



# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COMPARACIÓN DE MEDICIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE POR ESPECTROMETRÍA DE CORRELACIÓN Y ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ÓPTICA DIFERENCIAL**

**TESIS**

**PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**LICENCIADO EN INGENIERÍA GEOFÍSICA**

**PRESENTA:**

**LUIS SALAZAR TLACZANI**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**DR. JOSE LUIS GONZALEZ GUEVARA**

**DR. HUGO DELGADO GRANADOS**

**PUEBLA, PUE.**

**AGOSTO 2016**



# Contenido

<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO 1</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Antecedentes</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Trabajos previos</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Planteamiento del problema</b>	<b>12</b>
<b>1.4 Hipótesis</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Objetivos</b>	<b>13</b>
<b>1.6 Metodología</b>	<b>14</b>
<b>1.7 Área de estudio</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO 2 Marco Teórico</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Vulcanología</b>	<b>16</b>
2.1.1 Erupciones volcánicas	19
2.1.2 Vulcanismo y tipos de volcanes	23
2.1.3 Emisiones volcánicas	25
2.1.4 Importancia de medir los gases volcánicos	26
<b>2.2 Dióxido de azufre en la atmosfera</b>	<b>28</b>
2.2.1 Dióxido de azufre	29
2.2.2 absorción del dióxido de azufre	30
2.2.3 Fuentes de Dióxido de azufre naturales y antropogénico.	32
<b>2.3 Efectos de las emisiones volcánicas en la salud</b>	<b>35</b>
2.3.1 Dióxido de azufre	35
2.3.2 Dióxido de azufre permitido en México por La Norma Mexicana de salud.	37
2.3.3 Gases irritantes y no irritantes.	37

2.3.4 Ceniza volcánica	38
<b>2.4 Espectrometría de Correlación.</b>	<b>39</b>
2.4.1 Conceptos básicos de la radiación	39
2.4.2 Espectro electromagnético	40
2.4.3 Atenuación de la radiación solar por la atmósfera	42
2.4.4 El sistema COSPEC	43
<b>2.5 Espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS)</b>	<b>54</b>
2.5.1 Especies que se pueden medir en el rango UV-visible.	54
2.5.2 Espectros de absorción en el rango UV-visible.	54
2.5.3 Principio teórico del DOAS	56
<b>CAPITULO 3</b>	<b>58</b>
<b>Área de estudio: Volcán Popocatépetl</b>	<b>58</b>
3.1 Localización	59
3.2 Geología, origen y evolución del Popocatépetl	59
3.3 Historia eruptiva reciente	62
3.4 Condiciones meteorológicas: "VIENTO"	66
<b>CAPITULO 4 Mediciones de campo y procesamiento de datos</b>	<b>67</b>
<b>4.1 Técnica COSPEC utilizada en el volcán Popocatépetl</b>	<b>70</b>
4.1.1 Instrumentación y metodología	71
4.1.2 Medida de <b>SO<sub>2</sub></b> con COSPEC en mediciones terrestres móviles	71
4.1.3 Procesamiento de datos	73
4.1.4 Limitaciones del COSPEC como sensor remoto pasivo	76
<b>4.2 Técnica móvil-DOAS utilizada en el volcán Popocatépetl</b>	<b>77</b>
4.2.1 Instrumentación y metodología	78
4.2.2 Sistema móvil-DOAS desde un vehículo	81
4.2.3 Procesamiento de datos	83
<b>4.3 Red de DOAS NOVAC en el volcán Popocatépetl</b>	<b>86</b>
4.3.1 Instrumentación y metodología	87

4.3.2 Estaciones que componen la red de DOAS en el volcán Popocatépetl	90
4.3.3 Procesamiento de datos	92
<b>CAPITULO 5 Resultados</b>	<b>97</b>
<b>5.1 Campaña de Medición 2010 en el volcán Popocatépetl</b>	<b>98</b>
5.1.1 Datos de viento enero – octubre 2010	99
5.1.2 Primera campaña: enero – julio de 2010	100
5.1.3 Resultados segunda campaña: agosto - octubre 2010	106
<b>5.2. Análisis y discusión de los resultados.</b>	<b>117</b>
5.2.1 Situación meteorológica (Datos de la NOAA)	117
5.2.2 Análisis de la primera campaña	117
5.2.3 Análisis de la segunda campaña.	118
<b>CAPITULO 6 Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>121</b>
<b>Referencias Bibliograficas</b>	<b>125</b>

## RESUMEN

El volcán Popocatépetl (19° 1' 0" N, 98° 37' 0" W, 5500 msnm) se ha caracterizado por mantenerse en un estado activo por más de 15 años después del inicio de su última etapa de eruptiva que comenzó el 21 de Diciembre de 1994, Durante este periodo ha tenido periodos de reposo y periodos de mayor actividad. Este proceso comenzó con explosiones de tipo vulcaniano que produjeron columnas de ceniza con alturas de hasta 7,000 msnm. La fase más fuerte de la erupción inicial ocurrió el 24 y 25 de diciembre y posteriormente declino.

Los estudios de gases volcánicos en conjunto con otros métodos sísmicos y geodésicos son algunas de las herramientas comúnmente usadas para estudiar el comportamiento de un volcán (p. ej. Tilling, 1989; Sutton *et al.* 1993; Andrés y Rose, 1995). En los últimos 15 años se han realizado varios estudios, de medición de gases volcánicos para poder entender el comportamiento del volcán Popocatépetl (p. ej. Delgado *et al.* 1998a, b; Galindo *et al.* 1998). En estos estudios, el gas que se ha medido de forma continua desde el comienzo de la crisis en 1994 ha sido el dióxido de azufre por medio del espectrómetro de correlación (COSPEC), que es realizado por personal del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). En estos años recientes se implemento una red de monitoreo de gases volcánicos que consiste de 4 espectrómetros mini-DOAS fijos, que forman parte del proyecto NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change; <http://www.novac-project.eu/indexProjectObj.htm>), encargado de medir las emisiones de gases, en particular el dióxido de azufre.

Se hacen de manera continua campañas de campo para mediciones de gases volcánicos, en la última campaña que se realizo en el volcán Popocatépetl del 10 al 23 de abril del 2010 como parte del proyecto FIEL-VOLCAN (Observaciones de Campo, Instrumentales y Estudios Experimentales Aplicados a Prevenir Desastres Volcánicos: Desarrollo de Instrumentos y Métodos Novedosos para el Estudio de la Actividad Volcánica) se realizaron de manera diaria mediciones de dióxido de azufre por medio de diferentes técnicas como son el espectrómetro de correlación (COSPEC), espectrómetros mini-DOAS, móvil-DOAS, y la técnica FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy).

Esta tesis se desarrollo como parte de las actividades de dicha campaña de campo para el monitoreo de gases volcánicos del volcán Popocatépetl y forma parte de las investigaciones del Fondo de Cooperación Internacional para el fomento de la investigación científica y tecnológica entre México y la Unión Europea (FONCICYT).

Esta memoria incluye también aspectos teóricos y prácticos acerca de los instrumentos COSPEC Y de la red de mini-DOAS instalada en el volcán Popocatépetl, utilizados principalmente durante esta campaña para la medición de gases volcánicos en el volcán Popocatépetl, así como la comparación de datos obtenidos durante la misma para un mejor entendimiento del comportamiento del volcán en estudio. También se hace una comparación entre los dos métodos utilizados principalmente para ver ventajas y desventajas de su uso en campo.

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCION**

## 1.1 Antecedentes

El volcán Popocatepetl cuyo nombre en Náhuatl significa “Cerro que humea” es uno de los 14 volcanes que han desarrollado actividad histórica, de los más de 3000 estructuras volcánicas plio-cuaternarias que existen en México (Guevara *et al.*, 2003).

El Popocatepetl es un estratovolcán andesítico-dacítico, localizado a 60 km al sureste de la ciudad de México y a 45 km al oeste de la ciudad de Puebla. Tiene una altura de 5452 msnm y un cráter de aproximadamente 900 m de diámetro y 200 m de profundidad. Su edificio cubre un área de 500 km<sup>2</sup> abarcando los estados de Puebla, México y Morelos (Alarcón, 2008).

El volcán Popocatepetl ha pasado por periodos eruptivos, que han determinado su evolución a través de la definición de unidades de roca siguiendo un criterio morfo estratigráfico y secciones geológicas detalladas. El primer estratovolcán antiguo conocido como Nexpayantla produjo principalmente fluidos de lava de andesítico-dacítico, presento actividad en uno de sus flancos en forma de grandes domos de lava dacítica. La evolución del volcán Nexpayantla termino con un gran colapso del flanco sur produciendo depósitos de avalancha. Un nuevo volcán creció El Ventorrillo construido en los restos del volcán Nexpayantla formado principalmente de fluidos de lava andesítica. El volcán Ventorrillo colapso en una erupción tipo Bezymianny hacia el suroeste. El actual cono creció a través de la emisión de fluidos de lava de tipo andesítica a dacítica, (Espinasa y Martin, 2006).

Después de un periodo de reposo, este volcán inició una nueva fase de actividad con una emisión de gases y cenizas el 21 de diciembre de 1994. La última etapa de actividad fue de 1920 a 1927, generando el crecimiento de domos de lava dentro del cráter, así como explosiones y emisiones de ceniza (Waitz, 1921). La etapa de actividad contemporánea del volcán se caracteriza por crecimientos de domos dentro del cráter, así como explosiones de tipo vulcanianas con un máximo índice de explosividad de 3 (VEI, Newhall).

Hasta el inicio de esta nueva fase de actividad no existían estudios de importancia referente a los gases volcánicos para el volcán Popocatépetl. A partir de 1994 el interés por estudiar los gases volcánicos incremento en especial el dióxido de azufre, la imposibilidad de obtener datos de las especies de gas volcánico, implicó la utilización de métodos como la espectrometría de correlación. En las últimas tres décadas el método COSPEC ha sido parte del monitoreo de un gran número de volcanes alrededor del mundo incluyendo el Kilauea (Casadevall *et al.*, 1987) y el Monte Santa Elena (Casadevall *et al.*, 1983) en los Estados Unidos, el uso del COSPEC en el Popocatépetl se ve reflejado en el trabajo de varios autores (Delgado *et al.*, 1998a,b; Galindo *et al.*, 1997, 1998), el uso de esta técnica en el volcán Popocatépetl se encuentra detallada en Delgado, 2008.

De manera reciente se han incorporado al estudio de gases en volcán Popocatépetl nuevas técnicas de espectrometría, como lo es la espectrometría de absorción óptica diferencial (DOAS), esta nueva técnica ha permitido ampliar significativamente la capacidad de vigilancia del gas dióxido de azufre en el volcán Popocatépetl, a partir del 2005 con la instalación de la primera estación de la red NOVAC se mantiene un mejor monitoreo del volcán en estudio.

La nueva etapa ha sido bien monitoreada y estudiada en diversas áreas: percepción remota, sismología, petrología, deformación, geoquímica, vulcanología física, magnetometría, visual, etc. Especialmente el monitoreo de percepción remota ha sido de gran ayuda para estudiar la actividad volcánica actual.

## **1.2 Trabajos previos**

En lo que se refiere a la geología y a la estratigrafía del volcán Popocatépetl encontramos una gran número de trabajos realizados como los siguientes: Frías (1965) en su análisis geológico de la “hoja de Cuernavaca”, Schlaepfer (1968) en su análisis geológico de la “hoja México”, Mosser (1975) determina que el Popocatépetl inicio su formación en el Plioceno tardío alcanzando su máximo en el Pleistoceno. Venegas *et al.* (1985) incluye al Popocatépetl en la etapa del vulcanismo reciente, de edad Plio-Cuaternario. Morán (1985) menciona que el Popocatépetl forma parte de una de las fases terminales del vulcanismo de la cuenca de México, Mosser *et al.* (1996) pre-

senta en mapas escala 1: 100,000 la nueva geología de las cuencas de Toluca, México y Puebla, donde incluye la zona del Popocatepetl en seis unidades distintas. Martin del Pozzo *et al.* (1997) presenta en forma general la geología del volcán Popocatepetl en 8 unidades principales, Siebe *et al.* (1996a) y Martin del Pozzo (1997) realizan estudios estratigráficos detallados, en donde coinciden en la existencia de depósitos relacionados con erupciones plinianas históricas.

En los aspectos geomorfológicos del Popocatepetl, Camacho (1929) describe las características del cráter del Popocatepetl, Cantagrel *et al.* (1984) realiza estudios de los episodios eruptivos del Pico de Orizaba y del Popocatepetl, Robín (1984) realiza un estudio evolutivo de la estructura volcánica, Carrasco (1985) y Carrasco *et al.* (1986) también analizan las etapas de evolución del Popocatepetl y coincide con las propuestas por Robín (1984), Siebe *et al.* (1996b) indica que la actividad fumarólica que ha presentado el Popocatepetl a través del tiempo, ha sido constante, así como frecuentes erupciones de pequeña magnitud.

En lo que se refiere a sus glaciares, Aguilera y Ordoñez (1985) Son los primeros en mencionar la existencia de una capa de nieve o hielo que al parecer es permanente y se localiza en las cumbres del Popocatepetl, Lorenzo (1959) identifica y define las propiedades de los glaciares del volcán Popocatepetl, Delgado *et al.* (1985) realiza el segundo inventario de los glaciares del volcán Popocatepetl, Delgado y Brugman (1995) debido al incremento de la actividad volcánica del Popocatepetl (diciembre de 1994), realizan un monitoreo de sus glaciares.

Para el volcán Popocatepetl la vigilancia de la desgasificación se ha llevado a cabo de manera periódica, dentro de los cuales podemos mencionar: Galindo *et al.* (1996) que presenta mediciones de flujo de dióxido de azufre ( $SO_2$ ) del volcán Popocatepetl durante febrero de 1994 a enero de 1995, indicando que las emisiones máximas de gas ( $SO_2$ ) ocurrieron 72 horas después de iniciado el proceso eruptivo. Ellos, consideran que la línea base de emisión de  $SO_2$  durante el periodo mencionado es de 1,000 t/d, y con valores cercanos a los 5,000 t/d; Delgado y Cárdenas (1997); empezaron mediciones con COSPEC en enero de 1994 mostrando una tasa de emisión de  $SO_2$  de ~1,500 a ~12,500 t/d; Delgado *et al.* (2001) y donde se estableció un record de desgasificación para un volcán con erupciones pasivas y efusivas, con una tasa promedio total de flujo de  $SO_2$  de

9 millones de toneladas desde el inicio de su actividad hasta el 1 de enero de 1998; Goff *et al.* (1998) reporta flujos de 30,000 - 50,000 t/d de  $SO_2$ ; Grutter *et al.* (2008) durante la campaña de campo denominada MILAGRO (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations, por sus siglas en inglés) en marzo de 2006, utilizando un “scanning” DOAS reporto un promedio de  $2.45 \times 10^3 \pm 1.39 \times 10^3$  Gg/d, de todos los días durante la campaña.

Todas estas mediciones establecen al volcán Popocatépetl como uno de los más grandes productores de dióxido de azufre.

### **1.3 Planteamiento del problema**

Las especies de gases más abundantes en los penachos volcánicos son  $H_2O$  y  $CO_2$  y otros componentes importantes que incluyendo  $SO_2$ , HCl, HF y  $H_2S$ . Estos gases tienen información importante sobre las condiciones del magma, como es la composición del magma, el volumen, el transporte y la dinámica de la desgasificación. Es importante medir estos gases dado que la concentración de gas en el magma y la dinámica de su escape a la atmósfera son, posiblemente, los principales motores de la actividad volcánica que influyen para que una erupción sea explosiva o efusiva (Sparks, 2003). Además de que la medición de la tasa de emisión de gases volcánicos es un importante diagnóstico en el comportamiento volcánico (Symonds *et al.*, 1994).

Durante la actividad de desgasificación del volcán Popocatépetl se ha monitoreado el dióxido de azufre. En los primeros 10 años la principal técnica de medición terrestre y aérea fue realizada con un COSPEC. Esta técnica se adaptó para las necesidades del volcán Popocatépetl (Delgado, 2008) y, ha funcionado de manera satisfactoria. En el 2005 se instaló la red de mini-DOAS en la periferia del volcán Popocatépetl como parte del proyecto científico NOVAC (Rivera *et al.*, 2009), y a finales del 2009 se implementó el sistema de mini móvil-DOAS. Estas tres técnicas se desarrollan actualmente de manera conjunta para medir la desgasificación ( $SO_2$ ) de este volcán.

Es necesario verificar que las tres técnicas usadas actualmente, al ser utilizadas paralela y contemporáneamente, miden cantidades similares de flujo de  $SO_2$ . Debido a diferencias entre las

técnicas, así como debido a las diferentes distancias de la fuente emisora a que se llevan a cabo las mediciones, se esperaría obtener cantidades diferentes. Es importante evaluar las diferencias de estas mediciones.

## **1.4 Hipótesis**

El volcán Popocatepetl es considerado como un laboratorio natural idóneo por tener todas las características optimas para desarrollar estudios acerca de su comportamiento. Cuenta con sistemas de comunicación como son carreteras en buen estado en toda su periferia con un promedio de una distancia de 20 km. al cráter en línea recta, y que permite un acceso fácil al volcán. Cuenta también con aeropuertos cercanos en estados circundantes como Puebla, Edo. de México y el Distrito Federal, para poder ser estudiado tanto por tierra como por aire.

Las técnicas para medir la tasa de flujo de  $SO_2$  del volcán Popocatepetlson mediante espectrómetros tipo DOAS (Differential Optical Absorption Spectrometer)en estaciones fijas y de manera móvil. También se realizan mediciones usando el espectrómetro COSPEC (Correlation Spectrometer). A pesar de que realizan mediciones de manera simultánea, los instrumentos son diferentes y las condiciones de medición son diferentes a una estación fija. La hipótesis de este trabajo es que sí debería existir una diferencia entre los flujos medidos, aunque esta diferencia no debería ser significativa. Las mediciones deben ser del mismo orden de magnitud al menos.

## **1.5 Objetivos**

El objetivo de esta tesis es comparar los métodos que existen y que se han implementado en el volcán Popocatepetl para medir su desgasificación en particular el dióxido de azufre, estos métodos consisten en la espectroscopia de correlación (COSPEC), la espectroscopia de absorción óptica diferencial, en sus dos modalidades fija y móvil.

Los objetivos secundarios son:

- 1) Verificar el valor de las emisiones del volcán Popocatépetl medidas con el método mini móvil-DOAS simultáneamente con el COSPEC.
- 2) Verificar las diferencias entre los instrumentos mini-DOAS fijos y móviles al hacer mediciones de dióxido de azufre en el mismo día y en su caso, determinar a qué se debe esa diferencia.
- 3) Cuantificar el flujo total de dióxido de azufre emitido durante el tiempo de estudio (enero-octubre 2010).
- 4) Conocer el desarrollo del procesamiento de los datos obtenidos por la red NOVAC, así como de las técnicas COSPEC y mini móvil-DOAS.

## **1.6 Metodología**

Como primer paso en el desarrollo de esta tesis será, conocer las bases teóricas de las técnicas empleadas, así como el funcionamiento de los instrumentos, recibiendo capacitación del personal responsable de la red de NOVAC así como de quién desarrolle la técnica COSPEC, utilizando sus características de medición de esta última técnica para implementándola a la técnica mini móvil-DOAS. Por último conocer el desarrollo del procesamiento de los datos obtenidos de las 3 técnicas.

## **1.7 Área de estudio**

El área de estudio es el volcán Popocatépetl ( $19^{\circ} 1' 0''$  N,  $98^{\circ} 37' 0''$  W, 5500 msnm). Las mediciones de COSPEC y de mini móvil-DOAS se realizan en la red de carreteras que circundan al volcán Popocatépetl en los tres estados que comprende el volcán, las cuales se describen más adelante.

# **CAPITULO 2 Marco Teórico**

## 2.1 Vulcanología

La vulcanología es el estudio del origen y el ascenso del magma a través del manto y la corteza del planeta y su erupción en la superficie. La vulcanología trata de la evolución física y química de los magmas, su transporte y erupción y la formación de depósitos volcánicos en la superficie planetaria. Algunos procesos volcánicos constituyen un grave peligro de carácter natural, mientras que otros son muy beneficiosos para la sociedad. Así, el estudio de la actividad volcánica tiene un alto significado para la sociedad. Para la mayoría de la gente la vulcanología solo evoca a una imagen de un volcán en erupción. Los volcanes y sus erupciones, sin embargo, no son más que la manifestación superficial de los procesos magmático que operan en la profundidad de la Tierra (Encyclopedia of Volcanoes).

### Controles tectónicos en la generación de Magma

La actual tasa global anual de producción de magma de rocas ígneas volcánicas y plutónicas es de  $30 \text{ km}^3/\text{año}$  (Crisp, 1984). La generación de magma en las dorsales oceánicas (margen divergente) representa el 75 % del volumen y el 20 % se produce en contextos de zonas de subducción (margen convergente). El 5 % restante se produce como actividad magmática intraplaca oceánica o en las placas continentales (volcanismo intraplaca), por lo que los procesos que dominan la tasa de producción de magma son las dorsales oceánicas y las zonas de subducción. La producción de magma en las cordilleras oceánicas es dominada por una surgencia pasiva convectiva. Los magmas producidos por este proceso de fusión son de composición basáltica, los controles primarios en la generación del magma fundido son la temperatura del manto y su composición. El control de la temperatura en fusión se ilustra en la siguiente figura (Figura 2.1) por diferentes caminos adiabáticos.

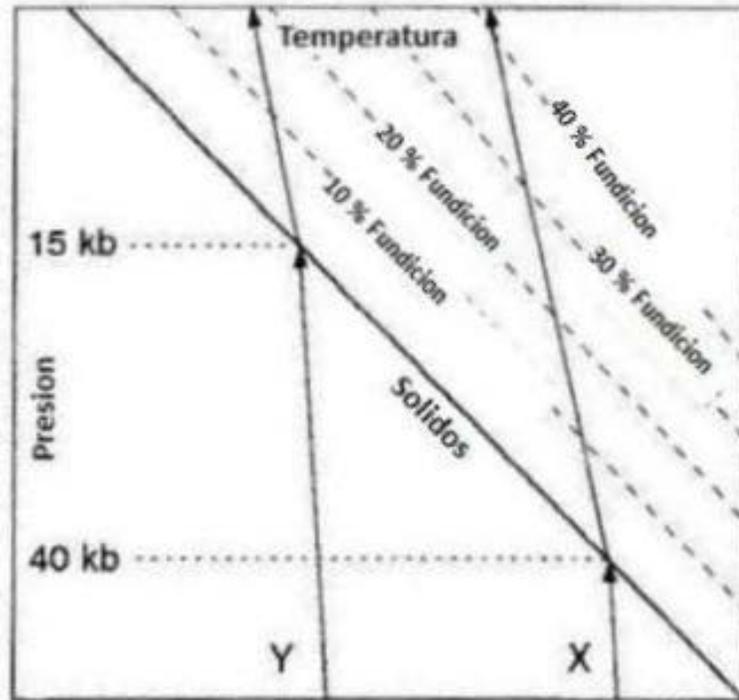


Figura 2.1 Diagrama esquemático de presión-temperatura para fundir la peridotita del manto. El camino X representa un afloramiento más caliente por convección que atraviesa el sólido a mayor profundidad y alta temperatura sometido a un mayor grado de fusión. El camino Y cruza el sólido a una presión y temperatura más baja sometidas a un menor grado de fusión (Klein y Langmuir 1989).

El magma se produce por el enfriamiento del manto sólido después de cruzar su solidificación, y utilizando el calor derivado del enfriamiento de para fundir la roca sólida. La fundición continúa hasta su enfriamiento. A esta profundidad los magmas pueden enfriarse por debajo de sus líquidos y son sometidos a la cristalización fraccionada (Grove).

En zonas de subducción (márgenes convergentes) la generación del magma es controlado por un proceso que implica la interacción del fluido liberado por la placa subducida cubierta por el manto. El fluido que ha sido transportado dentro del manto por la placa subducida es liberado cuando los minerales hidratados se descomponen y liberan su  $H_2O$ .

El  $H_2O$  disuelve algunos de los componentes de silicato en la placa subducida y el fluido resultante asciende al manto suprayacente caliente (Figura. 2.2). La fusión del manto se produce cuando un liquido rico en  $H_2O$  alcanza una profundidad que supera los sólidos como la peridotita rica en agua. La adición del agua tiene un efecto dramático de reductor de temperatura sobre el manto sólido. La producción del magma está controlada por la distribución de la temperatura con la profundidad por encima de la placa subducida y por el flujo del  $H_2O$ . El magma producido a través de este proceso es hidratado (por la relación con el agua). La cantidad de agua que es incorporada dentro del magma fundido después de la presión y temperatura. La solubilidad del  $H_2O$  en el magma es despreciable a presiones de superficie, pero aumenta drásticamente al aumentar la presión. A una presión de 3.0 GPa (1 GPa = 10 kbar) o a una profundidad de 90 Km en el manto alrededor del 20 % del magma es agua. También en un medio ambiente de subducción están presentes los magmas producidos por descompresión adiabática (Grove, supra. cit.).

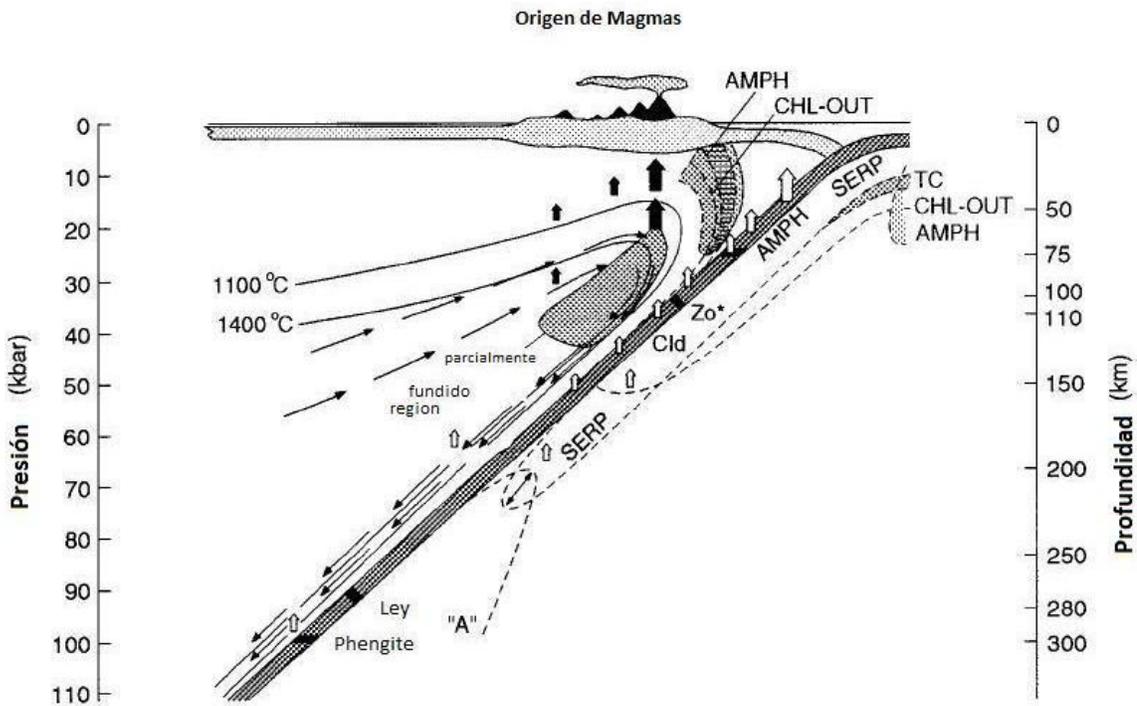


Figura 2.2 Modelo en sección transversal en un margen convergente que muestran algunos de los procesos en la generación del magma en zona de subducción. La deshidratación de minerales en la peridotita subducida y la corteza oceánica provee  $H_2O$  a la cuña del manto suprayacente sobre un amplio rango de profundidades (indicado por las

flechas abiertas). Las isotermas muestran la distribución de la temperatura en la cuña que recubre el bloque y la región inferida parcialmente fundida. Los minerales hidratados se indican mediante las abreviaturas: AMPH anfibolitas, SERP serpentina, TC talco, CHL clorita, Cld cloritoide, Zo soizita, law lawsonita, "A" fase A. las líneas discontinuas muestran los límites de la estabilidad en el bloque descendente. (Schmidt yPoli 1998).

El manto profundo asciende al aproximarse a la esquina del bloque que se acuña y se derrite durante su ascenso produciendo magmas anhídridos similares a los encontrados en ambientes del fondo del océano. Tanto los magmas hidratados como los magmas producidos por descompresión ascienden por encima de la corteza oceánica y continental, donde se enfrían y se someten a cristalización fraccionada. El calor y fundido de los magmas interactúan químicamente con la corteza superficial. Este proceso da lugar a una gran variedad de composición química de magmas de margen convergente. El resultado de los magmas resultantes va desde composición basáltica hasta riolítica.

Un volcán se define como un lugar en la superficie de la tierra, donde la roca fundida y gases atraviesan la corteza de la Tierra hasta salir mediante un proceso eruptivo. Los volcanes varían de acuerdo a su estructura, algunos son solamente fisuras en la corteza terrestre, mientras que, otros se presentan como domos, escudos, y otros tienen la estructura de una montaña con un cráter en la cima. La estructura de un volcán tienen su cumbre o en sus costados un conjunto de ventilas denominadas cráteres por donde sale el magma que se eleva directamente desde una profundidad de la Tierra, generalmente por debajo de los 30 kilómetros.

### **2.1.1 Erupciones volcánicas**

Las erupciones volcánicas resultan del ascenso del magma que se encuentra en la parte interna o debajo de un volcán activo. Cuando el magma se mueve hacia la superficie, pierde una gran parte de los gases que lleva en solución, formándose una gran cantidad de burbujas en su interior. Las erupciones son entonces emisiones de fragmentos de magma, gases volcánicos que se separan de este y fragmentos de rocas de la corteza. Estos materiales pueden ser arrojados con distintos grados de violencia, dependiendo de la diferencia de presión de los gases provenientes del magma o de agua subterránea sobrecalentada por el mismo.

Cuando la presión dentro del magma se libera a una tasa similar a la que se acumula, es decir, cuando el magma puede liberar los gases en solución con facilidad, se presenta una **erupción efusiva**. Si el magma se despresuriza rápidamente, las burbujas en su interior crecen hasta tocarse y el magma se fragmenta violentamente, produciendo una **erupción explosiva**.

Las erupciones explosivas pueden producir densas columnas de ceniza que se inyectan en la tropósfera y ocasionalmente penetran la estratosfera y alcanzan alturas superiores a los 20 km, estas son las llamadas **columnas eruptivas**.

La explosividad de una erupción volcánica es medida en términos de los productos volcánicos o tefra (Newhall y Self, 1982), sin embargo, como la mayoría de las erupciones han ocurrido en tiempos pasados se utiliza el índice de explosividad volcánica, (VEI por sus siglas en inglés) que considera criterios como el volumen de material emitido, la altura de la columna eruptiva y de la pluma, así como descripciones cualitativas. El área de dispersión piroclástica definido por Walker en 1973 es un indicador de la altura de la columna así como el índice de fragmentación es un indicador de la explosividad de la erupción como se muestra en la Figura. 2.3

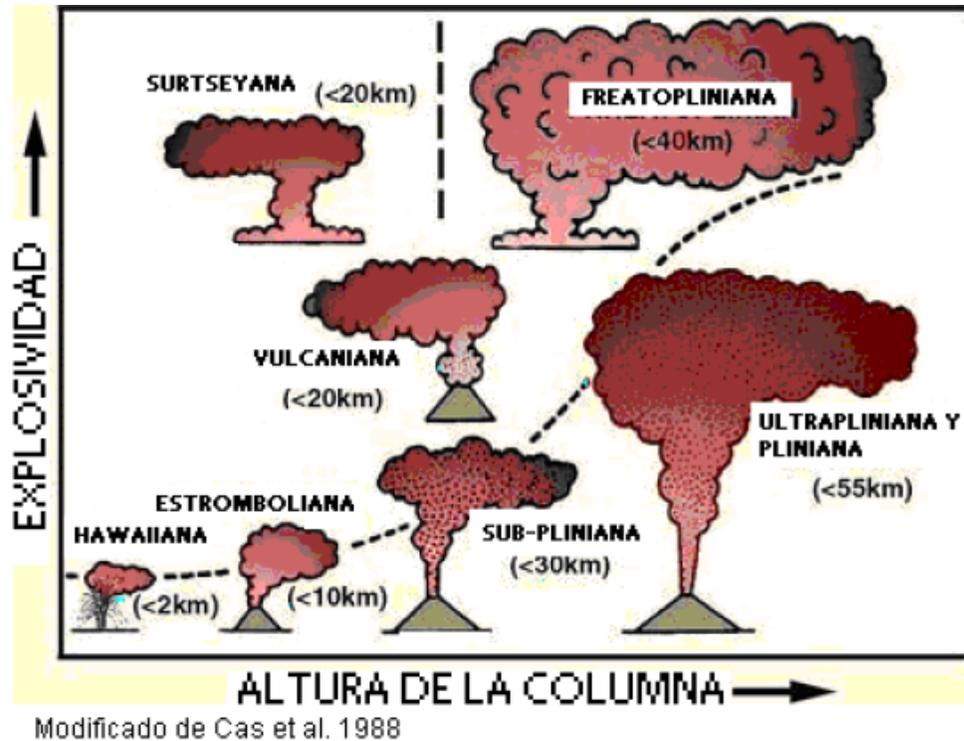


Figura. 2.3. Diagrama que relaciona la explosividad con la altura de la pluma en una erupción volcánica

Estos fenómenos explosivos se deben a los procesos de separación de la masa de los volátiles en el magma.

La tasa de erupciones volcánicas promedio para México durante los últimos 500 años ha sido de cerca de 15 erupciones de diversos tamaños por siglo (Alarcón 2008). La mayoría de esas erupciones han sido de magnitudes con un índice de explosividad volcánica de 0 a 1, sin embargo otras han sido destructivas con un índice de explosividad volcánica cercana a 2, como las del volcán de Colima de 1576 y 1818, o las de San Martín Tuxtla de 1664 y 1793, o en un mayor grado con un índice de explosividad volcánica entre 3 y 4 como fue la erupción del volcán El Chichón en 1982, que causó numerosas víctimas, devastó 153 km<sup>2</sup> de áreas boscosas y de cultivo (Sigurdsson *et al.*, 1987). Otras erupciones, como el nacimiento del volcán monogénico Parícutin que produjo flujos de lava, provocó la destrucción de poblaciones y tierras cultivables, pero sin causar vícti-

mas(Alarcón2008). Casos análogos de volcanes monogenéticos recientes son el Jorullo, que nació en Michoacán en 1759, y el Xitle, que nació en el valle de México, hace 1670 años (Simkin y Siebert).

Los tipos de erupciones más conocidas son:

**Hawaiano** se caracteriza por lavas muy fluidas y emisiones gaseosas de baja explosividad. La lava se desborda cuando rebasa el cráter y se desliza con facilidad, formando v corrientes de lava a grandes distancias

**Estromboliano**. La lava es fluida, con emisiones gaseosas más abundantes que en el caso de las erupciones hawaianas. Debido a que los gases pueden desprenderse con facilidad, producen explosiones relativamente pequeñas con pocas cenizas, aunque pueden durar varios años y acumular cantidad importante de materiales. Cuando la lava rebosa por los bordes del cráter, desciende por sus laderas y barrancos, pero no alcanza tanta extensión como en las erupciones de tipo hawaiano.

**Vulcaniano**, en su erupción se desprenden grandes cantidades de gases de un magma poco fluido que se consolida con rapidez. Las explosiones son muy fuertes y pulverizan la lava, produciendo una mayor cantidad de cenizas, respecto al caso anterior, que son lanzadas al aire acompañadas de gases y otros fragmentos rocosos.

**Peleano**. Su lava es extremadamente viscosa y se consolida con rapidez, llegando a tapar por completo el cráter. La enorme presión de los gases, que no encuentran salida levanta este tapón que se eleva formando una gran aguja.

**Pliniana**En las erupciones plinianas y subplinianas la mayoría de la masa emitida es descargada durante las fases que se caracterizan por la formación de columnas altas, erupciones convectiva resultando una inyección de ceniza y partículas a la atmosfera dispersadas por el viento cubriendo grandes áreas.

## 2.1.2 Vulcanismo y tipos de volcanes

El vulcanismo es el flujo de energía y materia. Es una expresión de la energía almacenada en el interior de la Tierra, que se deriva en parte del enfriamiento de un planeta que originalmente era caliente y en parte del calor resultante de la desintegración resultante de la desintegración radiactiva de los elementos como el uranio, potasio, torio y otros radionucleídos presentes en el interior de la Tierra. Por lo tanto, las erupciones volcánicas son la expresión superficial de estos procesos profundos en la Tierra.

Es necesario identificar y clasificar los volcanes. Existen dos tipos de vulcanismo el monogenético y el poligenético:

**Vulcanismo monogenético:** es aquel en que la erupción ocurre durante una sola etapa, a través de una fisura o boca y constituye un pequeño edificio en forma de mar, cono escoriáceo, domo o volcán escudo. Su duración varía de meses a cerca de 10 años y es predominantemente efusiva.

**Vulcanismo poligenético:** es aquel en el cual se forman edificios volcánicos por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo. Se producen erupciones con un rango amplio de intensidades. Construye edificios tipos estratovolcán y grandes calderas.

Los volcanes pueden ser de diferentes tipos entre los que se encuentran las calderas, los conos cinerítico, maares, volcanes escudo, estratovolcanes y domos. Saber a qué tipo pertenece un volcán, proporciona mucha información acerca de la actividad que se ha presentado en el pasado.

**Caldera:** depresión circular o elíptica grande (1 a 100 km de diámetro), a veces reconocer su extensión a simple vista resulta difícil. Se forma cuando el magma se obtiene de un reservorio somero. En un año común, algún tipo de actividad se presenta en cerca de 18 calderas en el mundo.

**Cono cinerítico:** es una montaña con laderas muy inclinadas, que se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases. Es el volcán más simple de todos. En general son monogenéticos. Alcanzan alturas entre 30 y 450 m. Sus magmas son de baja viscosidad. Uno de los conos cinerítico más recientes, es el volcán Parícutín, que construyó un cono con una altura de 424 m y produjo un fluido de lava que cubrió 25 km<sup>2</sup>.

**Maar:** los volcanes maar generalmente son entendidos por el ser el resultado de la interacción explosiva entre el magma y el agua (agua subterránea o agua superficial). En su mayoría “negativos” accidentes geográficos, que se caracterizan por sus cráteres circulares y elípticos, que tienen su piso muy por debajo de la elevación del paisaje circundante rodeados de tefra acumulada. Un maar ocurre comúnmente en campos volcánicos máficos, pero puede tener otras composiciones. La mayoría de los maar son monogenéticos, aunque algunos requieren varios periodos eruptivos que producen la superposición espacial que componen los maares (Greg A et al. 2011). También son conocidos como Axalapascos, que en Náhuatl significa “cuenco de tierra y arena con agua”.

**Volcán Escudo:** es un volcán amplio con pendientes suaves (menos de 10°) construidas por erupciones de lava basáltica fluida. El nombre proviene del parecido con los escudos de los guerreros. Los volcanes más grandes del mundo son volcanes escudo.

**Estratovolcán:** son volcanes con formas cónicas y pendientes pronunciadas construidos por la erupción de flujos de lava viscosa, flujos piroclásticos y tefra. Se desarrollan, a lo largo de periodos de cientos o decenas de miles de años. Estos volcanes pueden producir una variedad de tipos de magma, incluyendo basalto, andesita, dacita y riolita. Todos estos magmas, con excepción del basalto, generan erupciones explosivas. De los 1511 volcanes que han hecho erupción en el mundo en los últimos 10,000 años, 699 son estratovolcanes.

**Domos:** los domos están formados por masas de lava relativamente pequeñas. Esta lava es demasiado viscosa para fluir a grandes distancias, por lo que se apila sobre y alrededor de centro emisor. Presentan pendientes fuertes que tienden a derrumbarse y formar flujos de bloques y

cenizas. Ocurren típicamente en las cimas de algunos volcanes. Los domos son acompañados por actividad explosiva. Llegan a medir hasta 200 m de diámetro y 500 m de altura.

### **2.1.3 Emisiones volcánicas**

Durante una erupción volcánica se emiten a la atmósfera gases y cenizas, que son transportadas a altitudes variables por la diferencia de temperaturas entre las cenizas y el ambiente, además de la presión confinada en el magma. Las cenizas son inyectadas temporalmente en la estratosfera y troposfera, para luego ser dispersados por el viento (Robock, 2000).

#### ***Ceniza volcánica***

La ceniza se produce de la fragmentación y desmoronamiento de las rocas y el magma. Su estructura porosa y húmeda le permite absorber gases volátiles solubles en el agua, presentando mayor riesgo tóxico con el ácido fluorhídrico (HF) al reaccionar el flúor. A su diámetro (10  $\mu\text{m}$ ) le favorece estar en suspensión constantemente en la atmósfera y viajar con la dirección del viento.

La ceniza volcánica está compuesta por óxidos, principalmente de sílice, aluminio y hierro (80 %), magnesio, calcio, sodio, potasio, plomo; metales pesados como vanadio, cromo, cobalto, níquel y zinc. Se presenta en forma de polvo fino.

Otro elemento significativo de las erupciones volcánicas es la energía térmica (calor) que se emite acompañando el flujo de gases y ceniza.

#### ***Gases volcánicos***

Los gases de origen volcánico permanecen disueltos en el magma o atrapados en cavidades líticas en el edificio volcánico a altísimas presiones y temperaturas, crecientes con la profundidad y afectan considerablemente las propiedades reológicas de su matriz. La composición de los gases emitidos por un volcán activo depende de procesos profundos, como la desgasificación del magma por despresurización a medida que asciende por el conducto, saturación, nucleación, formación

de burbujas, coalescencia, vesiculación y fragmentación y procesos someros, como la interacción del magma con acuíferos o con paredes del conducto próximos a su salida (Delmelle y Stix).

Los principales gases volcánicos tal como lo muestra la tabla 2.1 son el agua, el dióxido de carbono, el dióxido de azufre, el ácido sulfhídrico, el ácido clorhídrico y el ácido fluorhídrico. Los dos primeros se originan fundamentalmente en la corteza, por lo que su génesis puede corresponder a cualquier etapa del edificio volcánico. Son los más abundantes y menos solubles y conforman, por lo tanto, la mayor parte de la presión de la fase gaseosa. Su baja solubilidad hace que su comportamiento se ajuste a la ley de Henry (proporcionalidad entre la solubilidad de un gas y la presión a la que está sometida el mismo). El CO<sub>2</sub>, se comporta en ambientes volcánicos como un gas conservativo, en el sentido de que está poco expuesto a reacciones secundarias, a la manera de un gas noble, por lo que la razón molar CO<sub>2</sub>/He, por ejemplo, suele permanecer inalterada (Delmelle y Stix. supra. cit.).

**Tabla 2.1 Principales gases de origen volcánico y volúmenes característicos en los que son emitidos (adaptado de Textor, 2003).**

ESPECIE	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	COS	CS <sub>2</sub>	HCl	HBr	HF
<b>% DEL VOLUMEN DE EMISIONES TOTALES</b>	50-90	1-40	1-25	1-10	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>	1-10	¿?	<10 <sup>-3</sup>
<b>MAGNITUD EN LA TROPOSFERA (Tg año<sup>-1</sup>)</b>	¿?	75	1,5-50	1-2,8	0,006-0,1	0,007-0,096	0,4-11	0,0078-0,1	0,06-6

#### 2.1.4 Importancia de medir los gases volcánicos

En junio de 1991, el Monte Pinatubo en las Filipinas hizo erupción violentamente y, el material expulsado alcanzó los 35 km de altura llegando a la estratosfera. (Newhall *et al.*, 2000). Esta fue la mayor erupción en el mundo en los últimos 80 años y resultó ser 10 veces mayor que el Monte St.

Helens. Sin embargo, a pesar de la enorme pérdida de vidas que podría haberse presentado, se estima que solo unos pocos cientos de personas murieron como resultado de la erupción. En lo que se considera ser el hecho preventivo más exitoso de peligros volcánicos en la historia. Unas 80,000 personas fueron evacuadas antes del comienzo de la erupción, por lo que se salvaron muchos miles de vidas humanas. Los científicos estuvieron observando muy de cerca el comportamiento del volcán, ya que la actividad comenzó unos meses antes, y correctamente previsto el punto culminante de la erupción. Una de las líneas claves de la evidencia de una erupción fue un rápido incremento diez veces mayor en la tasa de emisión de dióxido de azufre del volcán observada con la espectroscopia desde el terreno (Daag *et al.*, 1996).

Los gases volcánicos poseen información importante sobre las condiciones del magma como composición química, volumen, transporte y la química de desgasificación. Estos mismos factores se miden normalmente en una serie de volcanes en todo el mundo para proporcionar conocimientos fundamentales. Dado que la concentración de gas en el magma y la dinámica de su escape a la atmosfera son, posiblemente, los principales motores de la actividad volcánica que influyen para que una erupción sea explosiva o efusiva (Sparks, 2003). Estos datos son valiosos para pronosticar erupciones.

Los gases volcánicos tienen un impacto importante sobre la atmosfera y el clima que debe ser contabilizado correctamente para modelar satisfactoriamente el cambio climático en nuestro planeta (Robock, 2000). En particular, el dióxido de azufre volcánico se convierte en aerosoles de sulfatos radicalmente activos, que reflejan la luz solar hacia el espacio exterior (Graf *et al.* 1997). Algunos científicos piensan que este efecto pudo haber sido responsable de los eventos de extinciones masivas prehistóricas. Más recientemente, se tiene la evidencia de que los aerosoles provenientes de la erupción del Monte Pinatubo, provocaron un enfriamiento de la troposfera, por un tiempo limitado. Esta erupción también afecto los patrones globales de la circulación de la troposfera y una reducción aproximadamente del 20% de los niveles de ozono en la Antártida (McCormick *et al.*, 1995).

Otro motivo de interés para el estudio de estas emisiones de gases es su impacto ambiental y peligros potenciales para la salud del hombre (Delmelle *et al.*, 2002). Por ejemplo, en el volcán Masaya, en Nicaragua, las concentraciones atmosféricas de  $\text{SO}_2$  se elevaron sobre un área mayor a los 1000  $\text{km}^2$ . Dando como resultado la pérdida de ingresos procedentes de las plantaciones de café y la exposición de aproximadamente de 50,000 personas, excediendo los niveles de calidad de aire permitidos por la Organización Mundial de la Salud. Uno de los peores desastres ambientales se origino por la erupción del volcán Laki en Islandia (1783-1784) el cual origino un millón de toneladas de  $\text{SO}_2$  (Thordarson *et al.*, 1996); este gas formo una capa de niebla que cubría gran parte de Europa, causando la destrucción de cultivos agrícolas, la contaminación de pastos y mortandad de humanos.

## 2.2 Dióxido de azufre en la atmosfera

El azufre es un elemento relativamente abundante, el cual juega un papel esencial en el ciclo del medio ambiente. La atmosfera recibe una gran cantidad de compuestos de azufre de la quema de combustibles fósiles, de la descomposición de materia orgánica ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_3\text{SH}$  y  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ), de la sal marina de los océanos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y de los volcanes (principalmente  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), esta última es la mayor fuente natural de los componentes sulfurosos. En la Tierra los cambios de los compuestos de azufre toman lugar en la Litósfera, Biósfera, Hidrósfera y Atmósfera, todos a un mismo tiempo (Nicole, 2005) existiendo un delicado equilibrio entre la emisión de azufre a la atmosfera y su regreso a la superficie de la Tierra. Estos compuestos son transportados y mezclados en la atmosfera por los vientos y la turbulencia, los compuestos de azufre no son acumulativos en la atmosfera después de algún periodo de tiempo son depositados en la superficie de los océanos. El tiempo de residencia de los compuestos de azufre que se inyectan en la atmosfera es de aproximadamente un año, a veces hasta dos o tres años, dependiendo de la altura de la inyección en la estratosfera, mientras que en la troposfera solo duran algunas semanas (Graf *et al.* 1993). La influencia del azufre en el clima es aún poco conocida (Albittron y Meira Filho, 2001).

La Figura 2.4 muestra los principales procesos por el cual el azufre es emitido, así como sus transformaciones y sus procesos de depósito.

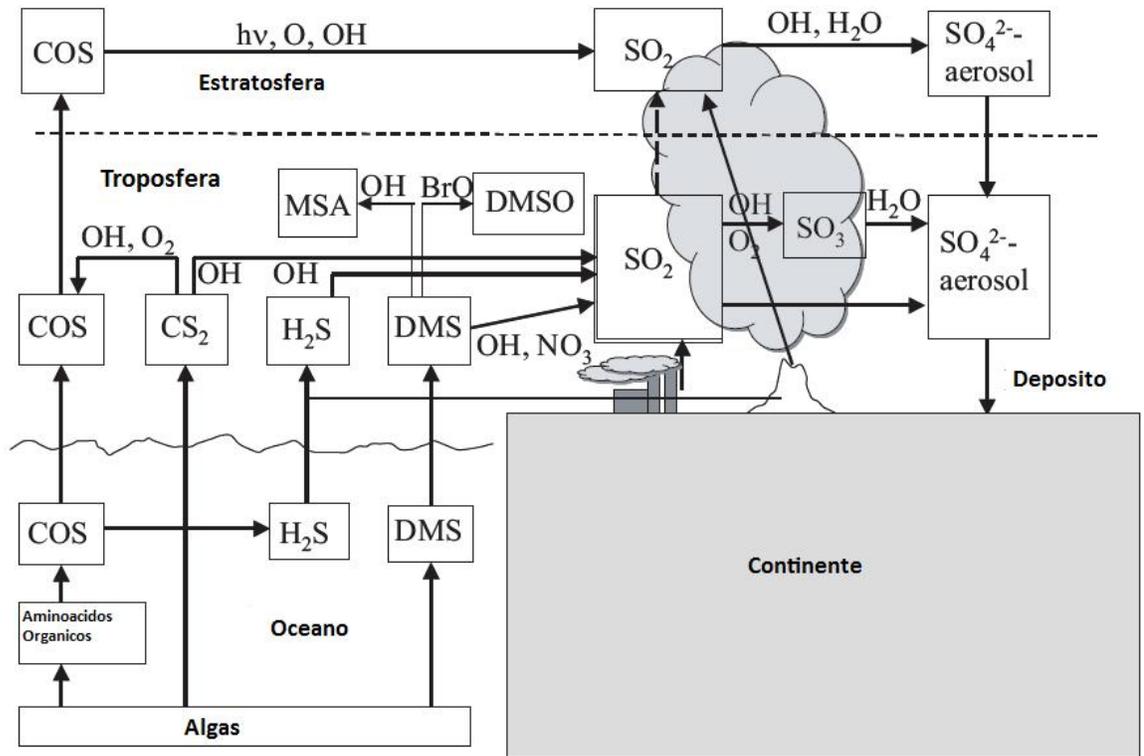
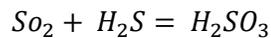


Figura. 2.4 Ciclo del azufre en la atmosfera modificado por U. Platt.

### 2.2.1 Dióxido de azufre

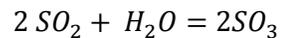
#### Propiedades químicas

El dióxido de azufre es un gas incoloro, de sabor ácido, olor sofocante y más denso que el aire. Es soluble en agua y se licua con facilidad (constante de solubilidad de la ley de Henry:  $126 \text{ mol m}^{-3} \text{ Pa}^{-1}$ ). La reacción con el agua es muy rápida y produce una solución débilmente ácida, llamada ácido sulfuroso:

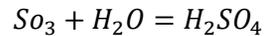


El ácido sulfuroso es muy inestable. Al reaccionar con las bases, forma sales llamados sulfitos.

El trióxido de azufre se forma por la oxidación del  $SO_2$  en presencia de catalizadores:

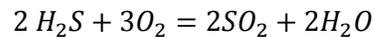


Es un gas incoloro muy ávido de agua, formando en la reacción ácido sulfúrico:



El ácido sulfúrico es incoloro, inodoro, espeso y de aspecto aceitoso. Es un gran corrosivo y muy soluble en agua, desprendiendo grandes cantidades de calor

En ambientes volcánicos es además importante el ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrogeno,  $H_2S$ , es un gas incoloro de olor fétido a huevo podrido, muy soluble en el agua. Es altamente toxico. Al arder en el aire (por colisiones moleculares) produce dióxido de azufre y agua:



Debido a la reacción precedente, la mayor parte de  $H_2S$  volcánico es transformado en  $SO_2$  en un tiempo de vida media de alrededor de dos días en la troposfera.

### **2.2.2 absorción del dióxido de azufre**

El espectro ultravioleta del  $SO_2$  está dominado por dos extensas bandas de absorción: de 175 a 230 nm, que es la más fuerte, y de 250 a 320 nm. Debido a que los estados electrónicos mas energéticos que participan en estas transiciones son fuertemente perturbados, no existe una descripción analítica exhaustiva. Consecuentemente, la dependencia con la temperatura del espectro de absorción del  $SO_2$  no puede ser resuelta analíticamente, más si puede ser medida. Estas bandas se muestran en la Figura 2.5, y corresponden a transiciones electrónico-vibracionales y sobre-tonos de vibración y rotación.

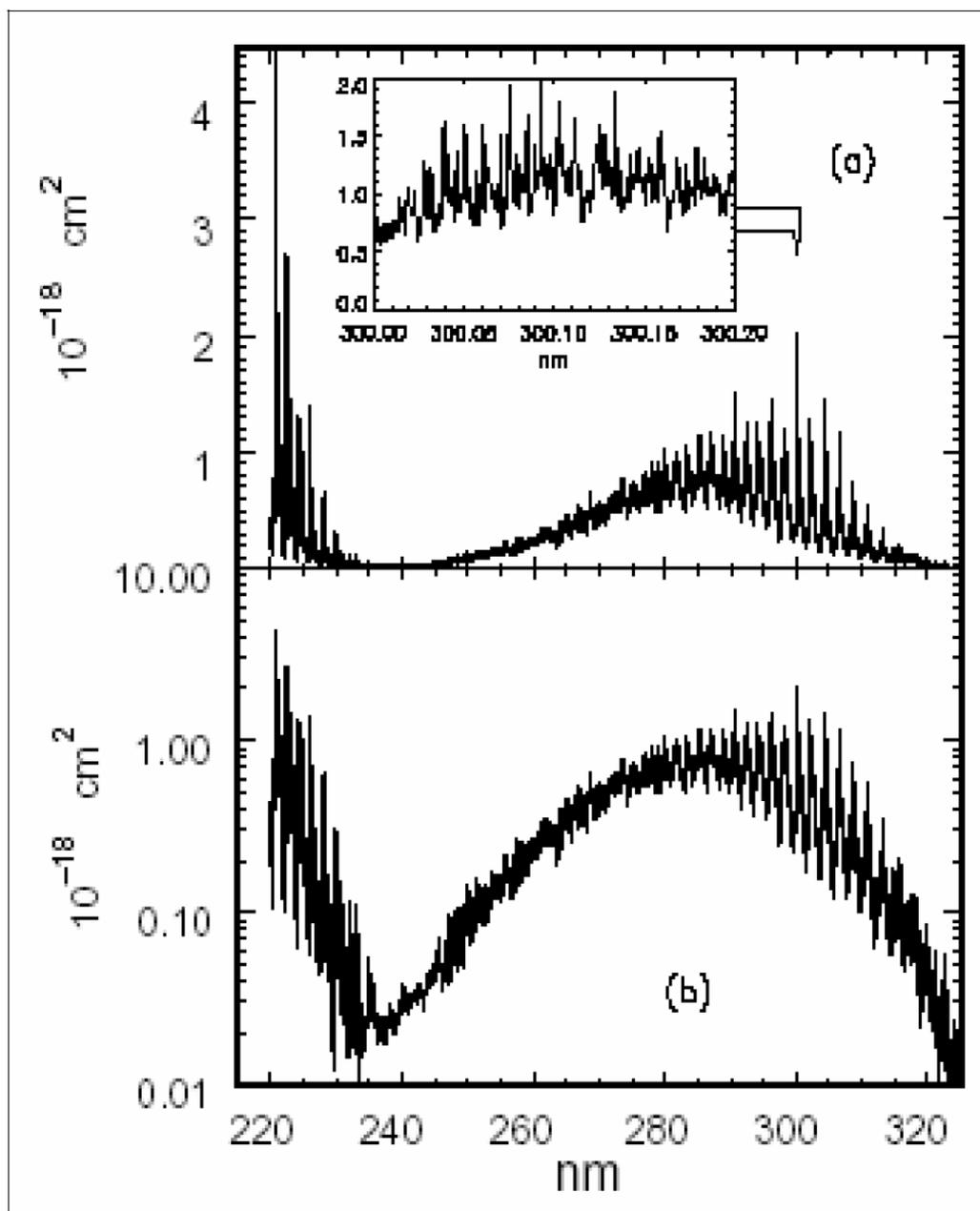


Figura. 2.5 Sección eficaz de foto absorción del  $SO_2$  gaseoso a 259 K en el rango ultravioleta medida con una resolución de 40 a 320 nm. En el cuadro interno s muestra una sección con una resolución de 0,2 nm (adaptado de Smith *et al.*, 2002).

### 2.2.3 Fuentes de Dióxido de azufre naturales y antropogénico.

El tiempo de vida de un compuesto de azufre depende de sus reacciones químicas y de sus procesos físicos.

El azufre contenido en la troposfera tiene dos orígenes: antropogénico y de una forma natural. Las emisiones antropogénicas de azufre son causadas por:

Gases industriales, que contienen azufre como sulfuro de carbonilo ( $CO_S$ ), disulfuro de carbono ( $CS_2$ ) o tioles ( $CH_3SH$ ).

Gases naturales y de refinería que contienen azufre como los mercaptanos,  $CO_S$  y sulfihídridos.

Gases síntesis (principalmente  $CO + H_2O$ ) que contienen azufre como  $CO_S$  y  $CS_2$ .

Emisiones de vehículos ( $SO_2$ ).

Las fuentes antropogénicas más relevantes de emisión de  $SO_2$  son las centrales eléctricas que funcionan con carbón, las refinerías de petróleo, las industrias de fundición de cobre, las empresas que manufacturan con ácido sulfhídrico. Todas estas representan las principales contribuciones de liberación antropogénica de azufre a la atmósfera. (Zellner *et al.*, 1999; Seinfeld y Pandis 1998).

Las cantidades de los compuestos volátiles de azufre emitidos de forma antropogénica son casi imposibles de medir o calcular directamente, debido principalmente a la falta de conocimiento cuantitativo que concierne a sus reacciones en la atmósfera.

Las principales fuentes de emisión de forma natural de azufre son:

- Fuentes biogénicas ( $DMS, H_2S, CO_S$ ).
- Rocío de mar ( $SO_4^{-2}$ ).

- Volcanes ( $SO_2$ ).

La reducción biológica de los compuestos de azufre constituye una importante fuente natural de azufre a la atmosfera. Dicha reducción se produce de manera fácil en la presencia de materia orgánica y bajo condiciones de oxígeno deficiente.

Los volcanes son la principal fuente natural de dióxido de azufre. Las erupciones volcánicas emiten principalmente vapor de agua, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Evans y Staudacher, 2001; Duboscq et al., 2004), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y ácido fluorhídrico ( $HF$ ). Una vez inyectados en la atmosfera, estos compuestos contribuyen a la lluvia ácida y pueden afectar a la estratosfera (Galindo et al., 1998). El  $SO_2$  atmosférico emitido durante una erupción volcánica es transformado químicamente en aerosoles de sulfato ( $H_2SO_3$  y  $H_2SO_4$ ) durante su transporte (McKeen et al., 1984).

Durante una erupción volcánica se presenta una alta variabilidad en la cantidad de  $SO_2$  emitido, ya que el volumen expulsado varía de acuerdo a cada volcán como se ilustra en la Tabla 2.2, que muestra las diferencias entre varios valores de diferentes autores. Estas estimaciones varían en más de un orden de magnitud.

**Tabla 2.2 Flujos anuales de  $SO_2$  a nivel mundial emitido por volcanes a la atmosfera de diversos autores, datos organizados ascendientemente. Modificado por Textor et al. (2004).**

$SO_2$ , [Tg/año]	Referencia
1.5	Kellogg et al.(1992)
4	Friend (1973)

6	Granatet <i>et al.</i> (1976)
7.78	Cadle (1975)
9	Halmer <i>et al.</i> (2002)
10	Stoiber y Jepsen (1973)
13	Bluth <i>et al.</i> (1993)
13	Andrés y Kasgnoc (1998)
15.2	Berresheim y Jaeschke (1983)
18.7	Stoiber <i>et al.</i> (1987)
20	Graf <i>et al.</i> (1997)
50	Le Guern (1982)
50	Lambert <i>et al.</i> (1988)

Existen otros compuestos emitidos durante una erupción como el vapor de agua,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $HBr$ , sin embargo hay mucho mas componentes emitidos pero en menor proporción.

Graf *et al.* (1997) argumentan que las contribuciones de  $SO_2$  volcánico a la atmosfera así como sus efectos radiativos son de mucha mayor intensidad en comparación con las emisiones antropogénicas. Esto es debido a que las emisiones de azufre volcánico se encuentran de manera libre dentro de la troposfera y el tiempo de vida de los sulfuros es mucho mayor comparado con los sulfuros que se encuentran en la capa límite de la troposfera y que son originados de manera antropogénica. Además de que las emisiones de sulfuros de manera antropogénica han sido reducidos en las últimas décadas en muchas partes del mundo por ejemplo en Europa y América del Norte (p.ej., Vestreng *et al.* 2007), aunque existen lugares donde las concentraciones de azufre atmosférico aun son altas como en Asia (p.ej., Stern, 2006).

## 2.3 Efectos de las emisiones volcánicas en la salud

### 2.3.1 Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es irritante a los ojos, garganta y vías respiratorias. La sobre exposición en el corto tiempo causa inflamación e irritación, provocando ardor en los ojos, tos, dificultades respiratorias y sensación de tensión en el pecho. Las personas asmáticas son especialmente sensibles al  $SO_2$  (Baxter, 2000) y pueden reaccionar ante concentraciones tan bajas como 0.2 a 0.5 ppm. Una exposición prolongada o repetida a concentraciones bajas (1-5 ppm) puede ser peligroso para personas con enfermedades cardiacas o pulmonares previas. Mientras los efectos sobre la salud de variadas concentraciones han sido documentados, una muestra de los umbrales por efectos a la salud se describe en la tabla siguiente.

**Tabla 2.3. Efectos en la salud por exposición respiratoria al dióxido de azufre (Baxter, 2000; Nemery, 2001; NIOSH 1981; Wellburn, 1994).**

<p style="text-align: center;"><b>Limite de exposición</b></p> <p style="text-align: center;"><b>(ppm)</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Efectos sobre la salud</b></p>
--	--

1-5	Umbral de respuesta respiratoria al ejercicio o respiración profunda en individuos sanos
3-5	El gas es fácilmente detectable. Caída de la función respiratoria en reposo y resistencia a la corriente de aire
5	Aumento de la resistencia en individuos sanos
6	Inmediata irritación en ojos, nariz y garganta
10	Empeora la irritación en ojos, nariz y garganta
10 - 15	Umbral de toxicidad por exposición prolongada
20 +	Parálisis o muerte después de exposición prolongada
150	Máxima concentración que puede ser resistida durante algunos minutos por individuos sanos

Se ha demostrado que la presencia de altos niveles de  $SO_2$  en el ambiente puede causar diversos problemas de salud en niños (Ware *et al.*, 1986). Asimismo, los estudios realizados en el Mt. Sakurajima no indican una correlación entre la prevalencia de asma en niños y la exposición prolongada a los gases volcánicos.

### **2.3.2 Dióxido de azufre permitido en México por La Norma Mexicana de salud.**

De acuerdo con la NOM-022-SSA1-1993, las concentraciones máximas permitidas de  $SO_2$  son de 0.13 ppm promedio de 24 horas, una vez al año.

Desde el punto de vista de los efectos en la salud, los gases volcánicos se pueden clasificar en: irritantes y no irritantes.

### **2.3.3 Gases irritantes y no irritantes.**

**Irritantes:** pueden ejercer sus efectos a mucha menor concentración y a muchos kilómetros del volcán. Su acción irritante la efectúan a nivel del árbol respiratorio y sobre el resto de mucosas con las que entra en contacto, provocando de esta manera ojos rojos, lagrimeo, odinofagia, estornudo, etc.

La afección del tracto respiratorio depende del tiempo de exposición, de la concentración del gas en el aire y de la solubilidad acuosa. Así los gases poco solubles penetran con facilidad hasta los alveolos, provocando tos, bronco espasmo, dolor torácico y fundamentalmente insuficiencia respiratoria por afectación del intercambio gaseoso, es decir, hipoxemia. Estas afecciones son provocadas por la inhalación de las siguientes sustancias:

Sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) en bajas concentraciones puede irritar los ojos y ocasionar depresión. En altas concentraciones irrita el tracto respiratorio superior y, en exposiciones prolongadas, produce edema pulmonar. En una exposición de 30 minutos a 500 partes por millón (ppm) produce dolor de cabeza, excitación, inestabilidad al caminar y diarrea. En algunas ocasiones se puede presentar bronquitis o bronconeumonía.

Cloruro de hidrogeno (*HCl*) irrita las membranas mucosas de los ojos y el tracto respiratorio. Para concentraciones por encima de 35 ppm se irrita la garganta después de una exposición corta. Por encima de 100 ppm se produce edema pulmonar y a menudo espasmo laríngeo.

Fluoruro de hidrogeno (*HF*) irritante muy fuerte que ocasiona conjuntivitis, irritación en el tracto respiratorio, degeneración en los huesos y dientes. En los animales, al ser consumido en el pasto en concentraciones mayores a 250 ppm y con menos de 1 cm de espesor de ceniza, ocasiona su muerte por fluorosis que destruye los huesos. (Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California.)

**No irritantes:** la acumulación de los gases asfixiantes o no irritantes en concentraciones letales es más probable en las pendientes de un volcán, dentro de un cráter o cerca de una fisura. Estos gases actúan sin provocar lesiones a nivel local, pero se absorben hacia la sangre y ejercen su efecto a nivel sistémico, interfiriendo fundamentalmente en la cadena respiratoria tisular. De esta manera provocan hipoxia tisular, por lo que se denomina gases asfixiantes. Los representantes más importantes de este grupo son lo cianuros y el monóxido de carbono, otro grupo de gases son aquellos cuyo efecto lo ejercen desplazando al oxígeno del aire inspirado como él: dióxido de carbono y el nitrógeno.

El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) es más pesado que el aire y puede acumularse en las áreas bajas, alcanzando eventualmente altas concentraciones que pueden terminar con la vida de personas, animales y plantas. Adicionalmente el  $CO_2$  puede acumularse en las aguas de los lagos cratericos hasta alcanzar grandes concentraciones y ser expulsado violentamente a la atmosfera.

#### **2.3.4 Ceniza volcánica**

Las partículas de ceniza producidas en erupciones son a menudo suficientemente pequeñas para ser rápidamente inhaladas en lo profundo de los pulmones y las partículas más gruesas pueden alojarse en la nariz o en los ojos e irritar la piel. Según los estudios de la OMS las partículas con

diámetro de 15 micras se depositan en la nariz, las de 10 micras alcanzan a llegar al árbol traqueo-bronquial y las menores de 5 micras son capaces de llegar a los alveolos.

La ceniza volcánica produce un efecto irritante en las vías respiratorias, los ojos y la piel. “Para valorar los riesgos que tiene la lluvia de cenizas en la salud de personas son importantes 5 factores: el tamaño de las partículas; la frecuencia y duración de la exposición; factores adicionales como enfermedades preexistentes de las vías respiratorias, y la presencia de sílice cristalino ( $SiO_2$ ) en las cenizas”. (Seamanet *al.*, 1989)

A nivel del aparato respiratorio superior produce irritación determinando rinitis, faringitis, amigdalitis, laringitis y empeoramiento de las sinusitis. Sus efectos sobre las vías aéreas inferiores están determinados por el tamaño de las partículas respirables (diámetro menor de 10 micrómetros). Los pacientes que sufren de hiperreactividad bronquial, bronquíticos crónicos, pacientes asmáticos y los que padecen enfermedad pulmonar obstructiva crónica pueden presentar complicaciones (Ministerio de Salud Pública del Ecuador, 2000). Los datos históricos de muerte por concentraciones altas de ceniza son escasos, sin embargo cuando la ceniza se mezcla con gases volcánicos, puede ocasionar la muerte, como resultado del consumo de agua contaminada con flúor. También se reportan casos de muertes relacionados con la presencia de que maduras extensas, necrosis de tejidos, sepsis y bronconeumonía, como consecuencia de la aspiración de cenizas calientes.

## **2.4 Espectrometría de Correlación.**

### **2.4.1 Conceptos básicos de la radiación**

La luz visible es una de las diversas formas de energía electromagnética. Así, las ondas de radio, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta o los rayos X son otras formas comunes. Todas estas formas de energía de acuerdo a la teoría ondulatoria, que describe cómo la energía electromagnética viajan con forma sinusoidal a la velocidad de la luz:

$$v\lambda = c \quad (2,1)$$

Donde  $c$  es una constante,  $3 \times 10^8$  m/s,  $v$  es la frecuencia y  $\lambda$  la longitud de onda, que están inversamente relacionadas.

Aunque muchas de las características de la radiación electromagnética se describen fácilmente con la teoría ondulatoria, no podemos olvidar la naturaleza corpuscular de la radiación descrita por la teoría cuántica. Esta teoría establece que la radiación está compuesta de muchos elementos discretos denominados cuantos o fotones. La energía,  $E$  (en Julios) de cada uno de estos elementos viene dado por:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2,2)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $h=6.6260 \times 10^{-34}$  J·s=  $6.6260 \times 10^{-27}$  erg. También se puede expresar como  $E= hc/\lambda = KT$  siendo  $K$  la constante de Boltzman ( $1.3806 \times 10^{-23}$  J·K).

Es esta expresión que nos indica que la energía de un cuanto es inversamente proporcional a su longitud de onda, es decir, a longitudes de onda más largas menor cantidad de energía.

### **2.4.2 Espectro electromagnético**

Aunque por conveniencia se asignan diferentes nombres a las regiones del espectro electromagnético, no existen divisiones o líneas de corte exacta entre unas regiones y sus vecinas. Las divisiones del espectro han surgido como consecuencia de los diferentes métodos utilizados para detectar cada tipo de radiación más que de las diferencias que pueden caracterizar a la energía de las distintas longitudes de ondas.

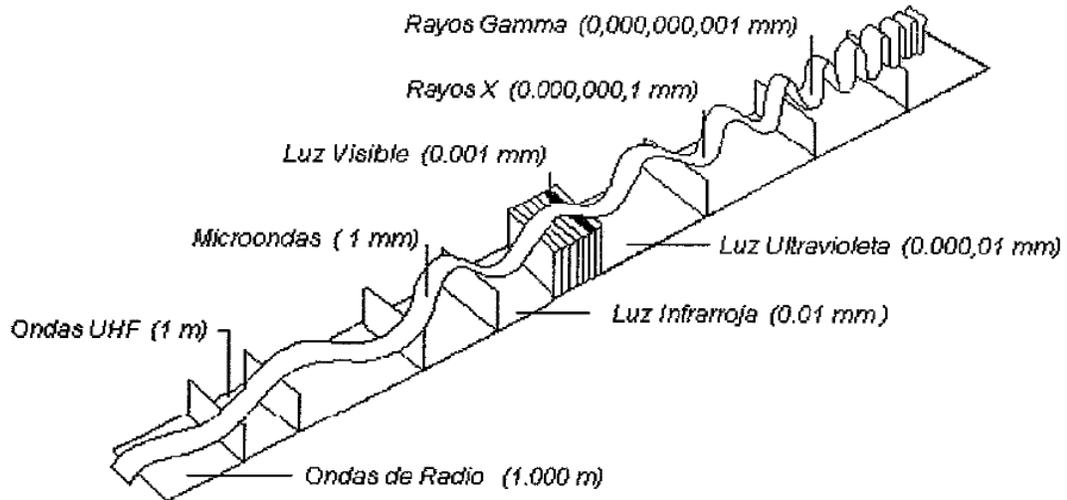


Figura. 2.6 El espectro electromagnético es una gama continua de ondas.

Cuando las ondas electromagnéticas se ordenan de acuerdo con su frecuencia o su longitud de onda, la disposición ordenada se llama espectro electromagnético (Figura 2.6).

Las porciones del espectro electromagnético que se usan en percepción remota, están caracterizadas por un continuo con magnitudes que difieren en potencia de 10, por lo que a veces encontramos representaciones logarítmicas del mismo.

La porción del visible es la que percibimos nosotros, es una pequeña región que apenas abarca desde los  $0.4 \mu\text{m}$  hasta los  $0.7 \mu\text{m}$ . La energía UV se encuentra inmediatamente por debajo del color violeta. Por encima del rojo nos encontraríamos con la región infrarroja (IR), que a su vez está dividida en tres categorías: IR próximo ( $0.7 - 1.3 \mu\text{m}$ ), IR medio ( $1.3 - 3 \mu\text{m}$ ) e IR térmico ( $3 - 100 \mu\text{m}$ ).

La unidad de longitud que se escoge para expresar la longitud de onda depende del tipo de radiación, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Unidades de longitud de onda comunes para la radiación electromagnética.

Unidad	Símbolo	Longitud [m]	Tipo de radiación
Ángstrom	Å	$10^{-10}$	Rayos X
Nanómetro	nm	$10^{-9}$	Ultravioleta, visible
Micrómetro	$\mu\text{m}$	$10^{-6}$	Infrarrojo
Milímetro	mm	$10^{-3}$	Infrarrojo
Centímetro	Cm	$10^{-2}$	Microondas
Metro	m	1	TV, radio

### 2.4.3 Atenuación de la radiación solar por la atmósfera

Antes de alcanzar cualquier punto de la superficie de la Tierra, la radiación solar ha de atravesar la atmósfera terrestre, en la que se ve sometida a un proceso de atenuación dependiente de la longitud del camino recorrido y las longitudes de ondas involucradas. Este proceso está determinado por la altura y por la posición del sol, y también con notable influencia de las variaciones de la composición atmosférica. En general, se pueden esquematizar los fenómenos de interacción de la radiación con la atmósfera como se indica en la Figura 2.7. En ella se observa que, a un determinado lugar de la superficie terrestre, la radiación solar llega tanto en forma de radiación directa, desde el Sol, como de radiación difusa procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal y como de la reflexión de la radiación por el suelo.

La radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra es modificada por la absorción y la dispersión en la atmósfera. Se considera cada efecto en forma separada.

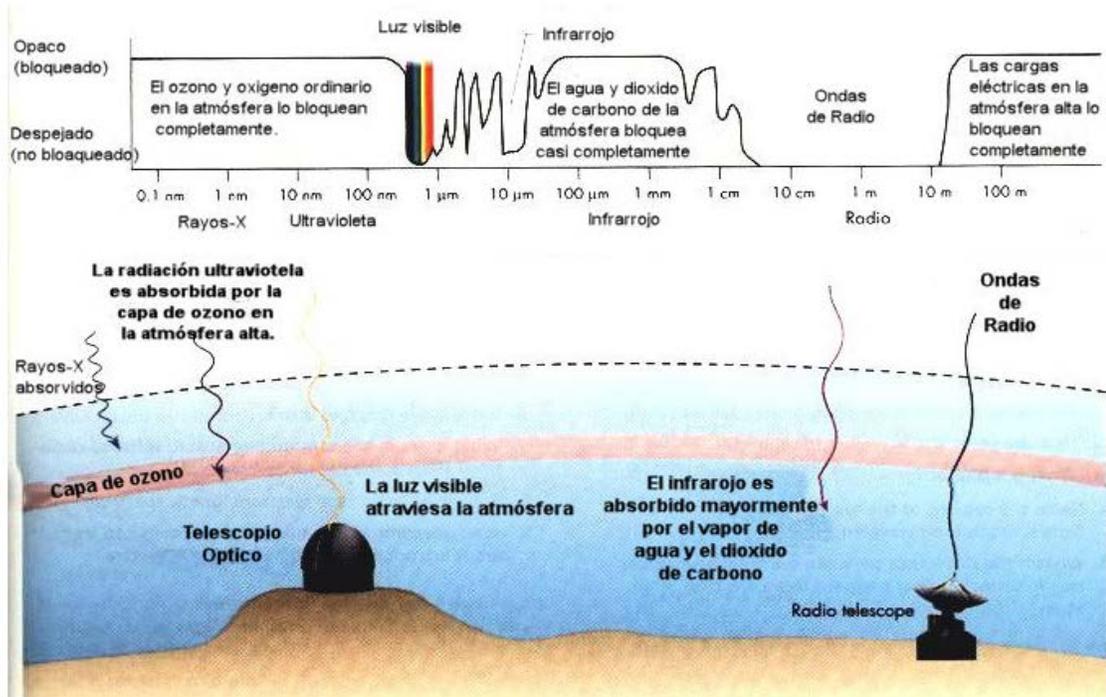


Figura 2.7. Atenuación de la luz solar por efecto de la atmósfera.

#### 2.4.4 El sistema COSPEC

La **Espectrometría de Correlación (COSPEC)** fue desarrollada fundamentalmente entre los años 60 y 70 en Canadá (Bottema, *et al.*, 1964; Barringer, 1964; Kay, 1967; Williams y Kowitz, 1968; Barringer y Newbury, 1968; Barringer y Moffat, 1969; Millán, *et al.*, 1969; Moffat, y Millán 1971; Moffat *et al.*, 1971). Esta técnica permite detectar la huella específica del espectro de absorción de un determinado gas sobre un fondo radiativo de estructura espectral compleja, por ejemplo, el de la radiación solar difusa recibida en la superficie terrestre.

Los dos pilares básicos de esta técnica son la espectrometría de absorción y el concepto matemático de la correlación cruzada de funciones (Lange, 1967). Mediante el empleo combinado de ambos se pudo desarrollar un método para detectar la presencia de ciertos compuestos moleculares en algunos medios atravesados por una radiación, partiendo del simple conocimiento de sus espectros de absorción y recogiendo radiación en una cierta franja espectral. La espectrometría de

correlación se basa, por tanto, en la correlación cruzada del espectro de la radiación contra una función sintética de las características espectrales de la especie buscada. Cuando esta especie está presente y la coordenada de correlación seleccionada es la idónea, el valor de la correlación cruzada registra un máximo. A partir de aquí, la espectroscopia de correlación consigue implementar un procedimiento para detectar la presencia en la atmósfera del gas buscado, al mismo tiempo que minimiza el efecto de las posibles interferencias con otras especies gaseosas que podrían repercutir negativamente sobre la medida, a base de elegir la función de simulación del espectro que maximice el rechazo de los interferentes.

Los aspectos macroscópicos de la absorción de radiación electromagnética por la materia están regidos por dos leyes básicas que fueron formuladas en los siglos XVIII y XIX (Olsen, 1990). La primera de éstas fue enunciada por Bouguer en 1729 y reformuladas por Lambert en 1768 y predice el efecto que produce sobre la transición de una cierta radiación del espesor de un determinado medio absorbente. La segunda ley, establecida por Beer, describe el efecto de la concentración del absorbente sobre la fracción de luz absorbida. La forma combinada de estas dos leyes se conoce como **Ley de Beer** o ley de **Beer- Lambert** y se utiliza generalmente en la zona central del espectro electromagnético, del ultravioleta al infrarrojo, aunque se cumple en todos los procesos de absorción que tienen lugar en cualquier región del espectro. La expresión más simplificada de esta ley es la siguiente:

$$N_{\lambda}(L) = N_{\lambda}(0) \cdot \exp(-k_{\lambda}cL) \quad (2,3)$$

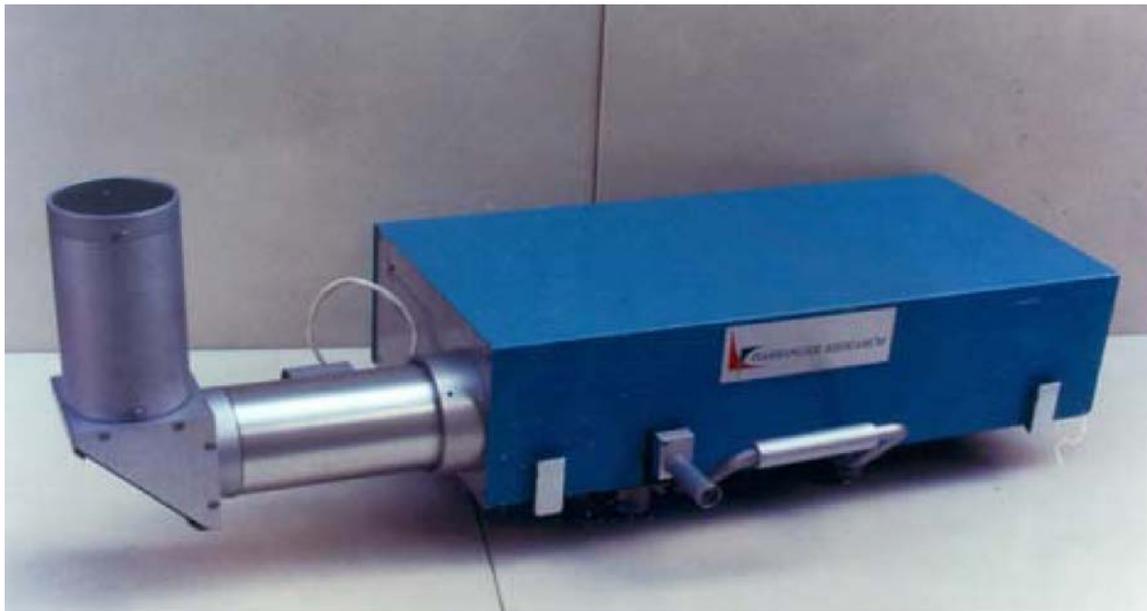
donde  $N_{\lambda}(0)$  es la intensidad de la radiación de longitud de onda  $\lambda$  antes de entrar en el medio absorbente,  $N_{\lambda}(L)$  es la intensidad de la radiación medida después de atravesar dicho medio,  $c$  es la concentración media de la especie absorbente,  $k_{\lambda}$  es el coeficiente de absorción específico correspondiente y  $L$  es la longitud del paso óptico total recorrido a través de ese medio.

#### **2.4.4.1 El sistema COSPEC versión "V"**

El sensor remoto COSPEC V fabricado por Barringer Research Limited (Canadá), es un equipo comercial de una serie de instrumentos diseñados para la detección de  $SO_2$  (o de  $NO_2$ ) en la atmósfera a partir del análisis de la banda UV de la radiación solar recibida en la superficie terrestre.

Este equipo ha sido ampliamente descrito en la literatura (Millán, *et al.*, 1977a, 1978) y aquí sólo se dará un repaso de las características principales de su bloque óptico y de su diseño electrónico.

En la figura 2.8 se muestra una imagen del aspecto exterior del instrumento que por su tamaño y peso es similar a un analizador automático de gases convencional. En la Figura 2.10 se presenta un esquema del bloque óptico con la disposición de las tarjetas de circuito (PCBs) en el cuerpo del COSPEC V.



**Figura.2.8 COSPEC V**

## COSPEC V

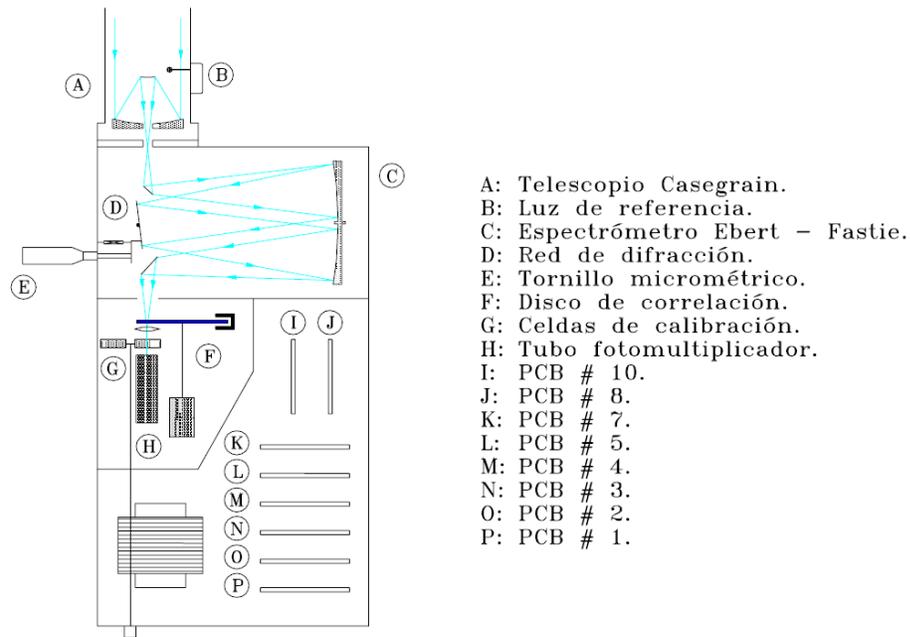


Figura. 2.9 Diseño del COSPEC V (Tomada de Pujadas, 2000)

Como puede observarse, la luz solar cenital es colectada mediante un telescopio tipo Cassegrain y dispersada en un policromador Ebert-Fastie. En el plano de salida de esta cavidad se presenta la región espectral de interés que se selecciona cambiando el ángulo de la red de difracción con el tornillo micrométrico, de este modo, para cada longitud de onda transmitida por el sistema se reproduce la imagen de la rendija (o rendijas) de entrada. En este punto, el espectro recibido ya está listo para ser correlacionado con las funciones simuladoras del espectro del gas de interés, operación que se realiza físicamente, esto es, sin necesidad de hacer cálculos. Para ello, estas funciones que reproducen las líneas de absorción del  $SO_2$  son funciones sencillas, que están implementadas como conjuntos de ventanas transparentes separadas por espacios opacos constituyendo auténticas funciones de muestreo (mascarillas de muestreo). El modo de implementar las correspondientes correlaciones cruzadas en este modelo de COSPEC es uno de los detalles que marca las diferencias entre ésta y las anteriores versiones del instrumento. En este equipo se abandonó el primitivo sistema biestable consistente en un conjunto oscilante de rendijas que,

según su posición, permitía simular dos replicas del espectro del gas (una reproducción de los picos y otra de los valles de absorción) y que con su balanceo posibilitaba la realización de la correlación del espectro de la luz incidente contra ambas funciones de simulación. A diferencia de éste, el nuevo sistema se basó en la utilización de cuatro mascarillas (dos de pico y dos de valles) grabadas como zonas transparentes y opacas sobre un disco rotatorio de cuarzo (disco de correlación), pasando a llamarse **sistema multiestable** (Millán, 1983). En el nuevo sistema se optimizó el diseño de las funciones de simulación del gas mediante un riguroso cálculo (Millán, 1972; Millán, *et al.*, 1977a) y se posibilitó que en cada ciclo de medida se realicen las cuatro correlaciones. Después cada una de ellas, es decir después de que el espectro ha sido “filtrado” por cada mascarilla, la luz transmitida es recogida con un lente colimadora que la lleva hasta un tubo fotomultiplicador (PMT), cuya salida en corriente es proporcional a la radiación recibida en cada momento, produciéndose un tren de cuatro pulsos de corriente (uno por cada mascarilla) por cada vuelta del disco. Esta señal pulsada es posteriormente procesada para obtener a la salida una tensión eléctrica analógica proporcional en cada instante a la concentración del gas linealmente integrada en el camino óptico de medida, es decir, proporcional a  $cL$ .

En la Figura 2.11 se describe, el concepto del sistema multiestable basado en la correcta definición de las 4 mascarillas y en su uso sobre el disco de muestreo. En el COSPEC V el disco gira a 50 Hz.

El instrumento consta principalmente de dos bloques: el sistema óptico y el sistema electrónico.

### **Sistema Óptico:**

El telescopio Cassegrain se encarga de coleccionar la radiación incidente que tras atravesar las rendijas de entrada del COSPEC es dirigida a la red de difracción del monocromador Ebert-Faste que produce su dispersión. El haz resultante nuevamente dirigido hacia la ventana de salida en donde aparece la región espectral elegida para su análisis. En el plano de salida se reproduce la imagen de las rendijas de entrada para cada longitud de onda y el muestreo selectivo de esta radiación se

realiza en ese plano a 50 Hz aproximadamente. Esas cuatro mascarillas están constituidas a base de ventanas transparentes y de regiones opacas intermedias, cuyo diseño reproduce algunas de las posiciones espectrales características del espectro de absorción del gas blanco, en este caso picos o valles de absorción del  $SO_2$ . La luz, después de ser filtrada por estas mascararas, se recoge por un lente de Fabry y se dirige hacia el tubo fotomultiplicador (PMT), cuya salida eléctrica es proporcional a la radiación que el sensor recibe tras el filtrado del espectro por cada mascarilla.

El sistema óptico se complementa con las celdillas de calibración. Se trata de dos capsulas de vidrio con ventanas de cuarzo cuyo contenido gaseoso y paso óptico son perfectamente conocidos y diferentes una de otra, de tal forma que se dispone de una celda de alta concentración y otra de baja. La interposición manual y transitoria de estas en el camino de luz produce a la salida del COSPEC V señales proporcionales a los valores nominales esperados, siendo este el procedimiento de calibración durante la operación normal del equipo.

#### **Sistema Electrónico:**

El procesado y control de todas las señales eléctricas generadas en el instrumento y la alimentación de todos sus componentes se centralizan en su bloque electrónico cuyo diseño es completamente analógico. Esta electrónica tiene una concepción modular, constando de una placa base sobre las que se conectan el resto de las placas de circuito impreso, hasta un total de ocho.

La señal obtenida finalmente tras la operación de medida es linealmente proporcional al espesor óptico del gas detectado, es decir, al producto ( $cL$ ) de la concentración  $c$ (ppm) del gas blanco ( $SO_2$ ) por el camino óptico  $L$ (m) en el que se encuentra espacialmente distribuido y que teóricamente ha sido recorrido por la luz analizada, dentro de la dirección marcada por el eje óptico del telescopio.

El sistema por sí mismo no permite obtener directamente valores absolutos de concentración linealmente integrados pero si detectar los cambios que se producen en el producto  $cL$ , generán-

dose en la señal de salida un cambio proporcional al producido. Esa señal diferencia es realmente la respuesta interpretable, no los valores absolutos de la señal eléctrica puesto que el equipo no tiene un valor de cero fijo, aunque en ciertas circunstancias sea posible aproximarse a esa condición.

#### ***2.4.4.2 Celdas de Calibración***

El sistema óptico se completa con las celdillas de calibración. Se trata de dos cápsulas con ventanas de cuarzo cuyo contenido de gas y paso óptico son conocidos y diferentes para cada uno. La interposición manual y transitoria de estas celdillas en el camino de la luz produce a la salida del COSPEC V señales proporcionales a los valores nominales de los respectivos productos cL, siendo éste el procedimiento de calibración durante las sesiones de medida en campo.

El procesado y control de todas las señales eléctricas generadas en el equipo y la alimentación de todos los circuitos se realizan en su bloque electrónico, cuyo diseño analógico responde a una concepción modular. El sistema está constituido por ocho placas de circuito que se conectan sobre una placa base según la disposición mostrada en la Figura 2.9.

#### ***2.4.4.3 Generación de la señal de salida $V_{out}$ en el COSPEC V (AGC).***

Como se ha comentado anteriormente, el uso de la técnica de correlación de funciones en el COSPEC V permite detectar y cuantificar la presencia del gas de interés en la región atmosférica recorrida por la luz analizada, además de minimizar el efecto de las interferencias debidas a la pérdida de señal producida por causas ajenas al gas. Sin embargo, la inversión de las señales producidas por las distintas funciones de muestreo para finalmente obtener una salida proporcional al valor real de cL, no es trivial.

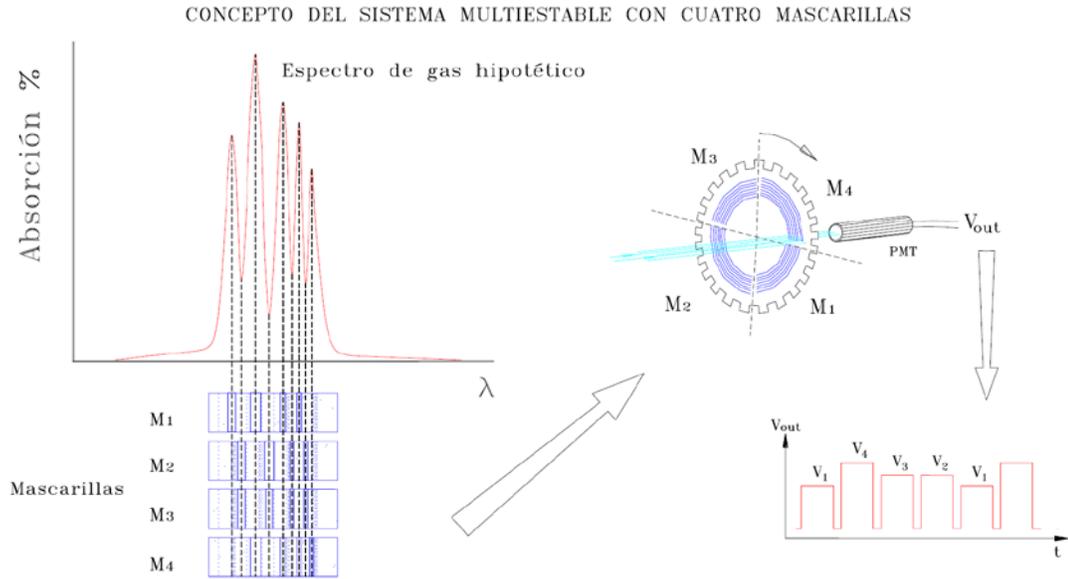


Figura 2.10 Concepto del sistema multiestable de cuatro mascarillas (Tomada de Pujadas, 2000).

Definidas las cuatro mascarillas  $M_i$  (Figura 2.10), según corresponda al espectro de absorción del gas a detectar, los correspondientes voltajes  $v_i$  obtenidos se procesan hasta alcanzar un resultado como el siguiente:

$$V_{out} \propto \left[ \left( 1 - \frac{v_2}{v_1} \right) - k \left( 1 - \frac{v_4}{v_3} \right) \right] \alpha A - k \cdot B \quad (2,4)$$

donde

$v_1 \propto$  Radiación muestreada por  $M_1$  (máscara de picos de absorción)

$v_2 \propto$  Radiación muestreada por  $M_2$  (máscara de valles de absorción)

$v_3 \propto$  Radiación muestreada por  $M_3$  (máscara de valles de absorción)

$v_4 \propto$  Radiación muestreada por  $M_4$  (máscara de picos de absorción)

Lógicamente la implementación de esta expresión en un instrumento analógico como éste no fue sencillo y a continuación se describe el procedimiento diseñado para el COSPEC V.

Considerando que la señal primaria la constituyen los pulsos  $v_1, v_2, v_3$  y  $v_4$ , el primer paso consiste en normalizar todos ellos a  $v_1$ , de tal modo que en realidad se trabaje con  $V_i = v_i/v_1$ , en lugar de hacerlo con  $v_i$  y para ello se recurre a utilizar una ganancia del PMT realimentada, el llamado Control Automático de Ganancia Primario (AGC 1°), que ajusta su valor en cada ciclo del disco de muestreo. La realimentación se produce continuamente de forma que la amplitud del pulso  $V_1$  siempre mantenga un valor constante previamente seleccionado, aplicándoseles al resto de pulsos el factor de ganancia fijado en cada ciclo, por lo que el sistema realiza una autentica normalización a  $V_1$ . De este modo se llega a otro conjunto de señales ( $V_1 = cte, V_2 = v_2/v_1, V_3 = v_3/v_1, V_4 = v_4/v_1$ ) que a su vez sufren un tratamiento posterior. El pulso normalizado  $V_3$  se compara con un valor de referencia previamente establecido  $V_3'$ , que al igual que  $V_1$  es seleccionable y fijo, y el factor de amplificación resultante se aplica al pulso  $V_4$  convirtiéndolo en  $V_4'$ . Esta nueva realimentación se denomina Control Automático de Ganancia Secundario (AGC 2°).

Después de todo este proceso el tren de pulsos primarios  $v_i$  se ha convertido en  $V_1, V_2, V_3'$  y  $V_4'$ . A continuación se detectan  $V_2$  y  $V_3'$  dentro de la onda, se separan, se invierten y se suman nuevamente para dar la onda de salida,  $V_1, -V_2, -V_3'$  y  $V_4'$ . La integración de los pulsos permite que la salida se de la forma deseada, es decir:

$$V_{out} \propto V_1 - V_2 - V_3' + V_4' \quad (2,5)$$

porque sustituyendo estas variables por su valor se comprueba que la expresión resultante es:

$$V_{out} \alpha \left[ \left( 1 - \frac{V_2}{V_1} \right) - \frac{V_3'}{V_1} \left( 1 - \frac{V_4'}{V_3'} \right) \right] \quad (2,6)$$

donde llamando  $k$  al cociente constante  $V_3'/V_1$  queda finalmente

$$V_{out} \alpha \left[ \left( 1 - \frac{v_2}{V_1} \right) - k \left( 1 - \frac{v_4}{v_3} \right) \right] \quad (2,7)$$

que es precisamente la ecuación (2,4). Las expresiones contenidas en los paréntesis agrupan las contribuciones a  $V_{out}$  de las cuatro mascarillas en dos parejas de señales que suelen denominarse señales suplementarias A y B (ecuación 2,4), estando disponibles como salidas independientes de  $V_{out}$  en el COSPEC V.

Considerando lo anterior, puede decirse que, la salida del COSPEC se describe como la suma de dos señales diferentes e inseparables: la señal correspondiente a un fondo radiativo en el que no existe absorción espectral detectable por parte del gas a medir (señal de NO GAS o línea base) y la señal debida a la absorción específica detectable del gas (señal de GAS). Esto significa que las variaciones que se producen en la salida del COSPEC pueden deberse de modo indistinto a cambios en alguna de esas dos componentes, de ahí la dificultad que existe para realizar una correcta interpretación de los datos (Millán, 1983).

En todo caso, la definición de las señales A y B se han realizado para obtener una señal inequívoca en presencia de gas, puesto que los cambios que se producen en ambas señales en presencia de gas son de signo distinto, mientras que los cambios inducidos sobre A y B por otras circunstancias suelen ser del mismo signo y a través de la adecuada sustracción ponderada de ambas ( $V_{out} \propto A - kB$ ) estos cambios no se reflejan sobre la señal de salida. Hay que tener en cuenta que, por definición, el factor constante  $k$  es seleccionable por el usuario y de la idoneidad de su valor depende en gran medida el comportamiento de la línea base.

En condiciones óptimas de funcionamiento y considerando las distintas fuentes de incertidumbre, el límite de detección del COSPEC V suele estar entre las 5 – 10 ppm•m, pudiendo trabajar con un tiempo de respuesta de 1 segundo, cuestión crucial para su uso en movimiento (Pujadas, 2002).

## 2.5 Espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS)

### 2.5.1 Especies que se pueden medir en el rango UV-visible.

Tanto la radiación ultravioleta como la visible se caracterizan por que al ser absorbidas por la materia provocan la excitación de los electrones exteriores a niveles de energía superiores. Los electrones de enlace, fuertemente ligados, requieren mayor energía (longitudes de onda más corta), mientras que los no compartidos se excitan con más baja energía.

### 2.5.2 Espectros de absorción en el rango UV-visible.

Los espectrómetros para el ultravioleta de uso común miden la absorción de luz en la región visible y ultravioleta “cercana”, es decir en el intervalo 200-750nm (Figura 2.11). Esta luz es de mayor frecuencia que la infrarroja y, cuando es absorbida por una molécula, produce cambios de estado electrónicos que requieren de más energía.

En una transición a un nivel electrónico más alto, una molécula puede ir desde cualquiera de varios subniveles, correspondientes a diversos estados vibracionales y rotacionales, hacia cualquiera de varios otros subniveles: el resultado es la observación de bandas anchas de absorción ultravioleta.

Mientras un espectro de infrarrojo muestra picos muy marcados, un ultravioleta típico solo indica algunas bandas anchas. Dicho espectro puede describirse convenientemente en función de la posición del máximo de la banda ( $\lambda_{max}$ ) y de la intensidad de dicha absorción ( $\epsilon_{max}$ , el coeficiente de extinción).

Cuando decimos que una molécula es elevada a un nivel electrónico superior, indicamos el paso de un electrón a un orbital a otro de energía mayor. Este electrón puede ser cualquiera de los descritos: un electrón  $\sigma$ , uno  $\pi$  o uno  $n$  (un electrón no enlazante, es decir, uno de un par no compartido). Un electrón  $\sigma$  está firmemente sujeto, por lo que se necesita bastante energía para

excitarlo; energía correspondiente a la luz ultravioleta de onda corta, fuera del intervalo del espectrómetro usual, la luz del ultravioleta “lejano”. Las excitaciones que aparecen en el ultravioleta (cercano) corresponden principalmente a los electrones  $n$  y  $\pi$ , mucho más sueltos, y de estos, sólo alcanzan a manifestarse los saltos a los estados excitados más bajos: los más estables.

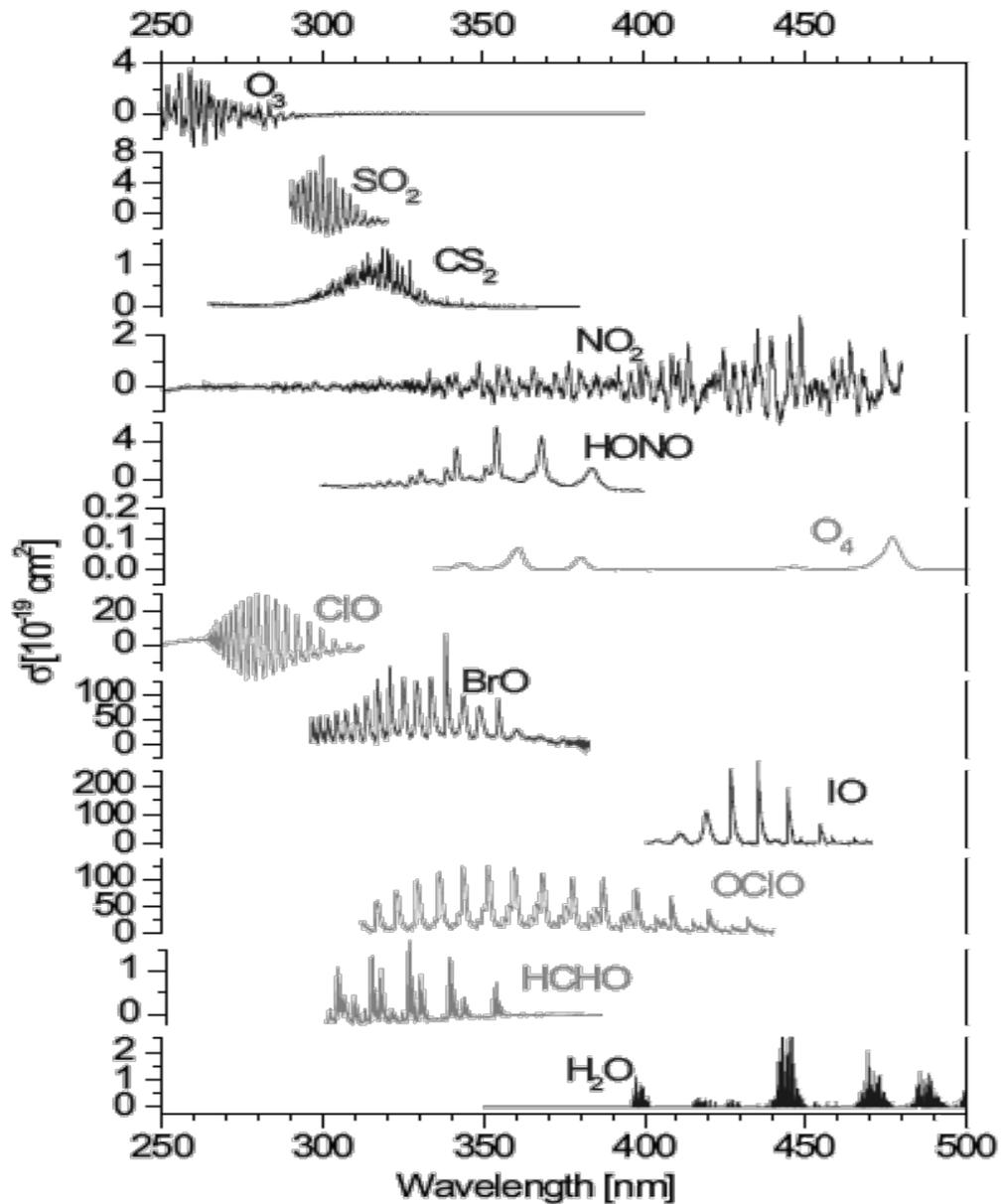


Figura. 2.11 Espectros de absorción en el ultravioleta para algunas especies atmosféricas

### 2.5.3 Principio teórico del DOAS

La medición de la concentración de gases traza y otras cantidades, como el campo de radiación de la atmósfera, son herramientas cruciales para la investigación de los procesos fisicoquímicos en la atmósfera terrestre. La técnica deberá cumplir con ciertas características.

Primero la técnica deberá ser lo suficiente sensible para detectar la concentración de especies bajo consideración en sus niveles atmosféricos. Algunas especies tienen relaciones de mezcla que van desde 1 parte por trillón (relación de mezcla de  $10^{-13}$ , equivalente aproximadamente a  $2 \times 10^6$  moléculas  $\text{cm}^{-3}$ ) a varias partes por billón (1ppb corresponde a una relación de mezcla de  $10^{-9}$ ) y pueden tener una significativa influencia en los procesos químicos en la atmósfera.

Segundo, es igualmente importante para la técnica de medición que sea específica, el resultado de la medición de un gas en particular no debe ser influenciado, tanto de manera positiva o negativa, por la presencia simultánea de otras especies presentes en la muestra.

Otras propiedades deseables de la técnica de medición son: simplicidad del diseño y uso de los instrumentos basados en: su capacidad de operación en tiempo real. También habrá de considerarse su peso, para su transporte, y la dependencia de medición-condiciones ambientales.

Tabla 2.5. Coeficientes de absorción diferencial y rangos de longitud de onda para algunas especies atmosféricas que se pueden medir con DOAS

Especie	Intervalo de $\lambda$ [nm]	$\sigma(\lambda)$ [ $\text{cm}^2$ moléculas $^{-1}$ ]
SO <sub>2</sub>	200-230	$6.5 \times 10^{-18}$
	290-310	$5.7 \times 10^{-19}$
NO <sub>2</sub>	200-230	$2.6 \times 10^{-20}$
	330-500	$2.5 \times 10^{-19}$
O <sub>3</sub>	300-330	$4.5 \times 10^{-21}$
HONO	330-380	$4.2 \times 10^{-19}$
HCHO	250-360	$6.8 \times 10^{-20}$
OH	308	$2 \times 10^{-16}$

La técnica "Differential Optical Absorption Spectroscopy" (por sus siglas en inglés "DOAS") es un método de percepción remota ampliamente empleado desde principios de los setentas, para determinar concentraciones de especies atmosféricas (p. ej.  $O_3$ , BrO, OCIO, IO, HCHO,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , etc.) por diversos grupos de investigación (p. ej. Platt, 1986; Plane, 1992; Platt, 1993; Evangelisti, 1995; Brauers, *et al.*, 1995; Barrefors, 1997; Platt, 1997; Volkamer, 2001; Galle, *et al.*, 2002; Brohede, 2002; Oppenheimer, 2002; Weibring, *et al.*, 1998; Bobrowski, *et al.*, 2003; Christoph, *et al.*, 2005). DOAS ha demostrado su potencial en particular para la detección de diferentes compuestos halogenados.

Esta técnica ha sido empleada tanto en la superficie terrestre como en mediciones satelitales, usando fuentes de radiación artificiales (configuración activa) o radiación solar dispersada (configuración pasiva), este arreglo es simple pero tiene aplicaciones limitadas (Platt, 1994). La principal ventaja de DOAS es la capacidad de medir la concentración absoluta de especie, sin destruir la muestra. En general, la técnica DOAS, se basa en el análisis de espectros de banda ancha, debido a que la sección transversal de absorción es relativamente grande en el UV-visible para muchos gases atmosféricos, en las regiones visible y ultravioleta, que ha sido transmitida a través de una trayectoria.

## **CAPITULO 3**

### **Área de estudio: Volcán Popocatepetl**

### **3.1 Localización**

El volcán Popocatepetl está localizado en la parte central de la Faja Volcánica Mexicana a 340 km de la Trinchera Mesoamericana con las siguientes coordenadas:

19° 01' 30" de latitud norte y

98° 37' 20" de longitud oeste.

El volcán Popocatepetl, extremo sur de la Sierra Nevada, divide dos grandes cuencas con una gran población: más de 20 millones de habitantes en la cuenca de México y 5.7 millones en la cuenca de Puebla. El volcán está localizado al sureste de la ciudad de México, a 60 km del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, a 65 km del zócalo capitalino, a 40 km de la zona metropolitana sur-este del D.F., a 114 km del Aeropuerto Internacional Lic. Adolfo López Mateos de Toluca, Méx., a 116 km del Aeropuerto local de Atizapán de Zaragoza Méx., a 50 km del centro de Cuautla Mor., a 64 km de Cuernavaca Mor., a 45 km del Aeropuerto de Puebla, a 58 km del centro de la ciudad de Puebla y a 45 km del área conurbada poblana.

### **3.2 Geología, origen y evolución del Popocatepetl**

El Popocatepetl se localiza en el extremo sur de la Sierra Nevada, cordillera volcánica que se desarrolló durante el Plioceno-Cuaternario, el cono actual del Popocatepetl se construyó de varios flujos de lava de composición andesítica y dacítica, interestratificado con el producto de grandes erupciones plinianas (Espinosa y Martín 2006). Este conjunto montañoso tiene una orientación N-S y representa el límite SE de la cuenca endorreica de México.

Son tres los materiales que constituyen el basamento sobre el cual se emplaza el Popocatepetl (Goff *et al.*, 2001). El más antiguo, de edad paleozoica, está constituido por rocas metamórficas que pertenecen al complejo Acatlán. Estos materiales no afloran en superficie, y se consideran

que se encuentran a una profundidad de ~6000 metros por debajo del cráter principal. Sobreayaciendo al sustrato anterior, existen estratos calizos del Cretácico de 3,000 m de espesor que afloran a 20 km al sur del volcán. Por encima de los depósitos cretácicos se presenta una capa de sedimentos continentales del Terciario, de un kilómetro de espesor. Toda la secuencia mencionada es interrumpida por cuerpos intrusivos del Terciario, que la cortan de manera perpendicular (Figura. 3.1)

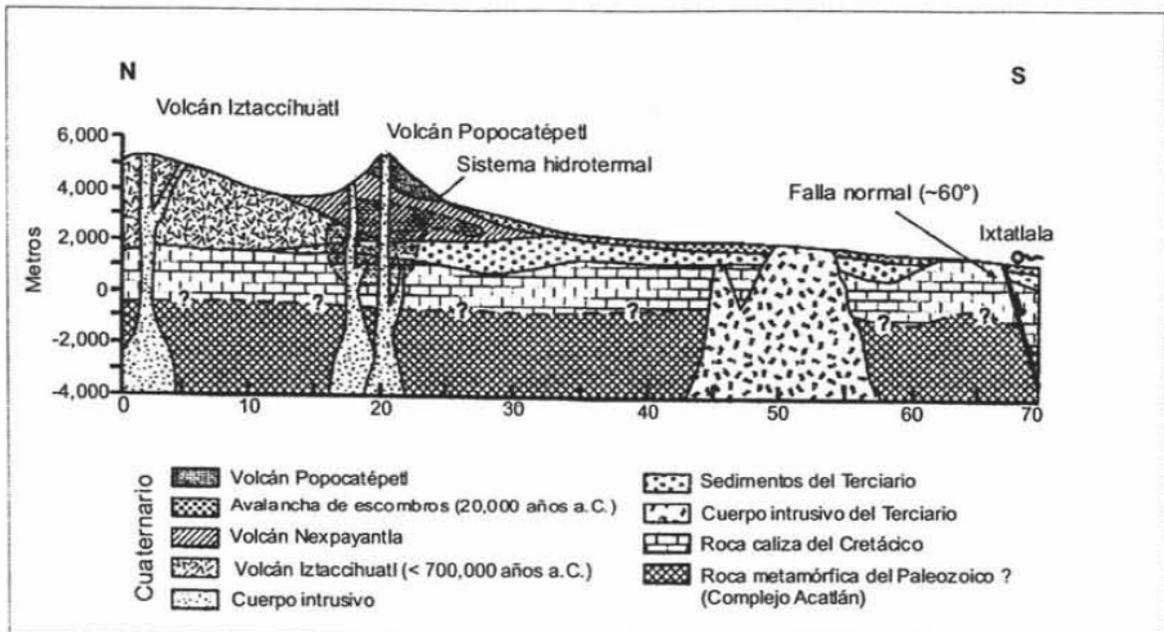


Figura. 3.1. Sección geológica que muestra a los principales componentes litológicos que constituyen el basamento del Popocatépetl así como las estructuras volcánicas previas a la formación del cono reciente (Goff et al., 2001).

Uno de los primeros modelos que tratan de explicar la evolución del Popocatépetl es atribuido a Robin (1984); y Robin y Boudal (1987). En él se plantea la existencia de tres estructuras volcánicas en el área del actual cono.

La primera de ellas corresponde a un edificio de 5000 – 5300 msnm; llamado *primitivo*, su edad es contemporánea a la formación de la Sierra Nevada, hace aproximadamente un millón de

años. Su actividad fue de tipo efusivo, dando origen a las lavas dacíticas que alcanzaron un volumen total de 400 km<sup>3</sup>.

Hace 50,000 a 30,000 años A.C. el volcán *primitivo*, a partir de un evento tipo Santa Elena se destruyó, de tal manera, que parte de su edificio se transformó en una avalancha de escombros. Una forma de relieve, que puede relacionarse con la antigua cicatriz dejada por el colapso volcánico, podría ser lo que Mooser et al. (1996) denominan "Caldera de Tlamacas", de edad Cuaternaria y que se localiza a 2.5 km al norte del cono actual.

La segunda etapa en la evolución del Popocatepetl queda definida por el nacimiento del volcán El Fraile, dentro de la depresión que originó la destrucción del *primitivo*. Las fases que marcan el inicio de actividad del Fraile afloran al SSE del edificio actual, fueron esencialmente efusivas y ocurrieron entre 10,000 y 15,000 años A.C. a 3,800 años A.C. De esta manera, se fue rellenando la antigua superficie, con morfología de caldera, con depósitos lávicos de hasta 200 m de altura y potentes capas de piroclásticos (40 km<sup>3</sup> de material emitido), la composición fue andesítica y dacítica (Figura 3.1).

El Fraile se destruyó a partir de tres eventos explosivos tipo San Vicente, el primero ocurrió hace 10,000 años. Entre los 9,500 y 8,000 años A.C. se presenta el segundo, y último de ellos se sucedió de 5,000 a 3,800 años A.C. Las dos últimas fases de destrucción se caracterizaron por la presencia de flujos de pómez y ceniza que llegaron a distancias de 20 km y alcanzaron espesores entre 10 y 20 m.

Existen escasas evidencias relacionadas con la existencia de El Fraile, debido a que se han ido perdiendo por explosiones posteriores y por la acción de la dinámica exógena, en especial de la acción glacial de finales del Pleistoceno y del Holoceno. No obstante, en la ladera NW del actual Popocatepetl es posible reconocer dos rasgos morfológicos. El primero se conoce como "El Pico del Fraile" (5,000 msnm), el segundo es una prominente pared rocosa que es nombrada "El Abanico".

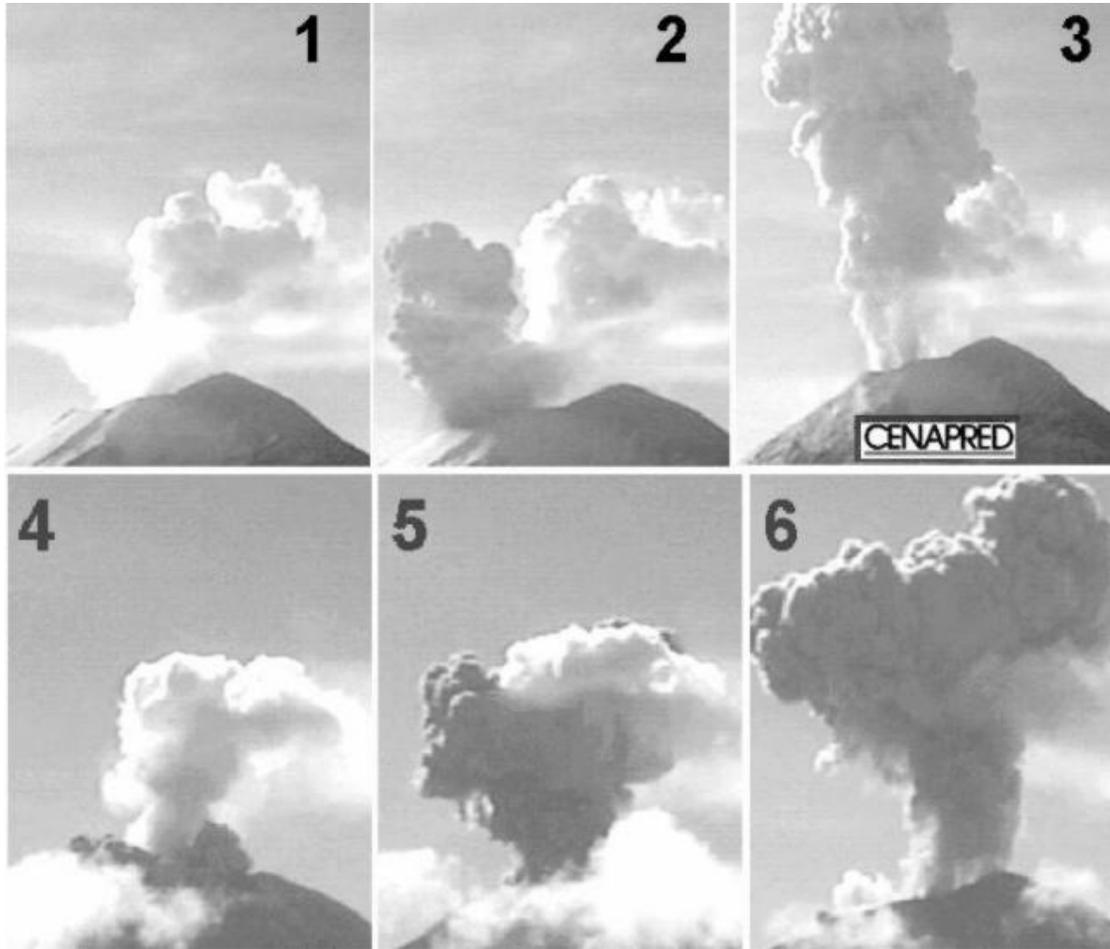
Es importante también mencionar que El Fraile (Robin, 1984; Robin y Boudal 1987); es conocido también como volcán Nexpayantla en los modelos propuestos por Carrasco et al. (1985); Mooser et al., (1996); Siebe et al., (1997) y Goff et al., (2001). Sin embargo estos dos últimos autores, identifican solo dos estructuras pre-Popocatépetl, donde el promontorio rocoso denominado “El Ventorrillo” es la evidencia morfológica relicto, que se asocia al Nexpayantla.

La tercera y última etapa de evolución está representada por el cono actual del Popocatépetl, su origen se asocia a la alternancia de eventos efusivos y destructivos. Su crecimiento comenzó con la emanación de potentes coladas de lava de composición andesítica y dacítica, entre los 3,800 y 1,200 a.C. Las características de todas las rocas muestran una afinidad calcialcalina, típica del vulcanismo de subducción (Delgado et al., 1999).

### **3.3 Historia eruptiva reciente**

El volcán Popocatépetl muestra evidencia de erupciones de tipo Pliniana cada 2000 años. Basado en muestras de núcleo de hielo la última gran erupción ocurrió en el año 823 D.C. (GVP; CE-NAPRED) desde entonces el volcán Popocatépetl muestra un ciclo continuo de erupciones de menor explosividad intercalado con ciclos de 2 a 70 años de inactividad. El último ciclo eruptivo ocurrió en 1920 y tuvo una duración de siete años (Delgado, 2001; GVP). La actividad eruptiva actual se inicio en 1994 y continúa hasta hoy.

El volcán despertó de nuevo en diciembre de 1994 (Figura 3.2) con una fuerte explosión freática que despejó el respiradero y limpio el conducto magmático, esta actividad continuó hasta enero de 1995.



**Figura. 3.2 Erupción del volcán Popocatépetl en el mes de diciembre de 1994 (CENAPRED, <http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/Album/>).**

Las explosiones fueron intermitentes durante enero a marzo del 2005. En agosto de este mismo año las emisiones de ceniza pararon en su totalidad así como otras señales volcánicas (sismicidad). Este periodo de inactividad continuó hasta Marzo de 1996 (Delgado *et al.*, 2001).

Durante el siguiente año y medio, explosiones esporádicas abrieron 4 nuevas bocas en el cráter de el mes de marzo de 1996 al año 2003 el volcán Popocatépetl se caracterizo por tener un actividad explosiva y efusiva, con la creación y destrucción de domos de lava emplazados en el cráter, así como una tasa alta de emisión de gases, flujos de lava, erupciones freáticas y lahares.

Durante la mayor parte del año 2005 el volcán se mantuvo relativamente estable teniendo pequeñas exhalaciones de vapor y una columna de cenizas que alcanzaron los 900 metros por encima del cráter. El 25 de diciembre de 2005 (Figura 3.3), el Popocatepetl tuvo una explosión moderada que produjo una columna de unos 2000 metros por encima del cráter y mostro incandescencia durante la mañana del 25 de diciembre (CENAPRED).



**Figura 3.3 Foto de la explosión del 25 de Diciembre de 2005 (CENAPRED,**  
<http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/Album/>)

Durante los primeros meses del año 2006 solo tuvo pequeñas emisiones de vapor y agua. Fotografías aéreas tomadas el 10 de febrero mostro un domo de lava de 130 metros de diámetro en el fondo del cráter. El 25 de julio a las 09:50 hora local el volcán Popocatepetl tuvo una fuerte explosión, produciendo una nube de ceniza y gas de unos 5 km de altura sobre el cráter. La erupción duro minuto y medio y fue acompañado por un temblor de alta frecuencia. Se cree que la explosión fue acompañada de por la interacción del agua de las recientes lluvias con el domo de lava caliente en el interior del cráter (CENAPRED), aunque esto es improbable.

El primero de abril de 2007 el Popocatépetl produjo una columna eruptiva que se elevó a 7.6 km de altitud con dirección NE y nuevamente el primero de diciembre se produjo una explosión más grande y produjo una columna de ceniza que se elevó a una altitud de 7.4 km, se reportó caída de cenizas en las zonas a sotavento. Con base a las observaciones por satélite del VAAC de Washington, la pluma de cenizas se elevó a una altitud de 9.1 km de altitud (CENAPRED).

En enero de 2008 el Popocatépetl recibió el año con una de sus explosiones más potentes. La pluma de cenizas de la erupción llegó a unos 8 km de altura. El 5 de febrero después de una fuerte explosión el volcán Popocatépetl arrojó rocas expulsadas a 300 m del cráter rodando cuesta abajo en los valles.

El CENAPRED reportó para el periodo de abril del 2009 a octubre 2010 cambios no significativos en la actividad del Popocatépetl. Su actividad solo consiste en microsismos de baja intensidad, una constante desgasificación y algunas veces acompañado de ceniza de variable intensidad (Figura 3.4).



Figura 3.4 Foto del volcán Popocatépetl teniendo una emisión de ceniza y gases el 9 de octubre de 2009 (CENAPRED, <http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/Album/>)

### **3.4 Condiciones meteorológicas: “VIENTO”**

La dirección del viento en el volcán Popocatepetl es muy variable durante todo el año. Los cambios drásticos en la dirección del viento se pueden observar incluso en un mismo día. Vientos superficiales <3000 msnm(metros sobre el nivel del mar) tienen una fuerte tendencia N-S con una velocidad de viento promedio de menos de 5 m/s. Vientos entre 3000 y 6000 msnm durante los meses de enero a abril tienen patrones de viento igual que los vientos de niveles altos (>6000 msnm), pero de junio a diciembre los vientos tienen una gran dispersión y una transición de bajas a altas velocidades de viento entre 5 y 10 m/s. Para los niveles altos (más de 20000 msnm) de noviembre a abril son viento del W y WSW, de junio a septiembre vientos del E, excepto en abril cuando viento de ~11000 msnm son muy irregulares. Los meses de mayo y octubre son de transición, entre los meses de abril y mayo los vientos guardan la misma tendencia W y WSW hasta los 16500 y de esta altitud hasta lo 20600m, las direcciones son diametralmente opuestas (E y ENE) con velocidades de 10 a 15 m/s. a partir de los 20,600 en los meses de abril a noviembre los vientos provienen del E, persistiendo en los meses de diciembre a marzo con velocidades de 20 a 30 m/s. Por debajo de los 5,800 los vientos son influenciados por la topografía. (Delgado, 2002).

# **CAPITULO 4 Mediciones de campo y procesamiento de datos**

Este capítulo corresponde a los diferentes métodos de medición remota que utiliza el CENAPRED para el monitoreo de la desgasificación pasiva de  $SO_2$  del volcán Popocatépetl.

Por medición remota se entiende la obtención de información cuantificable de algún objeto, sin contacto con éste. Dicha información se obtiene identificando y midiendo las variaciones que el objeto produce en el campo físico que lo rodea (gravitacional, electromagnético, térmico, etc.) o la emisión o reflexión de ondas (electromagnéticas, mecánicas –acústicas-) por el mismo (Elachi, 1987).

El primer método utilizado ya desde hace varios años es el método COSPEC, este método se ha utilizado desde principios de 1970 en muchos volcanes alrededor del mundo, y a pesar de su antigüedad sigue siendo una herramienta útil para mediciones de flujo de  $SO_2$  en el volcán Popocatépetl.

El segundo método es el llamado DOAS, este es un equipo que también mide el flujo de  $SO_2$  emitido por el volcán Popocatépetl a la atmósfera. Cabe mencionar que estas observaciones no son generadas en un solo equipo, sino que se trata de una red de DOAS denominado red NOVAC (por el nombre del proyecto bajo el cual se creó la red). La Red para la Observación de Cambios Volcánicos y Atmosféricos NOVAC (“Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change”) es un proyecto científico en conjunto con la Unión Europea que fue puesto en marcha en el año de 2005 y que consiste en una red global de monitoreo volcánico que abarca 15 volcanes en cinco continentes; incluyendo los volcanes más activos de México: Popocatépetl y el Volcán de Fuego Colima.

El tercer método que se describe en esta tesis para el monitoreo de  $SO_2$  es el denominado móvil-DOAS. Esta técnica fue desarrollada para hacer mediciones de gases volcánicos (Galle, 2002) y es basado en la espectroscopia de absorción óptica diferencial DOAS (Platt, 1979). Se utiliza con frecuencia al mismo tiempo que se realizan mediciones con el COSPEC. Este método es muy fácil de usar y su metodología se explicará posteriormente.

### ¿Por qué es importante medir el dióxido de azufre?

- Un gran aumento en el flujo de dióxido de azufre indica la intrusión de un magma nuevo y puede ser un indicador de una nueva erupción, (p.ej. Olmos *et al.*, 2007).
- Las variaciones en el flujo de dióxido de azufre muestran los procesos que ocurren en el interior del volcán tales como la apertura o sellado de la chimenea volcánica y el lavado del  $SO_2$  por medio del sistema hidrotermal, (p.ej. Delgado, *et al.*, 2001, Duffel *et al.*, 2003).
- El  $SO_2$  se oxida a  $H_2SO_4$  formando aerosoles altamente ácidos que tienen un importante impacto en el ambiente local (p.ej. alrededor de un volcán de baja altura como el volcán Masaya (Delmelle *et al.*, 2002), o el volcán Popocatépetl el cual está situado muy cerca de la ciudad de México (Raga *et al.*, 1999).
- Los aerosoles formados por el  $SO_2$  tienen un efecto sobre el balance de la radiación de la Tierra mediante el fenómeno de condensación de las nubes y el aumento de el reflejo de la radiación incidente (IPCC 2007).

## 4.1 Técnica COSPEC utilizada en el volcán Popocatépetl

Se postula que las mediciones de flujo de  $SO_2$  podrían ser utilizadas como indicador de desgasificación de magma. En algunos volcanes se ha observado un incremento de desgasificación de  $SO_2$  hasta diez veces mayor al normal en la etapa pre-eruptiva, como ocurrió en el Monte Pinatubo, en las Filipinas y en México (Delgado *et al.*, 2001). Estas observaciones, la composición química, y las tasas de emisión de gases volcánicos contienen información importante sobre las condiciones subterráneas e hidrotermales, con aplicación en el pronóstico de una erupción.

De igual manera la disminución de los flujos de  $SO_2$  en paralelo con la disminución de la actividad después de la erupción también se han observado en muchos volcanes (McGonigle, 2005).

El método tradicional de medición de gases volcánicos es recoger una muestra de gas directamente y transportarlo al laboratorio para su análisis. Esta metodología consiste en atrapar gases burbujeantes que salen de los respiraderos, estos pasan a través de soluciones alcalinas que actúan como trampas ácidas. Aunque el muestreo directo es la fuente más detallada y precisa para la obtención de datos sobre los gases volcánicos, este método sufre una serie de limitaciones: en primer lugar, la rutina de vigilancia puede ser difícil o imposible debido a los riesgos que implica, que puede restringir las observaciones a los respiraderos de baja temperatura que no son representativos de un volcán en conjunto, en segundo lugar las muestras en su composición química pueden ser alteradas por un mal almacenamiento, y en tercer lugar, una serie de datos previos a una erupción son interrumpidos por la erupción debido a la imposibilidad de acercarse nuevamente y en cuarto lugar, su análisis puede implicar retrasos (durante una crisis volcánica los datos a menudo se requieren de inmediato).

La espectrometría de correlación es, en la actualidad, una técnica de medida remota bien establecida para algunos contaminantes atmosféricos, cuyo concepto instrumental se basa en el conocimiento del espectro del gas a medir.

#### **4.1.1 Instrumentación y metodología**

La Espectroscopia de correlación aplicada en el volcán Popocatépetl se ha utilizado de manera regular desde mayo de 1994. Esta técnica se utiliza para evaluar la tasa de desgasificación de  $SO_2$ , la cual podría estar asociada con cambios en la actividad eruptiva de volcanes de conducto abierto.

La actividad del volcán Popocatépetl se ha caracterizado tanto en su etapa pre-eruptiva como en la eruptiva por tener grandes emisiones de  $SO_2$  (Global Volcanism Network Bulletin, 1994; Delgado y Cárdenas, 1997).

En las mediciones COSPEC durante los periodos considerados para este estudio se ha utilizado el espectrómetro de correlación fabricado por Barringer Research de Toronto (COSPEC) modelo V. La metodología usada para estas determinaciones es descrita por Williams-Jones y Stix (2001), Stix *et al.*, (2001), y Delgado (2001).

#### **4.1.2 Medida de $SO_2$ con COSPEC en mediciones terrestres móviles**

Existen diferentes estrategias de muestreo de  $SO_2$  utilizando COSPEC, las principales son *mediciones aéreas*, *mediciones terrestres estacionarias en tierra* y *mediciones terrestres móviles*.

Durante los últimos catorce años, el volcán Popocatépetl ha planteado varios retos para el monitoreo de flujo de  $SO_2$ . Las experiencias midiendo grandes penachos volcánicos han conducido a adaptar procedimientos metodológicos específicamente para el Popocatépetl descrita por Delgado-Granados (1991). Para el caso de este estudio de tesis solo describiremos la metodología que se hace en mediciones terrestres móviles. A continuación se presentan la descripción técnica de estos laboratorios móviles.

Se trata de vehículos ligeros los cuales son adaptados de manera interna, para transportar el COSPEC V de manera estable y que no presenten grandes movimientos verticales y/o horizontales con el movimiento del vehículo (Figura 4.1), se conecta a la batería del vehículo un convertidor de voltaje para poder suministrar de energía al COSPEC, al registrador analógico, al sistema de adquisi-

ción digital y otros (y al equipo DOAS, que para este estudio se hicieron las mediciones simultáneas, descrito en la sección 4.2). El telescopio del COSPEC junto con sus espejos reflectores es colocado externamente por una ventana para recibir un flujo de  $180^\circ$  ( $2\pi$ ) de irradiación dispersa de luz ultravioleta (UV).



**Figura. 4.1.** A la izquierda se muestra como son las adaptaciones para mantener estable al COSPEC, a la derecha muestra El telescopio del COSPEC antes de entrar a la pluma volcánica.

Para poder iniciar una medición COSPEC el vehículo se debe encontrar fuera de la pluma volcánica y en dirección del trayecto a realizar, de no hacerlo podemos encontrar errores al calcular el flujo total de dióxido de azufre. Al inicio y final de cada travesía es necesaria hacer las calibraciones (alta y baja), estas calibraciones sirven como referencia a la hora de hacer el cálculo.

El vehículo con el COSPEC debe pasar por debajo de la pluma y en forma casi perpendicular (Casadevall *et al.*, 1981) (Figura 4.2). Durante la medición la velocidad del vehículo se debe mantener uniforme, en algunos casos los cambios de velocidad pueden inducir errores en las mediciones de  $SO_2$  pero se ha visto que en el caso del Popocatepetl estos cambios de velocidad del vehículo producen errores muy bajos (Delgado, 2001).

Durante la medición cuando el vehículo este en movimiento se debe tener cuidado de no pasar por obstáculos como arboles, puentes y túneles que interfieran entre la vista del telescopio del instrumento y el cenit, estos obstáculos producen una alteración en registro analógico originando una distorsión en el trazado de la concentración de  $SO_2$  .

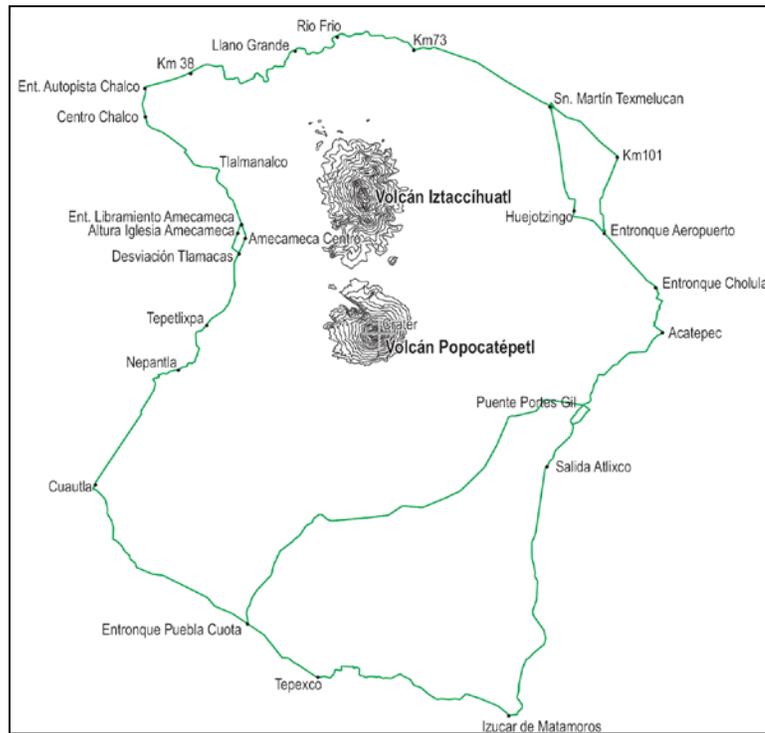


Figura. 4.2 Red de carreteras que rodean al volcán Popocatepetl.

### 4.1.3 Procesamiento de datos

El análisis de los datos obtenidos por el COSPEC V se lleva a cabo de dos maneras diferentes

- a) Graficado analógico (Figura 4.3): se describe en Stoiber et al., (1983), la densidad total del gas total de la columna se obtiene mediante la integración del área registrada en el papel del registrador después de realizar un análisis completo en una sección transversal de la pluma.

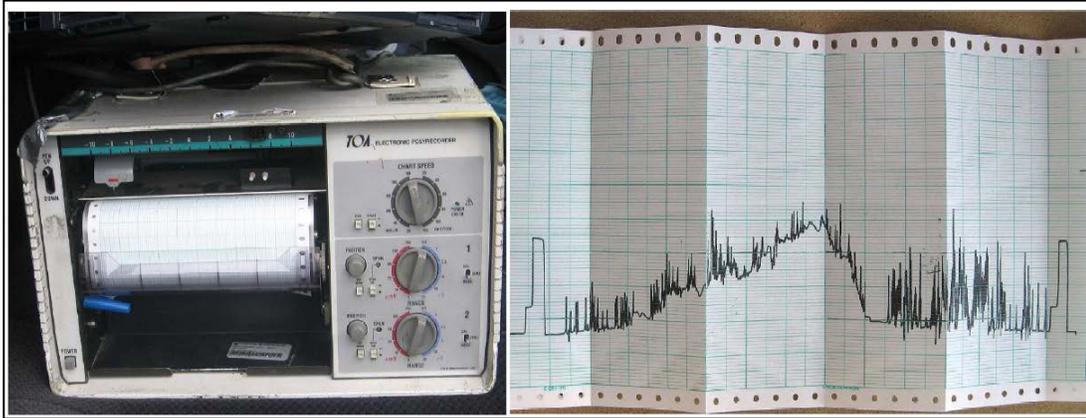
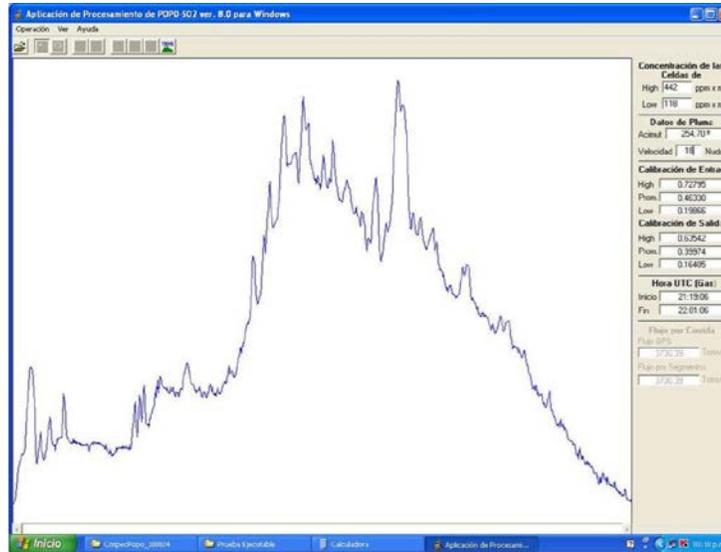


Figura. 4.3. Figura del registrador analógico (izquierda), hoja de papel con el perfil de la columna de  $SO_2$  (derecha).

- b) otro método de análisis para calcular la columna total de dióxido de azufre es por medio el software Popo so2 (Figura 4.4.), desarrollado por José Manuel Álvarez Nieves del Instituto de Geofísica. Este programa facilita el procesado de los datos obtenidos por el COSPEC V, ya que permite realizar un filtrado muy detallado de las obstrucciones encontradas durante la medición, permite obtener también un sistema de posicionamiento global con coordenadas geográficas, y como fue diseñado especialmente para el volcán Popocatepetl el software proporciona otros datos como es la distancia al cráter, el ángulo de posición con respecto al cráter, este programa reduce el tiempo de procesado de los datos obtenidos en un 50 %.



**Figura. 4.4.** Pantalla del programa Popo SO2 obteniendo el flujo total de una travesía con datos filtrados.

Para las dos formas de procesar los datos es necesario obtener la velocidad y dirección de viento que para el caso de la zona del Popocatépetl es obtiene de la siguiente manera:

Una de las más grandes fuentes de error para la técnica COSPEC es la determinación de la velocidad del viento y la altura de la pluma. Actualmente para el volcán Popocatépetl estos datos se obtienen por la mañana del día de medición (inicio del recorrido) por el Servicio Nacional del Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y por datos de instrumentos de navegación de aeronaves comerciales que cruzan a la altitud de la pluma el área del Popocatépetl mientras que se realizan los trayectos terrestres y cuyos datos son suministrados a la tripulación por el Centro de Control del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Existe otra forma de apoyo para poder suministrar los datos de velocidad y dirección de viento, la Secretaria de Gobernación instalo una red de cámaras que transmiten en tiempo real, la primera se instalo en el flanco sur del volcán Iztaccihuatl a 10 km del cráter del volcán Popocatépetl, la segunda en el cerro de Tlamacas a 4 km del cráter y la ultima en Tianguismanalco a 18 km del cráter. Cada medición COSPEC se inicia con la observación de estas imágenes para ver el sector del volcán donde se encuentra la nube volcánica.

#### 4.1.4 Limitaciones del COSPEC como sensor remoto pasivo

El COSPEC V, como muchos otros sensores remotos pasivos cuenta con dos desventajas:

- La imposibilidad de su operación durante la noche , y
- la existencia de perturbaciones durante la medida debido a las fluctuaciones espectrales del fondo radiativo que usa el COSPEC V.

El primer problema acorta el rango temporal de utilización del equipo frente al de otros sensores de carácter activo.

El segundo problema si presenta un obstáculo, ya que en esos cambios de irradiación solar puede producir un conjunto de anomalías importantes en la señal de salida del COSPEC, las causas por las que varia la radiación disponible pueden ser varias:

- a) por cambios en la propia emisión del Sol.
- b) por variaciones periódicas del fondo radiativo natural debidas a cambios en el ángulo de elevación solar (Millán yOff, 1997b, 1978).
- c) por cambios súbitos en la intensidad o composición del espectro de fondo radiativo utilizando (nubes, limites de penachos, etc.), cuya ocurrencia es inevitable e imprevisible (Millán, 1980).

## 4.2 Técnica móvil-DOAS utilizada en el volcán Popocatépetl

Durante los últimos treinta años la mayoría de las mediciones de flujo de gases volcánicos se han obtenido por medio de espectroscopia de correlación (COSPEC) (Millán, 1980). Este dispositivo mide la luz absorbida por el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) que se encuentra dispersa en la atmosfera, con un procedimiento de correlación interno. El COSPEC ha prestado un servicio excelente a muchos observatorios vulcanológicos alrededor del mundo y grupos de científicos que investigan la desgasificación de volcanes, lo que resulta en la acumulación de invaluables series de tiempo de desgasificación volcánicas (p.ej., Caltabiano *et al.*, 1994; Sutton *et al.*, 2001), y bases de datos de mundiales de desgasificación (p.ej., Andrés y Kasgnoc, 1998). Sin embargo, debido a su tecnología anticuada y el cese de su fabricación, se está convirtiendo cada vez más difícil mantenerlo en funcionamiento en las mediciones de campo. Existen otros métodos que se están utilizando con mucho éxito: la técnica lidar de absorción diferencial (DIAL) (p.ej., Weibring *et al.*, 1998), la espectroscopia de la transformada de Fourier en el Infrarrojo (FTIR, p.ej., Oppenheimer *et al.*, 1998), la espectroscopia diodo laser (p.ej., Chifa *et al.*, 1994) y la espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS, p.ej., Platt, U, 1994).

Para este estudio de tesis solo nos ocuparemos en el sistema denominado móvil-DOAS, el cual ya ha sido adaptado por muchos investigadores para las mediciones de flujo volcánico (p.ej., McGonigle *et al.*, 2002, McGonigle *et al.*, 2003, Edmonds *et al.*, 2003, Galle *et al.*, 2002, McGonigle *et al.*, 2004, Oppenheimer *et al.*, 2002 y Horton *et al.*, 2006). En comparación con el COSPEC, este dispositivo portátil es considerablemente más pequeño, más ligero y más barato y tiene un menor consumo de energía.

En el contexto del proyecto de la Unión Europea “Development of Optical Remote Sensing Instrument for Volcanological Applications” (DORSIVA), se desarrollo, el novedoso sensor remoto óptico mini-DOAS (Galle *et al.*, 2002), que ha sido instalado en una Red Mundial para la Observación de los Cambios Volcánicos y Atmosféricos (<http://www.novac-project.eu/>) “Network for Observa-

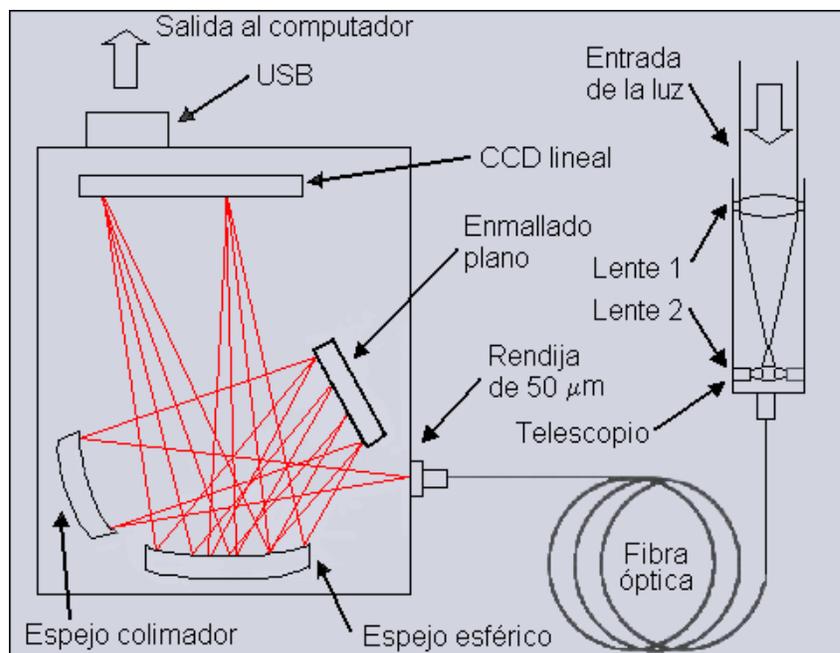
tion of Volcanic and Atmospheric Change" (NOVAC), proyecto que se realiza dentro del Sexto Programa Marco de la Comisión Europea (2005-2009).

Las mediciones con el instrumentomóvil-DOAS se realizaron de manera móvil y rutinaria junto con el COSPEC durante los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2010, con la finalidad de complementar este trabajo. Estas mediciones se hicieron con el propósito de observar las diferencias en el flujo de  $SO_2$  del volcán Popocatepetl, junto con la red de mini-DOAS estacionarias que se encuentran en el perímetro del volcán en estudio, para así sacar las diferencias entre los 3 métodos utilizados.

#### **4.2.1 Instrumentación y metodología**

El equipo utilizado para realizar las mediciones fue un sistema DOAS desarrollado por la Universidad de Chalmers en Suecia (Galle et al., 2002). El DOAS es un instrumento basado en un método pasivo que utiliza un mini-espectrógrafo para obtener información del perfil vertical del  $SO_2$  presente en la troposfera, mediante el análisis del espectro de la luz solar dispersada. El instrumento puede ser utilizado desde una plataforma fija, realizando escaneos de horizonte a horizonte, configurándose así un sistema escan-DOAS, también puede utilizarse desde un vehículo o también puede hacer mediciones a pie; para este estudio las mediciones se realizan por medio de un vehículo, propiedad de CENAPRED.

El sistemamóvil-DOAS está compuesto por un espectrómetro (Ocean Optics USB2000) configurado especialmente para determinar el espectro de absorción del  $SO_2$ , proveniente de la radiación solar dispersa, este espectrógrafo es pequeño (89.1 mm x 63.3 mm x 34.4 mm) y liviano (190 g), está dotado por un detector Sony ILX511, cuyo rango de detección está entre 200 y 1100 nm. Como elemento dispersor tiene una rejilla plana de 2400 líneas/mm, con alta eficiencia de detección para el rango UV entre 200 y 400nm, que combinada con una rendija de 50  $\mu$ m, permite una resolución espectral aproximadamente de 0.6 nm para el intervalo de longitudes de onda entre 245 y 380 nm.



**Figura 4.5. Esquema del sistema óptico de un mini-DOAS mostrando la configuración general que consta del espectrómetro, fibra óptica y telescopio. Tomado de Galle *et al.*, (2002).**

El telescopio tiene una apertura de 2 cm y una longitud focal de 12 cm y se conforma de un lente de cuarzo y un filtro que corta la radiación por arriba de los 400 nm. El telescopio capta la luz ultravioleta que es dispersada por los aerosoles y moléculas presentes en la atmosfera y las transfiere al espectrómetro por medio de una fibra óptica de cuarzo de 2 m de largo y 800  $\mu\text{m}$  de diámetro. Después de medir el espectro de absorción, el espectrómetro transfiere la señal a la computadora, la cual controla el funcionamiento del espectrómetro, captura y almacena los espectros de absorción, hace el procesamiento de la información del espectro del  $\text{SO}_2$  en la ventana de  $290 \leq \lambda \leq 320 \text{ nm}$  y determina el flujo total de emisión de la fuente medida; este espectrómetro no requiere de conexión a una fuente de poder, pues es alimentado directamente desde la computadora a través del puerto USB. Además del sistema óptico, el sistema DOAS cuenta con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que en este estudio viene incluido en la computadora y que es leído simultáneamente por el programa general que maneja todos los datos de medición.

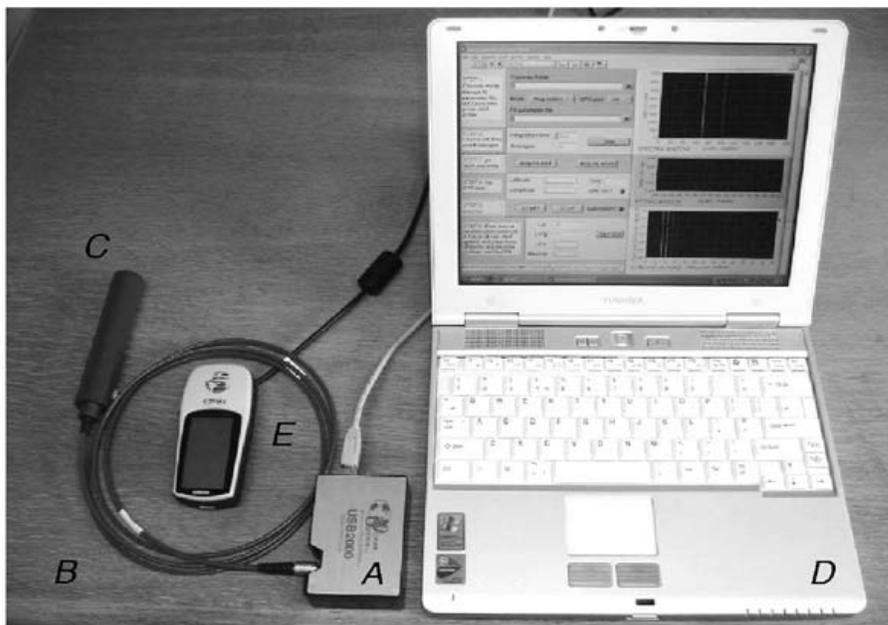


Figura 4.6. Fotografía de la configuración del equipo DOAS descrito en el texto, (A) espectrógrafo, (B) fibra óptica, (C) telescopio, (D) computadora portátil, (E) GPS de mano. Tomado de McGonigle, (2007).

El software utilizado se desarrollo por personal de la Universidad de Chalmers en Suecia, es la versión 5.0 móvil-Doas, desarrollado en octubre del 2009.

### Comparación con el COSPEC

El sistemamóvil-DOAS se diseño como un eventual reemplazo del COSPEC por lo que su comparación es necesaria la cual ya ha sido reportada en varios trabajos, como lo muestra la bibliografía de este trabajo.

Tabla 4.1 Comparación de DOAS, móvil-DOAS, COSPEC V.

<i>Características</i>	móvil-DOAS	DOAS	COSPEC V
masa (kg)	0.4 (excluyendo laptop)	10 (excluyendobatería)	19.3 (excluyen- do caja portá-

			tily batería)
<b>Potencia consumida (W)</b>	1 (del puerto USB del computador)	7 (de la batería de 12 V DC)	8 ( de la batería de 12.5 V DC)
<b>Rango espectral de trabajo (nm)</b>	280-433 (304-314 nm usado para ajuste con espectro sintético de SO <sub>2</sub> de concentración conocida)	280-422 (304-314 nm usado para ajuste con espectro sintético de SO <sub>2</sub> de concentración conocida)	300-315
<b>Resolución (nm)</b>	0.6	0.6	0.2
<b>Dimensiones (mm)</b>	89 x 64 x 34 (solo el espectrómetro)	600 x 400 x 250 (incluyendo caseta metálica)	787 x 375 x 203 (solo el espectrómetro )
<b>Campo visual típico (mrad)</b>	20	20	10 x 30

#### 4.2.2 Sistema móvil-DOAS desde un vehículo

La descripción de las mediciones realizadas con el sistema móvil-DOAS y su metodología se presentan a continuación.

Para el caso del Popocatepetl el uso del sistema DOAS móvil es muy reciente se empezó a usar a partir del año 2009. Para este estudio sólo se incluirán mediciones de 3 meses (2 mediciones por mes). El telescopio del DOAS se fija en el telescopio del COSPEC ya que las mediciones se hicieron de manera simultánea en la misma camioneta.

Antes de iniciar la medición, el sistema captura el espectro de absorción de SO<sub>2</sub> en el sitio de referencia, de preferencia donde la concentración de SO<sub>2</sub> que se encuentra en la troposfera es nula, también se toma el espectro en condiciones de obscuridad.

Una vez que se han tomado estos dos espectros de referencia se comienza a realizar los transectos de tal manera que se corte de manera completa la pluma volcánica y de manera transversal.

Para hacer esto es necesario empezar y terminar en sitios donde la concentración de  $SO_2$  sea la más baja de todos el transectos hechos.

Las rutas que se utilizan para hacer los recorridos son las mismas que se utilizan para el COSPEC, la forma de obtener los datos de velocidad y dirección del vientos también son los mismos.

Durante la medición el sistema realiza en promedio en la ventana espectral de 280 a 320 nm en periodos de 5 segundos y los almacena para su posterior análisis, así como los espectros de referencia y el de condiciones de obscuridad.

Al terminar cada transepto se puede estimar un cálculo del flujo con datos *insitu*, es decir únicamente introducimos la velocidad y dirección del viento sin quitar obstrucciones que nos dan un disparo positivo o negativo en el perfil de la pluma, y el programa calcula el flujo de  $SO_2$  en toneladas por día.

De lo contrario el post-proceso del cálculo exacto de  $SO_2$  se puede realizar con más calma en la oficina obteniendo los datos de viento de una forma más exacta de alguna estación meteorología o vía web.



**Figura 4.7.** Se presenta la disposición de un DOAS para realizar mediciones móviles desde un vehículo. En este caso se utiliza un vehículo propiedad de CENAPRED. El telescopio del DOAS va sujeto al telescopio del COSPEC ambos colocados verticalmente orientados al zenit.

### **4.2.3 Procesamiento de datos**

El procesamiento de datos de la técnica móvil-DOAS se realiza en el Instituto de Geofísica, para su realización se utiliza el software MóvilDOAS versión 5.0 desarrollado por personal de la Universidad de Chalmers a finales del año 2009.

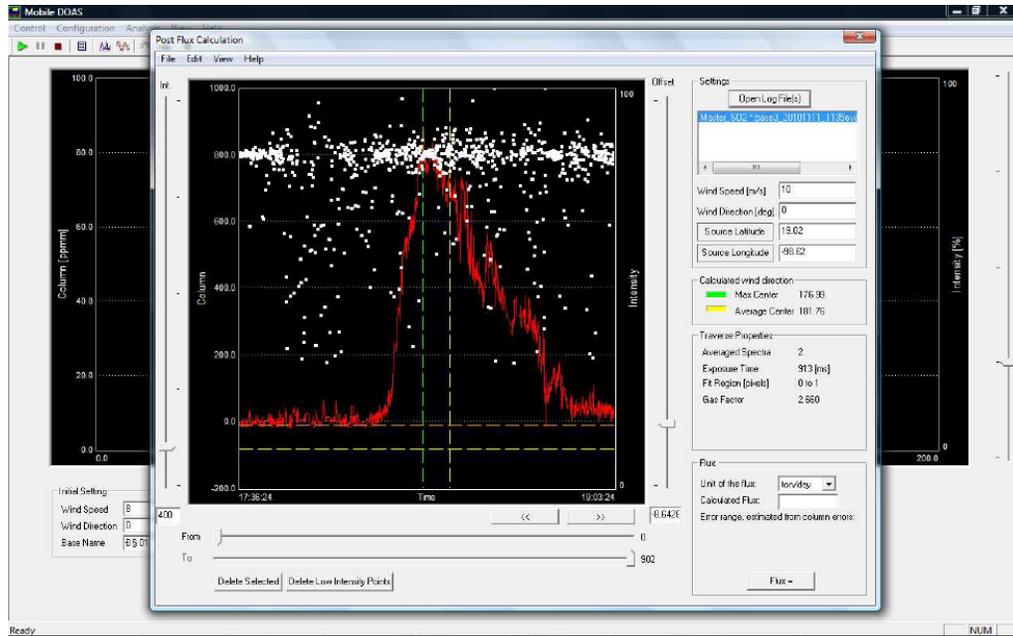


Figura 4.8. Esquema del software MóvilDOAS versión 5.0

El programa genera una carpeta al iniciar una travesía con la fecha(día, mes, año) del día de la travesía. Dentro de esta carpeta se generan subcarpetas de cada una de las travesías realizadas en ese día con la hora (UTM) del inicio de la travesía. En esta carpeta guarda automáticamente dos tipos de archivo (.STD y .txt), los archivos .STD se discriminan durante el procesado de los datos y solo nos concentramos en los archivos .txt que son los archivos con la información del  $SO_2$ . El programa genera un Bloc de notas con la siguiente información:

- #Time (tiempo UTM)
- Lat(latitud)
- Alt (altitud)
- NSpec (N. de espectro)
- ExpTime (tiempo de exposicion)
- Intens (Master)
- Master\_Column\_SO2
- Master\_ColumnError\_SO2
- Master\_Column\_O3
- Master\_ColumnError\_O3
- Master\_Column\_RING
- Mater\_ColumnError\_RING
- STD-File (Master).

En este bloc de notas las columnas más importantes son el tiempo, la latitud y la columna de Master\_Column\_SO2 que son los valores medidos de  $SO_2$  durante el transecto; al evaluar estos datos se recalculan las medidas obtenidas de  $SO_2$  para obtener un flujo total.

El procesamiento consiste en:

- Editar los datos quitando las obstrucciones (árboles, puentes, etc.) que en la gráfica de  $SO_2$  se muestran como disparos (positivos y negativos); anulando también las intensidades radiativas bajas.
- Ajuste de la línea base la cual en ocasiones muestra una deriva al iniciar o terminar la travesía en los bordes de la pluma volcánica.
- introducir los datos de velocidad y dirección de viento para obtener el flujo total de  $SO_2$  (para esta técnica los datos de dirección y velocidad de viento se obtienen de la misma manera que en la técnica COSPEC, sección 4.1.3).

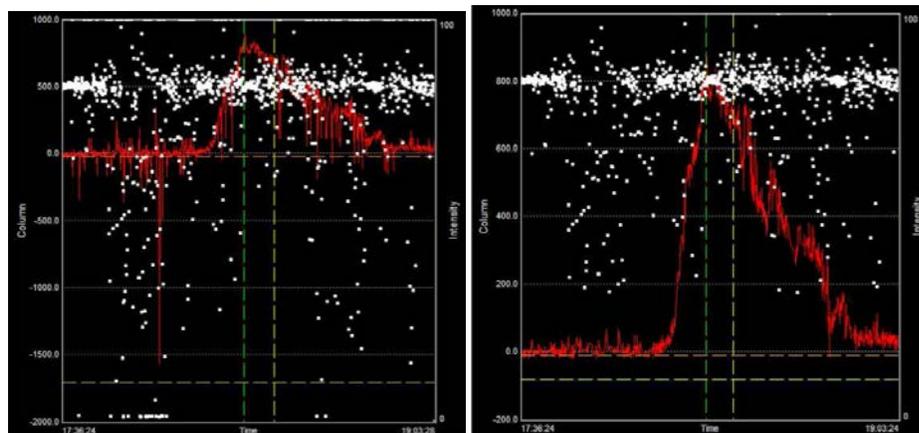


Figura 4.9. Representación de dos perfiles de  $SO_2$  antes (izquierda) de filtrar y después (derecha) de haber editado los datos.

### 4.3 Red de DOAS NOVAC en el volcán Popocatépetl

Hacer mediciones móviles con DOAS tiene sus desventajas ya que solo podemos hacer en promedio y en condiciones ideales, un máximo de 5 travesías por día, esto es debido a la logística de muestreo y a los costos que implica realizar dichas mediciones (vehículo o avión). Sin embargo el número de mediciones móviles que se pueden hacer por día es insuficiente para obtener datos de flujo de dióxido de azufre que se puedan correlacionar con otros datos geofísicos, por ejemplo con datos de actividad sísmica o deformación que son obtenidos con altas tasas de muestreo. También, puede ocurrir que en los días en que no sea posible hacer mediciones móviles ocurra algún fenómeno volcánico como exhalaciones menores o erupciones de baja magnitud. Ante este problema de no tener un monitoreo constante del volcán Popocatépetl se implemento una red de DOAS bajo el proyecto NOVAC que es una Red para la Observación de Cambios Volcánicos y Atmosféricos (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change), esta red de mini-DOAS se encuentra de manera fija (Edmonds *et al.*, 2003; McGonigle *et al.*, 2003)(Figura 4.10.) en puntos estratégicos alrededor del volcán en estudio.

El proyecto NOVAC a través de espectroscopia de absorción de luz ultravioleta (UV), es capaz de cuantificar las emisiones de gases volcánicos, utilizando el espectrómetro de absorción óptica diferencial en miniatura de haz de barrido (DOAS). Este proyecto se ha instalado en muchos volcanes alrededor del mundo pudiendo tener datos en tiempo real.

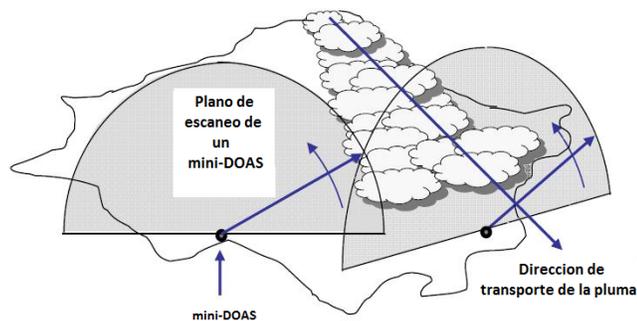
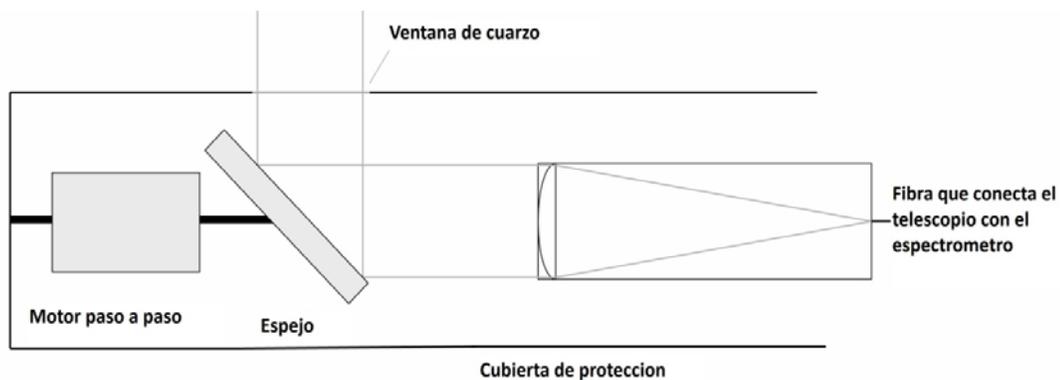


Figura. 4.10. Configuración de dos DOAS

### 4.3.1 Instrumentación y metodología

El instrumento de barrido DOAS es una variación del instrumento móvil DOAS y está diseñado para hacer mediciones de flujo de manera automática desde un punto fijo. El telescopio se coloca de forma horizontal y dirigido con la entrada óptica de luz hacia el cenit, el cual puede girar por medio de un motor paso a paso (Figura 4.11). En la primera versión del instrumento de barrido mini-DOAS, el espejo tiene un ángulo de  $45^\circ$  en relación con el eje óptico del telescopio y por la rotación la visión del espejo en el instrumento puede establecer en cualquier dirección un plano perpendicular al eje óptico del telescopio (Figura 4.11).



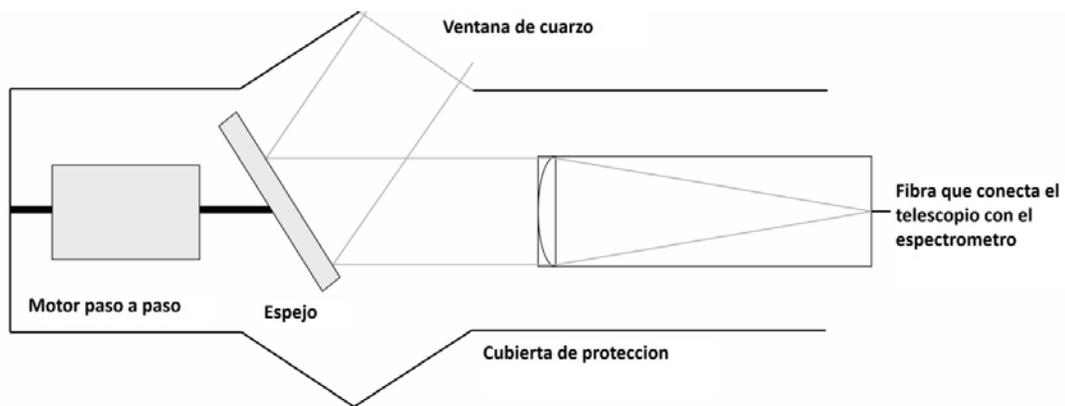
**Figura. 4.11. Instrumento de barrido plano. Hace mediciones utilizando un motor paso a paso, estableciendo puntos de vistas a cualquier dirección deseada a un plano vertical (Tomado de Johansson, 2009).**

Para proporcionar protección de la lluvia y el polvo la unidad de barrido está rodeada por una cubierta de plástico negra que gira con el motor. La cubierta viene con una ventana de cuarzo en la misma dirección de visión. La cubierta también actúa como pantalla de luz y permite realizar espectros oscuros girando el espejo a la posición del nadir.

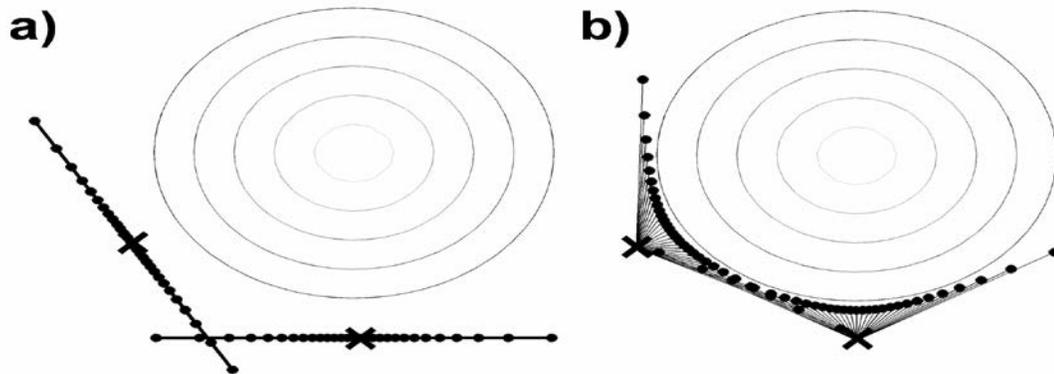
Como una mejora del instrumento de barrido DOAS se elaboró el instrumento de barrido cónico DOAS (Galle *et al.*, 2010). La diferencia entre el instrumento plano y el instrumento cónico de barrido es el ángulo del espejo. En el DOAS de forma cónica el espejo está inclinado a un mayor ángulo de  $60^\circ$  o  $75^\circ$  con respecto al eje óptico del telescopio (Figura 4.12) y la cubierta protectora

del instrumento está diseñada para que la ventana de cuarzo esté a 90° en dirección de la vista para minimizar los reflejos, y para minimizar el esfuerzo de torsión en el motor.

La construcción del instrumento cónico hace que la dirección de vista se restrinja a un cono. Cuando se realizan las mediciones de emisión de gases y es colocado el instrumento de barrido cónico, la fuente debe quedar dentro de este campo visual. La ventaja de este instrumento es que cuando se mide una pluma de gas existe un mayor rango de vista en comparación con el instrumento de barrido plano DOAS. Esto significa que en el instrumento cónico instalado de manera fija la pluma será visible en un mayor rango de tiempo. Como se puede observar en la Figura 4.13, en donde muestra dos instrumentos de barrido planos (Figura 4.13 a) y dos cónicos (Figura 4.13b) de barrido midiendo a un volcán (idealizado por curvas de nivel concéntricas). En esta figura que aparecen los dos puntos de intervención (en ambas figuras) entre las direcciones de visión y un plano imaginario de la altura de pluma cubre de forma mejor a la fuente de emisión en la Figura 4.13 b en comparación con la Figura 4.13 a.



**Figura 4.12 Instrumento de barrido cónico. Hace mediciones girando el espejo con un motor paso a paso, estableciendo puntos de vista en cualquier dirección deseada en un cono (Tomado de Johansson, 2009)**



**Figura 4.13.** La ubicación de los puntos de intersección entre la dirección de vista del instrumento de barrido y el plano de la altura de pluma usando dos instrumentos planos (a) o dos cónicos (b) de barrido DOAS vistos en planta. Volcán idealizado por curvas de nivel y la posición de cada uno de los instrumentos se muestra por una X. (Tomado de Johansson, 2009)

Otra ventaja del instrumento cónico sobre el instrumento plano es que la distancia entre el instrumento y el punto de intersección entre la vista del instrumento y la pluma se considera menor.

Un sistema de barrido (cónico o plano) de gases volcánicos DOAS, además de los componentes para la alimentación del sistema (batería y celda solar) y para la transmisión de datos, posee los siguientes componentes: un motor para giros de 360° el eje principal de un prisma que dirige la luz de entrada; un prisma de 45° (o 65°, según sea plano o cónico) para la reflexión de la luz de entrada hacia el telescopio; un telescopio que colecta la luz ultravioleta dispersada por los aerosoles y las moléculas presentes en la atmósfera; una fibra óptica de 200  $\mu\text{m}$  para transportar la luz desde el telescopio hacia el espectrómetro; un espectrómetro USB2000 que detecta la luz ultravioleta y la convierte en señales digitales; una computadora portátil para almacenar los espectros la cual contiene un algoritmo que calcula el total de emisión de  $\text{SO}_2$ , toneladas diarias o en gramos por segundo, administra las comunicaciones; un GPS para definir la localización y medir la hora universal; un timer que se encarga de apagar automáticamente el sistema durante la noche y encenderlo al día siguiente, realizándose así la adquisición de datos, procesamiento y envío de datos sólo durante el día; los datos son enviados por medio de un transreceptor Freewave hacia el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) donde se encuentran los encargados de recibir los datos provenientes del volcán Popocatepetl para su análisis.

Las mediciones de flujo con el instrumento de medición de barrido DOAS realizado para esta tesis han sido realizando la siguiente rutina que se repite en cada ciclo.

1. el espejo de cuarzo se gira a la posición cenital y se toman un par de espectros para determinar un tiempo de exposición adecuado. Este tiempo de exposición se utilizara para todos los espectros tomados durante el día.
2. un espectro de referencia es dado por medio de la computadora.
3. el espejo se gira en la dirección del nadir y toma un espectro oscuro
4. el análisis de la búsqueda de la pluma se realiza mediante giros de  $3.6^\circ$  (cada dos pasos en el motor de paso).

#### **4.3.2 Estaciones que componen la red de DOAS en el volcán Popocatepetl**

Las estaciones que componen la red de monitoreo del Popocatepetl se encuentran distribuidas alrededor del volcán, se hizo la siguiente distribución con el propósito de medir los flujos de dióxido de azufre lo mejor posible, es decir, que durante todo el año este monitoreado el volcán ya que de acuerdo a la estación del año la dirección del viento llevara la pluma volcánica a diferentes ángulos alrededor del volcán como se vio anteriormente. La Figura 4.14. muestra un mapa del volcán Popocatepetl señalando con un circulo las tres estaciones mini-DOAS: Tlamacas (PPM), Colibrí (PPC) y Chipiquixtle (PPX).



### 4.3.3 Procesamiento de datos

#### *Ordenamiento de datos*

Al momento de transferir los datos, el programa los organiza de acuerdo a la fecha en que fueron generados. En el mismo directorio donde se ejecuta el programa se genera un subdirectorio "Output". Dentro de este se encuentran a su vez 3 subdirectorios de los cuales hay una directorio por cada equipo (nombrada por el número de serie del espectrómetro), que a su vez contiene un directorio con los escaneos del día (archivos .pak que contienen información de los espectros de luz, y archivos .txt que contiene información de  $SO_2$ ), y los archivos de texto Evaluation Log Error y Flux Log.

Se crea un directorio por fecha, la cual va a contener un directorio por instrumento donde estarán únicamente los archivos .txt de los escaneos nombrado "Scan", y el archivo EvaluationLog que se creara adicionalmente y el cual se utilizara para la reevaluación del flujo.



Con el programa `FileMerger_2007_09_09.exe` se crea el archivo EvaluationLog con los archivos .txt; este programa adjunta los archivos en un solo archivo de texto también.

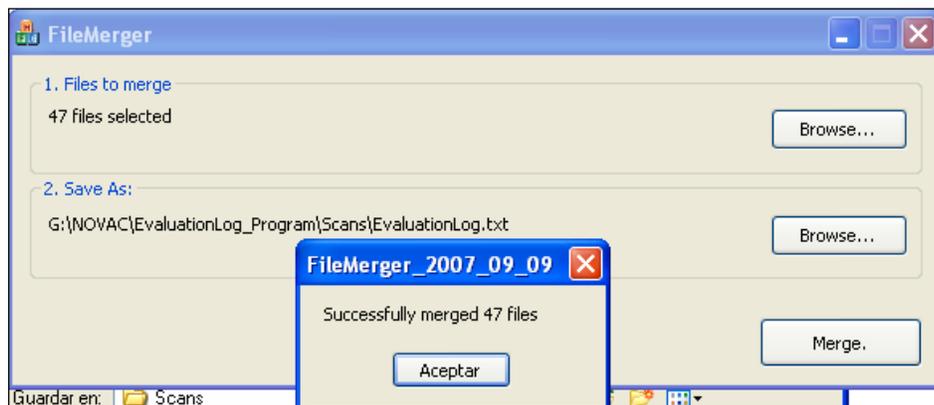


Figura 4.15 Programa FileMerger.

### Evaluación de los datos



Para la evaluación de los datos se utiliza el programa NOVAC PROGRAM en este programa se evaluarán los datos por cada instrumento DOAS. Para comenzar se debe seleccionar la opción “Análisis + Flujo” y se desplegará la nueva pantalla en donde se realizará la evaluación del flujo, “Post-Calculate Flux” (Figura 4.16).

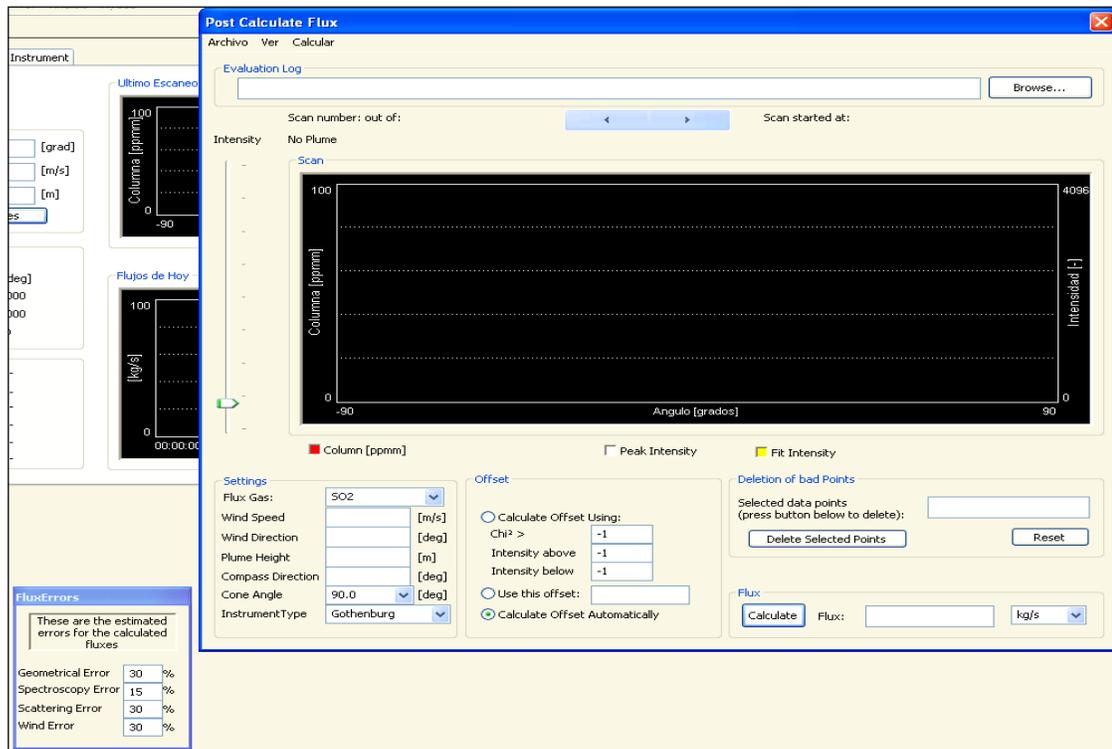


Figura. 4.16 Ventana Post-Calculate Flux.

Posteriormente se selecciona el archivo “EvaluationLog.txt” con los datos a evaluar de cada instrumento y del día.

Para complementar la información de dirección y velocidad de viento se crea previamente un archivo .txt a partir de los valores disponibles de la NOAA para cada día a determinada altura y para cuatro horas del día.

Una vez que se tiene este archivo se carga la información al programa con la opción "Archivo+Import Wind.Field".

Se realiza la evaluación seleccionando únicamente cuando el instrumento esta "viendo" a la nube volcánica, si se realiza la evaluación cuando el instrumento no está "viendo" a la nube nos dará un flujo de  $SO_2$  de cero.

Se obtiene un archivo .txt con los resultados de la evaluación "PostFluxLog.txt" y del cual se trabajara para crear una tabla o base de datos y las correspondientes graficas de flujo.

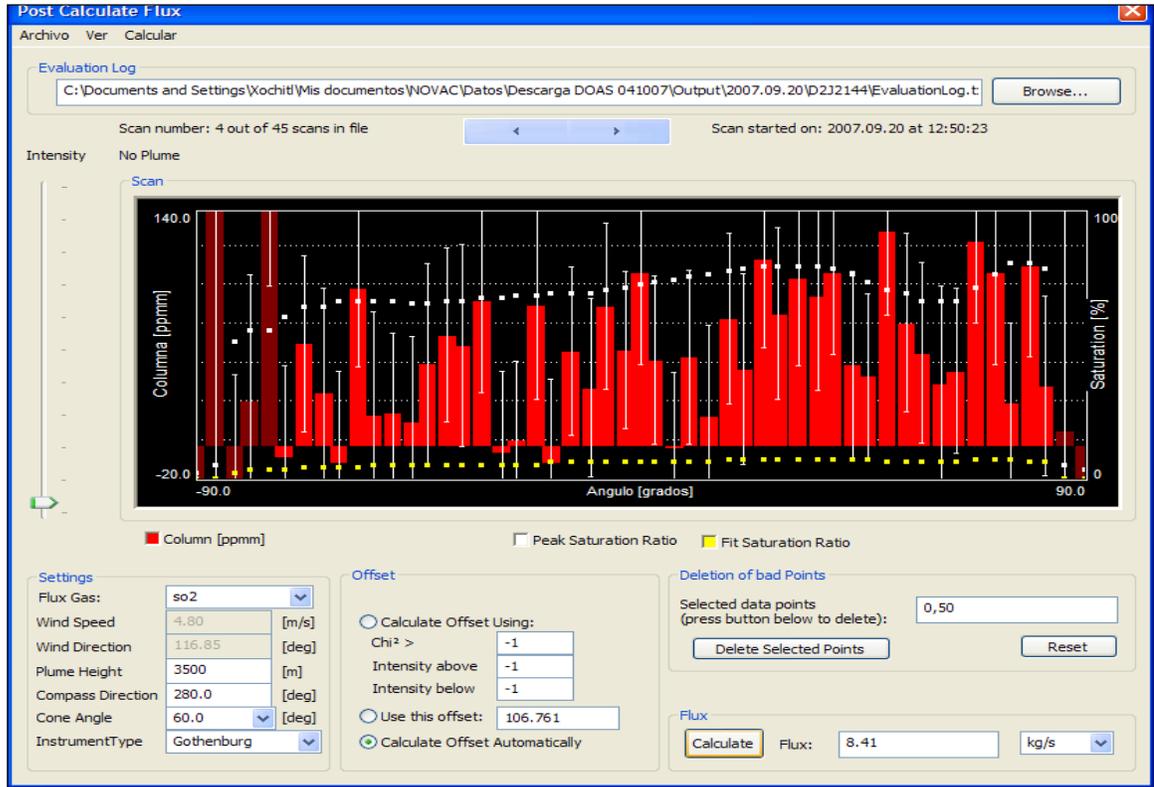


Figura4.17 Ventana de evaluación y datos adicionales.

PostFluxLog\_D2J2144 - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```

FluxLogFile generated by NovacProgram version 1.10, build oct 3 2007
scandate scanstarttime scanstoptime flux_[kg/s] flux_[ton/day] windspeed_[m/s] winddirection_[deg] compassdirection_[deg] coneang
[deg] plumeheight_[m] offset plumecentre_[deg] plume completeness_[ ] geom_error spectr_error scattering_error wind_error
2007.09.20 12:05:57 12:09:20 0.00 0.00 10.00 0.00 280.00 60.00 3500.00 0.00 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 12:05:57 12:09:20 0.00 0.00 10.00 0.00 280.00 60.00 3500.00 0.00 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 12:50:23 13:06:00 6.47 558.85 10.00 0.00 280.00 60.00 3500.00 106.76 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 14:16:59 14:24:52 3.40 294.15 5.13 115.85 280.00 60.00 3500.00 -21.95 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 12:50:23 13:06:00 8.41 726.93 4.80 116.85 280.00 60.00 3500.00 106.76 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 13:09:13 13:22:50 7.25 626.52 4.87 116.62 280.00 60.00 3500.00 -56.08 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 13:41:05 13:51:22 4.53 391.24 4.99 116.25 280.00 60.00 3500.00 -27.16 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 13:54:23 14:03:38 3.85 332.29 5.04 116.10 280.00 60.00 3500.00 -12.94 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 14:06:34 14:14:02 3.71 320.39 5.09 115.96 280.00 60.00 3500.00 -10.55 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 14:16:59 14:24:52 3.40 294.15 5.13 115.85 280.00 60.00 3500.00 -21.95 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 14:27:49 14:35:17 2.86 247.19 5.17 115.73 280.00 60.00 3500.00 -18.66 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 15:31:46 15:37:32 2.66 229.56 5.24 116.27 280.00 60.00 3500.00 -11.68 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 16:06:31 16:13:08 2.56 221.41 5.18 117.25 280.00 60.00 3500.00 -6.89 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 16:15:58 16:21:19 2.08 179.38 5.17 117.52 280.00 60.00 3500.00 -7.84 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 16:33:19 16:39:26 2.33 200.89 5.14 118.02 280.00 60.00 3500.00 -6.93 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 17:12:46 17:17:33 3.55 306.89 5.07 119.17 280.00 60.00 3500.00 -13.17 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 17:20:26 17:26:33 1.54 132.72 5.06 119.40 280.00 60.00 3500.00 -8.31 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 17:29:29 17:37:02 1.44 124.12 5.05 119.67 280.00 60.00 3500.00 -9.21 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 18:04:49 18:09:08 2.15 185.93 4.95 120.81 280.00 60.00 3500.00 -0.04 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 18:11:56 18:15:51 3.88 335.22 4.88 121.13 280.00 60.00 3500.00 -9.22 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 18:25:55 18:31:03 2.08 179.67 4.73 121.80 280.00 60.00 3500.00 -2.39 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 18:48:53 18:54:42 1.62 139.64 4.49 122.98 280.00 60.00 3500.00 1.43 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 18:57:30 19:01:34 2.65 229.35 4.41 123.45 280.00 60.00 3500.00 -1.63 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 19:22:22 19:31:25 0.99 85.83 4.15 124.94 280.00 60.00 3500.00 -1.10 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 19:34:14 19:38:05 1.68 144.86 4.03 125.71 280.00 60.00 3500.00 7.40 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 20:18:44 20:22:35 2.44 211.07 3.59 129.07 280.00 60.00 3500.00 -2.66 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 20:25:29 20:31:36 1.54 133.12 3.53 129.65 280.00 60.00 3500.00 -10.29 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 21:22:51 21:27:44 2.54 219.32 3.22 131.06 280.00 60.00 3500.00 11.94 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 21:30:39 21:37:00 1.44 124.50 3.22 130.40 280.00 60.00 3500.00 9.10 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 22:14:14 22:19:34 1.83 158.08 3.26 126.78 280.00 60.00 3500.00 -18.11 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 22:30:30 22:35:58 1.94 167.20 3.28 125.45 280.00 60.00 3500.00 1.76 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0
2007.09.20 22:38:54 22:45:38 2.65 229.17 3.29 124.77 280.00 60.00 3500.00 -3.48 -999.0 -999.0 100.0 15.0 30.0

```

Figura 4.18 Archivo .txt con los resultados del postflux que serán utilizados para crear una base de datos.

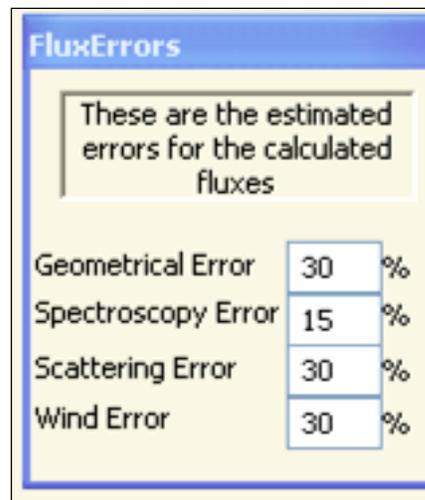
Finalmente los archivos de texto son introducidos en el programa FLUJO (Aparicio Juárez, 2010) para automatizar el análisis uniendo los datos provenientes de las cuatro estaciones obtenidos del software NovacProgram ordenándolos por tiempo y diferenciarlos por cada estación.

### ***Estimación de errores***

El programa MóvilDOAS de manera automática calcula los errores que se pueden generar durante una medición (Figura 4.19)

Existen cuatro tipos de errores, los valores de cada uno puede tomar:

1. Error de Espectroscopia 10 %
2. Error de viento 30 %
3. Error de dispersión
4. Error Geométrico (depende de la altura y centro de masa de la pluma).



The image shows a software dialog box titled "FluxErrors". Inside the dialog, there is a text box that says "These are the estimated errors for the calculated fluxes". Below this text, there is a table with four rows, each representing a different type of error and its estimated percentage value.

Error Type	Estimated Error (%)
Geometrical Error	30 %
Spectroscopy Error	15 %
Scattering Error	30 %
Wind Error	30 %

**Figura 4.19** Estimación de errores.

# **CAPITULO 5 Resultados**

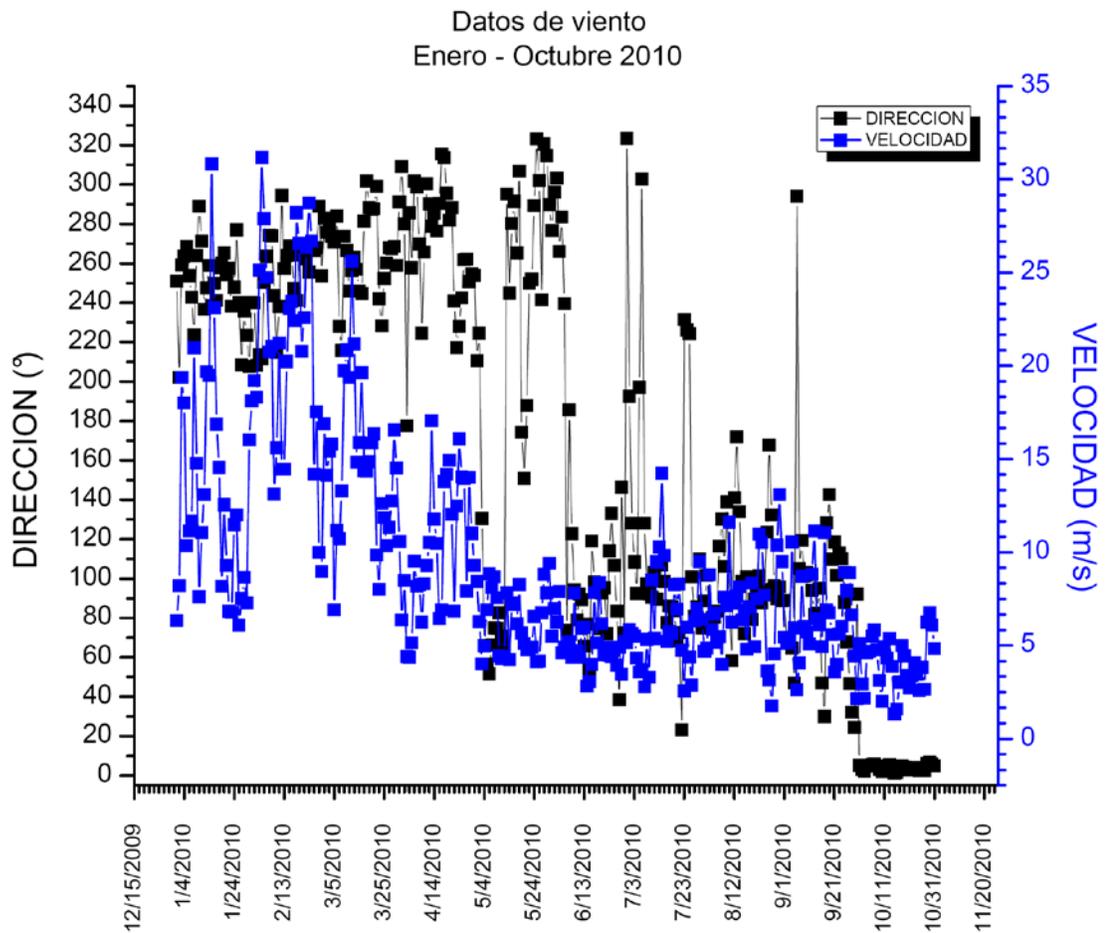
## 5.1 Campaña de Medición 2010 en el volcán Popocatépetl

Los datos de  $SO_2$  para la elaboración de esta tesis comprende del 1 de Enero al 28 de Octubre de 2010, estos datos para su análisis los dividiremos en dos secciones.

La primera campaña comprende de 1 de Enero al 31 de julio de 2010 y comprende la técnica de COSPEC y la red de DOAS. En esta primera sección sólo se uso para el monitoreo de  $SO_2$  del volcán Popocatépetl las primeras dos técnicas implementadas (COSPEC y red de DOAS), los datos de viento utilizados para el procesamiento de datos fueron obtenidos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) <http://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>.

La segunda campaña de nuestro análisis de datos comprende los meses de Agosto, Septiembre y Octubre del 2010, en estos meses se implemento la tercera técnica de monitoreo de  $SO_2$  en el volcán de estudio, dicha técnica DOAS en su versión móvil se implemento utilizando la técnica COSPEC (sección 4.1.2) la cual había sido ya desarrollada para medir el flujo de  $SO_2$  en el volcán Popocatépetl, en esta sección se analizan los resultados de las tres técnicas para poder contestar a los objetivos principales de esta tesis.

### 5.1.1 Datos de viento enero - octubre 2010



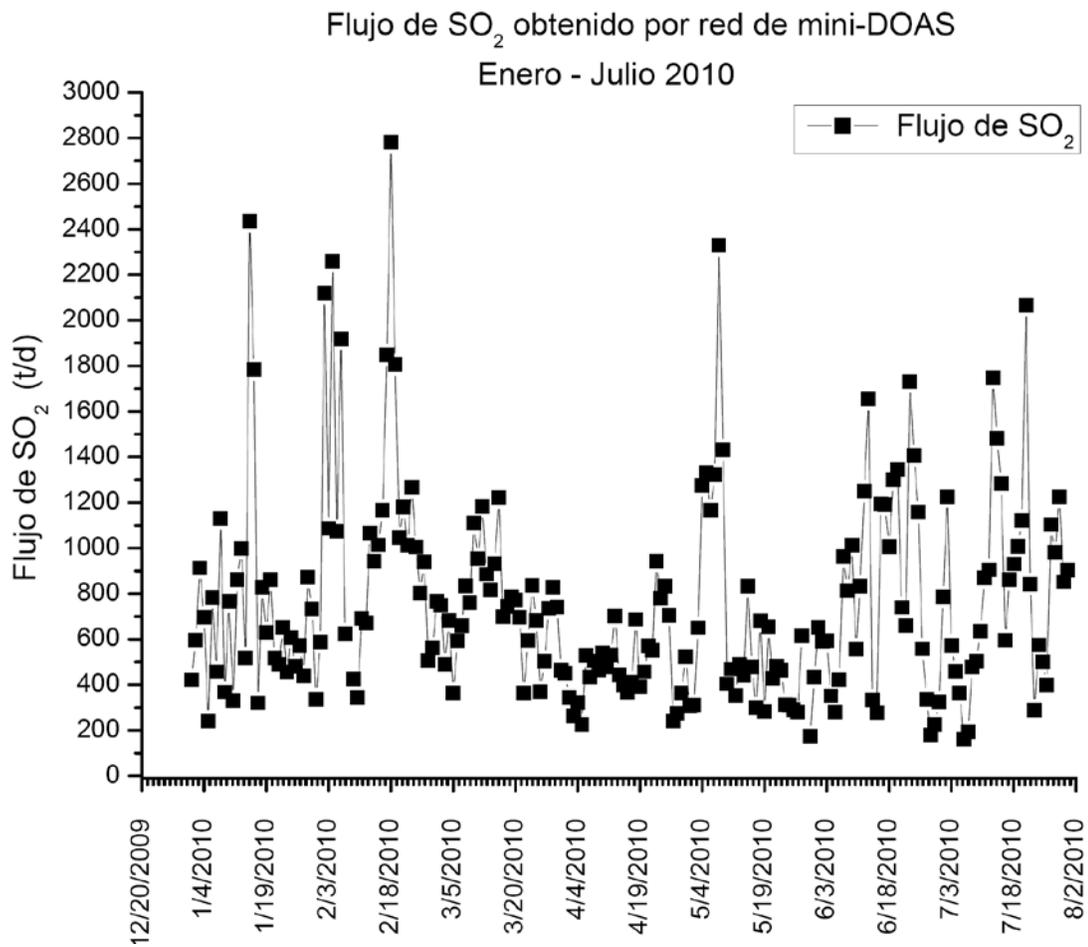
Grafica 5.1 Datos de viento

Durante este periodo de tiempo, para el análisis de los datos obtenidos por el sistema mini-DOAS y para los días en que se hizo la medición COSPEC se utilizaron los datos de dirección y velocidad de viento de la Grafica 5.1.

### 5.1.2 Primera campaña: enero - julio de 2010

- Datos de  $SO_2$  obtenidos por la red DOAS NOVAC del volcán Popocatépetl

Los resultados de  $SO_2$  de la primera campaña que a continuación se presentan son los que se obtuvieron de la red DOAS y es el promedio obtenido por día de las 4 estaciones de la red NOVAC.

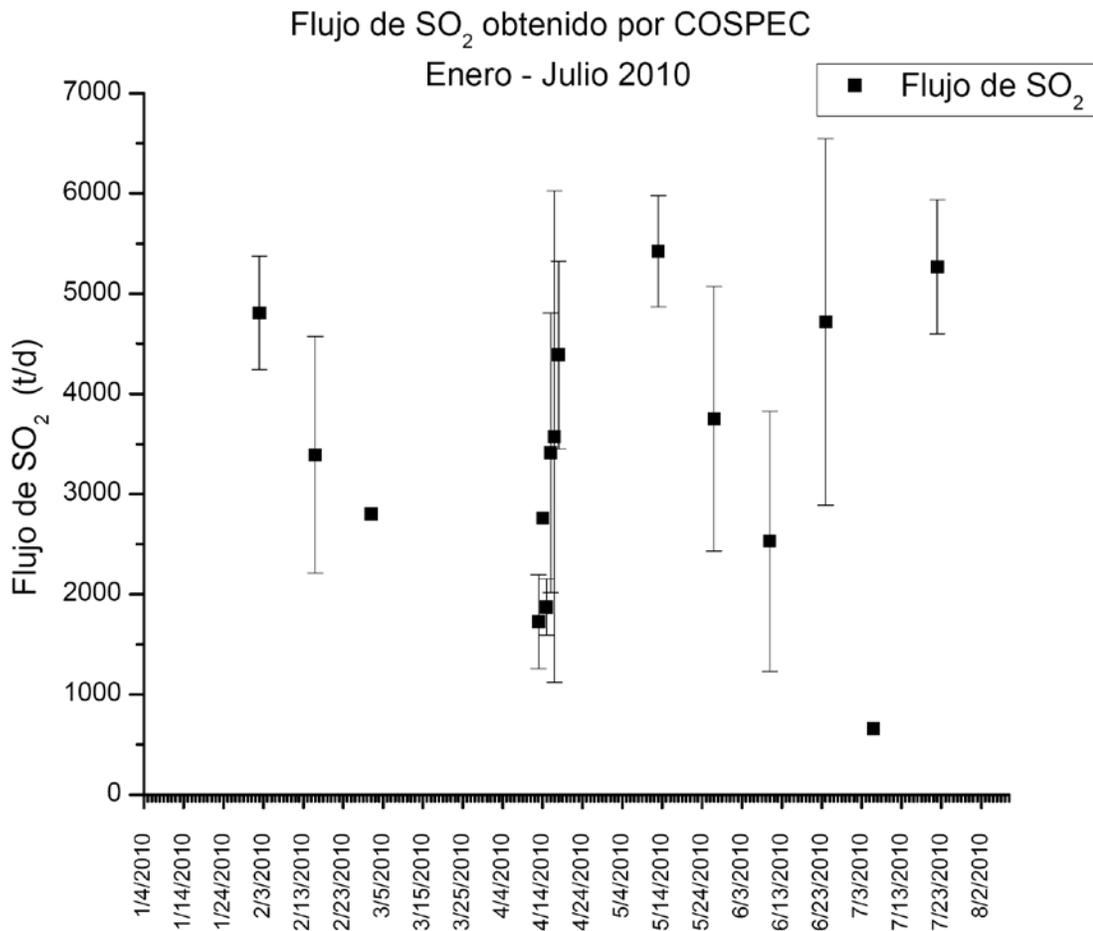


Grafica 5.2 Flujo de dióxido de azufre obtenido por mini-DOAS Enero - Julio 2010

- **Datos de  $SO_2$  obtenidos por medio del COSPEC en el volcán Popocatépetl**

Se presenta de manera graficalos promedios de las travesías que se realizaron por día, a partir del mes de Febrero a Julio de 2010.

Cabe mencionar que en algunos casos solo se pudo obtener una medición por día debido a problemas con el equipo o por malas condiciones climáticas. Durante el mes de abril hay una mayor concentración de mediciones ya que fue en ese mes en que se realizo la campaña FIEL-VOLCAN en el volcán Popocatépetl y uno de los métodos utilizados fue el COSPEC.



**Grafica 5.3 Flujo de dióxido de azufre obtenido por COSPEC Enero – Julio 2010**

La tabla siguiente contiene los parámetros meteorológicos que se utilizaron en las travesías del COSPEC, así como los valores de los promedios de  $SO_2$  obtenidos después de éstas, y corresponden a los valores de la gráfica antes presentada.

**Tabla 5.1 Datos de flujo de dióxido de azufre obtenido por COSPEC enero – julio 2010**

Fecha	Promedio de flujo de $SO_2$ (t/d)	Desviación estándar de flujo de $SO_2$ (t/d)	Número de travesías por día	Velocidad de viento (m/s)	Dirección de viento (°)	Distancia a la fuente (km)
02/02/2010	4809	566	2	15	187	36
16/02/2010	3393	1180	5	8	182	36
02/03/2010	2804		1	15	93	33
13/04/2010	1726	469	2	17	99	27
14/04/2010	2758		1	11	96	28
15/04/2010	1871	283	2	10	84	33
16/04/2010	3411	1392	6	7	110	25
17/04/2010	3573	2453	5	7	166	46
18/04/2010	4389	935	4	13	108	24
13/05/2010	5423	554	3	8	154	21
27/05/2010	3751	1320	4	7	352	21

10/06/2010	2528	1296	3	5	98	18
24/06/2010	4718	1831	2	5	266	39
06/07/2010	658		1	6	54	11
22/07/2010	5269	669	2	6	245	33

**Comparación de los flujos obtenidos durante los días que se hicieron mediciones de COSPEC con los resultados obtenidos por la redDOAS.**

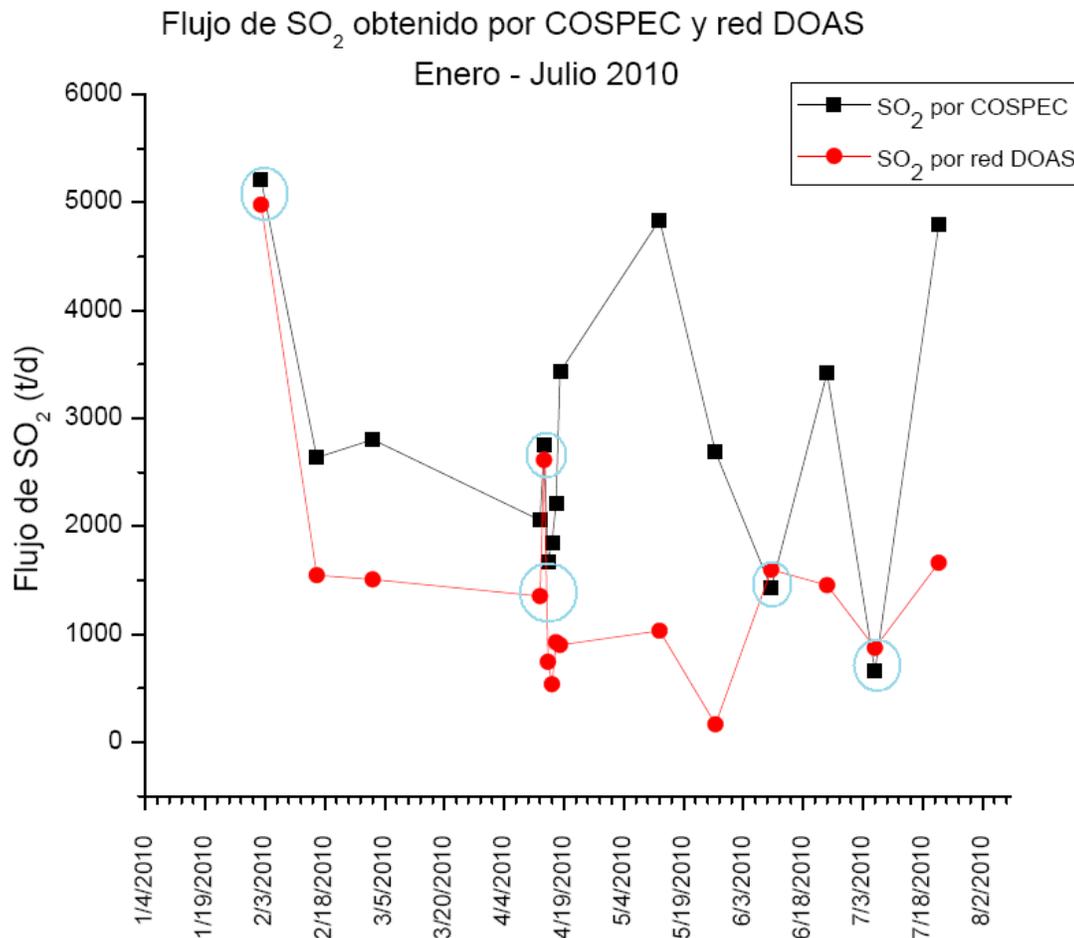
La redDOAS funciona todos los días, incluso en los días en que se mide con la técnica COSPEC. Esto se realiza con la finalidad de hacer una comparación de los flujos obtenidos por ambas técnicas. Los resultados que a continuación se presentan por día solo es el flujo de una corrida con la técnica COSPEC y el promedio del número de scan en el mismo rango de tiempo de la estación que mejor midió el flujo.

**Tabla 5.2 Comparación de flujo de dióxido de azufre obtenido por DOAS y COSPEC enero – julio 2010**

Fecha	Promedio de Flujo de SO <sub>2</sub> medido por COSPEC (t/d)	Promedio de Flujo de SO <sub>2</sub> medido por DOAS (t/d)
02/02/2010	<b>5209</b>	<b>4980</b>

16/02/2010	<b>2637</b>	<b>1548</b>
02/03/2010	<b>2804</b>	<b>1507</b>
13/04/2010	<b>2058</b>	<b>1353</b>
14/04/2010	<b>2758</b>	<b>2614</b>
15/04/2010	<b>1670</b>	<b>745</b>
16/04/2010	<b>1850</b>	<b>536</b>
17/04/2010	<b>2215</b>	<b>925</b>
18/04/2010	<b>3433</b>	<b>901</b>
13/05/2010	<b>4840</b>	<b>1033</b>
27/05/2010	<b>2690</b>	<b>167</b>
10/06/2010	<b>1430</b>	<b>1599</b>
24/06/2010	<b>3423</b>	<b>1455</b>
06/07/2010	<b>658</b>	<b>874</b>

La siguiente gráfica contiene los mismos resultados de la tabla anterior, mostrando en un círculo azul como los valores de ambas técnicas obtienen casi el mismo valor, para los demás días en que se hace la comparación de ambas técnicas el valor de la red DOAS no alcanza el valor de la técnica COSPEC, debido a que la pluma pasa entre dos de las estaciones midiendo únicamente ambas estaciones el borde de la pluma.



Gráfica 5.4 Comparación de flujo de dióxido de azufre obtenido por DOAS y COSPEC enero – julio 2010

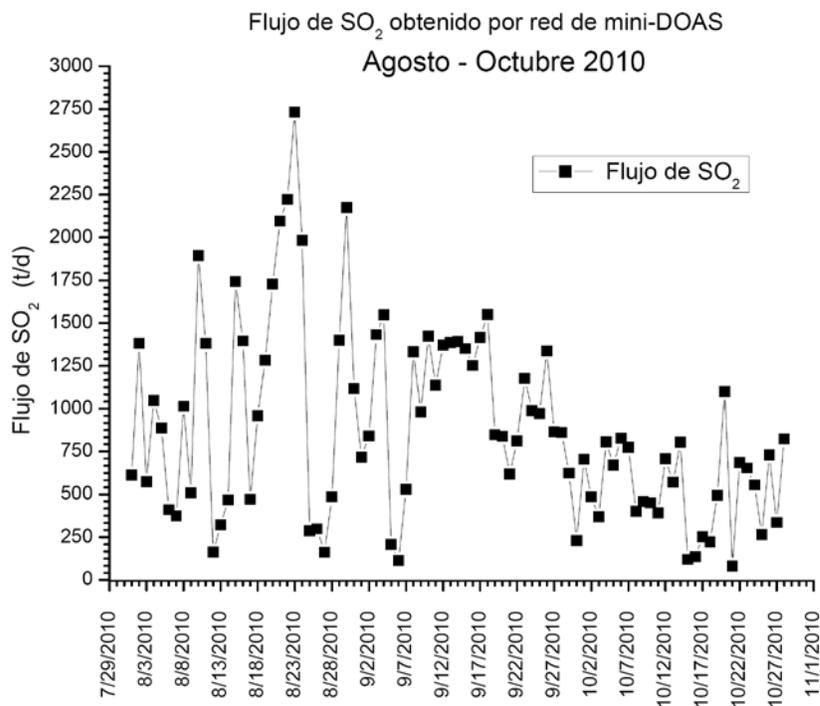
### 5.1.3 Resultados segunda campaña: agosto - octubre 2010

En esta sección presentamos los resultados de las tres técnicas que se desarrollaron en esta tesis, COSPEC, red DOAS y móvil-DOAS durante el tiempo mencionado anteriormente. También para esta campaña se presentaran de manera gráfica los recorridos que se hicieron para las técnicas COSPEC y móvil-DOAS.

- **Datos de  $SO_2$  obtenidos por la red DOAS NOVAC del volcán Popocatépetl**

En primer lugar presentamos los resultados de los valores de flujo de  $SO_2$  obtenidos por la red DOAS durante los meses de agosto, septiembre y octubre del 2010.

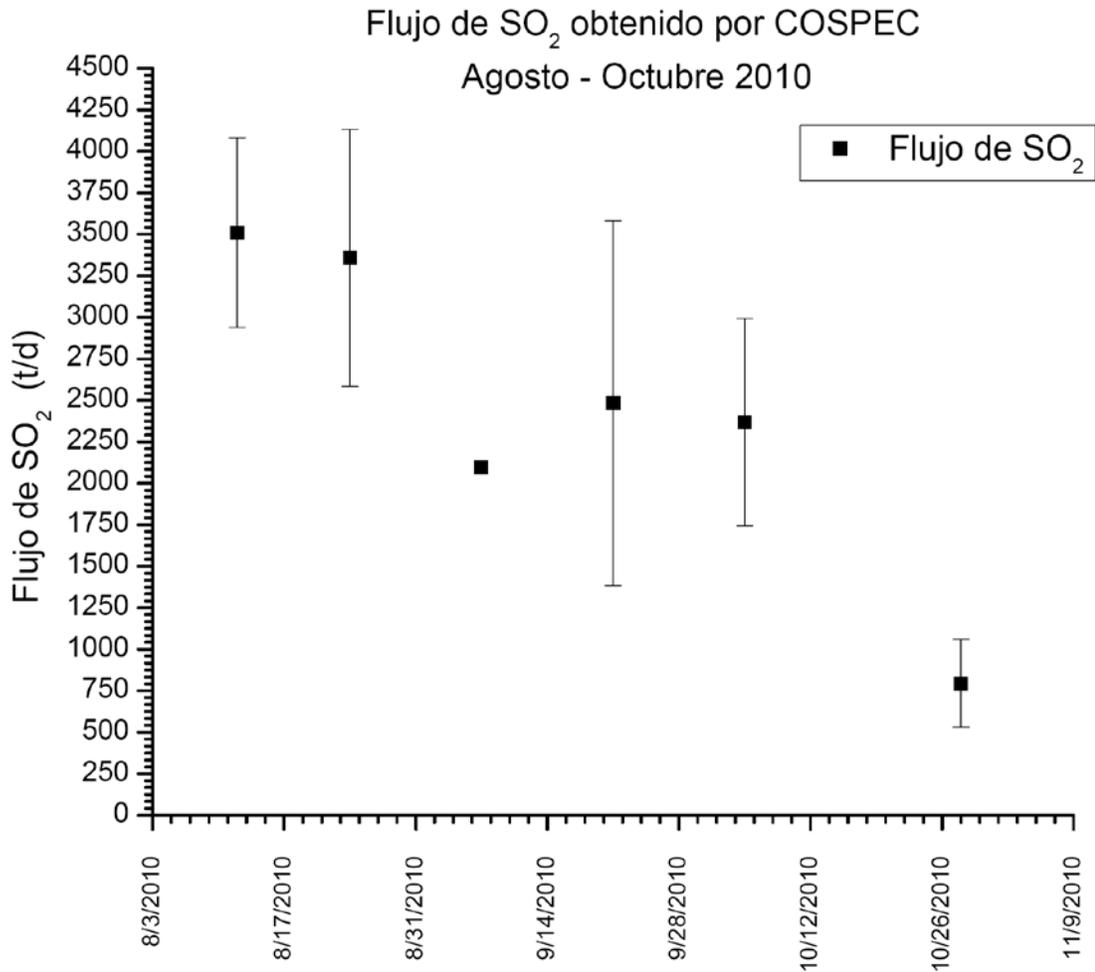
Estos valores son el complemento de los valores presentados en primera sección pertenecientes a la red de DOAS.



Gráfica 5.5 Flujo de dióxido de azufre obtenido por DOAS agosto – octubre 2010

### Mediciones con COSPEC durante la segunda campaña.

Se presenta el complemento de la primera campaña de mediciones para la técnica COSPEC.



Gráfica 5.6 Flujo de dióxido de azufre obtenido por COSPEC agosto – octubre 2010

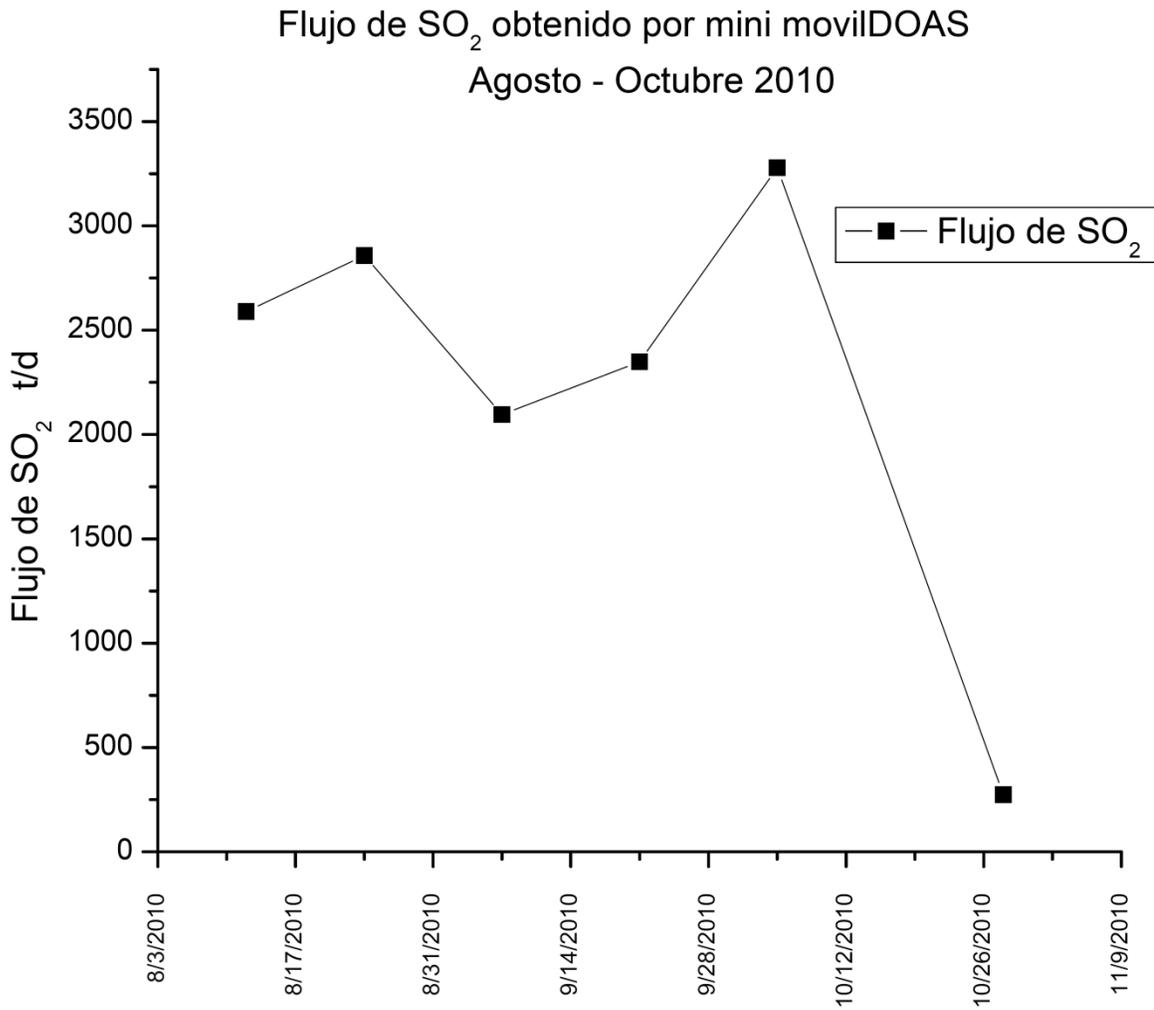
La siguiente tabla contiene el valor numérico de gráfica anterior así como los valores meteorológicos que se utilizaron durante las travesías, cabe mencionar que cada aspecto mencionado es el promedio de los transectos realizados.

**Tabla 5.3 Datos de flujo de dióxido de azufre medidos con COSPEC agosto – octubre 2010**

Fecha	Promedio de SO <sub>2</sub> medido por COSPEC (t/d)	Desviación estándar de SO <sub>2</sub> por COSPEC	Numero de travesías por día	Velocidad de viento (m/s)	Dirección de viento (°)	Distancia a la fuente (km)
12/08/2010	3511	571	4	7	324	31
24/08/2010	3357	775	5	8	260	24
07/09/2010	2094		1	4	105	18
21/09/2010	2484	1099	3	4	277	20
05/10/2010	2369	626	4	5	316	27
28/10/2010	794	263	3	5	79	23

### Mediciones mini móvil-DOAS durante la segunda campaña.

En esta segunda campaña se incluye la técnica mini móvil DOAS presentándose las mediciones de  $\text{SO}_2$  obtenidas, hay que mencionar que de las mediciones que se hicieron por día solo se muestran en la grafica aquellas que se consideraron para hacer la comparación de las 3 técnicas.



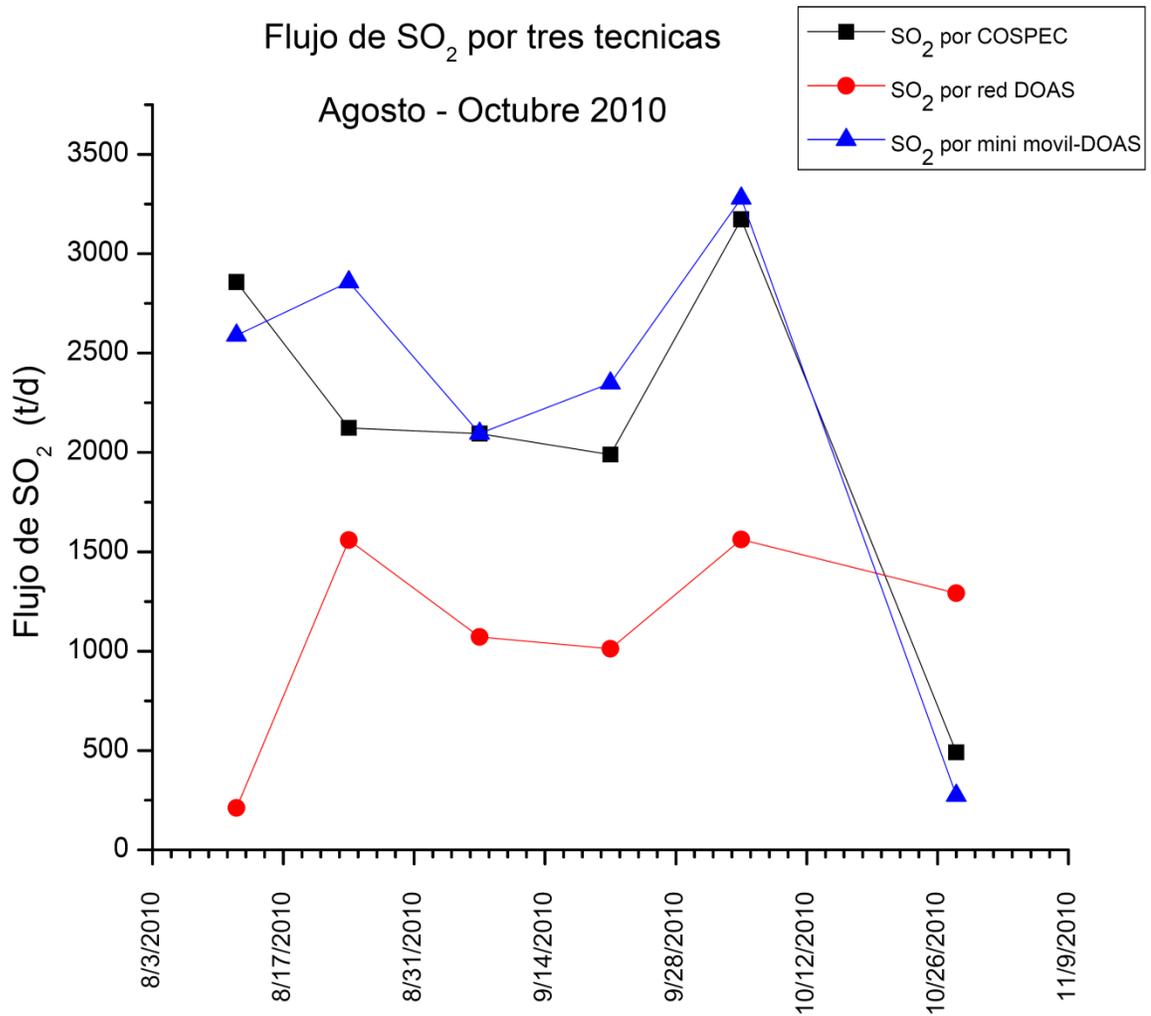
**Gráfica 5.7 Flujo de dióxido de azufre obtenido por móvil-DOAS agosto – octubre 2010**

La tabla No 5.4 contiene los valores de la gráfica anterior, así como la información de vientos utilizados en el procesamiento de datos y algunos datos relevantes de la pluma.

**Tabla 5.4 Valores de flujo de dióxido de azufre y valores utilizados en el procesamiento de datos por mini móvilDOAS, agosto –octubre 2010**

Fecha	Promedio de SO <sub>2</sub> medido por mini móvil-DOAS (t/d)	Numero de travesía en el día	Numero de travesías por día	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Distancia del centro de la pluma a la fuente (Km)
12/08/2010	2589	2	4	7	151	8.1
24/08/2010	2858	1	4	8	76	26.89
07/09/2010	2096	1	1	4	120	10.48
21/09/2010	2349	2	3	4	123	19.11
05/10/2010	3279	4	4	5	124	11.34
28/10/2010	273	1	3	6	75	27.61

Gráfica de los flujos de  $SO_2$  con las tres técnicas: COSPEC, móvil-DOAS y la red DOAS.



Gráfica 5.8 Flujo de dióxido de azufre red DOAS, COSPEC y móvil-DOAS, agosto – octubre 2010.

La siguiente tabla muestra los valores de la gráfica anterior.

**Tabla 5.5 Valores de flujo medidas con red DOAS, COSPEC y móvil-DOAS, agosto – octubre 2010.**

Día	<b>DOAS</b>	D.F.	<b>COSPEC</b>	D.F.	<b>mDOAS</b>	D.F.
12/08/2010	<b>211</b>	5.9	<b>2858</b>	8.8	<b>2589</b>	8.8
24/08/2010	<b>1560</b>	5.9	<b>2124</b>	23.5	<b>2858</b>	23.5
07/09/2010	<b>1071</b>	5.9	<b>2094</b>	10.5	<b>2096</b>	10.5
21/09/2010	<b>1012</b>	5.9	<b>1989</b>	20.2	<b>2349</b>	20.2
05/10/2010	<b>1562</b>	5.9	<b>3173</b>	10.2	<b>3279</b>	10.2
28/10/2010	<b>1292</b>	5.9	<b>491</b>	24.6	<b>273</b>	24.6

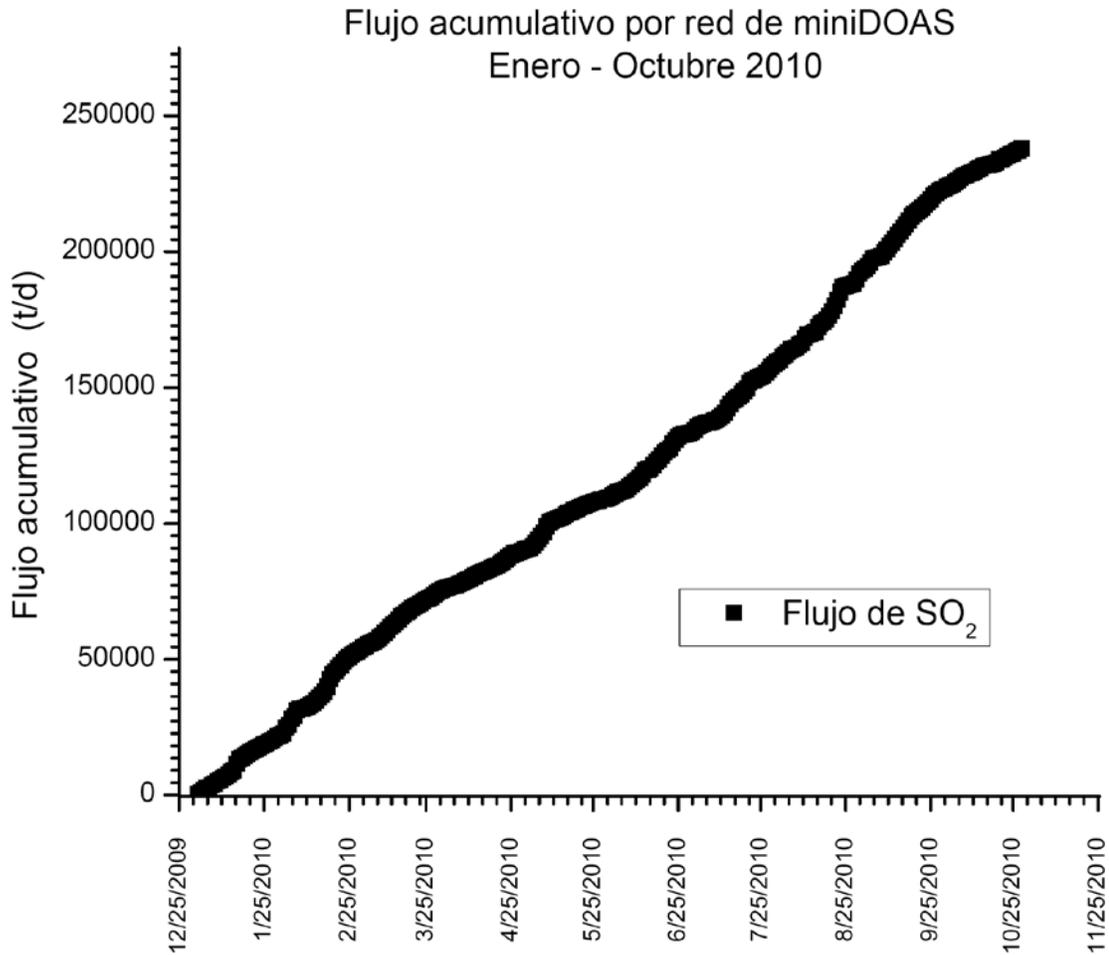
DOAS: Flujo de  $SO_2$  medido por DOAS

D.F.: Distancia a la fuente

COSPEC: Flujo de  $SO_2$  medido por espectrometría de correlación

mDOAS: Flujo de  $SO_2$  medido por móvil-DOAS

Atendiendo a los objetivos de esta tesis se presenta una gráfica mostrando el flujo acumulativo de  $SO_2$  durante el estudio de esta tesis, obtenido por la red DOAS del volcán Popocatépetl.

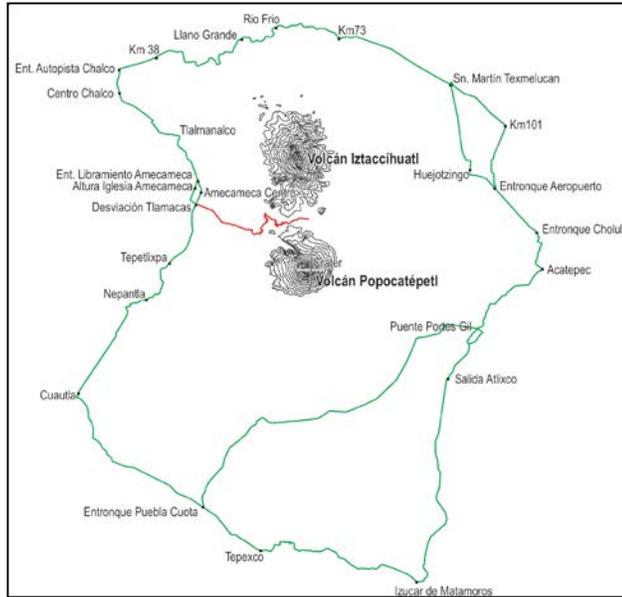


Gráfica 5.9 Flujo de dióxido de azufre acumulativo obtenido por la red DOAS del volcán Popocatépetl en el periodo enero – octubre 2010.

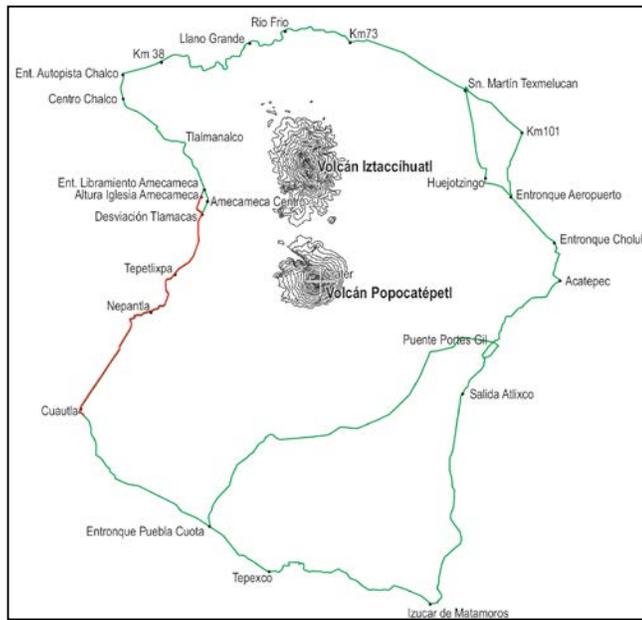
Se presenta de manera gráfica algunas de las travesías que se hicieron con las técnicas COSPEC y móvil-DOAS, mostrando únicamente una muestra de los resultados más representativos. El recorrido está nombrado por día, mes y año y el número de travesía seleccionado por día.

En estas gráficas se muestra todo el recorrido que circunda al volcán Popocatépetl (color verde) superponiendo el recorrido de medición (color rojo) correspondiente.

**Recorrido 120810-1**

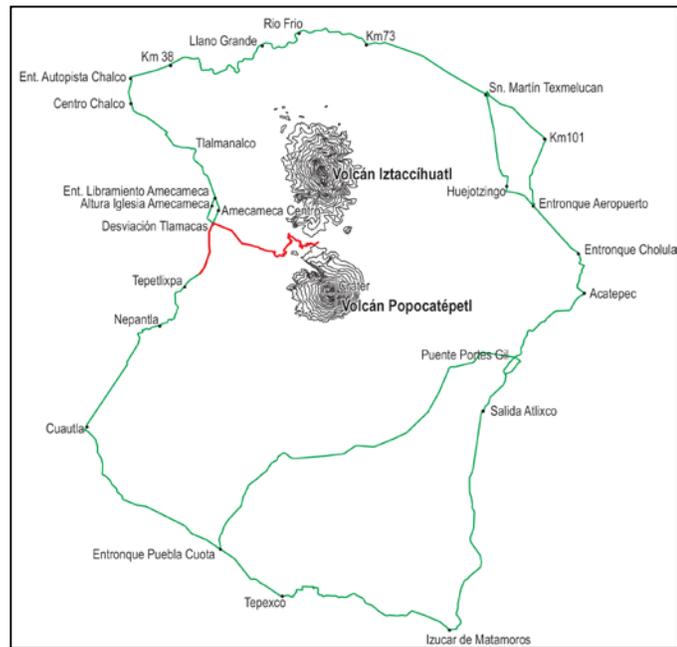


**Recorrido 240810-1**

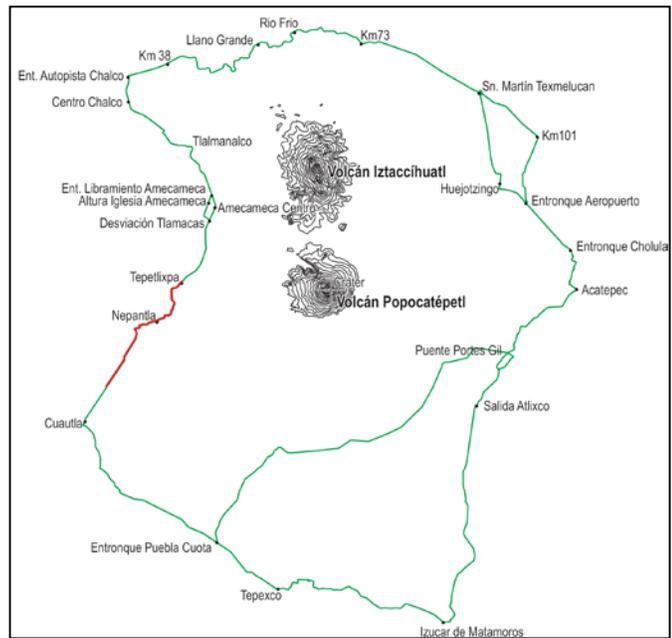




**Recorrido 051010-1**



**Recorrido 281010-1**



## **5.2. Análisis y discusión de los resultados.**

### **5.2.1 Situación meteorológica (Datos de la NOAA)**

Como se menciona anteriormente en la sección 3.4 los vientos en la región del Popocatepetlvarían constantemente tanto en dirección como en velocidad.

Los datos de viento se empezaron a descargar a partir de enero del 2010 para el procesamiento de los datos de  $SO_2$  de la red NOVAC DOAS.

Durante los meses de enero a abril la dirección de los vientos varía desde los  $200^\circ$  hasta los  $330^\circ$  es decir, el recorrido para las mediciones de COSPEC se hacía desde la caseta de la autopista siglo XXI hasta Amayuca, Morelos las velocidades del viento eran altamente variables desde los 5 hasta 30 m/s.

Durante el mes de abril y mayo son los meses de transición tanto en dirección como en velocidad de vientos. A partir del mes de junio hasta el mes de septiembre los vientos tenían una dirección desde los  $10^\circ$  hasta los  $150^\circ$ , en algunos casos cambiaba la dirección de los vientos en el mismo día viniendo desde los  $300^\circ$  y velocidades de 3 a 15 m/s durante este tiempo.

Durante el mes de octubre la dirección de los vientos se mantuvo constantes en los  $10^\circ$  y  $20^\circ$  con velocidades no mayores a los 8 m/s.

### **5.2.2 Análisis de la primera campaña**

Los datos emitidos por la red de mini-DOAS se procesaron de acuerdo a lo descrito en la sección 4.3.3. El promedio generado de  $SO_2$  por las cuatro estaciones siguen, en general, la misma tendencia, según se puede observar en la gráfica 5.2, durante los meses de enero hasta mediados de marzo el promedio del flujo se mantiene en las 700 t/d, después de ese periodo de tiempo, el

promedio de flujo disminuye variando entre 400 y 550 t/d que comprende los meses de marzo hasta los primeros días de junio salvo en algunos días donde el flujo alcanza los 1500 t/d.

La gráfica 5.3 muestra los resultados de la técnica COSPEC para la medición de  $SO_2$  durante los meses de la primera campaña, en esta gráfica podemos observar que al inicio del año (febrero) tenemos un flujo alto de casi 5,000 t/d, disminuyendo durante el mes y medio siguiente con un promedio de 2933 t/d, y a mediados de abril se inicia un nuevo incremento con un promedio de 4199 t/d y un máximo de flujo de 5423 t/d durante la medición del día 13 de mayo de 2010, como se muestra en la Gráfica 5.3 y en la Tabla 5.1 para el resto de la sección comprendida el flujo de  $SO_2$  varía con altas y bajas mediciones teniendo en el mismo mes (julio) el pico más bajo de tan solo 658 t/d de flujo de  $SO_2$  y un incremento drástico observándose un flujo de 5629 t/d de  $SO_2$ .

Durante el análisis de esta campaña se realiza la comparación de estos dos métodos utilizados (COSPEC y DOAS), siendo uno de los objetivos principales de esta tesis. En la tabla 5.2 se hace una comparación gráfica de los valores obtenidos de cada una de estas dos técnicas. Para hacer la comparación de ambas técnicas se tomaron las mediciones de la técnica COSPEC por día y de estas se tomaron aquellas en que las mediciones se hicieron en condiciones ideales (baja nubosidad, perpendicular a la dirección de pluma), por otro lado de las mediciones (del mismo día en que se hizo COSPEC) de la red DOAS se tomaron únicamente los scan con la misma hora haciendo una corrección de tiempo para hacer coincidir las horas de medición de ambas técnicas. Como se muestra en la grafica 5.4 los valores que se encuentran en un círculo azul coinciden de manera casi perfecta habiendo una diferencia mínima despreciable, para los días en que los valores de  $SO_2$  de ambas técnicas no coinciden al realizar el proceso de comparación se observó que la pluma de  $SO_2$  pasa por en medio de dos estaciones de la red DOAS midiendo estas últimas únicamente los bordes de la pluma observándose así valores muy bajos.

### **5.2.3 Análisis de la segunda campaña.**

Durante la segunda sección, como se mencionó anteriormente, se analiza el resultado de las 3 técnicas utilizadas para la medición del  $SO_2$  del volcán Popocatepetl.

Se analizó del primer día de agosto hasta el día 28 de octubre con la red de DOAS NOVAC como lo muestra la Gráfica 5.5.

El flujo de  $SO_2$  para el mes de agosto y los primeros días de septiembre tienen cambios significativos y drásticos de un día para otro, de mantenerse entre las 500 t/d sube hasta las 1890 t/d y nuevamente vuelve a bajar hasta las 200 t/d al día siguiente, siguiendo esta tendencia de picos y valles hasta el día 8 de septiembre de 2010. Del resto de la sección el comportamiento de la gráfica se mantiene con altibajos pero siguiendo una tendencia con un promedio de 766 t/d de  $SO_2$ .

En la técnica COSPEC para esta sección, como se mencionó anteriormente sólo se realizan mediciones dos veces por mes por lo que solo tenemos 6 mediciones, no se consiguieron más medidas por motivo de tiempo. Sin embargo con las pocas mediciones que se realizaron se puede hacer una pequeña comparación con las otras dos técnicas de medición. Las mediciones con COSPEC nos indican un flujo alto para el mes de agosto de 3500 t/d de  $SO_2$  siguiendo una tendencia en decadencia de flujo como se puede observar en la Gráfica 5.6 y en la Tabla 5.3, hasta el final de la campaña con un flujo de 790 t/d de  $SO_2$ .

En esta campaña se realizaron mediciones con móvil-DOAS, técnicamente es la misma estructura óptica que los DOAS de la red NOVAC, con la diferencia de que estos instrumentos DOAS son modificados para ser móviles. Los valores de la gráfica 5.7 que muestra son los que se obtuvieron para esta sección de tiempo, mostrando un sube y baja durante los dos primeros meses con un promedio de 1118 t/d de  $SO_2$ , como lo muestra la Tabla 5.4.

Finalmente, los resultados obtenidos por las 3 técnicas que se estudiaron en esta tesis. La gráfica 5.8 nos muestra las variaciones de flujo de  $SO_2$  que se obtuvieron para cada una de las técnicas, esta gráfica se puede cotejar con la Tabla 5.5 que contiene los valores de flujo por travesía para el caso de las técnicas móviles y de los scan para la red DOAS. Como se puede observar solo dos líneas muestran la misma tendencia de flujo, estas dos líneas corresponden a la técnica COSPEC y

móvilDOAS, en promedio existe una diferencia de flujo entre ellas de  $\pm 100$  t/d de  $SO_2$ , que para fines de monitoreo volcánico esta diferencia no es de gran relevancia.

Sin embargo para la red de DOAS si existe una gran incompatibilidad contra las dos técnicas alternas, esto se debe a que desafortunadamente cuando se hicieron las mediciones de la pluma volcánica con las técnicas móviles la dirección del viento no coincide con las estaciones de la red NOVAC por lo que nuevamente solo se miden los bordes de la pluma volcánica, por lo que gráficamente no coinciden los valores.

En la gráfica 5.9 se muestra el flujo acumulativo únicamente durante el tiempo en que se evaluaron y procesaron los datos que se analizaron para la elaboración de esta tesis.

Durante este tiempo se inyectó a la atmósfera (mientras hubo luz solar) por desgasificación del volcán Popocatepetl 238070 toneladas de Dióxido de Azufre, reafirmando así como al Popocatepetl como el mayor emisor natural de  $SO_2$ .

# **CAPITULO 6 Conclusiones y recomendaciones.**

Se presentan tres técnicas para medir la tasa de emisión de Dióxido de azufre del volcán Popocatepetl, COSPEC, DOAS y mini móvil-DOAS; con estas técnicas se hicieron campañas de medición de manera móvil y fija durante el intervalo de tiempo de Enero – Octubre de 2010.

Durante todo el periodo de estudio de 8 meses el promedio de la desgasificación de  $SO_2$  fue de 796 t/d y la emisión total de Azufre fue de 238070 toneladas, este dato fue obtenido por el proceso de la red de DOAS NOVAC.

A continuación se recogen las conclusiones más relevantes que pueden extraerse finalmente a partir de la consideración conjunta de los resultados obtenidos en las dos fases experimentales de esta investigación presentada en esta memoria:

- La técnica COSPEC es la más antigua que se desarrolla en el monitoreo volcánico por lo que ya se tiene una aplicación perfecta tanto para la medición como en el procesamiento de datos. Dicho lo anterior los datos obtenidos por medio de COSPEC son aquellos con mínima fluctuación de error.
- La técnica mini móvil-DOAS se implemento realizándose de manera simultánea con la técnica COSPEC, los resultados de ambas técnicas tienen diferencias mínimas que para el monitoreo de dióxido de azufre del volcán Popocatepetl estas diferencias son despreciables, se especula que un gran margen de error se encuentra en el procesamiento y criterio de datos en escritorio. El software MóvilDOAS empleado en la calculación del Post Flux contiene ciertos procesos que se desconoce su modo de aplicación a los datos insitu. Pese a lo anterior el resultado conseguido es confiable para el monitoreo volcánico.
- Se recomienda una revisión al software empleado en la técnica mini móvil-DOAS para tener resultados con menor probabilidad de error.
- Durante la primera sección se compararon las técnicas COSPEC y red DOAS NOVAC, observándose que en los días en que se hacían las mediciones móviles con COSPEC y coincidía la ruta en la misma dirección en que se encontraba una estación de la red DOAS NOVAC los resultados obtenidos por ambas técnicas son casi iguales. En la segunda sección

se compararon las 3 técnicas descritas en esta tesis, para las técnicas COSPEC y mini móvilDOAS se obtuvieron resultados muy aproximados y para la tercera técnica red DOAS NOVAC no coincidieron los resultados debido a que existe una gran pérdida de medida del gas  $SO_2$ , esto se debe principalmente a que durante los meses en que se realizaron las mediciones la nubosidad o vapor de agua es de baja altitud provocando una medida errónea ; otras causas fueron por efecto de viento dividiendo a la pluma en dos secciones y como consecuencia el software NovacProgram no está programado para integrar en una sola operación dos plumas, de igual manera que por la dirección del viento un solo penacho sea visto por dos instrumentos de medición el software antes mencionado solo tomara los valores más altos durante la hora de medición descartando así los valores del instrumento alterno. Pese a esto ya que en la sección anterior se comparo esta red DOAS NOVAC con la técnica COSPEC y los resultados fueron los esperados se concluye que las 3 técnicas empleadas para medir dióxido de azufre en el volcán Popocatépetl obtienen el mismo resultado.

- Se recomienda una mayor precaución durante el proceso de datos en la técnica red DOAS NOVAC durante los meses en que la nubosidad circundante al volcán Popocatépetl sea de baja altitud, o bien mejorar el mecanismo óptico del instrumento para que durante la medición desprecie el vapor de agua y tenga una medición real de  $SO_2$ .
- El procesamiento de los datos insitu de la red DOAS NOVAC tiene un alto grado de confiabilidad por lo que se espera que en los días en que no sea posible hacer mediciones móviles la red DOAS NOVAC sea suficiente para tener una medición de  $SO_2$  del volcán Popocatépetl en época de contingencia.
- Se recomienda seguir haciendo comparaciones principalmente de los datos de la red DOAS NOVAC contra los datos de COSPEC y mini móvil-DOAS con un mayor número de datos a los presentados en esta memoria para encontrar la razón de esas diferencias tan grandes.
- La aplicación de técnicas de detección remota pasiva para el estudio y monitoreo volcánico son actualmente, bajo una aplicación adecuada, las más seguras para el personal que las realiza y sus bases de datos son confiables para uso de riesgo volcánico.



## Referencias Bibliográficas

- Aguilera, J. G. y Ordoñez, E. (1985) "Expedición científica al Popocatepetl". Comisión Geológica Mexicana. Oficina tipográfica de la Secretaria del Fomento, México.
- Alarcón, F.A.M. 2008. "Sistema de Identificación Sísmica para el volcán Popocatepetl." Tesis para obtener el grado de maestra en ciencias. UNAM. México, D.F.
- Albritton, D. and L. MeiraFilho (2001). "Climate Change 2001: The Scientific Basis." In Contribution of Working Group I to the Third Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. ISBN: 0521014956.
- Andres, R.J., Rose, W.I., 1995. "Remote sensing spectroscopy of volcanic plumes and clouds." In: McGuire, W.J., Kilburn, C.R.J., Murray, J.B. (Eds.), Monitoring Active Volcanoes: Strategies, Procedures and Techniques. University College of London Press, London, England, pp. 301-314.
- Andres, R.J., Kasgnoc, A.D., 1998. "A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions." J. Geophys. Res. 103, 25251–25261.
- Aparicio, J.R.M. 2010. "Procesamiento de datos de emisión de dióxido de azufre obtenidos por espectrometría de absorción óptica diferencial en el volcán Popocatepetl". Tesis para obtener el grado de Licenciada en Ingeniería Geofísica. BUAP. Puebla. Pue.
- Barrefors, G. 1997. "Erratum to Monitoring of benzene, toluene and p-xylene in urban air with Differential Optical Absorption Spectroscopy technique." The Science of the total Environment 196: 99-104.
- Barringer, A.R. 1964 "Developments towards the remote sensing of vapours as an airborne and space exploration tool", Proc. 3rd Symposium in Remote Sensing. Univ. Michigan, 279-292.
- Barringer, A.R. and Newbury, B.C. 1968. "Remote sensing correlation spectrometry for pollution measurement", Ninth Conference, Air Pollution & Industrial Hygiene Studies, Pasadena, CA. Febrero.
- Barringer, A.R. and Moffat, A.J. 1969. "Recent progress in the remote detection of vapour and gases", Sixth Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Michigan.
- Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M.
- Berresheim, H. and Jaeschke, W. 1983. "The contribution of volcanoes to the global atmospheric sulfur budget." J. Geophys. Res., Vol. 88, 3732-3740.

- Bluth, G. J. S., Schnetzler, C.C., Krueger, A.J. and Walter, L.S. 1993. "The contribution of explosive volcanism to global atmospheric sulphur dioxide concentrations." *Nature*, Vol. 366, 327-329.
- Bobroski, N. G. H, GalleB., PlattU. 2003. "Detection of bromine monoxide in a volcanic plume." *Nature* 423, 273-276.
- Bobroski, N. 2005. "Volcanic Gas Studies by Multi Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy" Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Naturales. Universidad de Ruperto Carola de Heidelberg, Alemania.
- Bottema, M., Plummer, W., Strong, J. and Zander R. 1964. "Composition of the clouds of Venus". *Astrophysical Journal*, 140, 1640-1641.
- Brauers, T.M.H., Brandenburger, U. and Dorn, H.P. 1995. "Improvement of differential optical absorption spectroscopy with a multichannel scanning technique." *Applied Optics* 34 (21): 4472-4479.
- Brohede, S. 2002. *Differential Optical Absorption Spectroscopy – How does it work and what can it measure?*
- Cadle, R. D. 1975. "Volcanic emissions of halides and sulfur compounds to the troposphere and stratosphere." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, 1650-1652.
- Caltabiano, T., Romano, R., Budetta, G., 1994. "SO<sub>2</sub> flux measurements at Mount Etna (Sicily)." *J. Geophys. Res.* 99, 12809–12819.
- Camacho, H. 1929. "Resultado de la visita al cráter del Popocatepetl el 9 de marzo de 1929." *Anales del Instituto de geología de México*. Tomo II, 1, 2,3, México.
- Cantagrel, J. M., Gourgaud, A. y Robín, C. 1984. "Repetitive mixing events Holocene pyroclastic activity at Pico de Orizaba and Popocatepetl (México)." *Bull. Volcanol.*, Vol. 47-4.
- Carrasco, G. 1985. "Estudio geológico del Volcán Popocatepetl." México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis profesional. 138.
- Carrasco, G. Silvia, M., Delgado, H. y Urrutia, F. 1986 "Geología y Paleomagnetismo del Popocatepetl." *Comunicaciones técnicas, serie investigación*. No. 33. Instituto de geofísica, UNAM., México.
- Casadevall T.J., Johnston D.A., Harris D.M., Rose W.I., Malinconico L.L., Stoiber R.E., Bornhorst T.J., Williams S.N.; 1981: "SO<sub>2</sub> emissions rates at Mount St. Helens from March 29 through December, 1980". In: Lipman P.W., Mullineaux D.R. (Eds): "The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington". U.S. Geological Survey. No. 1250, 193-200.

- CENAPRED; Centro Nacional para la Prevención de Desastres
- Christoph V.F., Kai, M., Thomas, W., Platt, U. 2005. "Multi-axis-DOAS measurements of NO<sub>2</sub> during the BAB II motorway emission campaign." *Atmospheric Environment* 39: 977-985.
- Crisp, J. A. 1984. "Rates of magma emplacement and volcanic output". *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 20, 177–211.
- Daag, A.S.; Tubianosa, B.S.; Newhall, C.G.; Tuñgol, N.M.; Javier, D.; Dolan, M.T.; Reyes, P.J.D.; Arboleda, R.A.; Martinez, M.L.; Regalado, T.M. 1996 "Monitoring sulphur dioxide emission at Mount Pinatubo." In *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo Philippines.* (ed. C.G. Newhall and R.S. Punongbayan), University of Washington Press, Seattle. 409-414.
- Delgado, H., Carrasco, G., Cervantes, P. y Molinero, R. "Patrones de viento en la región del volcán Popocatepetl y ciudad de México."
- Delgado, H., Arciniega, D. y Calvario, B. 1985. "Los glaciares del Popocatepetl y el Iztacihuatl." *Comunicaciones técnicas, serie investigación.* No.31. Instituto de geofísica, UNAM., México.
- Delgado, H. y Brugman, M. 1995 "Monitoreo de los glaciares del Popocatepetl." *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995.* CENAPRED. UNAM. México.
- Delgado, H., Cárdenas, L., 1997. "Passive degassing at Volcan Popocatepetl (México): 2.6 x 10<sup>6</sup> tons of SO<sub>2</sub> relased in 617 days of activity." *Volcanic Activity and the Environment. Abstracts.* IAVCEI, Puerto Vallarta, 49.
- Delgado, H., Cárdenas, L., Piedad, N., Galván-Chávez L., Julio-Miranda J. 1998, a: "Structure of non-eruptive gas plumes from Popocatepetl volcano, México: II. Morphology, size and significance". *Sexta Reunión Internacional Volcán de Colima.* Universidad de Colima. 115.
- Delgado, H., Cárdenas, L., Julio, J. 1998, b: "Structure of non-eruptive gas plumes from Popocatepetl volcano, México: I. Chemical structure and processes influencing plumes". *Sexta Reunión Internacional Volcán de Colima.* Universidad de Colima. 113.
- Delgado, H., Carrasco. N. G., Urrutia, F. J. 1999. "Geology of Popocatepetl volcano". *Simposio Internacional Volcanpopocatepetl. Resumen.* Instituto de Geofísica UNAM. 12.
- Delgado, H., Cardenas, L., Piedad N. 2001. "Sulfur dioxide emissions from Popocatepetl volcano(Mexico): case study of a high-emission rate, passively degassing erupting volcano. J. volcano." *Geotherm. Res.* 107 – 120.

- Delgado Granados, H., 2002. Patrones de viento en las cercanías del volcán Popocatépetl, los productos balísticos y sus efectos en: Las cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos en la Aeronavegación e infraestructura Aeroportuaria, SEGOB-CENAPRED, pp. 51-81.
- Delgado, H. 2008 Large Volcanic-SO<sub>2</sub> fluxes: COSPEC measurements at Popocatépetl Volcano (Mexico).Capitulo 5, en: Williams-Jones, G., Stix, J. and Hickson, C. (eds.) The CO-SPEC Cookbook: Making SO<sub>2</sub> Measurements at Active Volcanoes. IAVCEI, Methods in Volcanology, 1,191- 215.
- Delgado, H., Cardenas, L. 2009. Degassing patterns of Popocatépetl volcano during the last 14 years.
- Delmelle, P., Stix, J. Volcanic interactions. In:Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), Encyclopedia of Volcanoes.803-817.
- Delmelle, P., Stix, J., Baxter, P.J., García, A.J., Barquero, J. (2002). Atmospheric dispersion, environmental effects and potential health hazard associated with the low-altitude gas plume of Masaya volcano, Nicaragua. Bull. Volcanol.64, 423-434.
- Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California. <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/what/VolGas/volgas.html>
- Dubosclard, G., Allard, P., Cordesses, R., Donnadieu, F., Hervier, C., Coltelli, M., Privitera, E., Kornprobst, J., 2004. “Doppler radar sounding of volcanic eruption dynamics at Mount Etna.” Bull. Volcanol. 66 (5), 443–456.
- Duffell, H.J., Oppenheimer, C., Pyle, D.M., Galle, B., McGonigle, A.J.S. and Burton, M.R., 2003. “Changes in gas composition prior to a minor explosive eruption at Masaya volcano, Nicaragua.” J. Volcanol. Geotherm. Res. 126(3-4), 327-339.
- Edmonds, M., Herd, R.A., Galle, B., Oppenheimer, C.M., 2003. “Automated, high time-resolution measurements of SO<sub>2</sub> flux at Soufrière Hills Volcano, Montserrat.” Bull. Volcanol. 65, 578–586.
- Espinasa, P.R., and Martin Del Pozzo, A.L., 2006. Morphostratigraphic evolution of Popocatépetl volcano, México, In. Siebe, C., Macías, J.L., and Aguirre-Díaz, G.J., eds., Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from México: Geological Society of America Special paper 402, Penrose Conference Series. 115-137.
- Evangelisti, F.A.B., P. Bonasoni, G. Giovanelli, and F. Ravegnani (1995). “Differential optical absorption spectrometer for measurement of tropospheric pollutants.” Applied optics 34(15): 2737-2744.

- Evans, B.M., Staudacher, T., 2001. "In situ measurements of gas discharges across fissures associated with lava flows at Reunion Island." *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 106, 255–263.
- Friend, J. P. 1973. "The global sulfur cycle, in *Chemistry of the Lower Atmosphere.*" edited by S. I. Rasool.
- Frías, Carl. Jr. 1965. "Hoja Cuernavaca 14Q-h (8), con resumen de la geología de la Hoja Cuernavaca. Estados de Morelos, México, Guerrero y Puebla." Instituto de Geología. UNAM. Carta geológica de México. Serie de 1: 100 000, México.
- Galindo, I., Gonzales, A., and Ayala, R., 1996. "Emisiones de bióxido de azufre del Volcán Popocatepetl, México durante la erupción de Diciembre 1994-Enero 1995, in Comité Científico Asesor, Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante La Crisis De 1994–1995." Mexico City, CENAPRED-UNAM, 245–256.
- Galindo, I., Ivlev, L.S., González, A., Ayala, R., 1998. "Airborne measurements of particle and gas emissions from the December 1994–January 1995 eruption of Popocatepetl volcano (Mexico)." *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 83, 197–217.
- Galle, B., Oppenheimer, C., Geyer, A., McGonigle, A., Edmonds, M., Horrocks, L. 2002. "A miniaturized ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO<sub>2</sub> fluxes: a new tool for volcano surveillance". *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 119, 241-25.
- Goff., Janik C.J., Delgado H., Werner c., Counce D., Stimac J.A., Siebe C., Love S.P., Williams S.N., Fisser T., y Johnson L., 1998. "Geochemical surveillance of magmatic volatiles at popocateptl volcano, mexico." *Geological Society of America, Bulletin* v.110 no. 6. 695-710.
- Goff, F., Love, S.P., Warren, R. G., Counce, D., Obenholzner, J., Siebe, C., and Schmidt, S. C. 2001. "Passive infrared remote sensing evidence for large, intermittent CO<sub>2</sub> emissions at Popocatepetl volcano, Mexico." *Chem. Geol.*, 177, 1-2, 133-156.
- Graf, H. F., Kirchner, I., Robock, A., Schult, I., 1993. "Pinatubo eruption winter climate effects: model versus observation." *Climate Dynamics* 9, 81–93.
- Graf, H. F., Feichter, J. and Langmann, B. 1997. "Volcanic sulfur emissions: Estimates of source strength and its contribution to the global sulfate distribution." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, 10727-10738.
- Granat, L., Rodhe, H. and Hallberg, R.O. 1976. "The global sulphur cycle, in *Nitrogen, Phosphorous and Sulphur-Global Cycles.*" SCOPE Report 7, Ecological Bulletin, Vol. 22, 89-134.
- Greg, A. V., Shufelt, N.L., Hintz, A.R.L. 2011. "Models of maar volcanoes, Lunar Crater (Nevada, USA)." *Bull Volcanol* (2011) 73: 753-765.

- Grove, T.L. Origin of Magmas. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. 133-149.
- Grutter, M., Basaldud, R., Rivera, C., Harig, R., Junkerman, W., Caetano, E., and Delgado, H. 2008. "SO<sub>2</sub> emissions from Popocatepetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8119–8141.
- Global Volcanism Network Bulletin, 1994. Seismicity moderate, but distinct plume and very high SO<sub>2</sub> flux. 19, 13-14.
- Guevara, O. E., Quaas, W. R., Castelán, P.G., Ortiz, G. J., Vázquez, L. J., Morquecho, Z. C., Alarcón F.A.M., Martínez, B.A., Gómez, V.A., Espitia, S.G., Alonso, R.P., Cárdenas, G.L. 2003. "Informe Técnico. Instrumentación y Monitoreo del Volcán Popocatépetl." Dirección de Instrumentación y Cómputo. CENAPRED.
- GVP; Global Volcanic Program, Smithsonian Institution – Popocatépetl information.
- Halmer, M., Schmincke, H.U. and Graf, H.F. 2002. "The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: A global data set of the past 100 years." *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 115, 511-528.
- Hans Edner, P. R., SuneSvanberg, Leif Unus, and SvanteWallin (1986). "Differential optical absorption spectroscopy system used for atmospheric mercury monitoring." *Applied Optics* 25(3): 403-409.
- Hans Edner, P. R., Stefan Spannare, and SuneSvanberg (1993). "Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system for urban atmospheric pollution monitoring." *Applied Optics* 32(3): 327-333.
- <http://www.novac-project.eu/>
- Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias de México. Revista Efecto sobre la función pulmonar en personas expuestas a cenizas del volcán Popocatépetl. Volumen 8, número 2. Abril - junio de 1995. 112-118.
- IPCC, 2007. *Climate change 2007. "The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change."* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Johansson, M. 2007. "Development and Use of Optical Remote Sensing Methods for Studies of Megacity Air Pollution and Volcanic Gas Emissions." Thesis for the degree of licentiate, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.

- Kay, R.B. 1967. "Absorption spectra apparatus using optical correlation for the detection of trace amounts of SO<sub>2</sub>." *Applied Optics*, 6, 776-778.
- Kellogg, W. W., Cadle, R.D., Allen, E.R., Lazrus, A.L and Martell E.A. 1972. "The Sulfur cycle." *Science*, Vol. 175, 587-596.
- Klein, E. M. and Langmuir, C. H. 1989. Local versus global variations in ocean ridge basalt composition. *J.Geophys. Res.* 94, 4241-4252.
- Lambert, G., Cloarec, M.F.L. and Pennisi, M. 1988. "Volcanic output of SO<sub>2</sub> and trace metals: A new approach." *GeochimicaetCosmochimicaActa*, Vol. 52, 39-42.
- Lange, F.H. 1967. "Correlation techniques". Van Nostrand-Reinhold Ed., New York.
- Le Guern, F. 1982. "Es duebits de CO<sub>2</sub> et de SO<sub>2</sub> volcaniquesdansl'atmosphère. L." *Bulletin of Volcanology*, Vol. 45, 197-202.
- Lorenzo, J. L. 1959. "Los glaciares de México." Monografía del Instituto de Geografía. Volumen 1, UNAM.
- Martin del Pozzo, A. L., Espinasa, R., Lugo, J., Barba, L., López, J., Plunkentt, P., Uruñuela, G. y Manzanilla, L. 1997. "Volcanic impact in central México." Excursión guía, IAVCEI, Puerto Vallarta, México.
- McCormick, M.P., Thomason, L.W. and Trepte, C,R. 1995. "Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption." *Nature*, 373, 399-404.
- McGonigle, A.J.S., Oppenheimer, C., Galle, B., Mather, T.A., Pyle, D.M., 2002. Walking traverse and scanning DOAS measurements of volcanic gas emission rates. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1985.
- McGonigle, A.J.S., Oppenheimer, C., Hayes, A.R., Galle, B., Edmonds, M., Caltabiano, T., Salerno, G., Burton, M., Mather, T. A. 2003. "Sulphur dioxide flux measurements at Mount Etna, Vulcano and Stromboli measured with an automated scanning static ultraviolet spectrometer." *J.Geophys. Res.* 108, 2455.
- McGonible, A.J.S., 2005. "Volcano remote sensing with ground-based spectroscopy", *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 363, 2915-2929.
- McGonigle, A.J.S. 2007. "Measurement of volcanic SO<sub>2</sub> fluxes with differential optical absorption spectroscopy." *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 162, 111-122.
- McKeen, S.A., Liu, S.C., Kiang, C.S., 1984. "On the chemistry of stratospheric SO<sub>2</sub> following volcanic eruptions." *J. Geophys. Res.* 89 (4), 873-881.

- Millán, M.M., Townsend, S.J. and Davies, J.H. 1969. "Study of the Barringer Remote Sensor". University of Toronto Report 146-69.
- Millán, M.M. 1972. "A study of the operational characteristics and optimization procedures of Dispersive Correlation Spectrometer for the detection of trace gases in the atmosphere". Tesis Doctoral. Univ. Toronto, Canadá.
- Millán, M.M., and Hoff R.M. 1977, a. "Dispersive Correlation Spectroscopy: a study of mask optimization procedures". Applied Optics, 16, 1609-1618.
- Millán, M.M. and Hoff R.M. 1977, b. "How to minimize the baseline drift in a COSPEC remote sensor". Atmospheric Environment, 11, 857-860.
- Millán, M.M. and Hoff R.M. 1978. "Remote Sensing of air pollutants by Correlation Spectroscopy. Instrumental response characteristics", Atmospheric Environment, 12, 853-864.
- Millán, M. M. 1980. "Remote sensing of air pollutants. A study of some atmospheric scattering effects." Atmospheric Environment, v. 14, p. 1241-1253.
- Millán, M.M., 1983. "Optical Remote Sensing of Air Pollution, Capítulos 3, 4 y 17". Elsevier Publishers, Amsterdam.
- Ministerio de Salud Pública del Ecuador. Efectos en la salud por las erupciones del Tungurahua. Boletín No.1. Febrero de 2000.
- Moffat, A.J. and Millán, M.M. 1971, a. "The application of the optical correlation techniques to the remote sensing of SO<sub>2</sub> plumes using sky light". Atmospheric Environment, 5, 677-690.
- Moffat, A.J., Robbins, J.R. and Barringer, A.R. 1971, b. "Electrooptical sensing of environmental pollutants". Atmospheric Environment, 5, 511-525.
- Mosser, F. 1975. "Historia geológica de la Cuenca de México". Memoria de las Obras del sistema de drenaje profundo del Distrito federal. T 1, México D.F.
- Mooser. F., Montiel. A. y Zúñiga. A. 1996. Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad (1939-1996), México. 27.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.

- Newhall, C.G., Self, S. 1982. "The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism." *Journal of Geophysical Research*. Vol. 87. 1231-1238.
- Nemery, B., Hoet, P.H.M. and Nemmar, A., 2001. "The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster." *The Lancet* 357(9257), 704-708.
- Olmos, R., Barrancos, J., Rivera, C., Barahona, F., Lopez, D.L., Henriquez, B., Hernandez, A., E. Benitez, E., Hernandez, P.A., Pérez, N.M. and Galle, B. 2007. "Anomalous emissions of SO<sub>2</sub> during the recent eruption of Santa Ana volcano, El Salvador, Central America." *Pure and Applied Geophysics*, 164 (12), 2489-2506.
- Olsen, E.D. 1990. "Técnicas ópticas de análisis", Ed. Reverté S.A., Barcelona.
- Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A., Boardman, L. 1998. "Remote measurements of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy". *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 67(4). 505-515.
- Oppenheimer, A. J. S. M. a. C. (2002). "Walking traverse and scanning DOAS measurements of volcanic gas emission rates." *Geophysical Research Letters* 29 (20, 1985).
- Plane, M.C.J., C.-F.N. 1992. "Differential optical absorption spectrometer for measuring atmospheric trace gases." *Review of Scientific Instruments* 63(3). 1867-1876.
- Platt, U. New Approaches of aromatic hydrocarbon measurements by DOAS. Heidelberg, Institut für Umweltphysik, Univ. Heidelberg:8.
- Platt, U. 1994. "Differential optical absorption spectroscopy (DOAS)", in *Air monitoring by spectroscopic techniques*, p. 27-84, Sigrist M.W., ed. Wiley, New York.
- Platt, U. 1997. "Improving long-path differential optical absorption spectroscopy with a quartz-fiber mode mixer." *Applied Optics* 36(6):1105-1115.
- Pujadas, M. (2002) "FORMACIÓN Y TRANSPORTE DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA CUENCA AÉREA DE MADRID EN SITUACIONES EPISÓDICAS DE INVIERNO" Tesis para obtener el grado de Doctor. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Raga, G.B., Kok, G.L., Baumgardner, D., Báez, A. and Rosas, I., 1999. Evidence for Volcanic Influence on Mexico City Aerosols. *Geophysical Research Letters*, 26(8): 1149-1152.
- Rivera, C., Delgado, H., Álvarez, J.M., Morquecho, C., Alonso, P., Valseca, R., Cárdenas, L., 2009. "A report describing the installation, with maps and photos at Volcán Popocatepetl" Project NOVAC.

- Robin, C., 1984. "Le volcan Popocatepetl (Mexique): Structure, evolution pétrologique et risques." *Bulletin of Volcanology*, Vol. 47-1, p. 1-23.
- Robin, C. and Boudal, C., 1987. A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern Volcan Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 31, p. 115-130.
- Robock, A. 2000. "Volcanic eruptions and climate." *Rev. Geophys.*, Vol. 38, 191-219.
- Schiff H., Macay G., Bechara J. 1994. "The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for atmospheric measurements", in *Air monitoring by spectroscopic techniques*, 239–333, Sigrist M.W., ed. Wiley, New York.
- Schlaepfer, C. J. 1968. "Hoja México 14Q-h(5), con resumen de la geología. De la Hoja México, Distrito Federal y Estado de México y Morelos." Instituto de Geología. UNAM. Carta geológica de México. Serie de 1: 00 000, México.
- Seaman, J., Leivesley, Sally; y Hogg, C. *Epidemiología de desastres naturales*. Editorial Har-la. 1989. pp.144.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S.N. 1998. "Atmospheric Chemistry and Physics." New York, Chichester, Weinheim: Wiley.
- Siebe, C., Abrams, M., Macias, J. M. and Obenholzner, J. 1996, a "Repeated volcanic disaster in Phehispanic time at Popocatepetl, central México: Past key to the future." *Geology*, Vol. 24, No. 5. U.S.A.
- Siebe, C., Macias, J. M., Abrams, M., y Obenholzner, J., 1996, b. "La destrucción de Ca-caxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatepetl." *Ciencias*, No.41. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Siebe, C., Macias, J.L., Abrams, M., Rodriguez, S. y Castro, R. 1997. "Catastrophic Prehis-toric eruptions at Popocateptl and Quaternary explosive volcanism in the Serdan-Oriental Basin, East-Central Mexico." *Fieltrip Guidebook*. IAVCEI General Assembly. Puerto Val-larta, Mexico; January. 19-24.
- Sigurdosson, H., Carey, S.N. and Fisher, R.V. 1987. "The 1982 eruptions of El Chichon vol-cano, Mexico (3): Physical properties of pyroclastic surges". *Bull Volcanol (1987)* 49:467-488
- Sigurdosson, H. "The History of Volcanology". In: Sigurdosson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. 15-44.

- Simkin, T. and Siebert, L. "Catalog of historically active volcanoes on Earth". In: Sigurdson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. 1365-1385.
- Smith P., Rufus J., Yoshino K., Parkinson W.H., Stark G., Pickering J., Thorne A.P. 2002. "UV photoabsorption cross sections of CO, N<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> for studies of the ISM and planetary atmospheres." NASA Law.
- Sparks R.S.J. 2003. "Dynamics of magma degassing Oppenheimer C, Pyle D.M, Barclay J. uulnVolcanic degassing London". The Geological Society 5–22.
- Sutton, A.J., McGee, K.A., Casadevall, T.J., Stokes, J.B, 1993. "Fundamental volcanic-gas-study techniques: an integrated approach to monitoring". In: Ewert J.W., Swanson (Eds.), *Monitoring Volcanoes: Techniques and Strategies Used by the Staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-90*. U.S Geological Survey Bulletin 1966, pp. 181-188.
- Sutton, A.J., Elias, T., Gerlach, T.M., Stokes, J.B., 2001. "Implications for eruptive processes as indicated by sulfur dioxide emissions from Kilauea Volcano, Hawaii, 1979–1997." *J. Volcano. Geotherm. Res.* 108, 283–302.
- Stern, D.I., 2006. "Reversal of the trend in global anthropogenic sulfur emissions. *Global Environ. Change* 16, 207–220.
- Stoiber, R. and Jepsen, A. 1973. "Sulfur dioxide contribution to the atmosphere by volcanoes." *Science*, Vol. 182, 57-578.
- Stoiber, R.E., Malinconico Jr., L.L., and Williams, S.N. 1983. "Use of the correlation spectrometer at volcanoes; in *Forecasting Volcanic Events*." (eds). H. Tazieff and J. C. Sabroux, *Developments in Volcanology*, 1, Elsevier, Amsterdam, 425-444.
- Stoiber, R. E., Williams, S.N. and Huebert, B. 1987. "Annual contribution of sulfur dioxide to the atmosphere by volcanoes." *J. Volcanol. Geotherm.Res.* Vol. 33, 1-8.
- Symonds R.B, Rose W.I, Blush G.J.S, Gerlach T.M 1994. "Volcanic gas studies-methods, results, and applications." *Rev. Mineral*, 30, 1-66.
- Textor, C., Graf, H., Timmreck, C., Robock, A. 2003. "Emissions from volcanoes." capitulo 7 In: Granier, C., Reeves, C., Artaxo, P., (eds.). *E missions of Chemical Compounds and Aerosols in the Atmosphere*. Kluwer, Dordrecht.
- Thordarson, T., Self, S., Oskarsson, N., Hulsebosch, T. 1996. "Sulfur, chlorine, and fluorine degassing and atmospheric loading by the 1783-1784 AD Laki (Skaftár fires) eruption in Iceland." *Bull.Volcanol.* 58, 205-225.

- Tilling, R.I., 1989. Introduction and Overview. In: Tilling, R.I. (E.d.), Volcanic Hazards. Short course presented at the 28<sup>th</sup> International Geological Congress. American Geophysical Union, Washington DC, 1-8.
- Venegas, S.S., Herrera, F.J. y Maciel F.R. 1985. "Algunas características de la Faja Volcánica Mexicana y de sus recursos geotérmicos." *Geofísica Internacional*, Vol. 24-1, 47-81.
- Vestreng, V., Myhre, G., Fagerli, H., Reis, S., Tarras, oon, L., 2007. "Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe." *Atmos. Chem. Phys.* 7, 3663–3681.
- Volkamer, R.T.E., Geyer, A. and Platt, U. 1998. "Correction of the oxygen interference with UV spectroscopic (DOAS) measurements of monocyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere." *Atmospheric Environment* 32(21):3731-3747.
- Volkamer, R. 2001. "A DOAS Study on the Oxidation Mechanism of Aromatic Hydrocarbons under Simulated Atmospheric Conditions." Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics of the RupertsCarola. Heidelberg, Germany, University of Heidelberg: 196.
- Waitz, P. 1921. "Popocatepetl again in activity." *Am. Journal of Science* 5<sup>th</sup> Ser. Vol.1. 81-85.
- Ware, J.H., Ferris, B.G.J.R. and Dockery, D.W., 1986. Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles on respiratory health of preadolescent children." *American Review of Respiratory Disease*, 133: 834-842.
- Ward, T., Zwick, H. 1975. "Gas cell correlation spectrometer": GASPEC. *Applied Optics*, 14. 2896–2904.
- Weibring, P., Edner, H., Svanberg, S., Cecchi, G., Pantani, L., Ferrara, R., Caltabiano, T. 1998. "Monitoring of volcanic sulphur dioxide emissions using differential absorption lidar (DIAL), differential optical absorption spectroscopy (DOAS) and correlation spectroscopy (COSPEC)". *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 67(4), 419-426.
- Williams, D.T. and Kolitz, B.L. 1968. "Molecular Correlation Spectrometry", *Applied Optics*, 7.
- Williams-Jones, G., Stix, J. and Hickson, C. 2008. "The COSPEC Cookbook: Making SO<sub>2</sub>Measurements at Active Volcanoes." IAVCEI, *Methods in Volcanology*, 1.
- Wellburn, A., 1994. "Air Pollution and Climate Change: the biological impact." Addison Wesley Longman Limited, Harlow, 268 pp.

- Zellner, J., Baumgärtel, H., Grünbein, W. and Ensel, F. 1999. "Global Aspects of Atmospheric Chemistry." Darmstadt: Springer.