pomez	34	11.85	11.85
2	Olivino	10	3.48	15.33
3	Piroxeno	2	0.70	16.03
4	Vidrio	58	19.51	35.54
5	Feldespatos	27	9.41	44.95
6	Líticos	134	46.69	91.64
7	Obsidiana	1	0.35	91.99
8	Óxidos	2	0.70	92.68
9	Anfibol	21	7.32	100.00
10				
	Total	287	100.00	100.00

## Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M9	2.3 Km	10-Mar-96	E. Canario	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	23	8.30	8.30
2	Olivino	4	1.44	9.75
3	Piroxeno	2	0.72	10.47
4	Vidrio	32	11.55	22.02
5	Feldespatos	90	32.49	54.51
6	Líticos	115	41.52	96.03
7	Obsidiana	2	0.72	96.75
8	Óxidos	0	0.00	96.75
9	Anfibol	9	3.25	100.00
10	Total	277	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M10	23 Km	12-Mar-96	Atlixco	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	7	0.985	0.985
2	Olivino	45	6.329	7.314
3	Piroxeno	58	8.158	15.471
4	Vidrio	120	16.878	32.349
5	Feldespatos	90	12.658	45.007
6	Líticos	291	40.928	85.935
7	Obsidiana	3	0.422	86.357
8	Óxidos	3	0.422	86.779
9	Anfibol	94	13.221	100.000
10	Total	711	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M11	1.16 Km	30-Mar-96	Queretano	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	8	0.70	0.70
2	Olivino	25	2.18	2.88
3	Piroxeno	13	1.13	4.01
4	Vidrio	406	35.43	39.44
5	Feldespatos	168	14.66	54.10
6	Líticos	470	41.01	95.11
7	Obsidiana	3	0.26	95.38
8	Óxidos	2	0.17	95.55
9	Anfibol	51	4.45	100.00
10	Total	1146	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M12	0 Km	11-Abr-96	Cráter V.	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	4	2.76	2.76
2	Olivino	0	0.00	2.76
3	Piroxeno	0	0.00	2.76
4	Vidrio	2	1.38	4.14
5	Feldespatos	19	13.10	17.24
6	Líticos	118	81.38	98.62
7	Obsidiana	0	0.00	98.62
8	Óxidos	0	0.00	98.62
9	Anfibol	2	1.38	100.00
10	Total	145	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M13	1 Km	20-Abr-96	Costado V.	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	7	0.81	0.81
2	Olivino	31	3.59	4.40
3	Piroxeno	3	0.35	4.75
4	Vidrio	175	20.28	25.03
5	Feldespatos	120	13.90	38.93
6	Líticos	455	52.72	91.66
7	Obsidiana	7	0.81	92.47
8	Óxidos	0	0.00	92.47
9	Anfibol	65	7.53	100.00
10	Total	863	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M14	1 Km	20-Abr-96	Costado Sur	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	5	0.42	0.42
2	Olivino	69	5.80	6.22
3	Piroxeno	22	1.85	8.07
4	Vidrio	167	14.03	22.10
5	Feldespatos	320	26.89	48.99
6	Líticos	461	38.74	87.73
7	Obsidiana	2	0.17	87.90
8	Óxidos	4	0.34	88.24
9	Anfibol	140	11.76	100.00
10	Total	1190	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M15	54 Km	30-Abr-96	Tlaxcala	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	15	8.77	8.77
2	Olivino	3	1.75	10.53
3	Piroxeno	2	1.17	11.70
4	Vidrio	35	20.47	32.16
5	Feldespatos	12	7.02	39.18
6	Líticos	93	54.39	93.57
7	Obsidiana	2	1.17	94.74
8	Óxidos	2	1.17	95.91
9	Anfibol	7	4.09	100.00
10	Total	171	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M16	19 Km	30-Abr-96	Calpan	0 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	199	11.24	11.24
2	Olivino	14	0.79	12.03
3	Piroxeno	33	1.86	13.90
4	Vidrio	0	0.00	13.90
5	Feldespatos	70	3.95	17.85
6	Líticos	1410	79.68	97.51
7	Obsidiana	2	0.11	97.63
8	Óxidos	12	0.68	98.31
9	Anfibol	30	1.69	100.00
10	Total	1770	100.00	100.00

## Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M17		21-Jun-96	Turbina Avión	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	9	0.95	0.95
2	Olivino	15	1.58	2.53
3	Piroxeno	69	7.28	9.81
4	Vidrio	473	49.89	59.70
5	Feldespato	121	12.76	72.47
6	Líticos	213	22.47	94.94
7	Obsidiana	4	0.42	95.36
8	Óxidos	5	0.53	95.89
9	Azufre	7	0.74	96.62
10	Anfibol	32	3.38	100.00
	Total	948	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M18	2.3 Km	18-Sep-96	E. Canario	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	3	0.24	0.24
2	Olivino	24	1.95	2.19
3	Piroxeno	10	0.81	3.00
4	Vidrio	492	39.90	42.90
5	Feldespato	240	19.48	62.37
6	Líticos	390	31.63	94.00
7	Obsidiana	13	1.05	95.05
8	Óxidos	11	0.89	95.94
9	Anfibol	50	4.06	100.00
10	Total	1233	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M19	35.2 Km	28-Oct-96	Col. Delicias	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	3	1.63	1.63
2	Olivino	1	0.54	2.17
3	Piroxeno	4	2.17	4.35
4	Vidrio	27	14.67	19.02
5	Feldespato	9	4.89	23.91
6	Líticos	135	73.37	97.28
7	Obsidiana	2	1.09	98.37
8	Óxidos	0	0.00	98.37
9	Azufre	0	0.00	98.37
10	Anfibol	3	1.63	100.00
	Total	184	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M20	25.6 Km	29-Oct-96	Ataúta	2 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	28	12.96	12.96
2	Olivino	2	0.93	13.89
3	Piroxeno	2	0.93	14.81
4	Vidrio	49	22.69	37.50
5	Feldespato	22	10.19	47.69
6	Líticos	107	49.54	97.22
7	Obsidiana	1	0.46	97.69
8	Óxidos	2	0.93	98.61
9	Anfibol	3	1.39	100.00
10	Total	216	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M21	2.3 Km	28-Nov-96	E. Canario	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	3	0.21	0.21
2	Olivino	50	3.54	3.75
3	Piroxeno	6	0.42	4.18
4	Vidrio	346	24.49	28.66
5	Feldespato	388	27.46	56.12
6	Líticos	514	36.38	92.50
7	Obsidiana	2	0.14	92.64
8	Óxidos	2	0.14	92.78
9	Anfibol	102	7.22	100.00
10	Total	1413	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M22	21 Km	06-Mar-97	D. Arenas	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	2	1.342	1.342
2	Olivino	2	1.342	2.685
3	Piroxeno	5	3.356	6.040
4	Vidrio	7	4.698	10.738
5	Feldespato	13	8.725	19.463
6	Líticos	115	77.181	96.644
7	Obsidiana	0	0.000	96.644
8	Óxidos	0	0.000	96.644
9	Azufre	0	0.000	96.644
10	Anfibol	5	3.356	100.000
	Total	149	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M23	19 Km	07-Mar-97	S.M. Atexcac	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	7	5.072	5.072
2	Olivino	3	2.174	7.246
3	Piroxeno	3	2.174	9.420
4	Vidrio	23	16.667	26.087
5	Feldespato	17	12.319	38.406
6	Líticos	83	60.145	98.551
7	Obsidiana	2	1.449	100.000
8	Óxidos	0	0.000	100.000
9	Azufre	0	0.000	100.000
10	Anfibol	0	0.000	100.000
	Total	138	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M24	15.3 Km	29-Abr-97	S.N.de los R.	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	6	2.007	2.007
2	Olivino	6	2.007	4.013
3	Piroxeno	5	1.672	5.686
4	Vidrio	85	28.428	34.114
5	Feldespato	47	15.719	49.833
6	Líticos	130	43.478	93.311
7	Obsidiana	3	1.003	94.314
8	Óxidos	2	0.669	94.983
9	Azufre	2	0.669	95.652
10	Anfibol	13	4.348	100.000
	Total	299	100.000	100.000

## Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M28	49.4 Km	08-May-97	Entronque	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	10	0.676	0.676
2	Olivino	43	2.907	3.584
3	Piroxeno	26	1.758	5.341
4	Vidrio	448	30.291	35.632
5	Feldespatos	350	23.665	59.297
6	Líticos	511	34.550	93.847
7	Obsidiana	0	0.000	93.847
8	Óxidos	2	0.135	93.982
9	Azufre	2	0.135	94.118
10	Amfibol	87	5.882	100.000
	Total	1479	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M28	20.7 Km	11-May-97	Nealtican, Pue	0.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	1074	31.148	31.148
2	Olivino	44	1.276	32.425
3	Piroxeno	40	1.160	33.585
4	Vidrio	14	0.406	33.991
5	Feldespatos	395	11.456	45.447
6	Líticos	1783	51.711	97.158
7	Obsidiana	1	0.029	97.187
8	Óxidos	8	0.232	97.419
9	Amfibol	89	2.581	100.000
10				
	Total	3448	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M29	35 Km	11-May-97	Cholula, Pue.	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	173	38.359	38.359
2	Olivino	5	1.109	39.468
3	Piroxeno	19	4.213	43.681
4	Vidrio	68	15.078	58.758
5	Feldespatos	40	8.869	67.627
6	Líticos	129	28.803	96.231
7	Obsidiana	5	1.109	97.339
8	Óxidos	2	0.443	97.783
9	Amfibol	10	2.217	100.000
10				
	Total	451	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M30	20.7 Km	11-May-97	Nealtican, Pue	2 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	122	9.895	9.895
2	Olivino	18	1.460	11.354
3	Piroxeno	8	0.487	11.841
4	Vidrio	45	3.650	15.491
5	Feldespatos	235	19.059	34.550
6	Líticos	750	60.827	95.377
7	Obsidiana	0	0.000	95.377
8	Óxidos	20	1.622	96.999
9	Amfibol	37	3.001	100.000
10				
	Total	1233	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M31	24.7 Km	11-May-97	S.M. Acuexcoma	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	60	25.424	25.424
2	Olivino	8	3.390	28.814
3	Piroxeno	5	2.119	30.932
4	Vidrio	27	11.441	42.373
5	Feldespatos	38	15.254	57.627
6	Líticos	83	35.169	92.797
7	Obsidiana	1	0.424	93.220
8	Óxidos	0	0.000	93.220
9	Amfibol	18	8.780	100.000
10				
	Total	236	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M34	34 Km	11-May-97	Cholula, Pue	1 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	24	16.438	16.438
2	Olivino	3	2.055	18.493
3	Piroxeno	7	4.795	23.288
4	Vidrio	11	7.534	30.822
5	Feldespatos	19	13.014	43.836
6	Líticos	73	50.000	93.836
7	Obsidiana	2	1.370	95.205
8	Óxidos	0	0.000	95.205
9	Amfibol	7	4.795	100.000
10				
	Total	146	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M35	36 Km	11-May-97	U. de las A.	2 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	121	40.741	40.741
2	Olivino	6	2.020	42.761
3	Piroxeno	7	2.357	45.118
4	Vidrio	38	12.121	57.239
5	Feldespatos	26	8.754	65.993
6	Líticos	87	29.293	95.286
7	Obsidiana	2	0.673	95.960
8	Óxidos	0	0.000	95.960
9	Amfibol	12	4.040	100.000
10				
	Total	297	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M38	49.4 Km	11-May-97	Bv.Hnos Serdar	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	75	34.884	34.884
2	Olivino	3	1.395	36.279
3	Piroxeno	2	0.930	37.209
4	Vidrio	23	10.698	47.907
5	Feldespatos	20	9.302	57.209
6	Líticos	86	40.000	97.209
7	Obsidiana	0	0.000	97.209
8	Óxidos	1	0.465	97.674
9	Amfibol	5	2.326	100.000
10				
	Total	215	100.000	100.000

## Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M41	15.3 Km	11-May-97	S.N. de los R.	2 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	49	20.248	20.248
2	Olivino	9	3.719	23.967
3	Piroxeno	4	1.653	25.620
4	Vidrio	24	9.917	35.537
5	Feldespató	13	5.372	40.909
6	Líticos	123	50.826	91.738
7	Obsidiana	2	0.828	92.562
8	Óxidos	0	0.000	92.562
9	Anfibol	18	7.438	100.000
10	Total	242	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M42	49.4 Km	11-May-97	F.Cholollan	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	47	19.502	19.502
2	Olivino	8	3.320	22.822
3	Piroxeno	7	2.905	25.728
4	Vidrio	14	5.809	31.535
5	Feldespató	31	12.863	44.398
6	Líticos	118	48.133	92.531
7	Obsidiana	1	0.415	92.946
8	Óxidos	0	0.000	92.946
9	Anfibol	17	7.054	100.000
10	Total	241	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M43	49.4 Km	12-May-97	Frc. Cholollan	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	63	34.054	34.054
2	Olivino	3	1.622	35.676
3	Piroxeno	3	1.622	37.297
4	Vidrio	12	6.488	43.784
5	Feldespató	20	10.811	54.595
6	Líticos	77	41.822	96.218
7	Obsidiana	1	0.541	96.757
8	Óxidos	0	0.000	96.757
9	Anfibol	6	3.243	100.000
10	Total	185	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M44	40 Km	14-Jun-97	Cuautla	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	9	2.528	2.528
2	Olivino	3	0.843	3.371
3	Piroxeno	2	0.562	3.933
4	Vidrio	92	25.843	29.775
5	Feldespató	70	19.663	49.438
6	Líticos	170	47.753	97.191
7	Obsidiana	0	0.000	97.191
8	Óxidos	4	1.124	98.315
9	Anfibol	6	1.685	100.000
10	Total	358	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M45	23.8 Km	14-Jun-97	Nepantla	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	6	4.615	4.615
2	Olivino	2	1.538	6.154
3	Piroxeno	2	1.538	7.692
4	Vidrio	12	9.231	16.923
5	Feldespató	21	16.154	33.077
6	Líticos	85	65.385	98.462
7	Obsidiana	1	0.769	99.231
8	Óxidos	1	0.769	100.000
9	Anfibol	0	0.000	100.000
10	Total	130	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M46	18.5 Km	15-Jun-97	Tetela del V. M.	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	14	3.825	3.825
2	Olivino	6	1.639	5.464
3	Piroxeno	15	4.098	9.563
4	Vidrio	110	30.055	39.617
5	Feldespató	37	10.109	49.727
6	Líticos	168	45.355	95.082
7	Obsidiana	3	0.820	95.902
8	Óxidos	2	0.546	96.448
9	Anfibol	13	3.552	100.000
10	Total	368	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M47	47.0 Km	15-Jun-97	Yautepéc, Mor.	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	55	18.212	18.212
2	Olivino	7	2.318	20.530
3	Piroxeno	9	2.980	23.510
4	Vidrio	37	12.252	35.762
5	Feldespató	38	11.921	47.682
6	Líticos	143	47.351	95.033
7	Obsidiana	0	0.000	95.033
8	Óxidos	0	0.000	95.033
9	Anfibol	15	4.967	100.000
10	Total	302	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M48	19.0 Km	30-Jun-97	Amecameca	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	47	1.587	1.587
2	Olivino	27	0.912	2.499
3	Piroxeno	27	0.912	3.411
4	Vidrio	45	1.520	4.931
5	Feldespató	436	14.725	19.656
6	Líticos	2303	77.778	97.433
7	Obsidiana	17	0.574	98.007
8	Óxidos	4	0.135	98.143
9	Anfibol	55	1.857	100.000
10	Total	2961	100.000	100.000



## Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M49	19.0 Km	01-Jul-97	Amecameca	1 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	819	18.119	18.119
2	Olivino	47	1.040	19.159
3	Piroxeno	57	1.261	20.420
4	Vidrio	147	3.252	23.673
5	Feldespatos	707	15.642	39.314
6	Líticos	2598	57.478	96.792
7	Obsidiana	19	0.420	97.212
8	Óxidos	32	0.708	97.920
9	Anfibol	94	2.080	100.000
10	Total	4520	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M50	56.6 Km	30-Jun-97	Sta. Cruz M. D.F.	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	68	14.783	14.783
2	Olivino	11	2.391	17.174
3	Piroxeno	12	2.609	19.783
4	Vidrio	118	25.217	45.000
5	Feldespatos	73	15.870	60.870
6	Líticos	153	33.261	94.130
7	Obsidiana	3	0.652	94.783
8	Óxidos	2	0.435	95.217
9	Anfibol	22	4.783	100.000
10	Total	460	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M52	49.4 Km	30-Jun-97	Col. S.D. Miron	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	98	23.223	23.223
2	Olivino	6	1.422	24.645
3	Piroxeno	5	1.185	25.829
4	Vidrio	78	18.483	44.313
5	Feldespatos	50	11.848	56.161
6	Líticos	170	40.284	96.445
7	Obsidiana	2	0.474	96.919
8	Óxidos	0	0.000	96.919
9	Anfibol	13	3.081	100.000
10	Total	422	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M53	19.0 Km	30-Jun-97	Amecameca	1.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	6	0.587	0.587
2	Olivino	18	1.761	2.348
3	Piroxeno	4	0.391	2.740
4	Vidrio	39	3.816	6.556
5	Feldespatos	60	5.871	12.427
6	Líticos	854	83.562	95.988
7	Obsidiana	3	0.294	96.282
8	Óxidos	2	0.196	96.477
9	Anfibol	36	3.523	100.000
10	Total	1022	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M54	18.5 Km	30-Jun-97	T. del Volcán	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	10	2.326	2.326
2	Olivino	3	0.698	3.023
3	Piroxeno	11	2.558	5.581
4	Vidrio	145	33.721	39.302
5	Feldespatos	30	6.977	46.279
6	Líticos	215	50.000	96.279
7	Obsidiana	1	0.233	96.512
8	Óxidos	0	0.000	96.512
9	Anfibol	15	3.488	100.000
10	Total	430	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M55	15 Km	12-Ago-97	Ecatzingo	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	27	1.537	1.537
2	Olivino	29	1.651	3.187
3	Piroxeno	3	0.171	3.358
4	Vidrio	529	30.108	33.466
5	Feldespatos	199	11.326	44.792
6	Líticos	900	51.224	96.016
7	Obsidiana	3	0.171	96.187
8	Óxidos	5	0.285	96.471
9	Anfibol	62	3.529	100.000
10	Total	1757	100.000	100.000

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M56	19 Km	28-Ago-98	Amecameca	4 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	13	0.96	0.96
2	Olivino	83	6.12	7.07
3	Piroxeno	32	2.36	9.43
4	Vidrio	334	24.61	34.05
5	Feldespatos	90	6.63	40.68
6	Líticos	611	45.03	85.70
7	Obsidiana	26	1.92	87.62
8	Óxidos	11	0.81	88.43
9	Anfibol	157	11.57	100.00
10	Total	1357	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fracción
M57	15.8 Km	09-Sep-98	Tochimilco	60 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	20	0.87	0.87
2	Olivino	24	1.04	1.91
3	Piroxeno	7	0.30	2.21
4	Vidrio	132	5.73	7.94
5	Feldespatos	75	3.26	11.20
6	Líticos	1971	85.55	96.74
7	Obsidiana	6	0.26	97.01
8	Óxidos	19	0.82	97.83
9	Anfibol	50	2.17	100.00
10	Total	2304	100.00	100.00

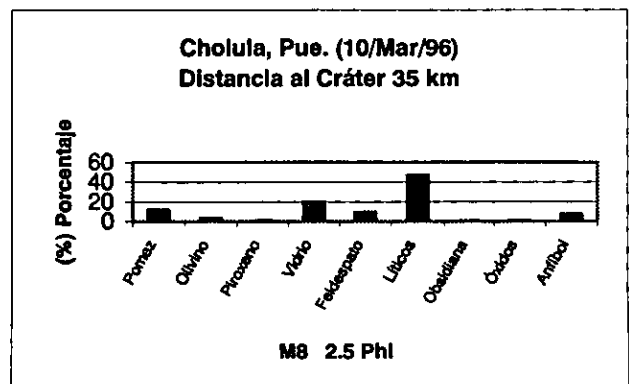
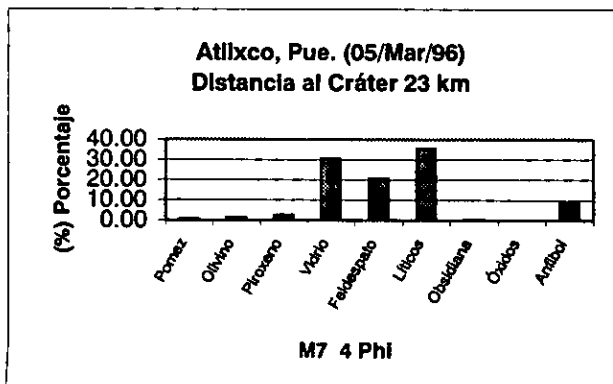
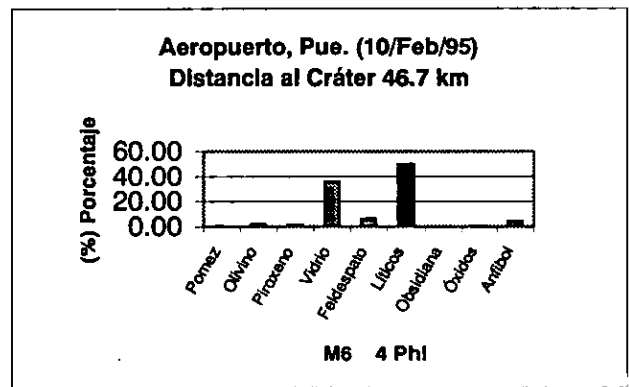
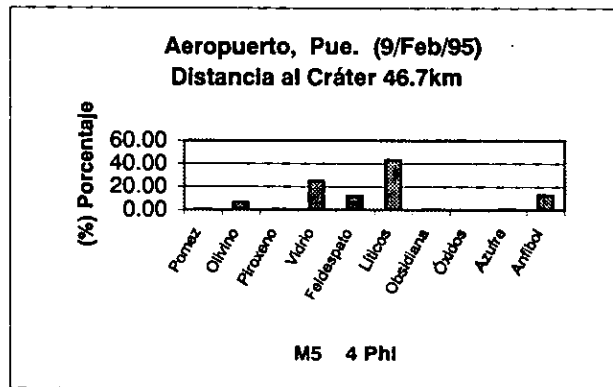
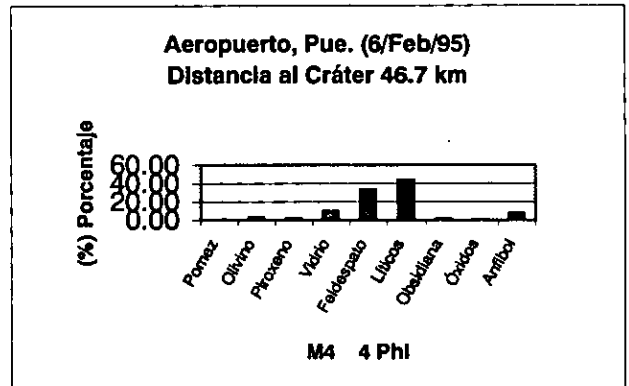
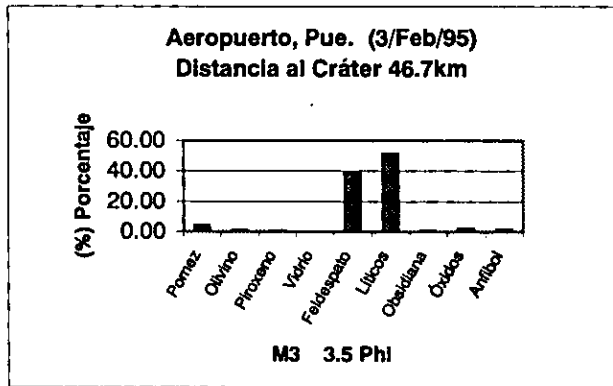
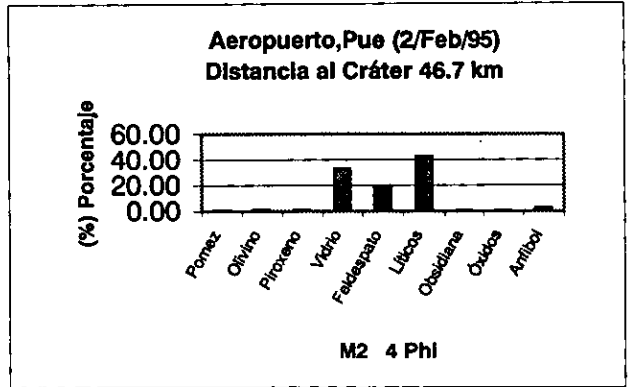
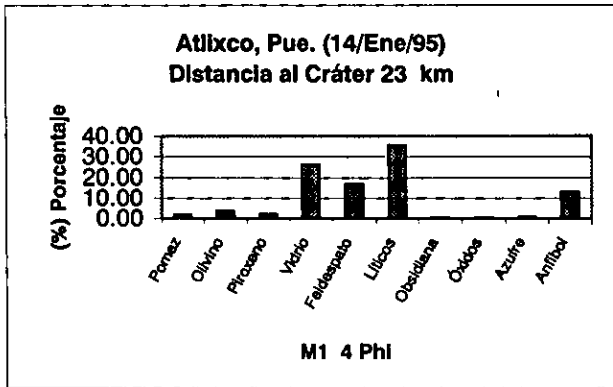
### Separación Modal

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fración
M58	15 Km	21-Sep-98	Ecatzingo	2.5 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	21	0.82	0.82
2	Olivino	38	1.41	2.24
3	Piroxeno	8	0.24	2.47
4	Vidrio	736	28.87	31.35
5	Feldespató	211	8.28	39.62
6	Líticos	1453	57.00	96.63
7	Obsidiana	7	0.27	96.90
8	Óxidos	5	0.20	97.10
9	Anfíbol	74	2.90	100.00
10				
	Total	2549	100.00	100.00

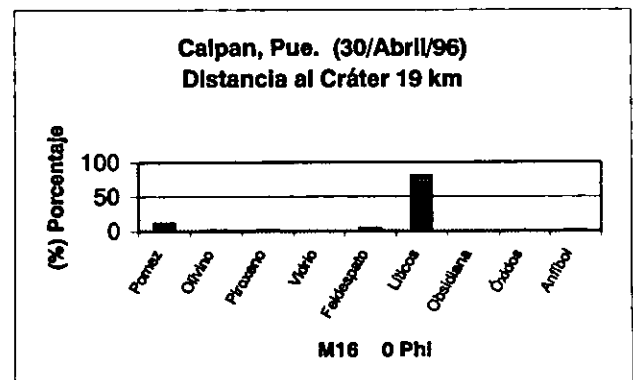
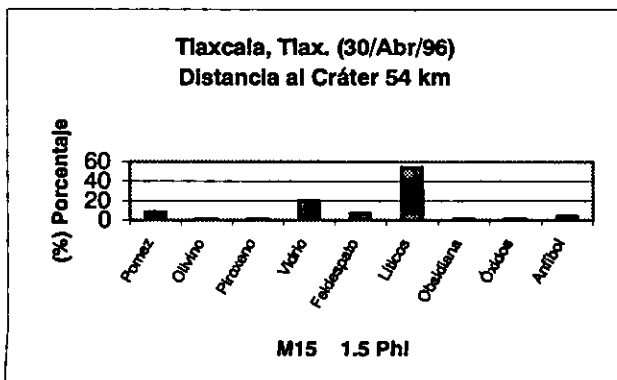
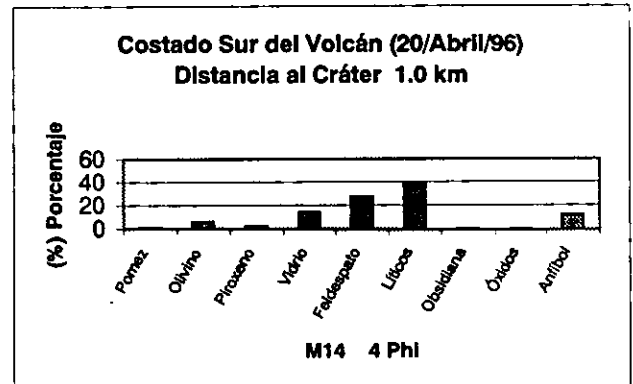
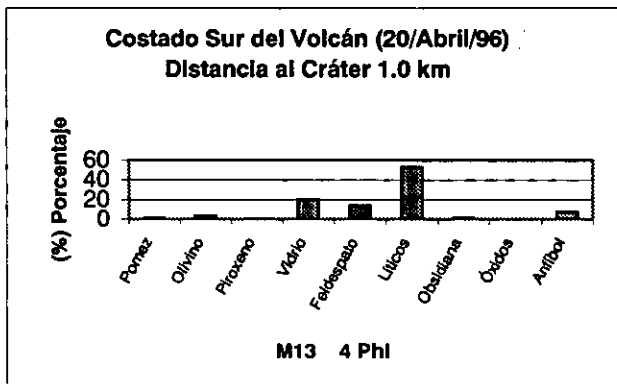
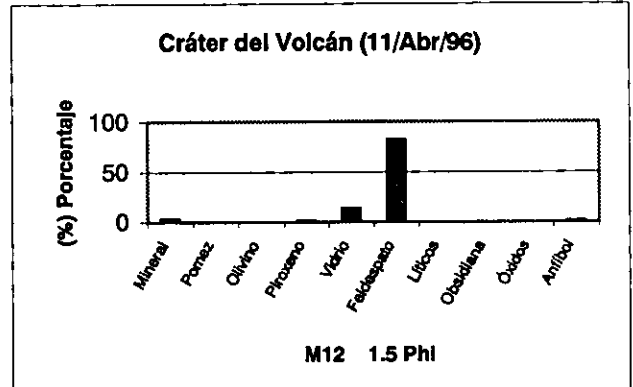
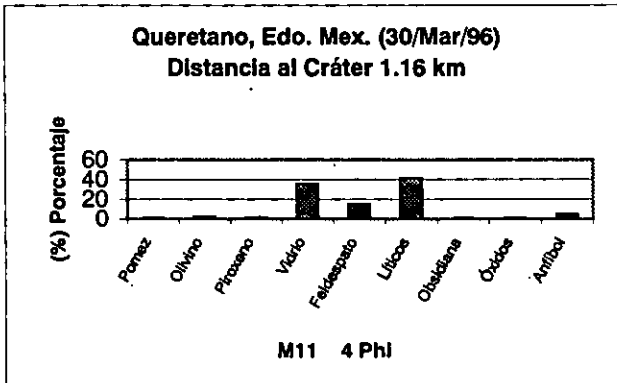
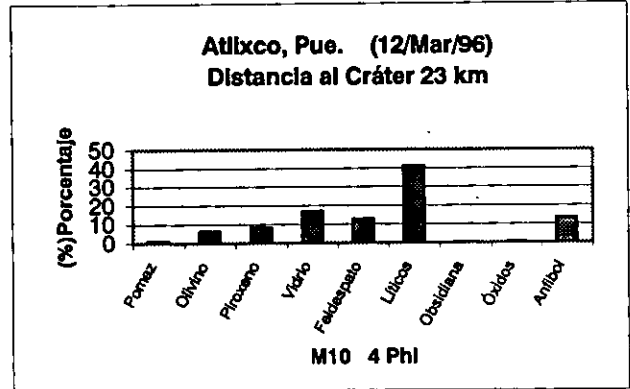
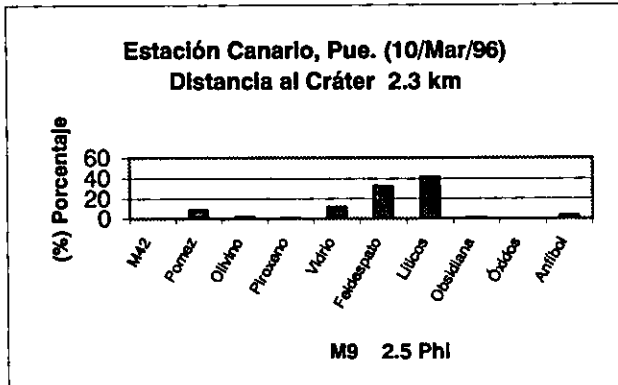
Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fración
M59	7.2 Km	26-Sep-98	Paso de C.	2.0 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	3	0.95	0.95
2	Olivino	9	2.84	3.79
3	Piroxeno	2	0.63	4.42
4	Vidrio	85	26.81	31.23
5	Feldespató	18	5.68	36.91
6	Líticos	175	55.21	92.11
7	Obsidiana	3	0.95	93.06
8	Óxidos	2	0.63	93.69
9	Anfíbol	20	6.31	100.00
10				
	Total	317	100.00	100.00

Muestra	Dist.al Cráter	Fecha	Localidad	Fración
M60	7.2 Km	06-Oct-98	Paso de C.	2.0 Phi
No.	Mineral	Conteo	%Individual	%Acum.
1	Pomez	5	2.14	2.14
2	Olivino	2	0.85	2.99
3	Piroxeno	7	2.99	5.98
4	Vidrio	28	11.97	17.95
5	Feldespató	14	5.98	23.93
6	Líticos	175	74.79	98.72
7	Obsidiana	0	0.00	98.72
8	Óxidos	0	0.00	98.72
9	Anfíbol	3	1.28	100.00
10				
	Total	234	100.00	100.00

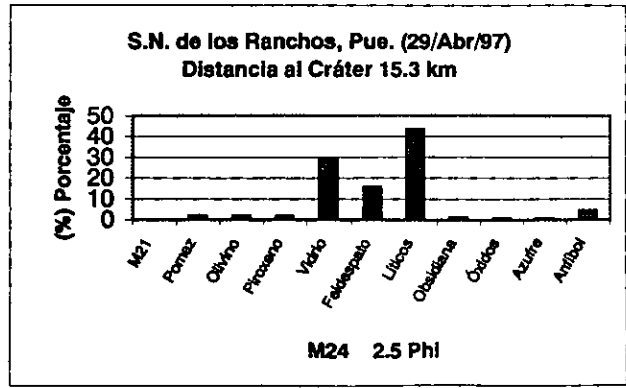
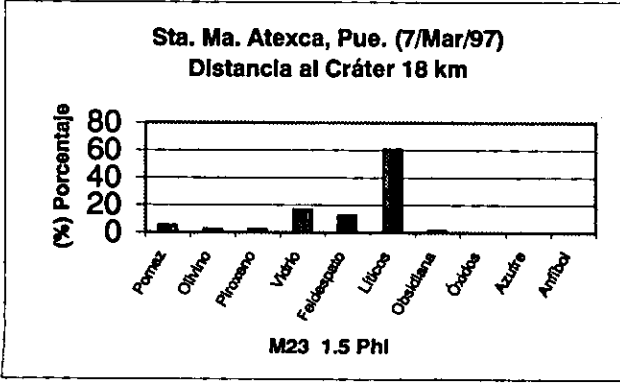
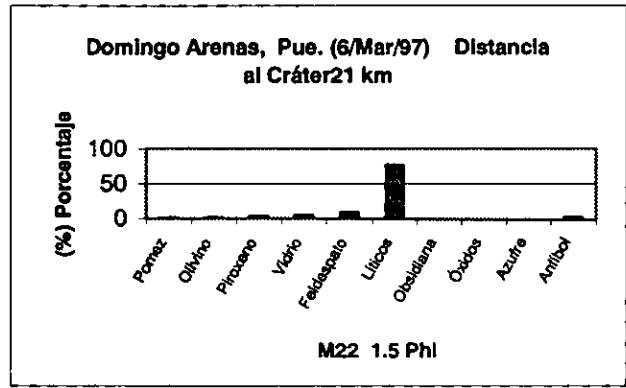
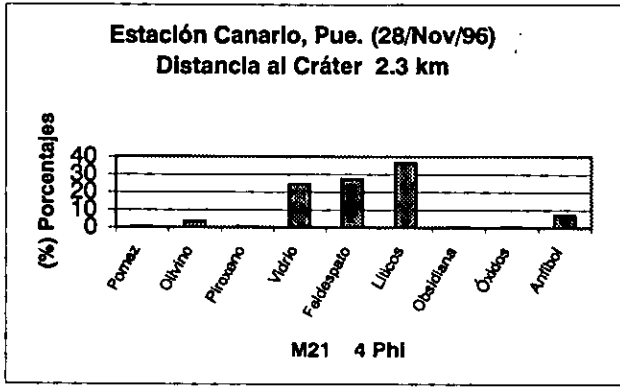
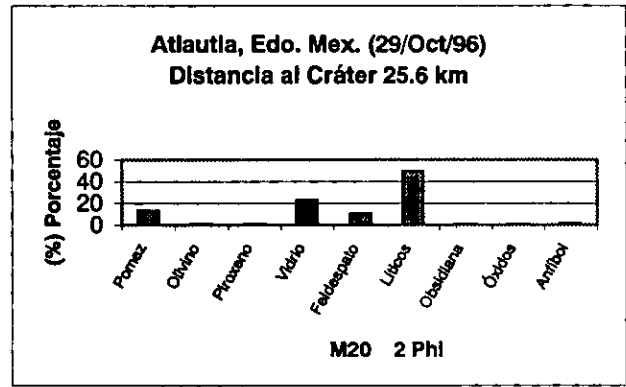
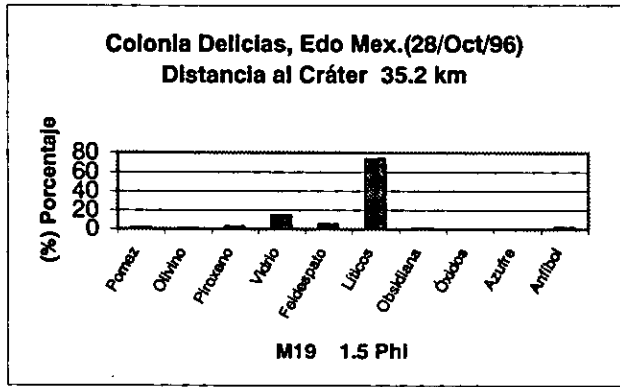
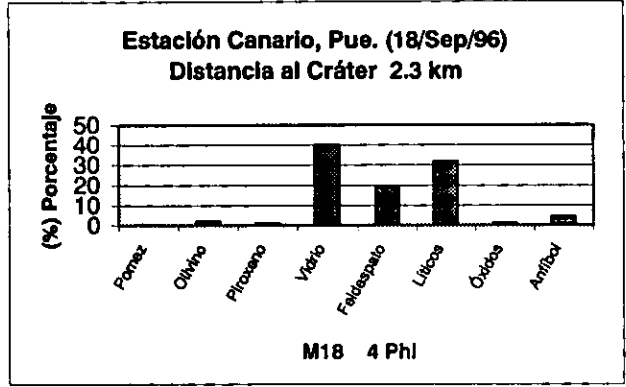
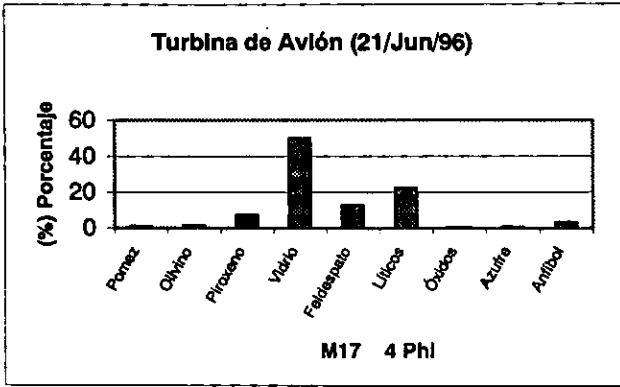
## Separación composicional mineralógica



## Separación composicional mineralógica

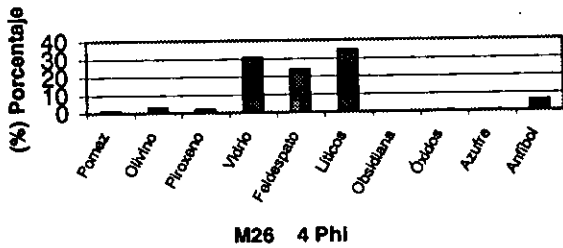


## Separación composicional mineralógica

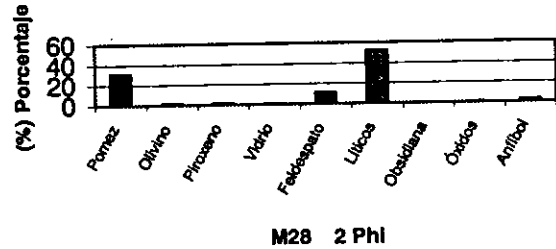


## Separación composicional mineralógica

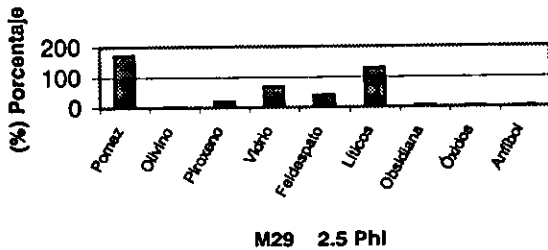
**Entronque, Pue (8/May/97)**  
Distancia al Cráter 49.4 km



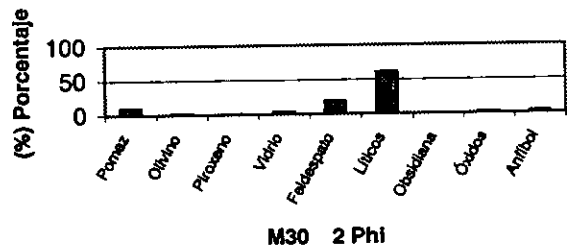
**Nealtican, Pue.(11/May/97)**  
Distancia al Cráter 20.7 km



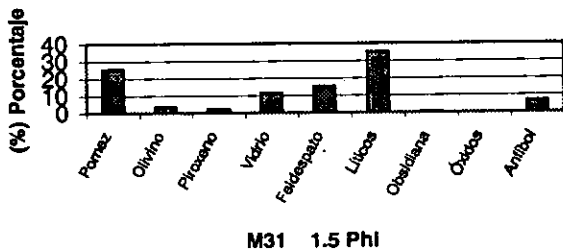
**Cholula, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 35.0 km



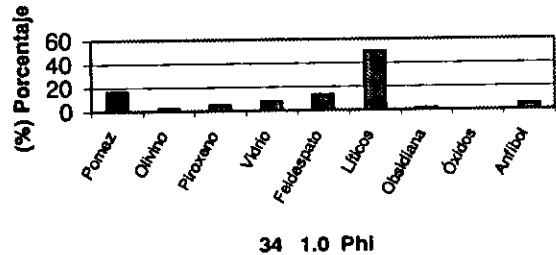
**Nealtican, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 20.2 km



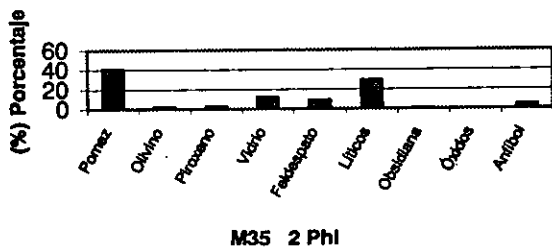
**S.M. Acuecomac, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 24.7 km



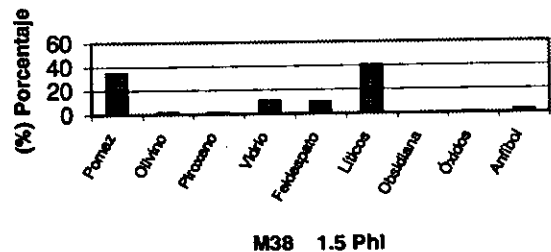
**Cholula, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 34 km



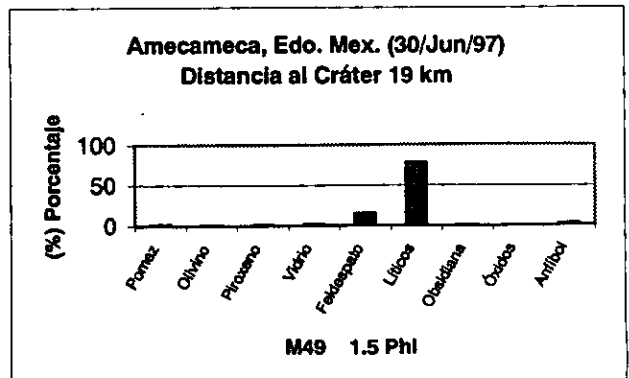
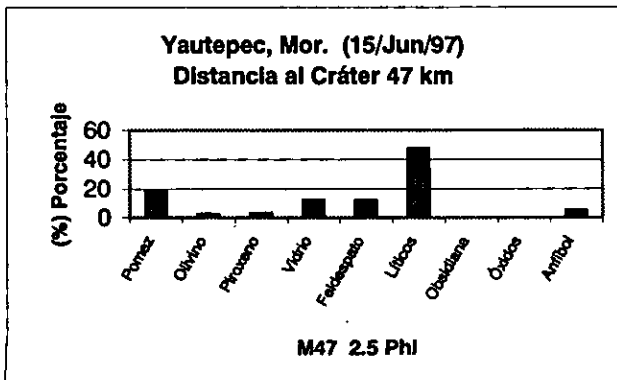
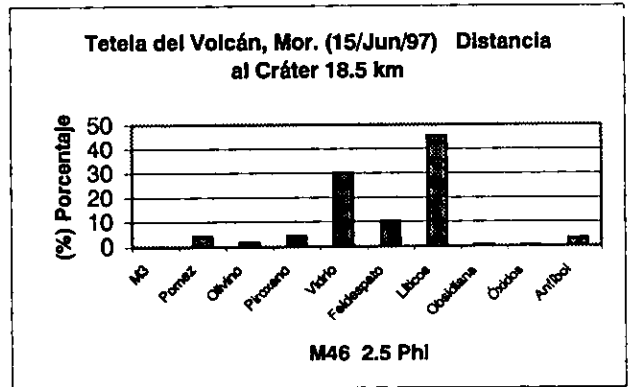
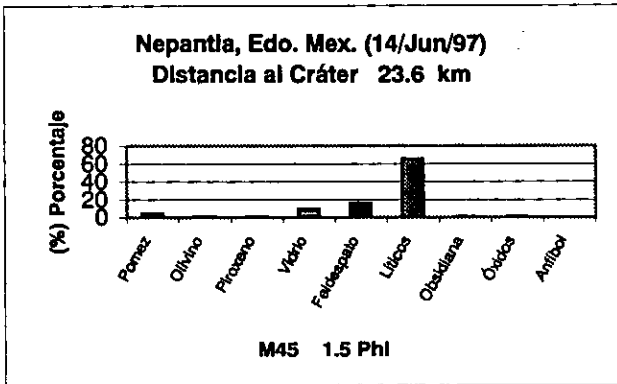
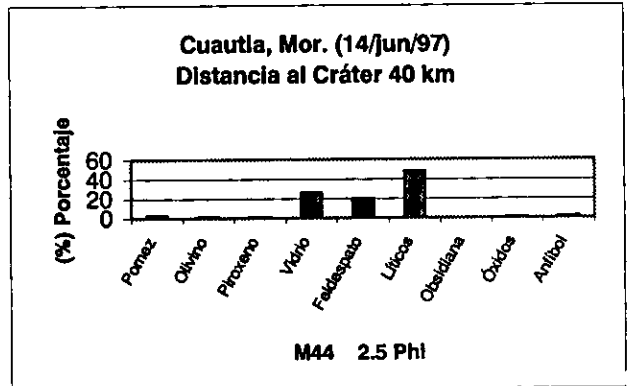
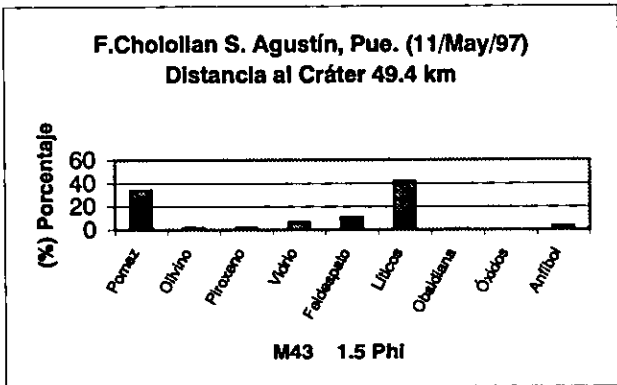
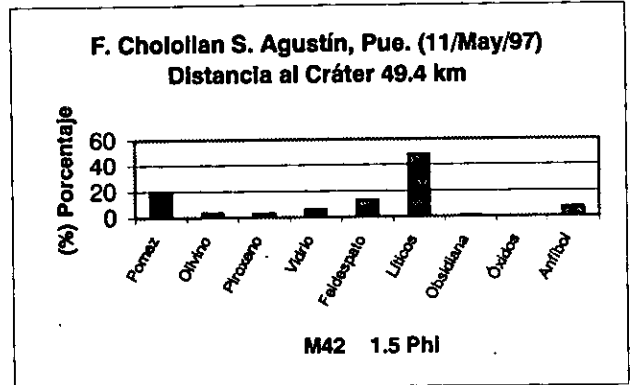
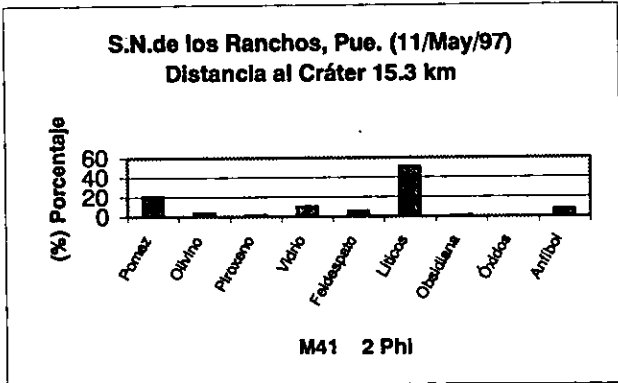
**U. de las Américas, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 36 km



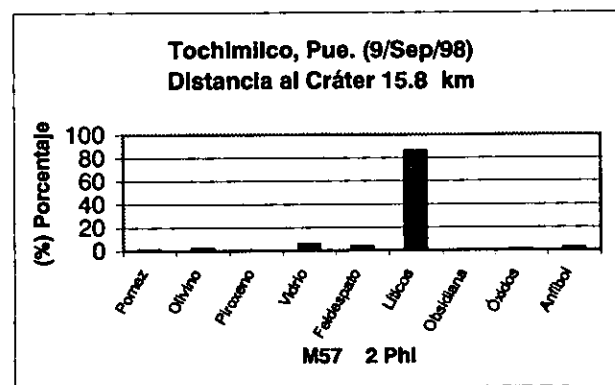
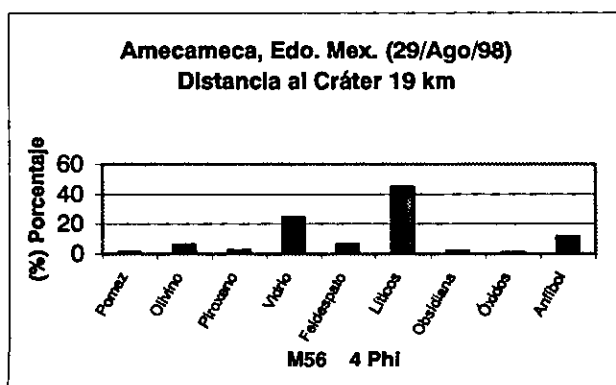
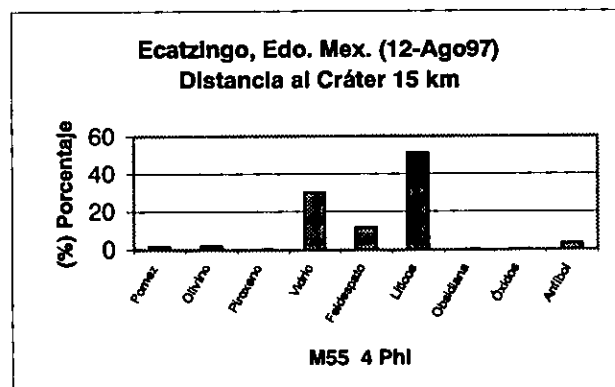
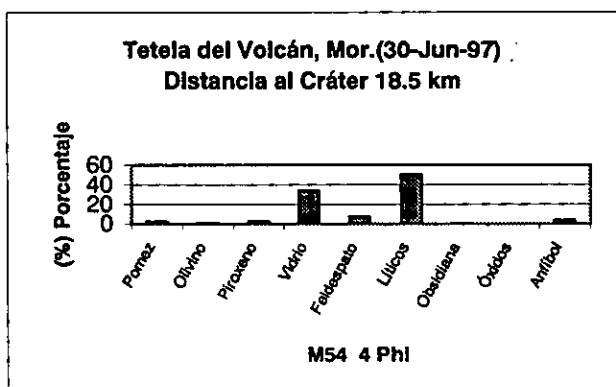
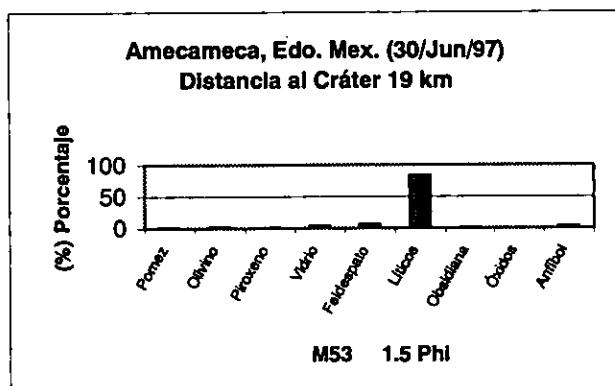
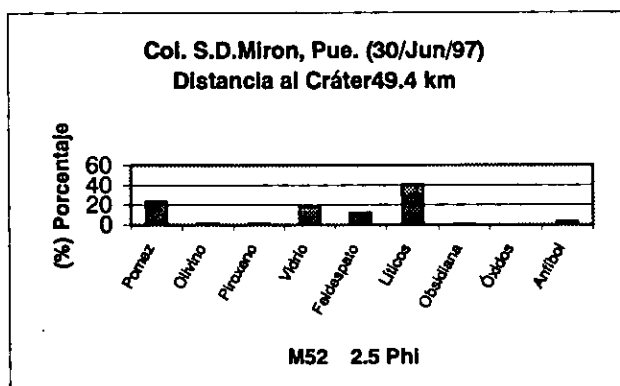
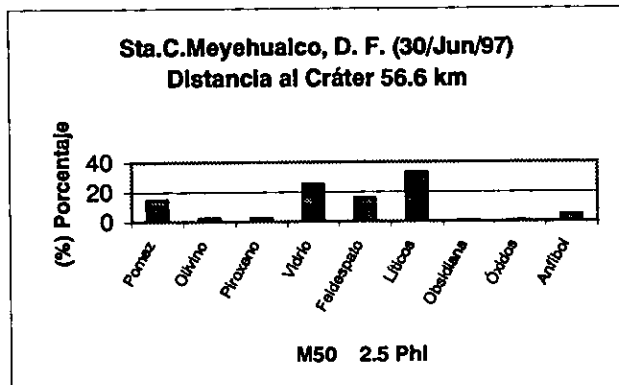
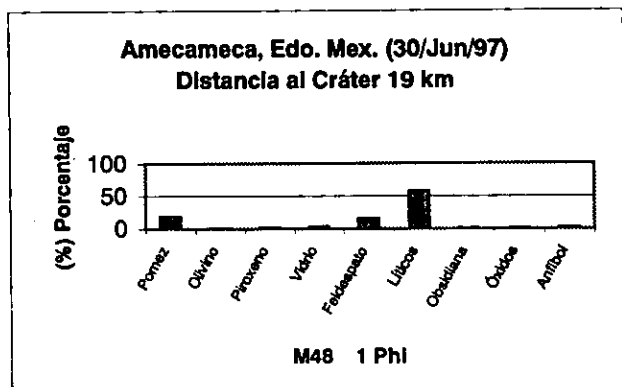
**Biv. H. Serdan, Pue. (11/May/97)**  
Distancia al Cráter 49.4 km



## Separación composicional mineralógica

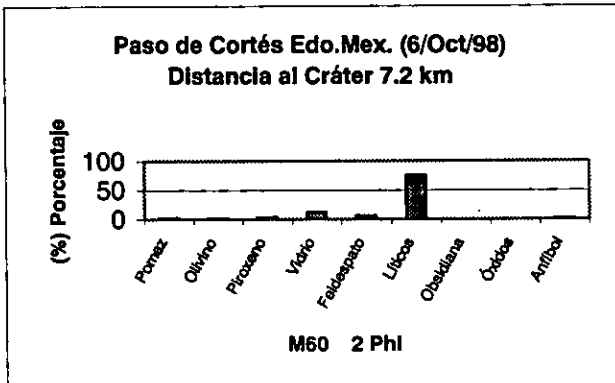
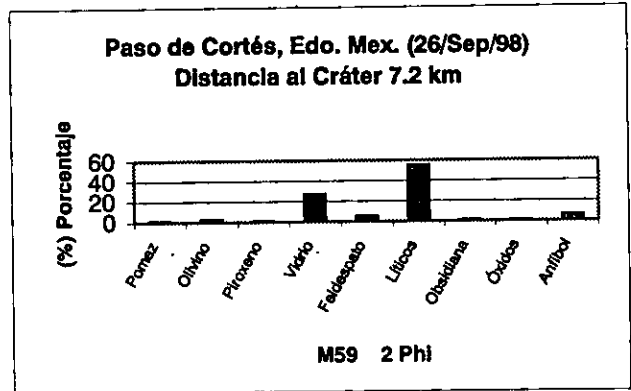
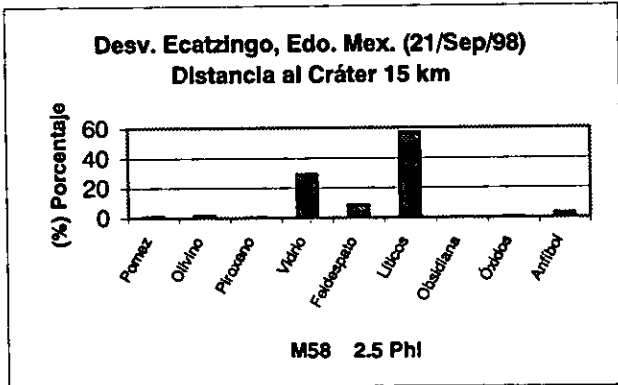


## Separación composicional mineralógica



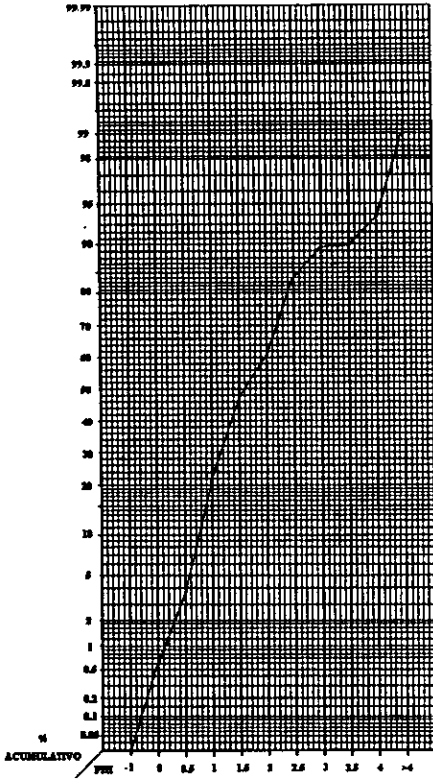


## Separación composicional mineralógica



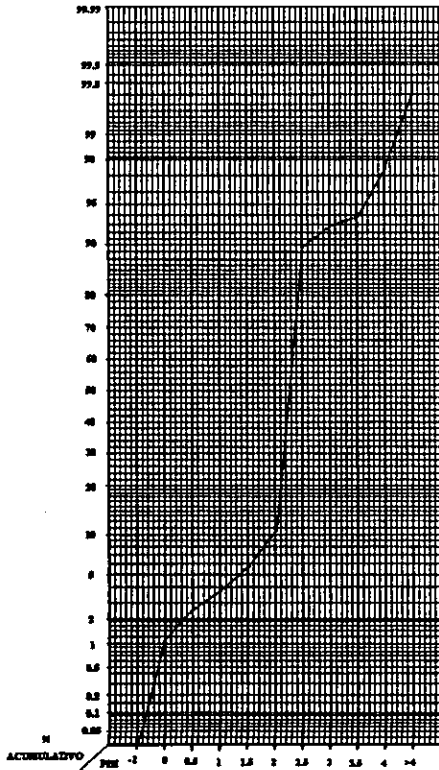
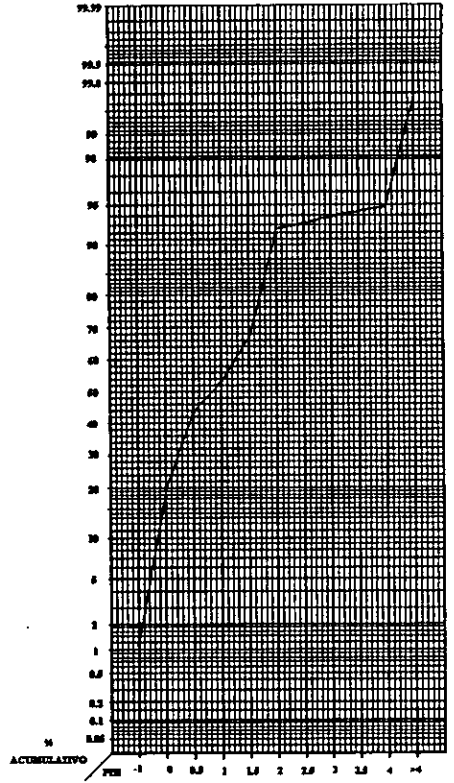
## APÉNDICE V

# **HISTOGRAMAS DE SEPARACIÓN COMPOSICIONAL MINERALÓGICA**



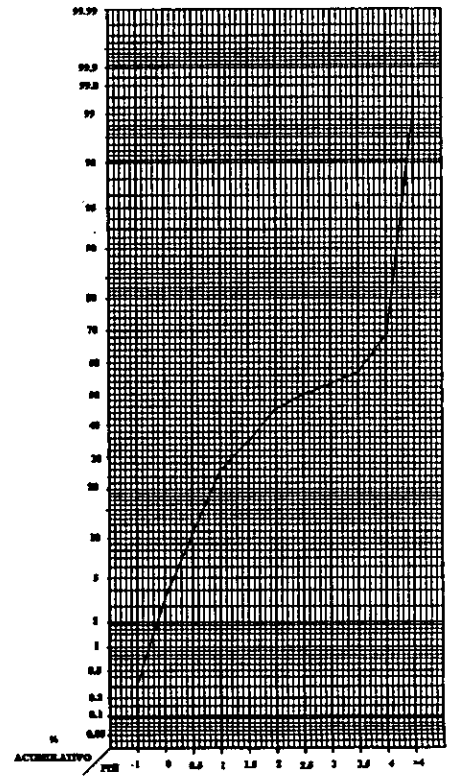
**Muestra: M1**  
 Localidad: Atlixco, Puebla  
 Fecha: 14 de enero de 1995  
 Phi<sub>5</sub>: 0.65  
 Phi<sub>16</sub>: 0.9      Phi<sub>75</sub>: 2.35  
 Phi<sub>25</sub>: 1.0      Phi<sub>84</sub>: 2.5  
 Phi<sub>50</sub>: 1.6      Phi<sub>95</sub>: 4.0

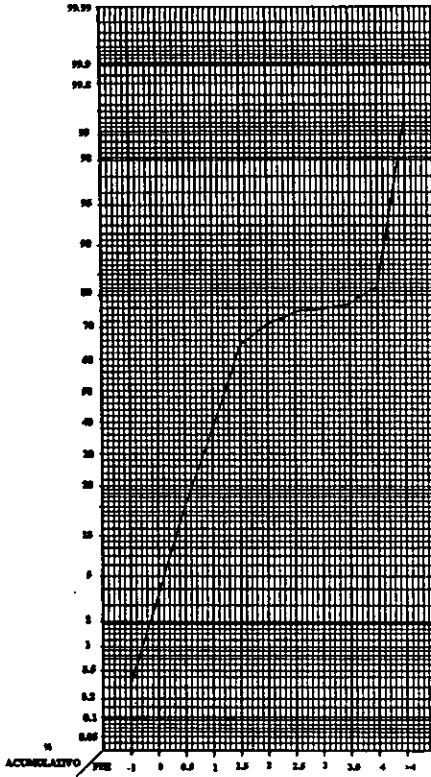
**Muestra: M2**  
 Localidad: Aeropuerto, Puebla  
 Fecha: 2 de febrero de 1995  
 Phi<sub>5</sub>: -0.8  
 Phi<sub>16</sub>: -0.9      Phi<sub>75</sub>: 1.6  
 Phi<sub>25</sub>: 0.1      Phi<sub>84</sub>: 1.8  
 Phi<sub>50</sub>: 0.35      Phi<sub>95</sub>: 4.0



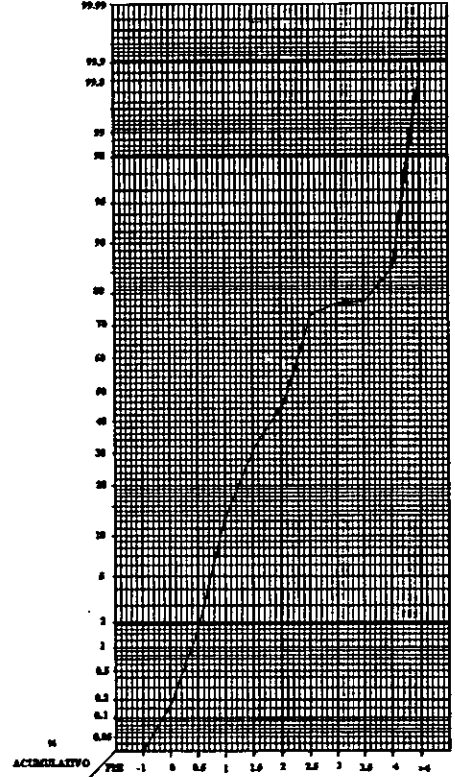
**Muestra: M3**  
 Localidad: Aeropuerto, Puebla  
 Fecha: 3 de febrero de 1995  
 Phi<sub>5</sub>: 1.3  
 Phi<sub>16</sub>: 2.1      Phi<sub>75</sub>: 2.35  
 Phi<sub>25</sub>: 2.2      Phi<sub>84</sub>: 2.4  
 Phi<sub>50</sub>: 2.3      Phi<sub>95</sub>: 3.7

**Muestra: M4**  
 Localidad: Aeropuerto, Puebla  
 Fecha: 6 de febrero de 1995  
 Phi<sub>5</sub>: 0.15  
 Phi<sub>16</sub>: 0.7      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 1.0      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 2.7      Phi<sub>95</sub>: 4.4

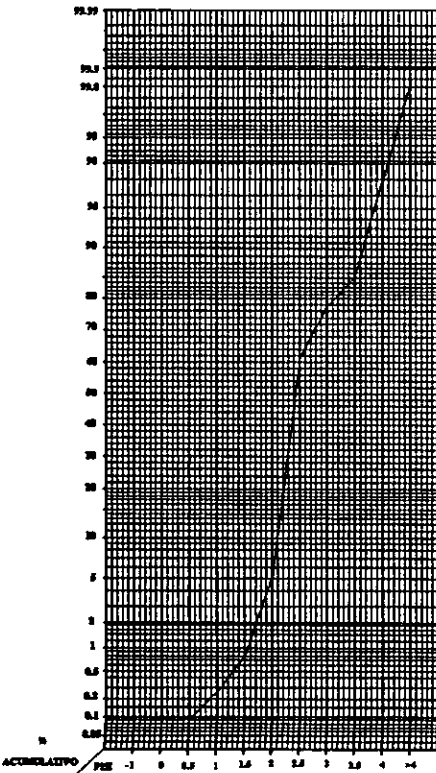




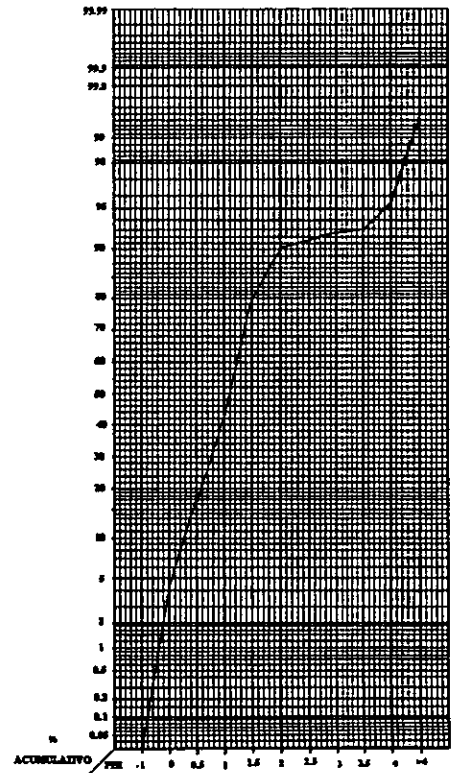
**Muestra: M5**  
 Localidad: Aeropuerto, Puebla  
 Fecha: 9 de febrero de 1995  
 Phi<sub>5</sub>: 0.1  
 Phi<sub>16</sub>: 0.5      Phi<sub>75</sub>: 2.6  
 Phi<sub>25</sub>: 0.7      Phi<sub>84</sub>: 4.1  
 Phi<sub>50</sub>: 1.25      Phi<sub>95</sub>: 4.35



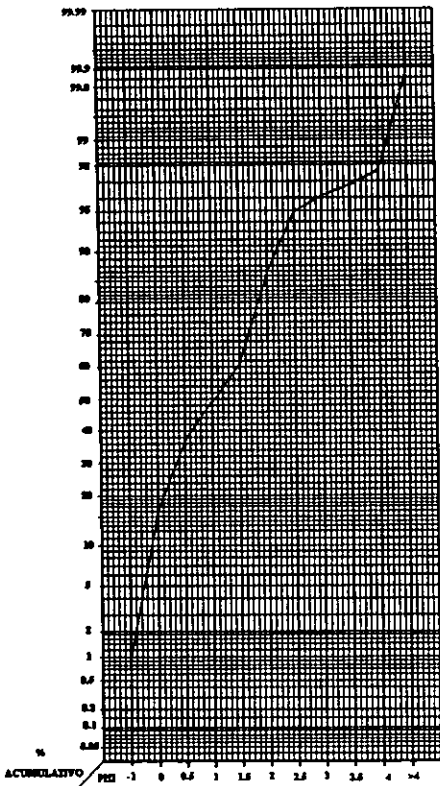
**Muestra: M6**  
 Localidad: Aeropuerto, Puebla  
 Fecha: 10 de febrero de 1995  
 Phi<sub>5</sub>: 0.75  
 Phi<sub>16</sub>: 1.1      Phi<sub>75</sub>: 2.3  
 Phi<sub>25</sub>: 1.3      Phi<sub>84</sub>: 4.0  
 Phi<sub>50</sub>: 2.1      Phi<sub>95</sub>: 4.3



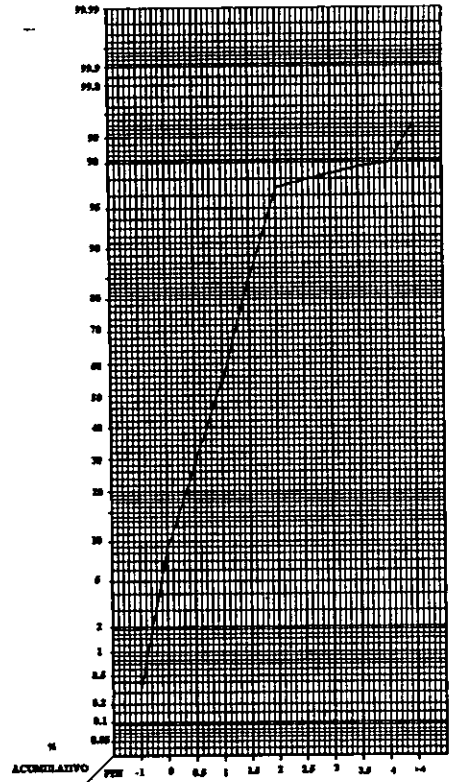
**Muestra: M7**  
 Localidad: Atlixco, Puebla  
 Fecha: 5 de marzo de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 2.0  
 Phi<sub>16</sub>: 2.2      Phi<sub>75</sub>: 2.9  
 Phi<sub>25</sub>: 2.25      Phi<sub>84</sub>: 3.5  
 Phi<sub>50</sub>: 2.4      Phi<sub>95</sub>: 3.9



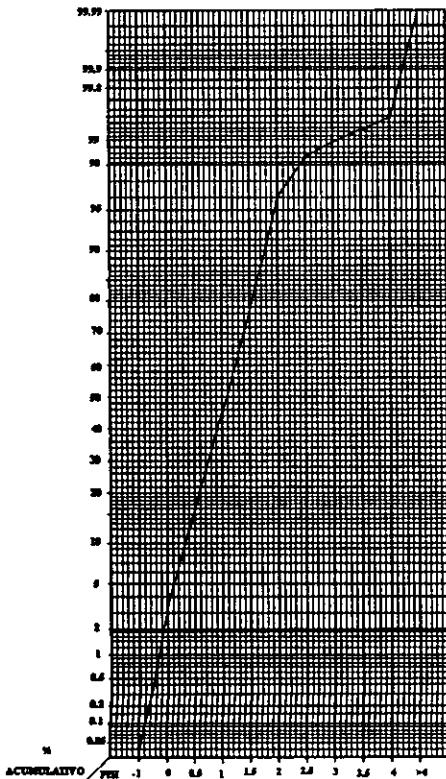
**Muestra: M8**  
 Localidad: Cholula, Puebla  
 Fecha: 10 de marzo de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 0  
 Phi<sub>16</sub>: 0.45      Phi<sub>75</sub>: 1.35  
 Phi<sub>25</sub>: 0.7      Phi<sub>84</sub>: 1.6  
 Phi<sub>50</sub>: 1.0      Phi<sub>95</sub>: 3.9



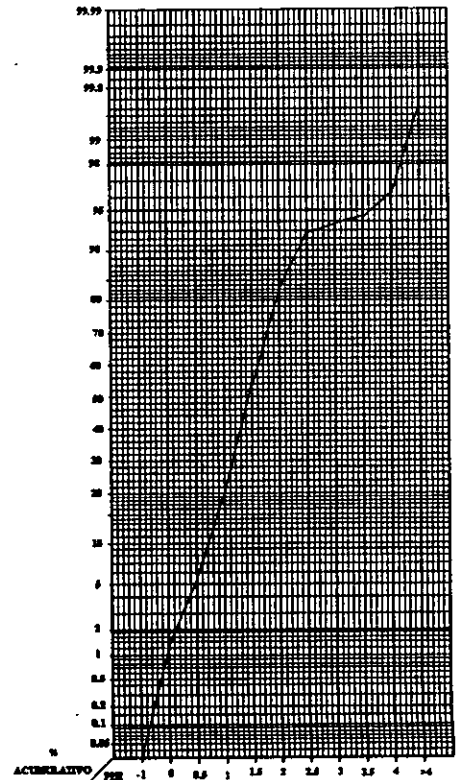
**Muestra: M9**  
 Localidad: Estación Canario,  
 Puebla  
 Fecha: 10 de marzo de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: -0.6  
 Phi<sub>16</sub>: 0           Phi<sub>75</sub>: 1.55  
 Phi<sub>25</sub>: 0.2       Phi<sub>84</sub>: 2.0  
 Phi<sub>50</sub>: 1.0       Phi<sub>95</sub>: 2.8



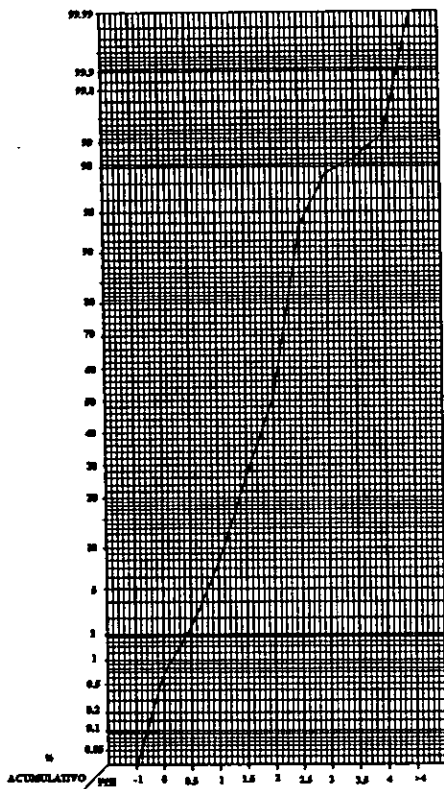
**Muestra: M10**  
 Localidad: Atlixco, Puebla  
 Fecha: 12 de marzo de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: -0.2  
 Phi<sub>16</sub>: 0.3       Phi<sub>75</sub>: 0.8  
 Phi<sub>25</sub>: 0.45     Phi<sub>84</sub>: 1.0  
 Phi<sub>50</sub>: 0.5       Phi<sub>95</sub>: 1.5



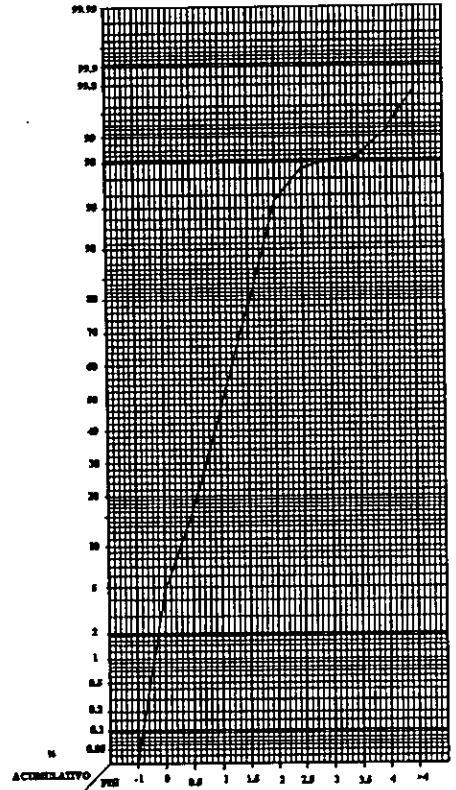
**Muestra: M11**  
 Localidad: Queretano, Edo.  
 Mex.  
 Fecha: 30 de marzo de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 0  
 Phi<sub>16</sub>: 0.45       Phi<sub>75</sub>: 1.45  
 Phi<sub>25</sub>: 0.7       Phi<sub>84</sub>: 1.65  
 Phi<sub>50</sub>: 1.05      Phi<sub>95</sub>: 2.0



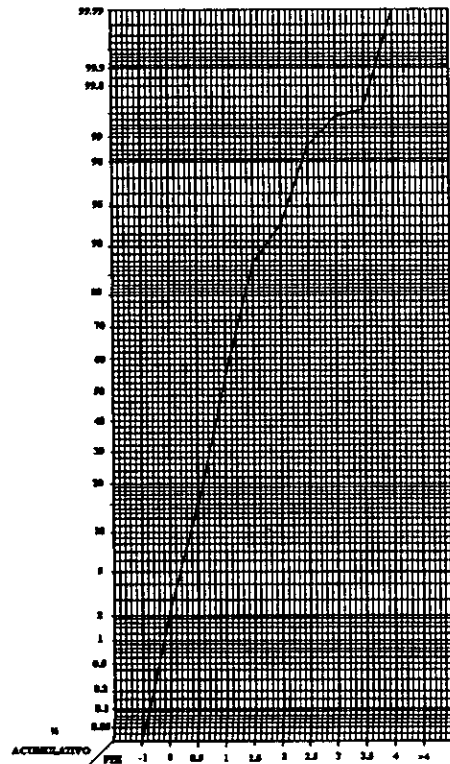
**Muestra: M12**  
 Localidad: Cráter del Volcán,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de abril de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 0.5  
 Phi<sub>16</sub>: 0.9       Phi<sub>75</sub>: 2.2  
 Phi<sub>25</sub>: 1.1       Phi<sub>84</sub>: 2.3  
 Phi<sub>50</sub>: 2.0       Phi<sub>95</sub>: 2.6



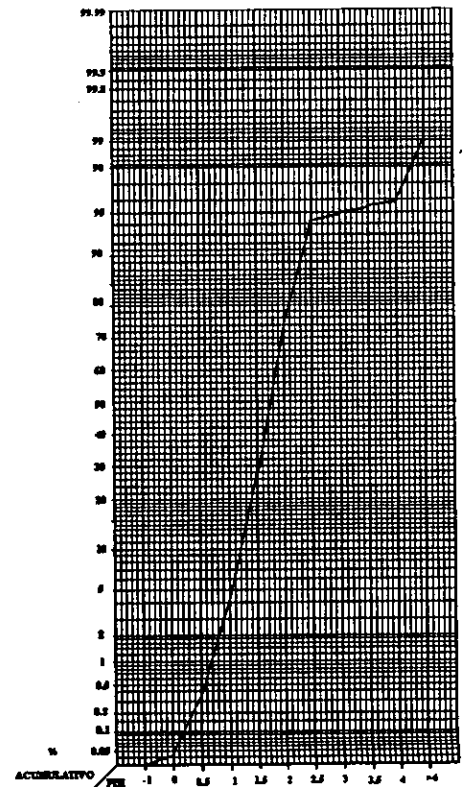
**Muestra: M13**  
 Localidad: Costado N. del Volcán  
 Fecha: 20 de abril de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 0.8  
 Phi<sub>16</sub>: 1.3      Phi<sub>75</sub>: 2.2  
 Phi<sub>25</sub>: 1.5      Phi<sub>84</sub>: 2.3  
 Phi<sub>50</sub>: 2.0      Phi<sub>95</sub>: 2.6



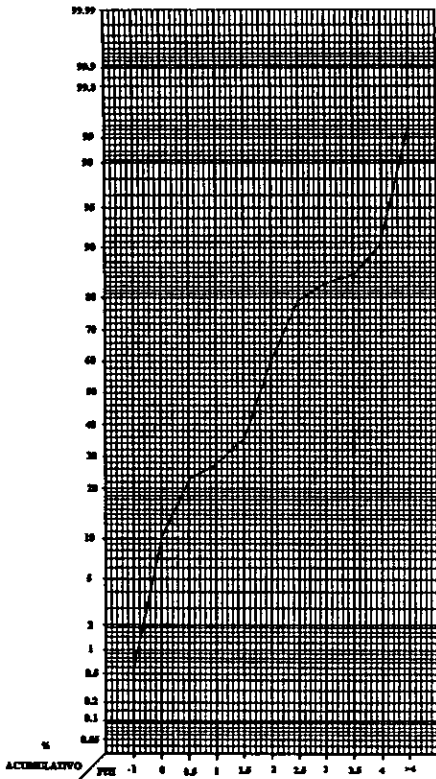
**Muestra: M14**  
 Localidad: Costado S. del Volcán  
 Fecha: 20 de abril de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 0.1  
 Phi<sub>16</sub>: 0.5      Phi<sub>75</sub>: 1.4  
 Phi<sub>25</sub>: 0.65      Phi<sub>84</sub>: 1.6  
 Phi<sub>50</sub>: 1.0      Phi<sub>95</sub>: 2.0



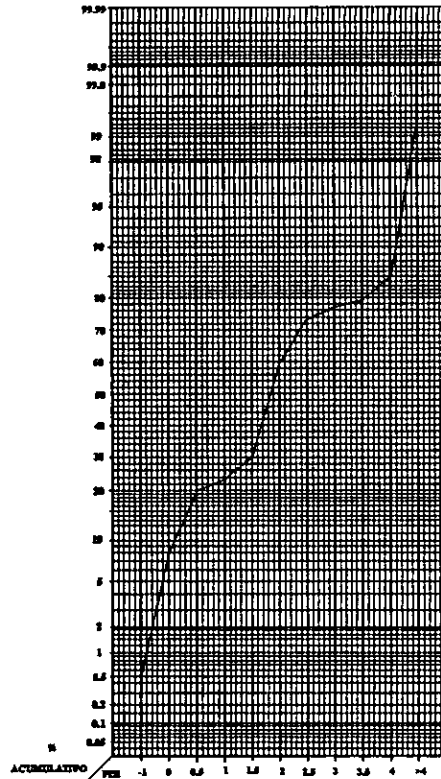
**Muestra: M15**  
 Localidad: Tlaxcala, Tlaxcala  
 Fecha: 03 de abril de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 0.2  
 Phi<sub>16</sub>: 0.5      Phi<sub>75</sub>: 1.3  
 Phi<sub>25</sub>: 0.6      Phi<sub>84</sub>: 1.5  
 Phi<sub>50</sub>: 0.9      Phi<sub>95</sub>: 2.2



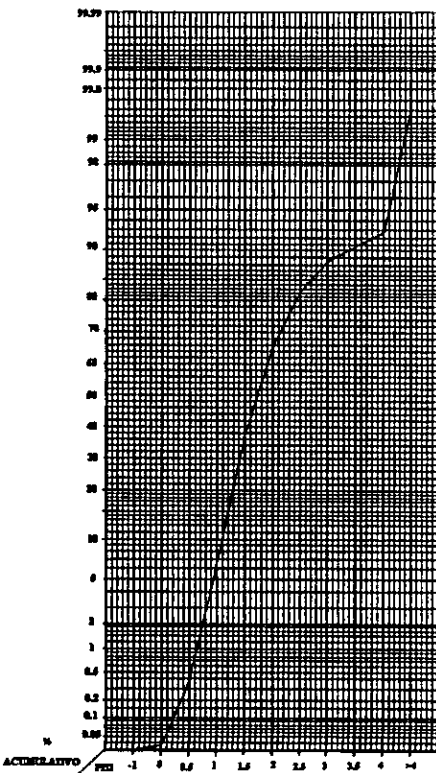
**Muestra: M16**  
 Localidad: Calpan, Puebla  
 Fecha: 30 de abril de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 1.0  
 Phi<sub>16</sub>: 1.35      Phi<sub>75</sub>: 2.0  
 Phi<sub>25</sub>: 1.5      Phi<sub>84</sub>: 2.1  
 Phi<sub>50</sub>: 1.75      Phi<sub>95</sub>: 3.0



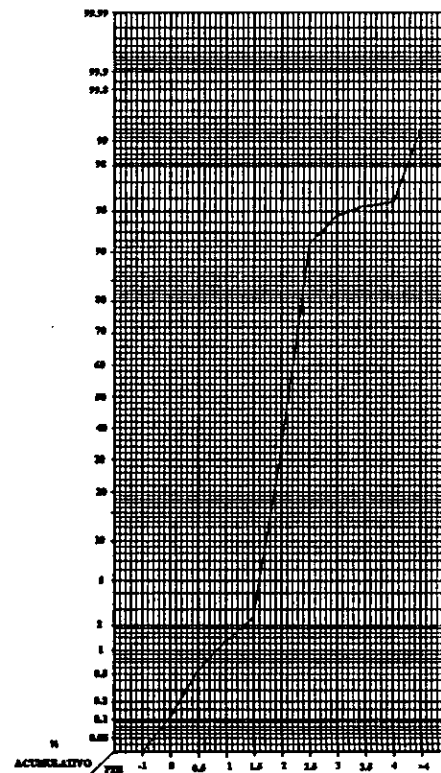
**Muestra: M17**  
 Localidad: Turbina del avión  
 Fecha: 21 de junio de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: -0.8  
 Phi<sub>16</sub>: 0.2      Phi<sub>75</sub>: 2.2  
 Phi<sub>25</sub>: 0.8      Phi<sub>84</sub>: 3.5  
 Phi<sub>90</sub>: 1.7      Phi<sub>95</sub>: 4.3



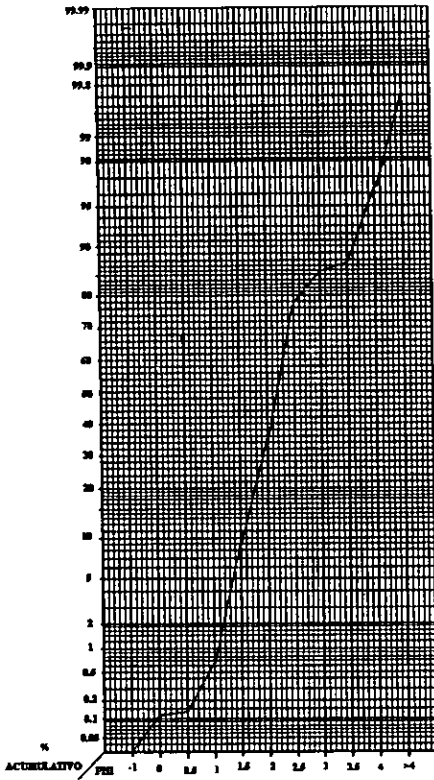
**Muestra: M18**  
 Localidad: Estación Canario,  
 Puebla  
 Fecha: 18 de septiembre de  
 1996  
 Phi<sub>5</sub>: -0.2  
 Phi<sub>16</sub>: 0.3      Phi<sub>75</sub>: 2.7  
 Phi<sub>25</sub>: 1.0      Phi<sub>84</sub>: 4.1  
 Phi<sub>90</sub>: 1.9      Phi<sub>95</sub>: 4.2



**Muestra: M19**  
 Localidad: Col. Delicias, Edo.  
 Mex.  
 Fecha: 28 de Octubre de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 1.0  
 Phi<sub>16</sub>: 1.2      Phi<sub>75</sub>: 2.2  
 Phi<sub>25</sub>: 1.35      Phi<sub>84</sub>: 2.65  
 Phi<sub>90</sub>: 1.75      Phi<sub>95</sub>: 4.25

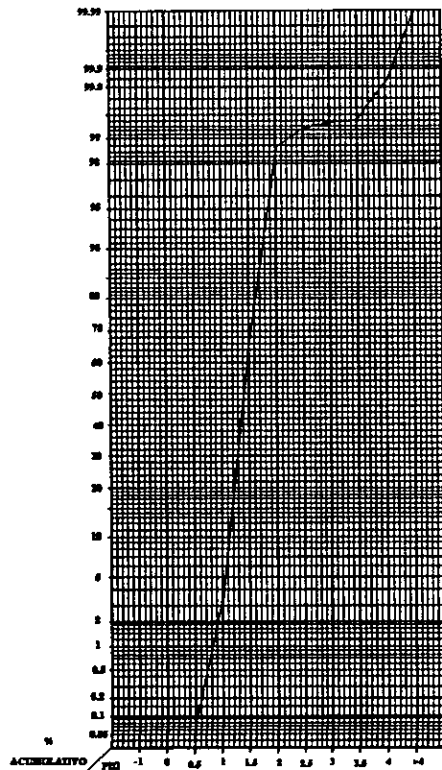
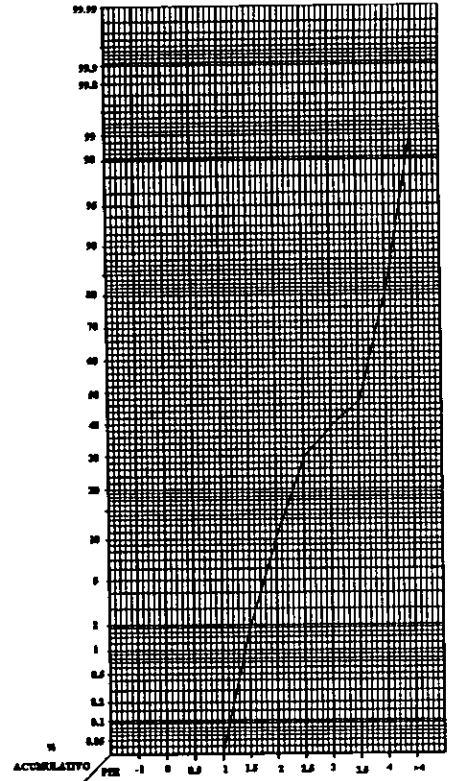


**Muestra: M20**  
 Localidad: Atlauta, Edo. Mex.  
 Fecha: 29 de octubre de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 1.8  
 Phi<sub>16</sub>: 1.9      Phi<sub>75</sub>: 2.2  
 Phi<sub>25</sub>: 2.0      Phi<sub>84</sub>: 2.35  
 Phi<sub>90</sub>: 2.1      Phi<sub>95</sub>: 3.5



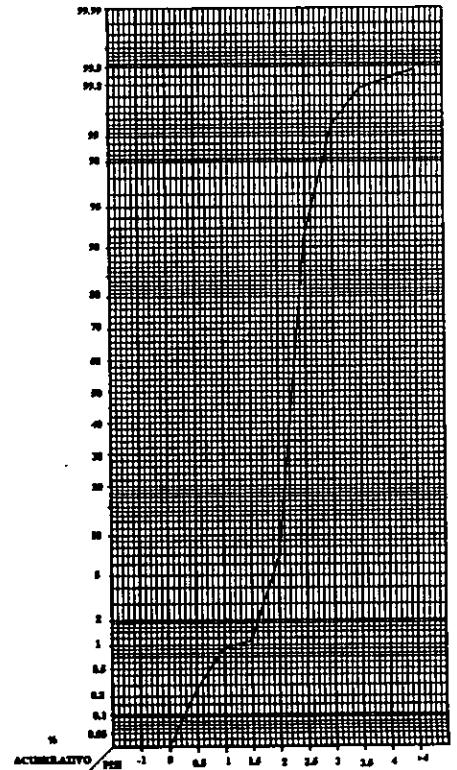
**Muestra: M21**  
 Localidad: Estación Canario,  
 Puebla  
 Fecha: 28 de noviembre de  
 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 1.4  
 Phi<sub>16</sub>: 1.6      Phi<sub>75</sub>: 2.45  
 Phi<sub>25</sub>: 1.8      Phi<sub>84</sub>: 2.8  
 Phi<sub>50</sub>: 2.2      Phi<sub>95</sub>: 4.0

**Muestra: M22**  
 Localidad: P.D. Arenas,  
 Puebla  
 Fecha: 6 de marzo de 1996  
 Phi<sub>5</sub>: 1.7  
 Phi<sub>16</sub>: 2.2      Phi<sub>75</sub>: 4.0  
 Phi<sub>25</sub>: 2.45      Phi<sub>84</sub>: 4.05  
 Phi<sub>50</sub>: 3.5      Phi<sub>95</sub>: 4.3

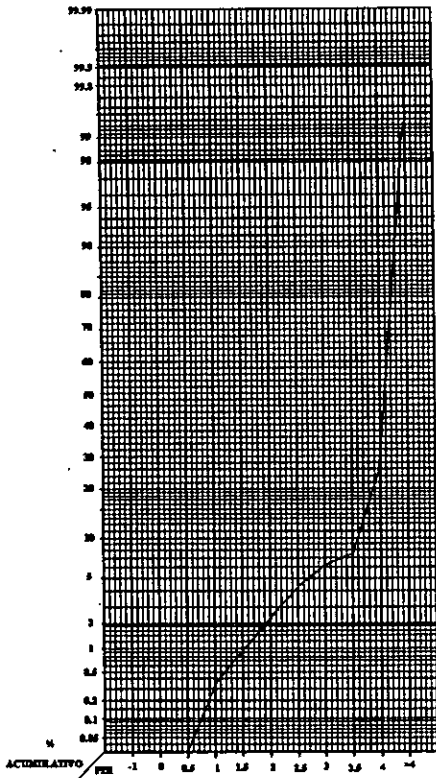


**Muestra: M23**  
 Localidad: Sta. Atexcac,  
 Puebla  
 Fecha: 7 de marzo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.05  
 Phi<sub>16</sub>: 1.25      Phi<sub>75</sub>: 1.5  
 Phi<sub>25</sub>: 1.3      Phi<sub>84</sub>: 1.6  
 Phi<sub>50</sub>: 1.4      Phi<sub>95</sub>: 1.7

**Muestra: M24**  
 Localidad: S. N. de los  
 Ranchos, Pue.  
 Fecha: 29 de abril de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.9  
 Phi<sub>16</sub>: 2.1      Phi<sub>75</sub>: 2.4  
 Phi<sub>25</sub>: 2.15      Phi<sub>84</sub>: 2.5  
 Phi<sub>50</sub>: 2.3      Phi<sub>95</sub>: 2.6

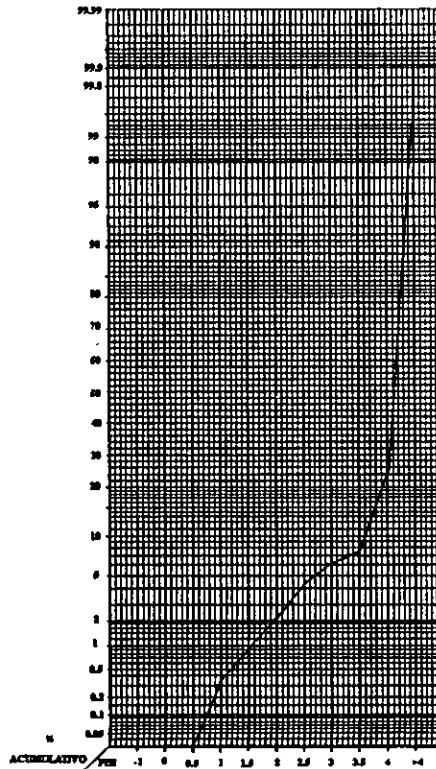
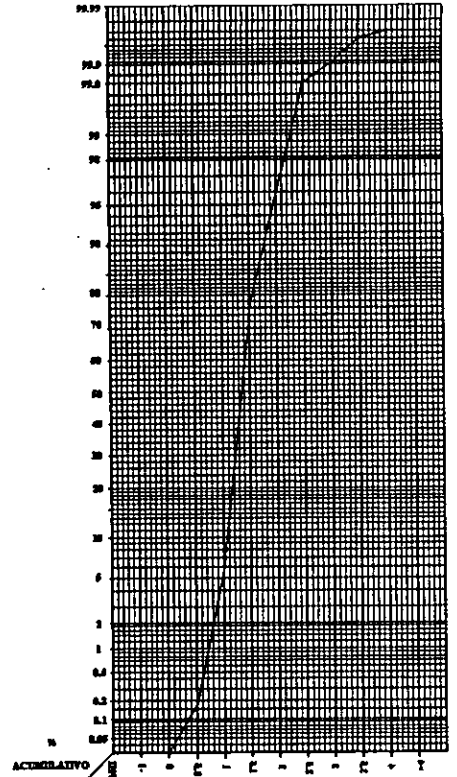






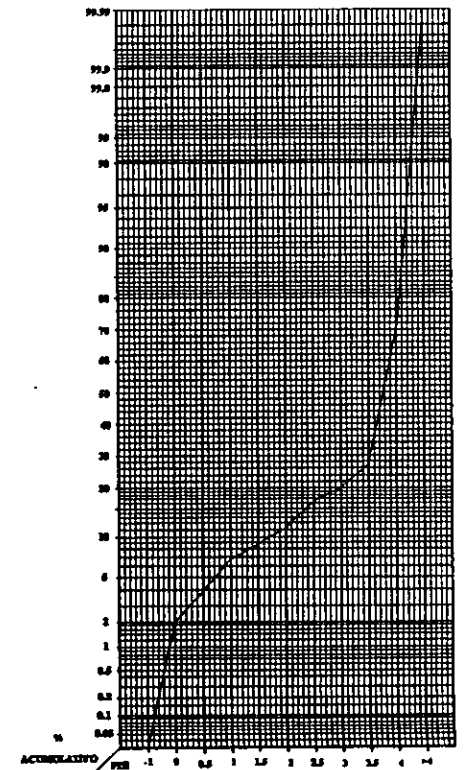
**Muestra: M25**  
 Localidad: S.N. de los  
 Ranchos, Pue.  
 Fecha: 29 de abril de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.5  
 Phi<sub>16</sub>: 3.8      Phi<sub>75</sub>: 4.3  
 Phi<sub>25</sub>: 3.9      Phi<sub>84</sub>: 4.35  
 Phi<sub>50</sub>: 4.1      Phi<sub>95</sub>: 4.4

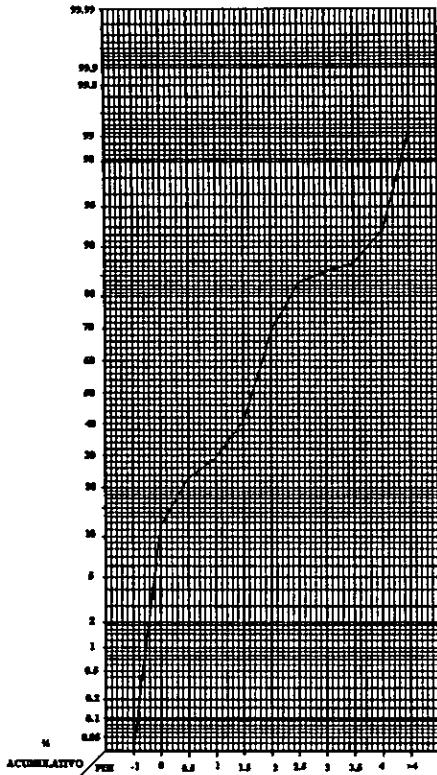
**Muestra: M26**  
 Localidad: Entronque  
 Autopista, Pue.  
 Fecha: 8 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.0  
 Phi<sub>16</sub>: 1.1      Phi<sub>75</sub>: 1.4  
 Phi<sub>25</sub>: 1.2      Phi<sub>84</sub>: 1.55  
 Phi<sub>50</sub>: 1.3      Phi<sub>95</sub>: 1.7



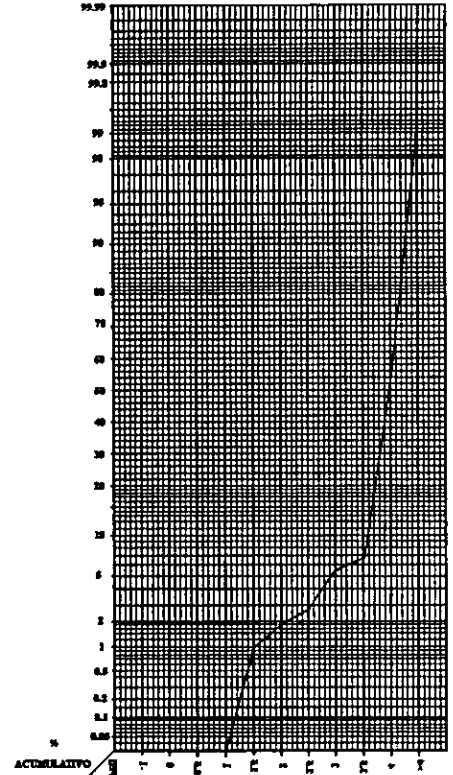
**Muestra: M27**  
 Localidad: Cholula, Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.7  
 Phi<sub>16</sub>: 3.8      Phi<sub>75</sub>: 4.4  
 Phi<sub>25</sub>: 4.0      Phi<sub>84</sub>: 4.45  
 Phi<sub>50</sub>: 4.3      Phi<sub>95</sub>: 4.49

**Muestra: M28**  
 Localidad: S. B. Nealtican,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.7  
 Phi<sub>16</sub>: 2.5      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 3.3      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 3.9      Phi<sub>95</sub>: 4.4

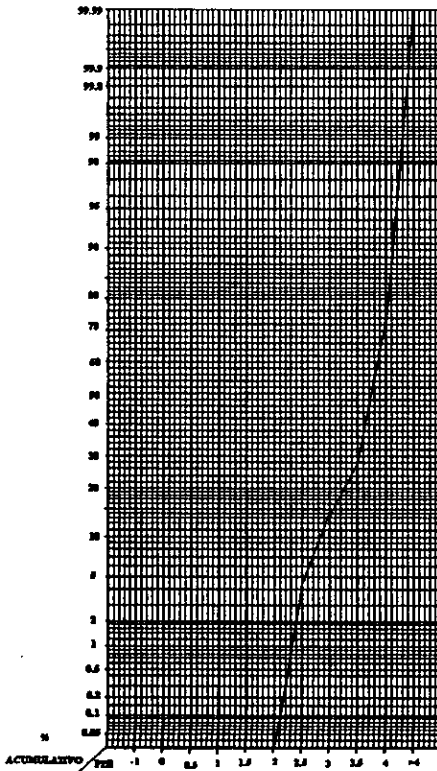




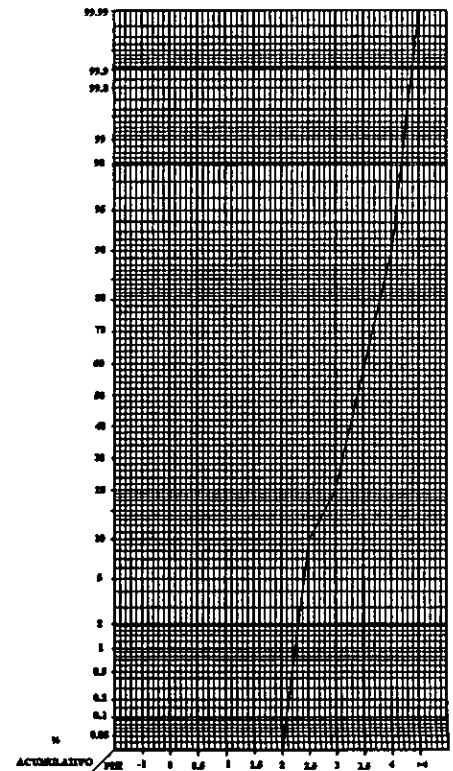
**Muestra: M29**  
 Localidad: Cholula, Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: -0.4  
 Phi<sub>16</sub>: 0.15      Phi<sub>75</sub>: 2.1  
 Phi<sub>25</sub>: 0.55      Phi<sub>84</sub>: 2.7  
 Phi<sub>50</sub>: 1.7      Phi<sub>95</sub>: 4.1



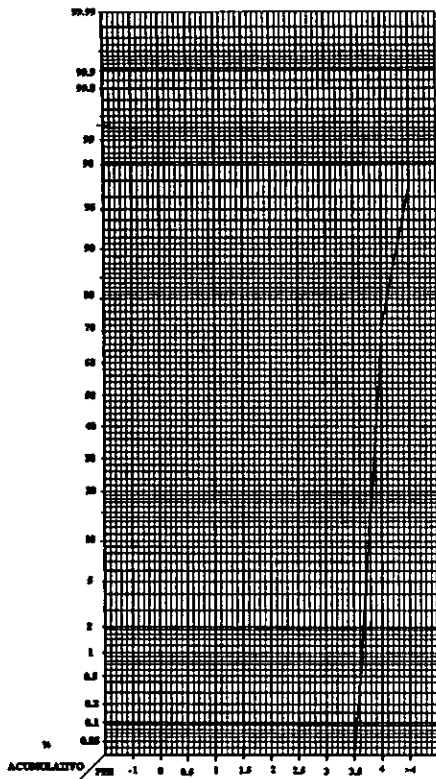
**Muestra: M30**  
 Localidad: S. B. Nealtican,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 3.0  
 Phi<sub>16</sub>: 3.8      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 3.9      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 3.95      Phi<sub>95</sub>: 4.3



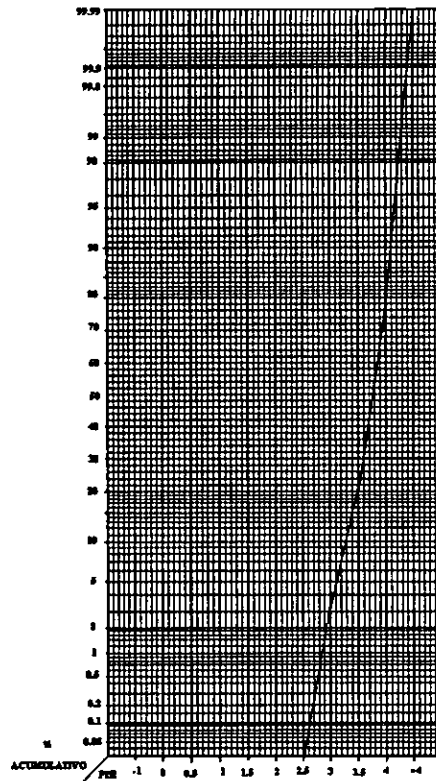
**Muestra: M31**  
 Localidad: S.M. Acuexcomac,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.5  
 Phi<sub>16</sub>: 3.1      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 3.5      Phi<sub>84</sub>: 4.15  
 Phi<sub>50</sub>: 3.85      Phi<sub>95</sub>: 4.3



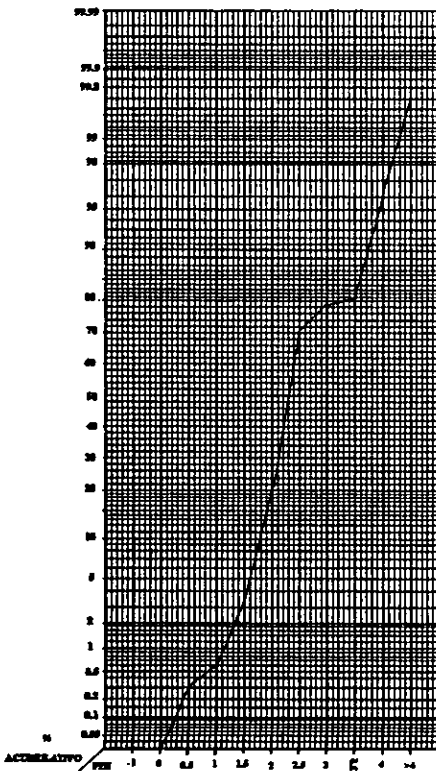
**Muestra: M32**  
 Localidad: Cholula, Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.5  
 Phi<sub>16</sub>: 3.25      Phi<sub>75</sub>: 3.95  
 Phi<sub>25</sub>: 3.5      Phi<sub>84</sub>: 4.0  
 Phi<sub>50</sub>: 3.7      Phi<sub>95</sub>: 4.2



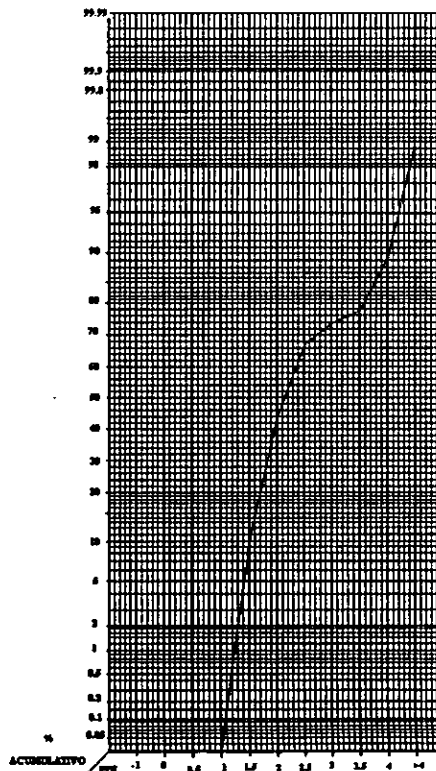
**Muestra: M33**  
 Localidad: Cholula, Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 3.6  
 Phi<sub>16</sub>: 3.75      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 3.8      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 4.0      Phi<sub>95</sub>: 4.4



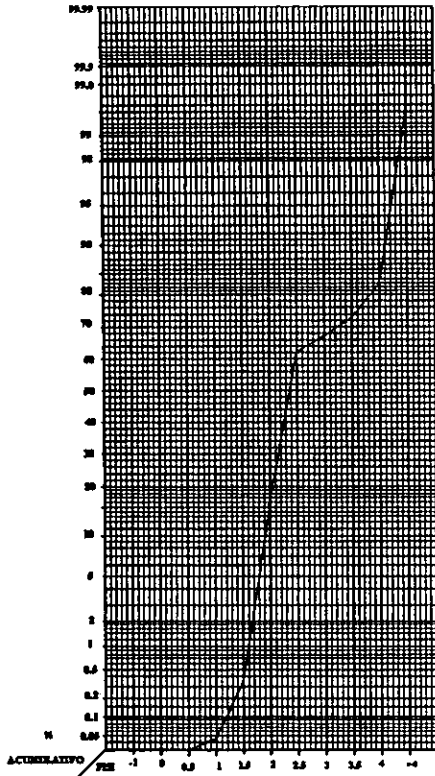
**Muestra: M34**  
 Localidad: Cholula, Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 3.0  
 Phi<sub>16</sub>: 3.4      Phi<sub>75</sub>: 4.0  
 Phi<sub>25</sub>: 3.6      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 3.8      Phi<sub>95</sub>: 4.4



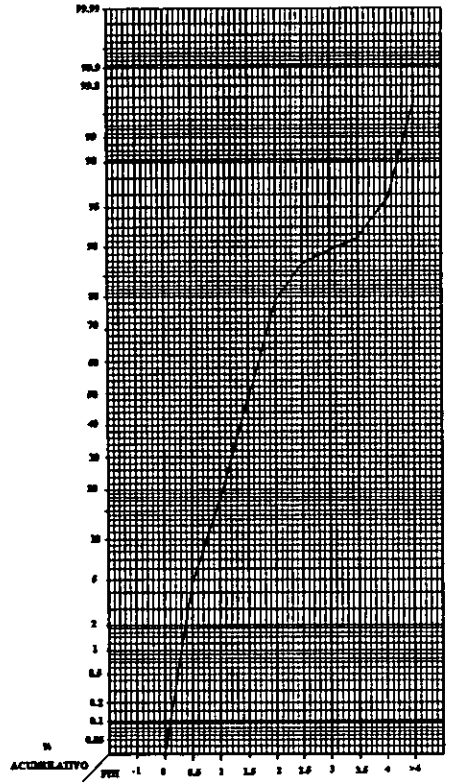
**Muestra: M35**  
 Localidad: UDLA, Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.6  
 Phi<sub>16</sub>: 1.9      Phi<sub>75</sub>: 2.8  
 Phi<sub>25</sub>: 2.05      Phi<sub>84</sub>: 3.5  
 Phi<sub>50</sub>: 2.3      Phi<sub>95</sub>: 4.0



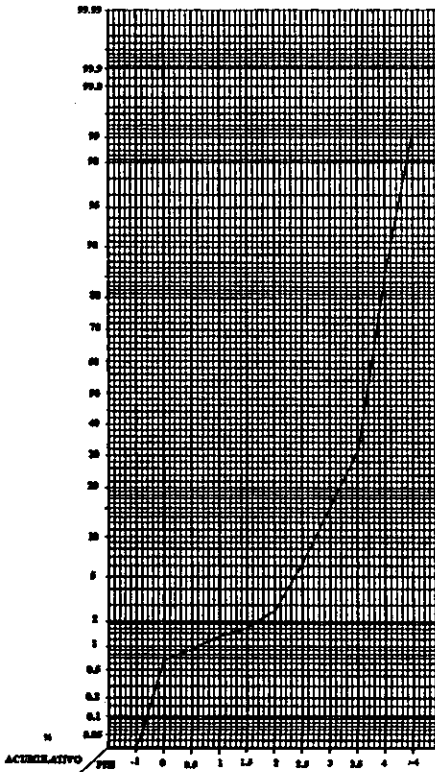
**Muestra: M36**  
 Localidad: S. B. Nealtican,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.3  
 Phi<sub>16</sub>: 1.5      Phi<sub>75</sub>: 3.4  
 Phi<sub>25</sub>: 1.7      Phi<sub>84</sub>: 3.85  
 Phi<sub>50</sub>: 2.2      Phi<sub>95</sub>: 4.3



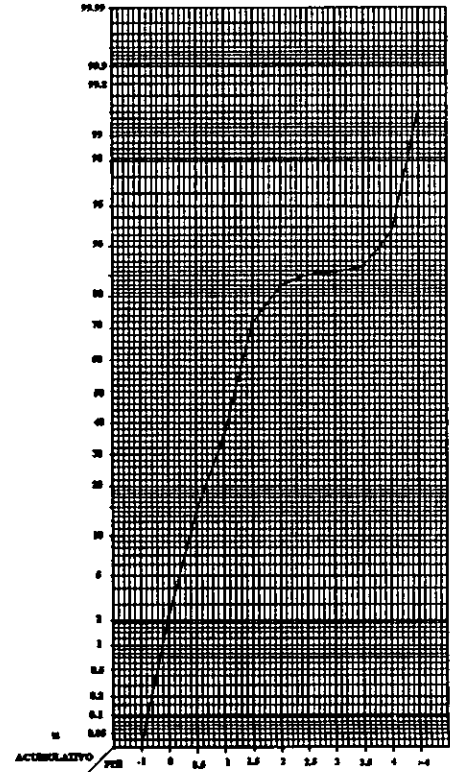
**Muestra: M37**  
 Localidad: S. B. Nealtican,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.8  
 Phi<sub>16</sub>: 2            Phi<sub>75</sub>: 3.6  
 Phi<sub>25</sub>: 2.05        Phi<sub>84</sub>: 4.0  
 Phi<sub>50</sub>: 2.2         Phi<sub>95</sub>: 4.3



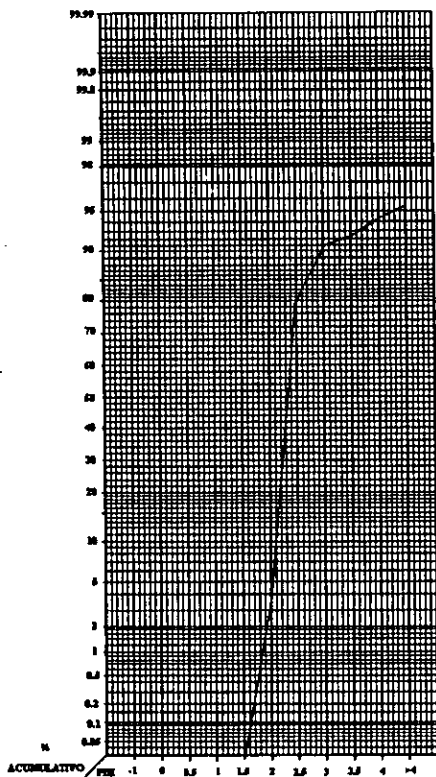
**Muestra: M38**  
 Localidad: B. H. Serdan,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.5  
 Phi<sub>16</sub>: 1.0         Phi<sub>75</sub>: 1.9  
 Phi<sub>25</sub>: 1.1         Phi<sub>84</sub>: 2.2  
 Phi<sub>50</sub>: 1.5         Phi<sub>95</sub>: 3.9



**Muestra: M39**  
 Localidad: S.B. Nealtican,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.4  
 Phi<sub>16</sub>: 3.0         Phi<sub>75</sub>: 4.0  
 Phi<sub>25</sub>: 3.3         Phi<sub>84</sub>: 4.1  
 Phi<sub>50</sub>: 3.8         Phi<sub>95</sub>: 4.2

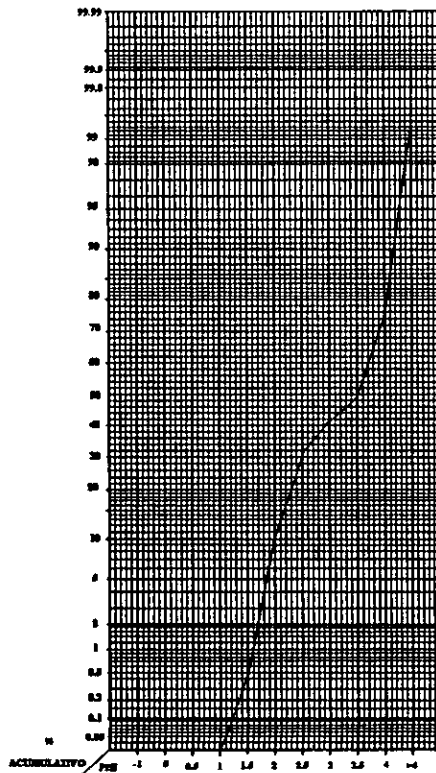
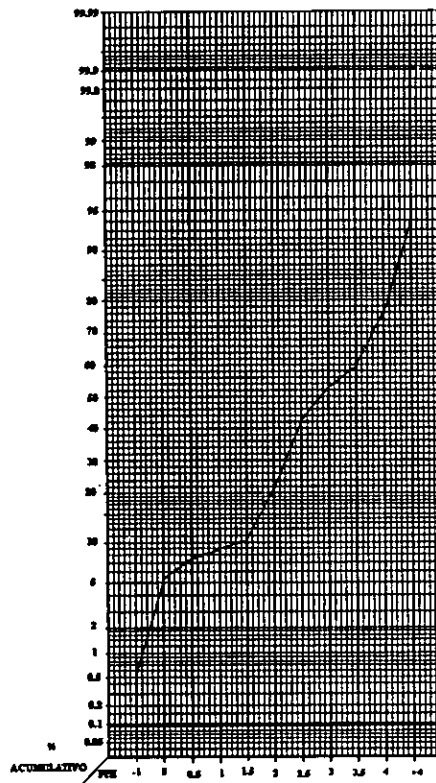


**Muestra: M40**  
 Localidad: S. B. Nealtican,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.2  
 Phi<sub>16</sub>: 0.6         Phi<sub>75</sub>: 1.5  
 Phi<sub>25</sub>: 0.7         Phi<sub>84</sub>: 2.2  
 Phi<sub>50</sub>: 1.2         Phi<sub>95</sub>: 4.1



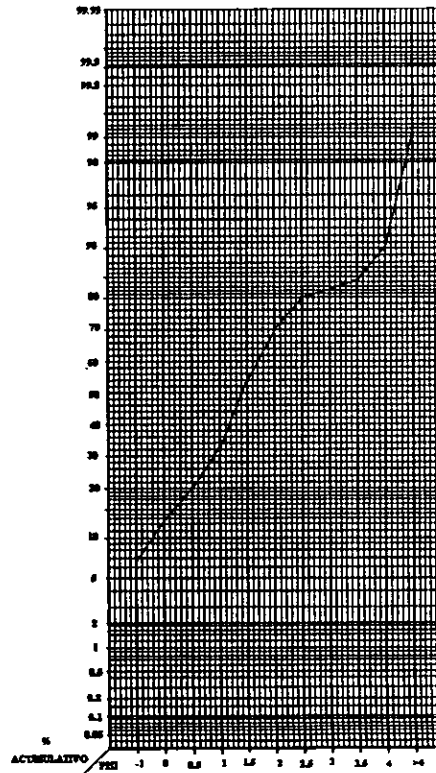
**Muestra: M41**  
 Localidad: S.N. de los  
 Ranchos, Pue.  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.1                      Phi<sub>75</sub>: 2.55  
 Phi<sub>16</sub>: 2.3                      Phi<sub>84</sub>: 2.6  
 Phi<sub>25</sub>: 2.4                      Phi<sub>95</sub>: 4.45  
 Phi<sub>50</sub>: 2.5                      Phi<sub>95</sub>: 4.45

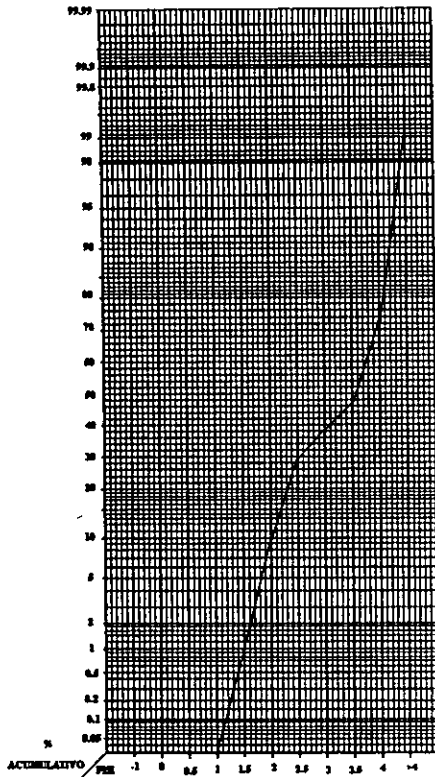
**Muestra: M42**  
 Localidad: Fracc. Cholollan,  
 Puebla  
 Fecha: 11 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.0  
 Phi<sub>16</sub>: 1.25                      Phi<sub>75</sub>: 3.9  
 Phi<sub>25</sub>: 2.05                      Phi<sub>84</sub>: 4.1  
 Phi<sub>50</sub>: 2.9                      Phi<sub>95</sub>: 4.4



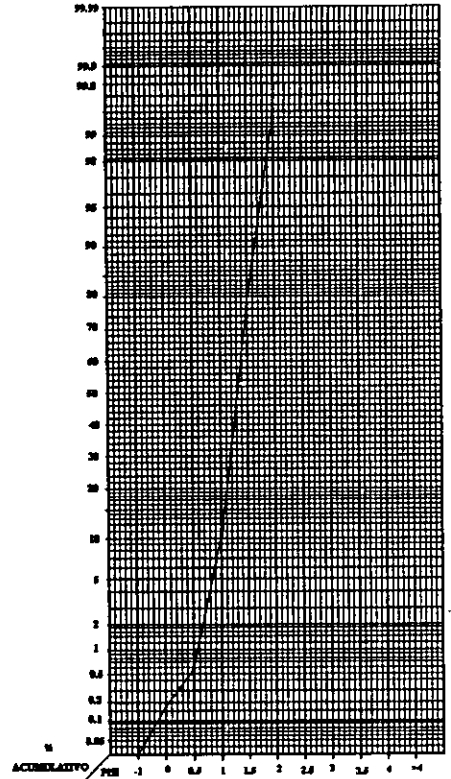
**Muestra: M43**  
 Localidad: Fracc. Cholollan,  
 Puebla  
 Fecha: 12 de mayo de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.8  
 Phi<sub>16</sub>: 2.1                      Phi<sub>75</sub>: 4.0  
 Phi<sub>25</sub>: 2.2                      Phi<sub>84</sub>: 4.1  
 Phi<sub>50</sub>: 3.5                      Phi<sub>95</sub>: 4.3

**Muestra: M44**  
 Localidad: Cuautla, Morelos  
 Fecha: 14 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: -0.1  
 Phi<sub>16</sub>: 0.3                      Phi<sub>75</sub>: 2.2  
 Phi<sub>25</sub>: 0.7                      Phi<sub>84</sub>: 3.4  
 Phi<sub>50</sub>: 1.5                      Phi<sub>95</sub>: 4.2

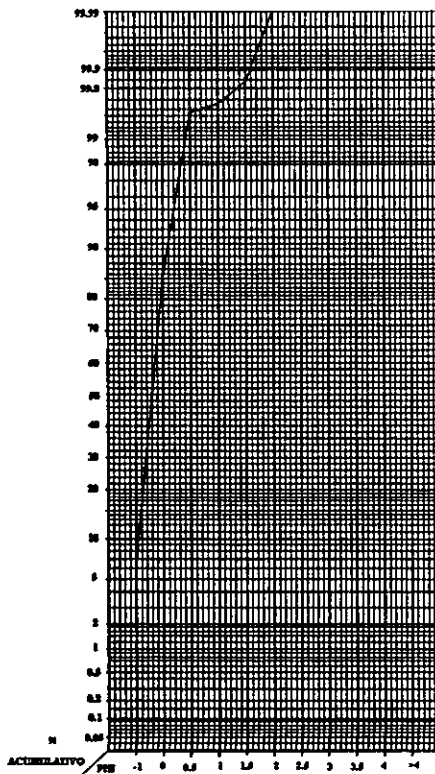




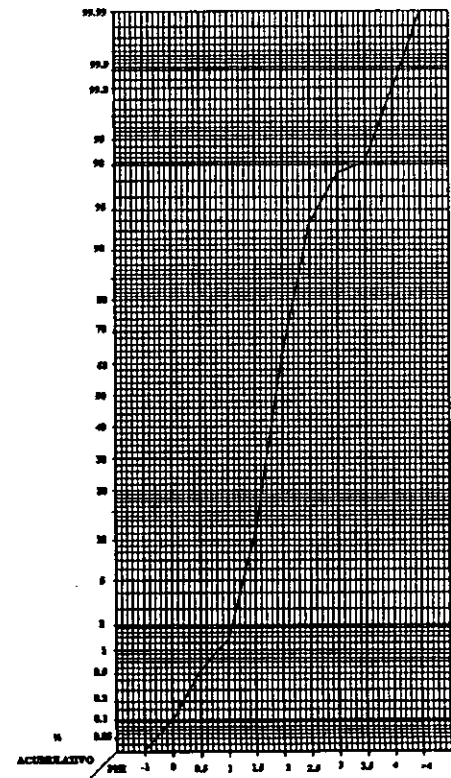
**Muestra: M45**  
 Localidad: Nepantla, Edo.  
 Mex.  
 Fecha: 14 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.7  
 Phi<sub>16</sub>: 2.2      Phi<sub>75</sub>: 4.0  
 Phi<sub>25</sub>: 2.4      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 3.6      Phi<sub>95</sub>: 4.4



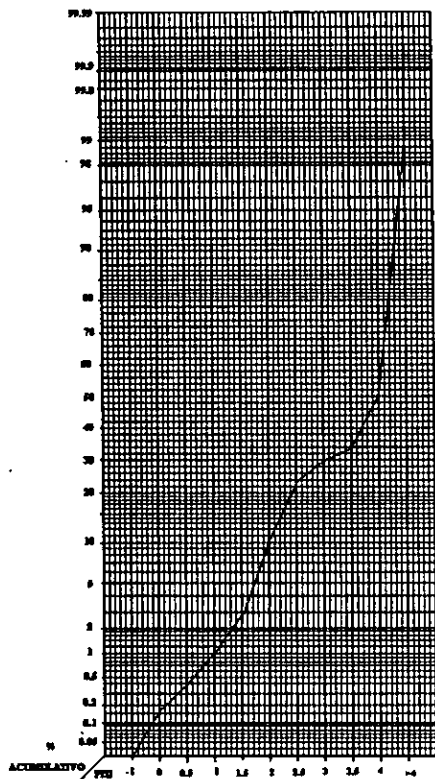
**Muestra: M46**  
 Localidad: Tetela del Volcán,  
 Morelos  
 Fecha: 15 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.85  
 Phi<sub>16</sub>: 1.05      Phi<sub>75</sub>: 1.9  
 Phi<sub>25</sub>: 1.1      Phi<sub>84</sub>: 2.2  
 Phi<sub>50</sub>: 1.2      Phi<sub>95</sub>: 3.9



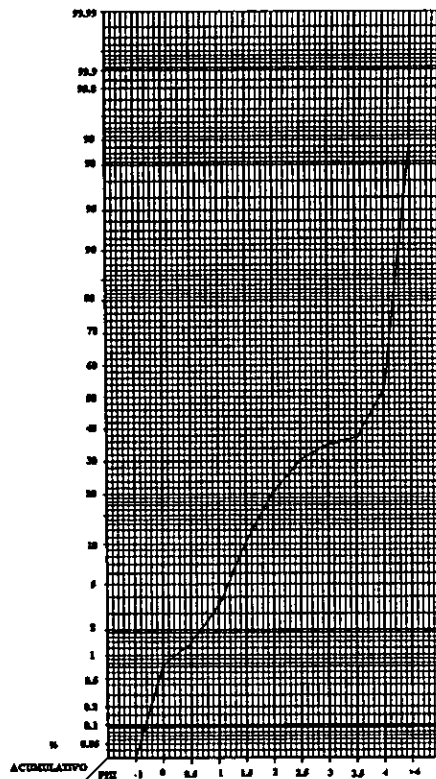
**Muestra: M47**  
 Localidad: Yautepec, Morelos  
 Fecha: 15 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: -1  
 Phi<sub>16</sub>: -0.8      Phi<sub>75</sub>: -0.1  
 Phi<sub>25</sub>: -0.6      Phi<sub>84</sub>: 0  
 Phi<sub>50</sub>: -0.2      Phi<sub>95</sub>: 0.14.2



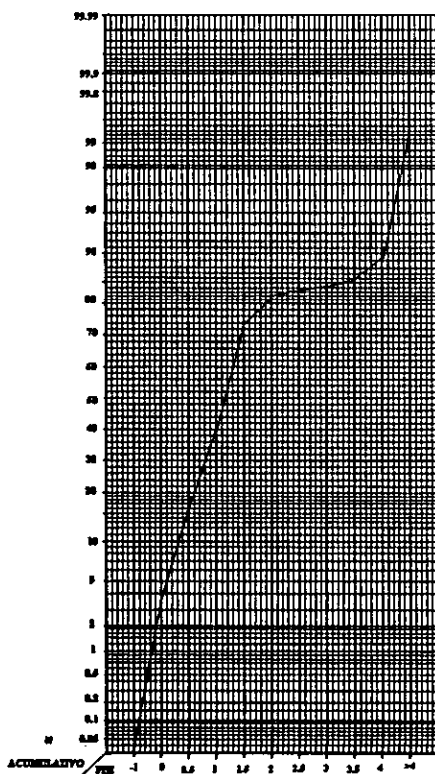
**Muestra: M48**  
 Localidad: Amecameca, Edo.  
 Mex.  
 Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.4  
 Phi<sub>16</sub>: 1.55      Phi<sub>75</sub>: 2.1  
 Phi<sub>25</sub>: 1.65      Phi<sub>84</sub>: 2.2  
 Phi<sub>50</sub>: 1.9      Phi<sub>95</sub>: 2.7



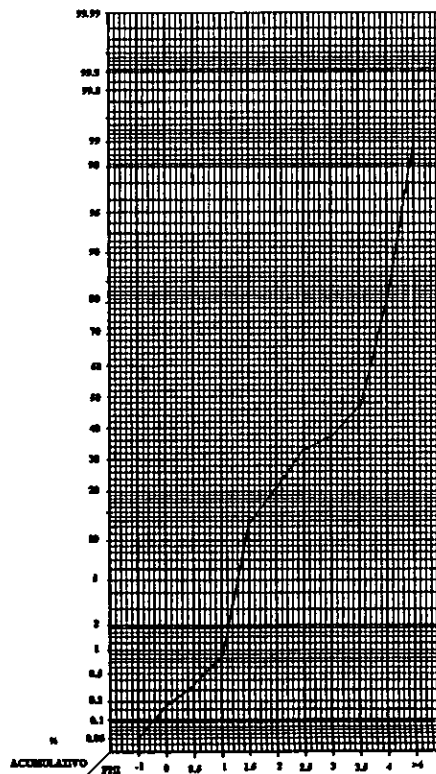
**Muestra: M49**  
 Localidad: Amecameca, Edo.  
 Mex.  
 Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.8  
 Phi<sub>16</sub>: 2.25      Phi<sub>75</sub>: 4.3  
 Phi<sub>25</sub>: 2.754      Phi<sub>84</sub>: 4.35  
 Phi<sub>50</sub>: 4.0      Phi<sub>95</sub>: 4.45



**Muestra: M50**  
 Localidad: Sta. Cruz M.,  
 México D. F.  
 Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 1.2  
 Phi<sub>16</sub>: 1.75      Phi<sub>75</sub>: 4.2  
 Phi<sub>25</sub>: 2      Phi<sub>84</sub>: 4.3  
 Phi<sub>50</sub>: 3.9      Phi<sub>95</sub>: 4.4



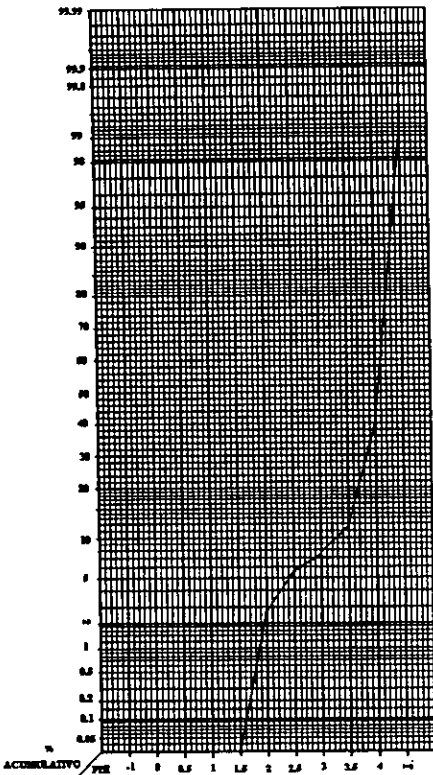
**Muestra: M51**  
 Localidad: Amecameca, Edo.  
 Mex.  
 Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.1  
 Phi<sub>16</sub>: 0.5      Phi<sub>75</sub>: 1.5  
 Phi<sub>25</sub>: 0.7      Phi<sub>84</sub>: 3.5  
 Phi<sub>50</sub>: 1.1      Phi<sub>95</sub>: 4.3



**Muestra: M52**  
 Localidad: Col. S. D. Mirón,  
 Puebla  
 Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 0.8  
 Phi<sub>16</sub>: 1.7      Phi<sub>75</sub>: 3.95  
 Phi<sub>25</sub>: 2.2      Phi<sub>84</sub>: 4.0  
 Phi<sub>50</sub>: 3.6      Phi<sub>95</sub>: 4.2

**Muestra: M53**  
 Localidad: Amecameca Edo.  
 Mex.

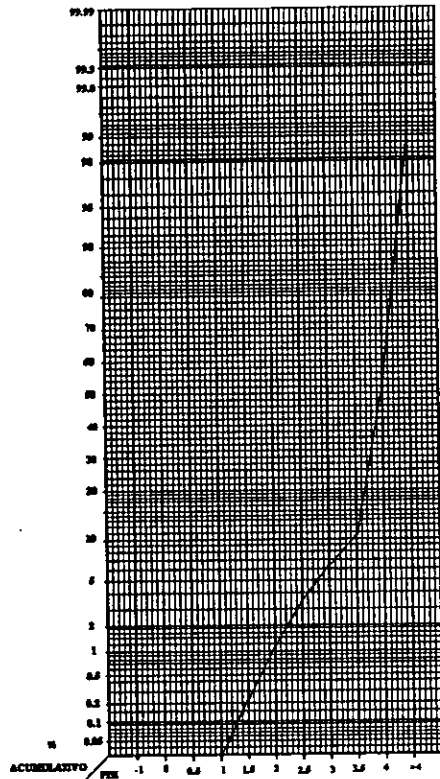
Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.5  
 Phi<sub>16</sub>: 3.7      Phi<sub>75</sub>: 4.3  
 Phi<sub>25</sub>: 3.8      Phi<sub>84</sub>: 4.35  
 Phi<sub>50</sub>: 4.15      Phi<sub>95</sub>: 4.4



**Muestra: M54**

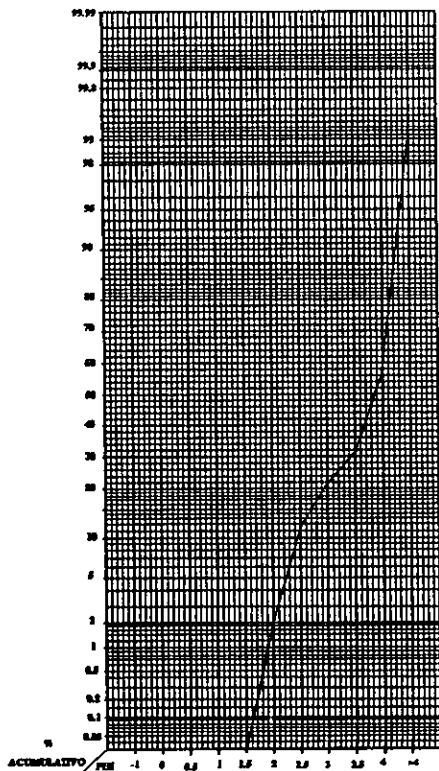
Localidad: Tetela del Volcán,  
 Morelos

Fecha: 30 de junio de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.7  
 Phi<sub>16</sub>: 3.75      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 3.85      Phi<sub>84</sub>: 4.2  
 Phi<sub>50</sub>: 4.0      Phi<sub>95</sub>: 4.3



**Muestra: M55**  
 Localidad: Ecatingo, Edo.  
 Mex.

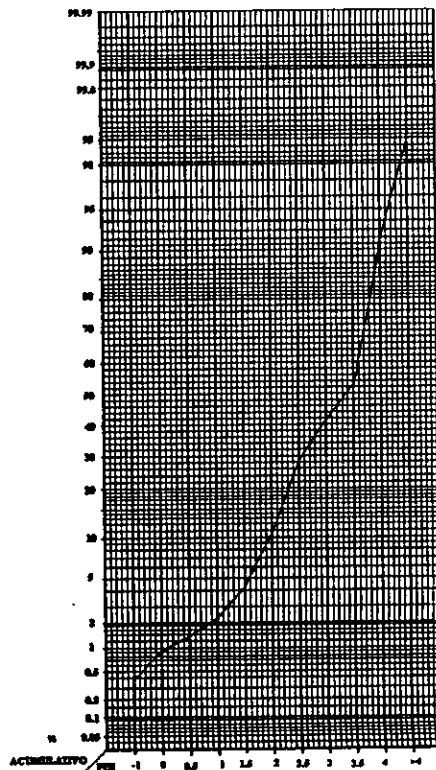
Fecha: 12 de agosto de 1997  
 Phi<sub>5</sub>: 2.2  
 Phi<sub>16</sub>: 2.8      Phi<sub>75</sub>: 4.2  
 Phi<sub>25</sub>: 3.1      Phi<sub>84</sub>: 4.3  
 Phi<sub>50</sub>: 3.9      Phi<sub>95</sub>: 4.4



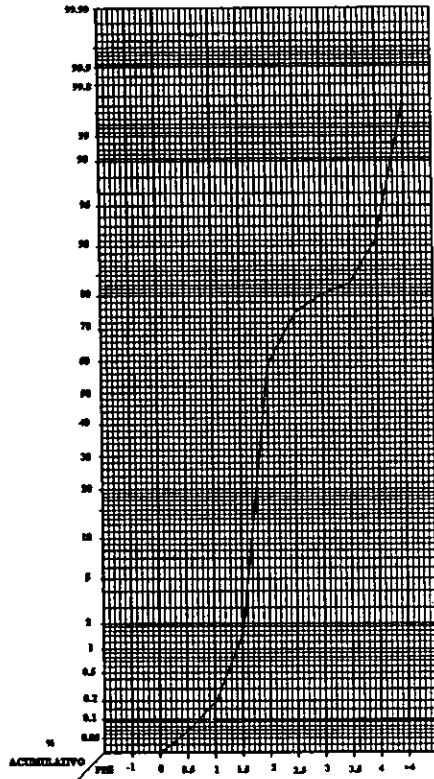
**Muestra: M56**

Localidad: Amecameca Edo.  
 Mex.

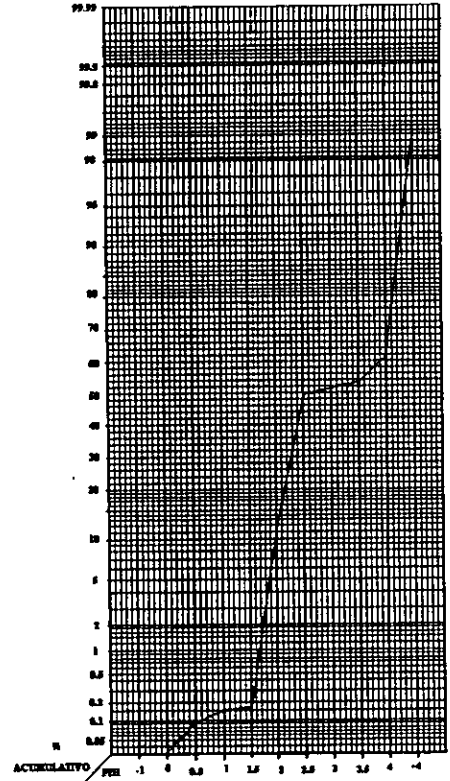
Fecha: 29 de agosto de 1998  
 Phi<sub>5</sub>: 1.6  
 Phi<sub>16</sub>: 2.2      Phi<sub>75</sub>: 3.9  
 Phi<sub>25</sub>: 2.5      Phi<sub>84</sub>: 4.0  
 Phi<sub>50</sub>: 3.3      Phi<sub>95</sub>: 4.25



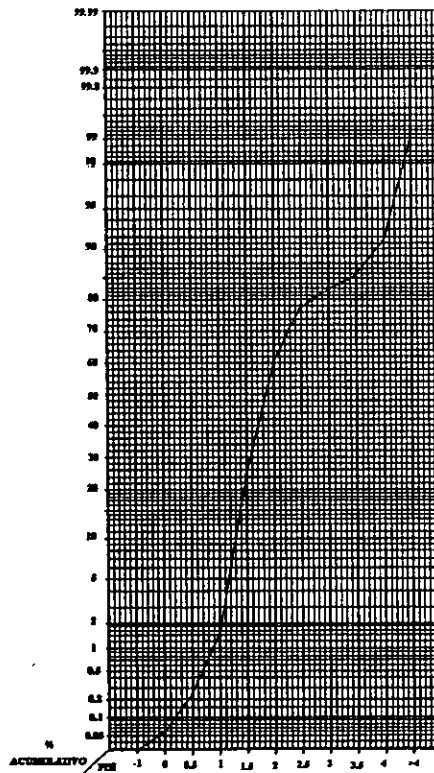




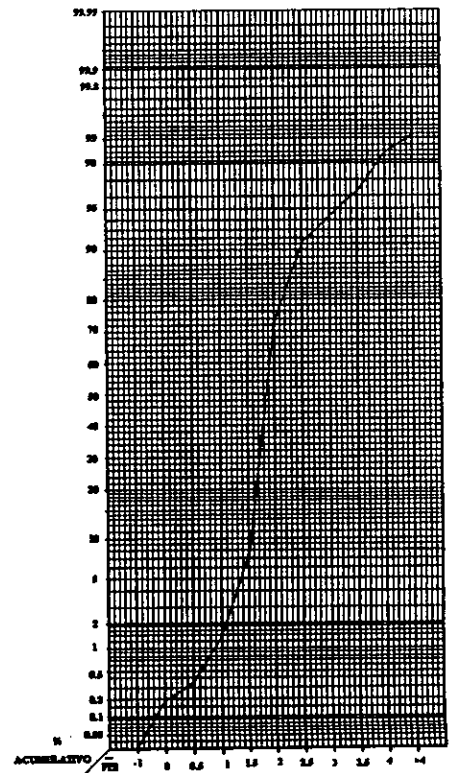
**Muestra: M57**  
 Localidad: Tochimilco, Puebla  
 Fecha: 9 septiembre de 1998  
 Phi<sub>5</sub>: 1.7  
 Phi<sub>16</sub>: 1.75      Phi<sub>75</sub>: 2.3  
 Phi<sub>25</sub>: 1.8      Phi<sub>84</sub>: 3.5  
 Phi<sub>50</sub>: 1.9      Phi<sub>95</sub>: 4.1



**Muestra: M58**  
 Localidad: Desv. Ecatzingo,  
 Edo. Mex.  
 Fecha: 21 de septiembre de  
 1998  
 Phi<sub>5</sub>: 1.9  
 Phi<sub>16</sub>: 2.0      Phi<sub>75</sub>: 4.1  
 Phi<sub>25</sub>: 2.1      Phi<sub>84</sub>: 4.3  
 Phi<sub>50</sub>: 2.5      Phi<sub>95</sub>: 4.45



**Muestra: M59**  
 Localidad: Paso de Cortés,  
 Edo. Mex.  
 Fecha: 26 de septiembre de  
 1998  
 Phi<sub>5</sub>: 1.3  
 Phi<sub>16</sub>: 1.5      Phi<sub>75</sub>: 2.5  
 Phi<sub>25</sub>: 1.55      Phi<sub>84</sub>: 3.3  
 Phi<sub>50</sub>: 1.7      Phi<sub>95</sub>: 4.3



**Muestra: M60**  
 Localidad: Paso de Cortés,  
 Edo. Mex.  
 Fecha: 6 de octubre de 1998  
 Phi<sub>5</sub>: 1.5  
 Phi<sub>16</sub>: 1.7      Phi<sub>75</sub>: 2.0  
 Phi<sub>25</sub>: 1.8      Phi<sub>84</sub>: 2.2  
 Phi<sub>50</sub>: 1.9      Phi<sub>95</sub>: 3.3