



Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

ISSN: 1405-3322

Sociedad Geológica Mexicana, A.C.

Jiménez-Escalona, José Carlos; Monsivais-Huerta, Alejandro;
Delgado-Granados, Hugo; Huerta-Chavez, Oliver Maciel
Comparación del flujo de emisión de SO₂ derivadas de COSPEC y MODIS y su
complementariedad en el monitoreo volcánico: caso de estudio en el Volcán Popocatepetl (México)
Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 70, núm. 3, 2018, pp. 709-729
Sociedad Geológica Mexicana, A.C.

DOI: <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a7>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94358881007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Comparación del flujo de emisión de SO₂ derivadas de COSPEC y MODIS y su complementariedad en el monitoreo volcánico: caso de estudio en el Volcán Popocatepetl (México)

José Carlos Jiménez-Escalona, Alejandro Monsivais-Huerta, Hugo Delgado-Granados, Oliver Maciel Huerta-Chavez

José Carlos Jiménez-Escalona

jjimenez@ipn.mx

Alejandro Monsivais-Huerta

Oliver Maciel Huerta-Chavez

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional, Av. Ticomán 600, San José Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero, 07340 CDMX, México.

Hugo Delgado-Granados

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 CDMX, México.

RESUMEN

Uno de los principales elementos monitoreado en las emisiones volcánicas es el SO₂, debido al contraste en las concentraciones que emite un volcán comparado con el presente de fondo en la atmósfera. Se han desarrollado diferentes metodologías a partir de técnicas de percepción remota desde tierra y desde el espacio. En particular, la técnica COSPEC se ha utilizado eficientemente desde vehículos permitiendo la obtención de la tasa de emisión de SO₂ con errores relativos estimados entre $\pm 13\%$ a $\pm 42\%$. Sin embargo, la logística requerida para realizar campañas de medición continuas en la zona del Popocatepetl sólo permite la obtención de información 2 ó 3 veces al mes y sólo en horas con luz de día. Otro tipo de metodología es el procesamiento de imágenes satelitales en el infrarrojo térmico. En este caso, el uso de imágenes MODIS permite la obtención de información de SO₂ diaria tanto en imágenes tomadas en horas con luz de día o durante el periodo de noche, lo que permite una resolución temporal máxima de dos imágenes por sensor en la zona de estudio (máximo 4 imágenes diarias). Con el propósito de utilizar información de ambas técnicas para la construcción de series de tiempo del comportamiento del flujo de SO₂, se propone utilizar los valores de medición del sensor COSPEC como elemento de referencia y con esta información identificar dentro de la imagen MODIS la zona de la pluma que fue muestreada con COSPEC y con estos valores proponer una metodología de ajuste para la reconstrucción de la información. En el periodo de estudio (noviembre de 2006 a febrero de 2007) en el volcán Popocatepetl se presentó un buen ajuste entre las dos técnicas, lo que indica que la propuesta podría ser aplicada para la obtención de ecuaciones de calibración de datos en periodos en donde se cuente con datos simultáneos de los dos sensores.

Palabras clave: monitoreo volcánico, percepción remota, MODIS, COSPEC.

ABSTRACT

One of the main elements monitored in volcanic emissions is SO₂ due to the contrast of concentrations between the volcanos compared to the background of the atmosphere. Different methodologies have been developed from remote sensing techniques from the ground and from space. In particular, the COSPEC technique has been used efficiently from terrestrial vehicles, allowing the emission rate of SO₂ with estimated relative errors of $\pm 13\%$ to $\pm 42\%$ to be obtained. However, the logistics required to carry out continuous measurement campaigns in the Popocatepetl area, allows exclusively 2 or 3 measurements a month and only during daylight hours. Another type of methodology based on remote sensing is the processing of satellite images in the thermal infrared. In this case, the use of MODIS images allows obtaining daily SO₂ information both in images taken at daylight hours or during the night period, which gives a maximum temporal resolution of images for the sensor in the study area (maximum 4 images per day). In order to construct time series from both techniques, the flux of SO₂ derived from the COSPEC sensor are used as a reference, which allows the MODIS image identification within the area of the plume that was sampled with the COSPEC sensor. We aim to propose an adjustment methodology to reconstruct the information with the aforementioned values. Between November 2006 to February 2007 in the Popocatepetl volcano area, we found a good match between the two techniques, which indicates that the adjustment methodology proposal to obtain data calibration equations could be applied during periods of time when simultaneous data from both sensors are available.

Keywords: volcano monitoring, remote sensing, MODIS, COSPEC.

BOL. SOC. GEOL. MEX. 2018

VOL. 70 NO. 3

P. 709 – 729

<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a7>

Manuscrito recibido: Octubre 7, 2017.

Manuscrito corregido: Diciembre 21, 2017.

Manuscrito aceptado: Enero 15, 2018.

1. Introducción

La medición de las emisiones constantes de dióxido de azufre (SO_2) es una piedra angular del monitoreo de los volcanes activos. Los volcanes se consideran una de las mayores fuentes naturales de SO_2 a nivel mundial, emitiendo a la atmósfera 23 ± 2 millones de toneladas métricas anualmente (Carn *et al.*, 2017). Por otro lado, las bajas concentraciones de fondo del SO_2 en la atmósfera (~ 1 ppbv en el aire claro; Breeding *et al.*, 1973) y sus firmas espectrales distintivas tanto en la región del ultravioleta (UV) como en la región del infrarrojo térmico (TIR, por sus siglas en inglés), permiten una detección mucho más eficiente al utilizar métodos de percepción remota, a diferencia de otros volátiles volcánicos más abundantes en la pluma como el agua (H_2O) o el dióxido de carbono (CO_2), debido a que estos elementos se encuentran en mayor concentración en la atmósfera (Edmonds, 2003; Oppenheimer *et al.*, 2011). Las mediciones continuas de SO_2 permiten comprender el almacenamiento y la liberación de volátiles a partir de magmas y, por lo tanto, los controles dinámicos y químicos sobre las erupciones volcánicas. Esto hace que el monitoreo del SO_2 sea un componente clave en la mitigación del riesgo volcánico y el pronóstico potencial de una erupción (Edmonds, 2003; Shinohara, 2008; Galle *et al.*, 2010; Jimenez-Escalona *et al.*, 2011; Oppenheimer *et al.*, 2011).

La magnitud física más utilizada para el monitoreo volcánico es generalmente el flujo de SO_2 (expresado en T/día o kg/s), el cual, combinado con otros sistemas de monitoreo y datos (p. ej. sismicidad), proporciona una amplia visión de la dinámica del comportamiento interno de un volcán. Los cambios en la emisión del flujo de SO_2 se usan frecuentemente como un precursor de una erupción (Jiménez-Escalona *et al.*, 2011; Werner *et al.*, 2012). La interpretación de las variaciones del flujo de SO_2 puede ayudar a identificar procesos volcánicos importantes, en particular: (a) reabastecimiento del sistema magmático con material joven (Caltabiano *et al.*, 1994), caracterizado por

un aumento gradual del flujo de SO_2 medido durante un período de tiempo relativamente largo; (b) agotamiento de los elementos volátiles de un cuerpo de magma, estos procesos están marcados por una disminución gradual del flujo de SO_2 (Kazahaya *et al.*, 2004) y, debido a que los gases constituyen la fuerza motriz de las erupciones volcánicas, generalmente este evento precede al final de un período eruptivo; y (c) la obstrucción del sistema de conducto superior por cristalización de magma (Fischer *et al.*, 2002). Este proceso promueve la acumulación de gas bajo el tapón, hasta su destrucción o fallo cuando se supera su resistencia, lo que se cree que alimenta la actividad denominada “vulcaniana” y “estromboliana” (Iguchi *et al.*, 2008).

Las mediciones del flujo de SO_2 volcánico, utilizando sensores de percepción remota, inició a mediados de los años setenta con el uso del Espectrómetro de Correlación (COSPEC, por sus siglas en Inglés) (Stoiber *et al.*, 1983). El COSPEC es un sensor que utiliza la radiación ultravioleta entre 300 y 330 nm dispersada por la atmósfera como fuente de radiación. Puede ser utilizado de forma fija para medir los gases de salida del cráter del volcán o se puede montar en un vehículo terrestre o aéreo para la realización de medición en transectos de la pluma. Stoiber *et al.* (1983) calcularon el error relativo de las mediciones de COSPEC entre valores de $\pm 13\%$ y $\pm 42\%$, los cuales incluyen errores tanto instrumentales como metodológicos. En este estudio, se obtuvieron mediciones de COSPEC desde un vehículo terrestre el cual estima las concentraciones de SO_2 tomando mediciones verticales en transectos que cruzan la pluma volcánica como se observa en la Figura 1. La concentración media de la sección tomada de la pluma es multiplicada por la velocidad de la pluma para determinar el flujo de SO_2 de la emisión.

Por otro lado, a principios de los años ochenta se descubrió la capacidad de los sensores satelitales para detectar y estimar las concentraciones de SO_2 volcánico emitidas a la atmósfera (Krueger, 1983); desde entonces, se han desarrollado diferentes

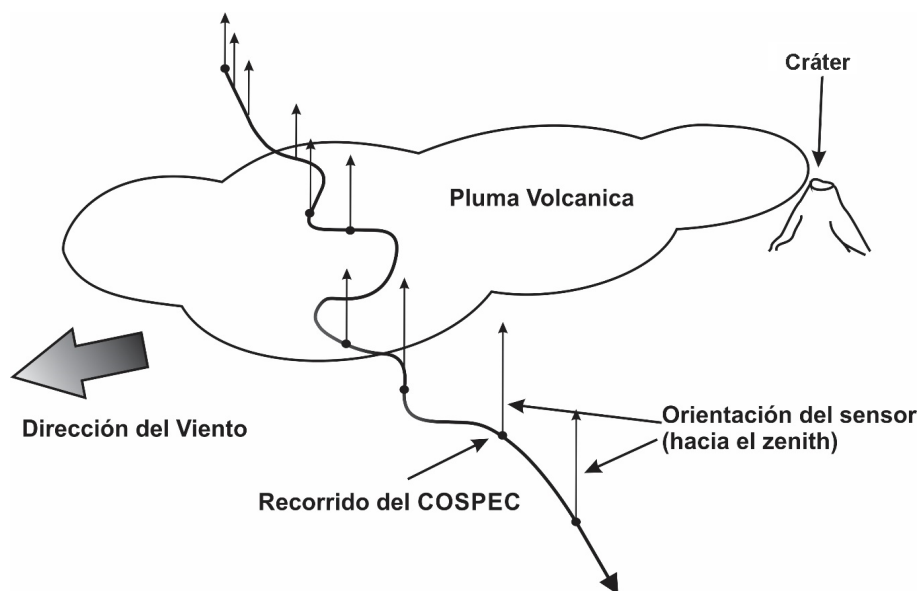


Figura 1 Mediciones de los transectos desde superficie con COSPEC. Los transectos cubiertos por tierra dependen de la disponibilidad de carreteras alrededor de la zona del volcán.

metodologías tanto para sensores que detectan en el UV (p. ej. TOMS, OMI, GOME-2), como para sensores que permiten la detección en el TIR (p. ej. ASTER, IASI, MODIS).

Al tratarse de técnicas de percepción remota, tanto las que utilizan sensores midiendo desde superficie como los sensores satelitales, presentan valores de incertidumbre en las estimaciones que se realizan, dependiendo fuertemente de la distancia de la pluma al sensor y la interacción que presenta la longitud de onda utilizada para la estimación del SO_2 con los elementos de la atmósfera. Por otro lado, un factor muy importante en la calidad de los datos que se obtienen con estas técnicas es la complejidad de la logística que se debe seguir para la adquisición de la información, así como el contar con el personal capacitado para el análisis de ésta. Por esta razón, lo recomendable no es que una técnica sustituya a la otra, sino se debe buscar la manera de complementar la información de un sensor con la que se obtiene con otros.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para ajustar dos técnicas de percepción remota utilizadas para monitorear el flujo de SO_2 en el volcán Popocatepetl, con el propósito de contar con la mayor cantidad de información para la

construcción de series de tiempo con promedios diarios. Las mediciones en superficie con el sensor COSPEC y la estimación de SO_2 por medio de imágenes satelitales del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) son comparadas. Debido a que las mediciones del sensor COSPEC presenta las ventajas de llevar a cabo una medición a menor distancia de la pluma volcánica (~6 a 8 km) y es menos afectada por las condiciones ambientales presentes, se toma como referencia de calibración para corregir el sesgo que se presenta en las estimaciones derivadas de las imágenes MODIS. Por otro lado, las imágenes MODIS detectan el SO_2 en la atmósfera en el rango del infrarrojo térmico permitiendo la obtención de información tanto en el día como en la noche. Este rango de detección permite contar con una resolución temporal de hasta 4 imágenes diarias de la zona del volcán Popocatepetl. Para este ajuste con los valores estimados con COSPEC, se debe tomar en cuenta la baja resolución espacial de las imágenes MODIS (1 km), así como la distancia que debe recorrer la señal que es utilizada para obtener la información (radiación infrarroja de la superficie). Se propone tomar en consideración las ventajas y desventajas de cada sensor

con el propósito de buscar su complementariedad sinérgica que ayude a mejorar las series de tiempo que muestran el comportamiento del volcán.

2. Descripción de los sensores

2.1. SENSOR COSPEC

El sensor COSPEC fue desarrollado en Canadá a principios de los sesenta con el propósito de monitorear los NO_x y el SO_2 de la industria (Horton *et al.*, 2006) y posteriormente también se aplicó para medir SO_2 en plumas volcánicas (Moffat y Millan, 1971; Stoiber y Jepsen, 1973; Stoiber *et al.*, 1983; Delgado-Granados *et al.*, 2001). Millan (2008) describe de manera clara los principios de COSPEC, que usualmente opera en modo pasivo en estudios de monitoreo volcánico. Este sensor es utilizado para estimar la concentración de SO_2 en una pluma volcánica comparando la extinción de radiación electromagnética en el rango de longitud de onda de $300 \leq \lambda \leq 330 \text{ nm}$. COSPEC requiere de la observación de la radiación UV difusa en la atmósfera, la cual puede ser recolectada en un punto estacionario o una plataforma móvil, tanto aérea como por tierra. Cuando el instrumento es transportado por un vehículo, se hacen mediciones en transectos de la pluma perpendiculares al desplazamiento de esta, estimando la abundancia de SO_2 en la columna en el campo de vista del instrumento. El sensor que se coloca en un vehículo terrestre apunta de forma vertical a la pluma de SO_2 , como se muestra en la Figura 1, para estimar la concentración de SO_2 en la vertical. El éxito de esta metodología depende de la intensidad de radiación solar en la atmósfera y de la disponibilidad de carreteras o caminos alrededor del volcán que permitan la medición de los transectos de la pluma volcánica. Debido a que el instrumento sólo ve una pequeña porción de la pluma para la estimación del flujo diario de SO_2 , se toma el promedio de varios transectos medidos durante las horas del día mientras la luz del sol es óptima para el uso del instrumento. Además, para la esti-

mación del flujo de SO_2 es muy importante considerar la componente perpendicular del vector de viento a la altitud de la pluma de SO_2 en cada uno de los transectos. Este dato podría obtenerse de estaciones meteorológicas o aeropuertos locales relativamente cercanos a la zona de monitoreo. Sin embargo, un método más preciso y confiable implica determinar las características del viento en la zona donde se mide el transecto, ya sea por observación o con apoyo de instrumentos de medición en el caso de ser posible (Williams-Jones *et al.*, 2008).

2.2. SENSOR MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites NASA Terra-I y Aqua-I los cuales recorren trayectorias en órbita polar a una altitud de 705 km sobre el nivel del mar (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). El sensor tiene un ángulo de visión de $\pm 55^\circ$ que permite cubrir zonas con un ancho de banda de 2330 km lo que permite realizar una cobertura global completa cada dos días. MODIS es un sensor multispectral que adquiere información en 36 bandas de detección desde la región del visible hasta el infrarrojo térmico ($0.405 \mu\text{m}$ a $14.385 \mu\text{m}$) y su resolución espacial varía entre 250, 500 y 1000 m. Las bandas del sensor MODIS utilizadas para las observaciones de productos volcánicos son B28 ($7.3 \mu\text{m}$), B29 ($8.5 \mu\text{m}$), B31 ($11.0 \mu\text{m}$) y B32 ($12.0 \mu\text{m}$) con una resolución espacial de 1 km. Su amplia cobertura espectral permite que MODIS sea de los pocos sensores que en la actualidad pueden detectar tanto SO_2 como ceniza volcánica (Watson *et al.*, 2004; Matiella-Novak *et al.*, 2008; Jiménez-Escalona *et al.*, 2011). El algoritmo de detección de SO_2 en imágenes multispectrales en el infrarrojo térmico fue descrito por primera vez por Realmuto *et al.* (1994) para el espectrómetro aerotransportado TIMS (Thermal Infrared Multispectral Scanner). Posteriormente, esta técnica ha sido utilizada por diversos autores para aplicarla a sensores satelitales como es el caso de MODIS (Watson *et al.*, 2004). Las ventajas que presenta la detección en el infrarrojo térmico son,

que debido a la naturaleza de la emisión de esta radiación electromagnética, la detección de productos volcánicos se puede hacer con imágenes que son tomadas tanto de día como de noche. Para el caso de la zona de estudio, los sensores MODIS embarcados en Terra-I y en Aqua-I permiten la detección de imágenes durante las horas de día (entre las 11:00 y las 15:00 hora local) y durante las horas de noche (entre las 23:00 y las 4:00 hora local), por lo que se puede tener un máximo de 4 imágenes diariamente. Por otro lado, la desventaja que presenta este tipo de algoritmos para imágenes en el infrarrojo térmico, es la fuerte interacción con los elementos contenidos en la atmósfera, principalmente con el vapor de agua en la zona de detección de 7.3 μm . Por esta razón, en la zona de la troposfera se recomienda el uso de la zona de detección de 8.6 μm (Realmuto y Worden, 2000; Watson *et al.*, 2004).

3. Actividad del volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl (19.02°N, 98.62°W, 5425 msnm) se encuentra a ~70 km al sureste de la Ciudad de México y ~40 km al oeste de la ciudad de Puebla, y se encuentra rodeado de cientos de medianos y pequeños poblados en un radio de 60 km alrededor del volcán (De la Cruz-Reyna y Siebe, 1997; Sheridan *et al.*, 2001). Estudios geológicos muestran que el volcán Popocatepetl ha presentado grandes erupciones en los últimos 15000 años, los cuales son descritos en Siebe *et al.* (1996). Los eventos eruptivos de mayor intensidad en los últimos 800 años ocurrieron en 1510, 1519, 1540, 1580, 1664 y 2001, ocasionando caídas generalizadas de cenizas que afectaron tanto a las zonas pobladas como rurales (Martin-Del Pozzo *et al.*, 2016). Por otro lado, estos estudios históricos han mostrado que la duración de los episodios eruptivos han presentado periodos de tiempo de entre menos de un año y más de 30 años, separados por periodos de reposo entre 7 y más de 100 años. El último período eruptivo del volcán Popocatepetl ocurrió entre 1920 – 1927 y después de este,

tuvo un lapso de reposo de alrededor de 70 años (Delgado-Granados *et al.*, 2001). El volcán presentó un aumento notorio de su actividad fumarólica a partir de 1990. Durante el año de 1993, se observó un aumento de la actividad interna del volcán, representado por el aumento de frecuencia y magnitud de micro-sismos, así como por las emisiones de gases a la atmósfera. Mediciones hechas por Goff *et al.* (1998) y Delgado-Granados *et al.* (2001) muestran que las tasas de emisión de SO_2 aumentaron de ~2000 ton/día en 1994 a ~50000 ton/día en 1997 hasta llegar a valores de 100000 ton/día a principios de 2001. A partir de los episodios de enero de 2001, la actividad eruptiva del Popocatepetl comenzó a descender gradualmente hasta 2007. El Centro de Aviso de Ceniza Volcánica de Washington (VAAC, por sus siglas en inglés), reportó en 2001, 49 erupciones y en 2007 sólo se reportaron 8, número que se mantuvo hasta 2011 en donde se reportaron más de 14 erupciones explosivas que depositaron ceniza en la atmósfera.

4. Metodología

4.1. ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SO_2 CON COSPEC

Debido al principio de detección del sensor COSPEC, es importante considerar las condiciones de luz solar para determinar el mejor momento para llevar a cabo las mediciones. Para el caso del volcán Popocatepetl, el mejor momento para realizar las mediciones con COSPEC se presenta entre las 10:00 y 14:00 hora local (Delgado-Granados, 2008). Es durante este tiempo que los transectos de la pluma volcánica son obtenidos al pasar al sensor por debajo de ésta. Para lograrlo, es necesario seguir varios caminos que rodean el volcán dado que la dirección de la pluma puede presentarse en varias direcciones a lo largo del año. Como se muestra en la Figura 2, el sistema de carreteras que rodean al volcán permite llevar a cabo mediciones en cualquier dirección que presente la pluma.

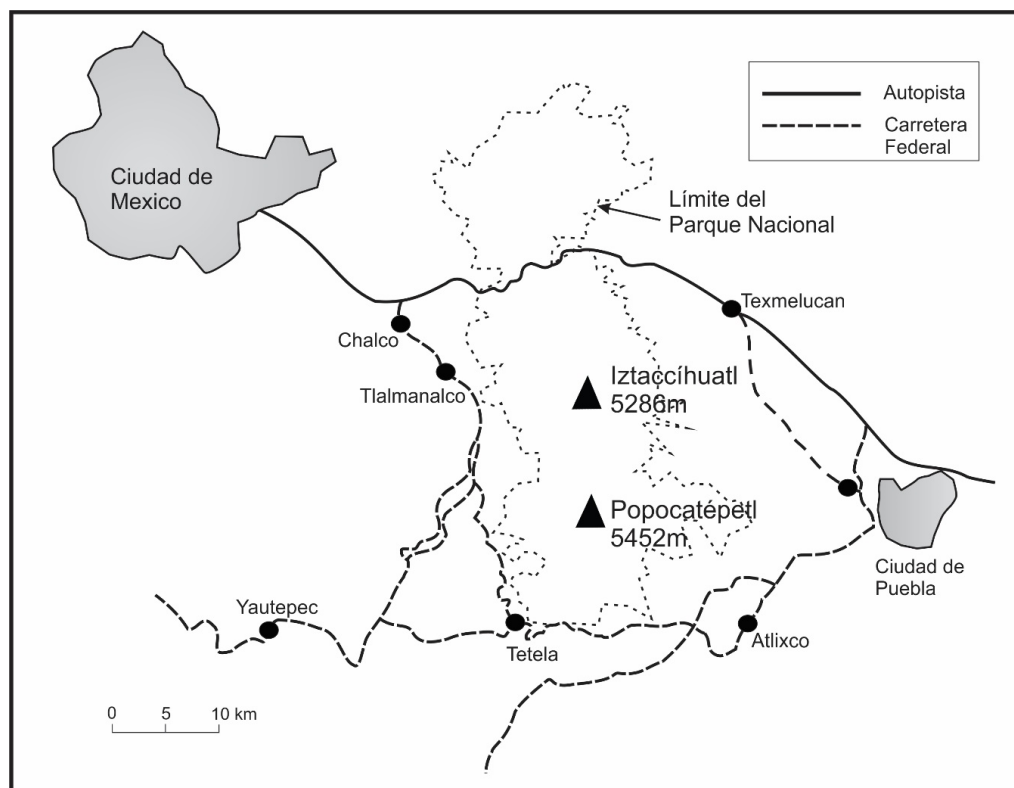


Figura 2 Mapa de carreteras en la zona del volcán Popocatepetl utilizados para las mediciones con COSPEC.

La información de la medición del transecto de la pluma se registra, así como el tiempo de inicio y final de cada uno de ellos y la distancia de la medición al cráter del volcán. Un punto importante que se debe considerar para la obtención del flujo diario de SO_2 a partir de la medición de transectos de una pluma volcánica, es que la emisión de gases en el cráter no mantiene un flujo continuo en el tiempo. Es muy común la presencia de intervalos de aumento y descenso de la cantidad de gases que son emitidos en función de los procesos de la actividad interna del sistema. Estos cambios de la concentración de gases pueden ser identificados a lo largo de la pluma en varias decenas de kilómetros. Por esta razón, para calcular la tasa de emisión promedio diaria, durante el tiempo que se llevan a cabo las mediciones, se realizan el mayor número de transectos posibles de la pluma volcánica. Debido a lo ancho de la pluma y la velocidad que se puede desplazar el vehículo, generalmente se llevan a cabo de 2 a 4 mediciones de transectos.

Para la obtención de los datos de viento, se toma en cuenta que la pluma de gases que emite el volcán Popocatepetl se transporta en altitudes arriba de los 5000 m. Al encontrarse en la atmósfera libre se considera que no hay una influencia importante de la capa límite planetaria y por consiguiente las características del viento no cambian significativamente a nivel de mesoescala. Por lo que, para las estimaciones en la zona del volcán Popocatepetl se utilizan los datos de los sondeos atmosféricos generados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en la estación de la Ciudad de México (19.40°N , 99.20°O), reforzando esta información con estimaciones visuales en campo (Delgado-Granados *et al.*, 2001).

El cálculo del flujo de SO_2 en cada transecto se obtiene estimando la concentración promedio de este, multiplicado por la componente perpendicular del viento y línea de muestreo. Este procedimiento se describe con la Ecuación 1 propuesta por Okita (1971).

$$F = v_h \sin \alpha \int_{C \geq th} C dS \quad (1)$$

Donde F es el flujo de SO_2 , α es el ángulo entre la dirección del viento y la línea de muestreo del transecto, C es la abundancia de SO_2 en la columna, dS es un pequeño segmento de la línea de medición y th es el umbral de abundancia de la columna de SO_2 .

4.2. ESTIMACIONES DEL FLUJO DE SO_2 CON MODIS

Las imágenes de MODIS utilizadas en este trabajo fueron descargadas de las bases de datos de NASA (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>). Este sitio web permite al usuario seleccionar el tipo de datos de satélite, la ubicación de la imagen deseada basada en la latitud y longitud, y el tiempo de la imagen deseada. MODIS captura 288 imágenes cada día alrededor de la Tierra. Bajo condiciones ideales, sería posible obtener 4 imágenes al día, aunque en la mayoría de los casos, no se pueden obtener más de 2 imágenes. Sin embargo, las condiciones de baja o nula nubosidad en la zona de estudio generalmente no se satisfacen durante la estación de lluvia (junio a agosto).

Para recuperar la masa total de SO_2 y el área de la pluma volcánica de las imágenes MODIS, se empleó el programa MAP_SO2 (Realmuto y Worden, 2000). Este software fue diseñado como una herramienta de análisis de datos de imágenes en el infrarrojo térmico, tanto de sensores aerotransportados como adquiridos desde satélites. El procedimiento de recuperación de la información de la imagen se basan en una versión personalizada del modelo de transmisión atmosférica MODTRAN® (MODERate resolution atmospheric TRANsmision) (Berk *et al.*, 2004; Berk, 2013), el cual es una aplicación estándar reconocida para el modelado de transferencia radiativa.

El programa detecta la cantidad de radiancia que es absorbida por el SO_2 presente en la atmósfera en una longitud de onda de $\sim 8.6 \mu\text{m}$ (Realmuto *et al.*, 1994; Realmuto y Worden, 2000). El éxito de esta técnica depende de una eficiente carac-

terización de: (i) la superficie debajo de la pluma volcánica, (ii) la atmósfera en la trayectoria de la superficie a sensor, y (iii) la geometría de la pluma (altura y espesor). El espectro de radiación térmica infrarroja observado por el sensor $L_s(\lambda, T_s)$, puede ser representado por el modelo simplificado mostrado en la ecuación 2 (Realmuto *et al.*, 1994):

$$L_s(\lambda, T_s) = \left\{ \varepsilon_g(\lambda) B(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon_g(\lambda)) L_d(\lambda) \right\} \tau_a(\lambda) + L_u(\lambda) \quad (2)$$

Donde, T_s y $\varepsilon_g(\lambda)$ representan la temperatura y la emisividad superficial y $B(\lambda, T_s)$ representa la Ecuación de Planck para la radiancia del cuerpo negro. El producto de $\varepsilon_g(\lambda)$ y $B(\lambda, T_s)$ describe la radiancia superficial, que es atenuada por la transmisión atmosférica $\tau_a(\lambda)$, en el camino recorrido al sensor. La presencia de una pluma volcánica se expresa principalmente a través de la absorción de esta radiación de la superficie. Sin embargo, las contribuciones del flujo de radiación dispersa que llega a la superficie $L_d(\lambda)$ y es reflejada, así como la que viaja hacia el sensor $L_u(\lambda)$ también pueden ser significativas en la estimación de la radiancia en el sensor $L_s(\lambda, T_s)$.

Para la estimación del flujo de SO_2 , se utilizó un derivado del método transversal según la metodología de medición de plumas volcánicas con COSPEC desde una plataforma móvil (Stoiber *et al.*, 1983). Esta técnica se ha aplicado en imágenes de alta y moderada resolución espacial (p. ej. ASTER y MODIS), ya que permite estimar el flujo de SO_2 de pequeñas plumas que luego pueden compararse fácilmente con datos obtenidos de mediciones en tierra (Theys *et al.*, 2013). Los datos del viento en la zona de la pluma se obtuvieron de los datos de reanálisis preparados por el Centro Nacional de Predicción Ambiental y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP/NCAR, por sus siglas en inglés), de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Para aplicar esta técnica, se definen secciones transversales al eje de desplazamiento de la pluma volcánica en planos perpendiculares a la superficie. La formulación general del flujo de masa de

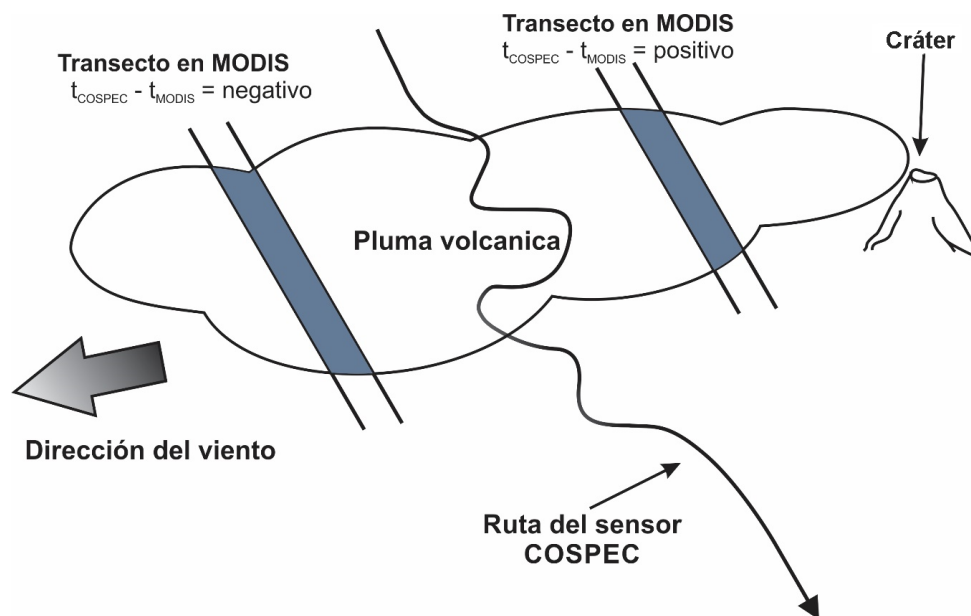


Figura 3 Ubicación de las mediciones de los transectos hechos por COSPEC identificados en las imágenes MODIS. Se muestra como fueron identificadas las secciones de la pluma medidas por COSPEC cuando la imagen MODIS se tomó después de la medición de COSPEC (diferencia negativa) y cuando MODIS se tomó antes de la medición de COSPEC (diferencia positiva).

SO₂ a través de una superficie S de la pluma está dada por la Ecuación 3 (Theys *et al.*, 2013):

$$F = \int_S c \bar{v} \cdot \bar{n} dS \quad (3)$$

Donde c es la concentración de masa de SO₂ (kg/m³), v es el vector de viento y n es un vector unitario normal a la superficie. Integrando sobre la vertical y asumiendo un campo de viento constante, el flujo de SO₂ a través de un transecto puede ser calculado por la Ecuación 4 (Theys *et al.*, 2013):

$$F = \left(\sum_i VC_i l_i \right) v \cos(\theta) \quad (4)$$

Donde VC_i es la concentración en la columna, l_i es la longitud horizontal del i -ésimo píxel del perfil, v la velocidad del viento y θ es el ángulo entre la dirección del perfil y la dirección del transporte. La dirección de la pluma puede ser detectada automáticamente buscando los píxeles alrededor del volcán que tienen la cantidad máxima de columna.

Se debe tomar en cuenta que la metodología de COSPEC para la estimación del flujo diario se basa en el promedio de los transectos tomados en

la pluma durante el día. Para el caso de una imagen satelital, se podría suponer un número n de transectos que permitan considerar detalles que se presentan en un flujo heterogéneo. Una modificación en las ecuaciones 2 y 3 podrían expresarse respectivamente como (Ecuación 5 y Ecuación 6):

$$F_{prom} = \frac{\int_L \int_S c v \cdot n dS dL}{L} \quad (5)$$

$$F_{prom} = \frac{\sum_j^m [(\sum_i VC_i l_i) v \cos(\theta)]_j}{m} \quad (6)$$

En donde la Ecuación 4 indica la estimación del promedio del flujo lo largo L de la pluma y la Ecuación 5, de forma análoga, indica la estimación del flujo promedio en m transectos dentro de la pluma volcánica.

5. Resultados y discusión

5.1. COMPARACIÓN DE DATOS COSPEC Y MODIS

Los sensores COSPEC y MODIS proporcionan información complementaria que puede usarse

Tabla 1. Flujo de SO₂ de COSPEC en cada transecto individual y flujo de SO₂ de MODIS en el transecto equivalente en la imagen.

Fecha	COSPEC		MODIS		
	Hora de la Medición (UTC)	SO ₂ (flujo ton/día)	Hora de la Imagen MODIS (UTC)	Distancia al cráter del volcán	SO ₂ (flujo ton/día)
24/01/2006	17:14 hrs	2487	17:20 hrs	16 km	2854
	19:03 hrs	1740		22 km	2518
09/02/2006	17:48 hrs	4656	20:25 hrs	7 km	9894
	20:38 hrs	4079		11 km	4935
	21:06 hrs	2247		22 km	2312
21/02/2006	17:50 hrs	2820	17:45 hrs	30 km	3855
	19:51 hrs	2775		32 km	3133
	21:22 hrs	3387		36 km	4490
07/11/2006	18:39 hrs	5335	19:45 hrs	42 km	6081
	20:47 hrs	7632		14 km	11476
21/11/2006	18:01 hrs	5576	19:55 hrs	47 km	9834
	22:16 hrs	2824		13 km	5852
05/12/2006	19:06 hrs	3625	20:10 hrs	60 km	5544
	20:57 hrs	3709		14 km	3937
13/02/2007	19:13 hrs	5449	19:35 hrs	35 km	4467
	20:26 hrs	6562		2 km	11757
27/02/2007	20:12 hrs	3006	19:45 hrs	14 km	5350
20/03/2007	18:19 hrs	4328	16:55 hrs	34 km	5833
	20:33 hrs	3589		38 km	5004

como una herramienta de monitoreo más robusta. El sensor COSPEC presenta menos interferencia con los elementos de la atmósfera, y una mayor precisión en los datos debido a la corta distancia entre la pluma volcánica y el instrumento. Por otro lado, las imágenes satelitales del sensor MODIS muestran una cobertura espacial mucho más amplia la cual permite observar plumas volcánicas de varias decenas de kilómetros. También permite obtener información durante el día y la noche con un bajo costo de operación y una alta resolución temporal (hasta 4 imágenes de la zona del volcán diariamente).

Es importante notar que hay varias dificultades para lograr una comparación objetiva de los métodos COSPEC y MODIS. Por un lado, estamos tratando de comparar datos de concentración de SO₂ obtenidos en dos ventanas de detección del espectro electromagnético en regiones diferentes (UV y TIR). Además, estos sensores se encuentran

ubicados en diferentes tipos de plataformas (tierra vs. satélite) y por consecuencia la interacción de la radiación con los elementos de la atmósfera son diferentes. Trabajos previos de comparación de los dos métodos (Matiella-Novak *et al.*, 2008), usan transectos obtenidos en la imagen MODIS en las zonas donde se llevan a cabo los pases del vehículo que transporta al COSPEC, sin tomar en cuenta el comportamiento irregular de la emisión del flujo de SO₂ en el cráter del volcán. También se han desarrollado trabajos de comparación de concentración de SO₂ emitida a la atmósfera, con datos obtenidos por redes de monitoreo fijas en tierra utilizando sensores DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), y concentraciones estimadas con el uso de imágenes satelitales (Spinetti *et al.*, 2014). En el trabajo desarrollado por Spinetti *et al.* (2014) reportan que encontraron una diferencia del 10% al comparar los datos obtenidos en tierra con la red de sensores DOAS y los datos

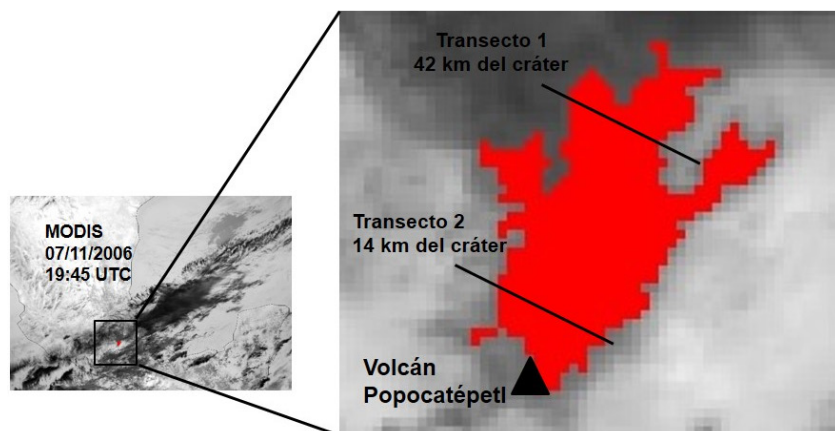


Figura 4 Transectos de la pluma de SO_2 medidos con COSPEC para el día 7 de noviembre de 2006 a las 18:39 UTC (transecto 1) y a las 20:47 UTC (transecto 2) identificados en la imagen MODIS tomada el mismo día a las 19:45 UTC.

obtenidos con imágenes MODIS. Por otro lado, al correlacionar los datos del flujo estimado con ambas técnicas, obtuvieron un coeficiente de 0.84. En este trabajo, se propone una metodología basada en la reconstrucción del comportamiento histórico del flujo de SO_2 extraído de una imagen de satélite mostrado por Merucci *et al.* (2011), con el propósito de identificar las secciones de la pluma de SO_2 en la imagen MODIS que fueron medidas con COSPEC. Para lograr este acoplamiento, se toma en cuenta la velocidad del viento y la diferencia de tiempo de adquisición entre las mediciones COSPEC y las imágenes MODIS. El propósito de identificar este desfase entre el tiempo de adquisición de los datos de cada sensor es para tratar de asegurar que la zona de la pluma volcánica que midió COSPEC sea identificada en la imagen MODIS. Para identificar los transectos de COSPEC dentro de la imagen MODIS es importante considerar el tiempo de inicio y fin de los transectos, así como las mediciones de la velocidad del viento. Esto permite una ubicación aproximada del área de la pluma medida con COSPEC (medición dinámica) en la imagen MODIS (medición instantánea de todo el evento). La pluma se mueve constantemente por efecto del viento predominante a la altura donde se ubica, por lo que al considerar este efecto sobre la imagen satelital se deberá considerar una relativa inclinación del transecto como se muestra en

la Figura 3. El ángulo de inclinación (θ) dependerá de la velocidad del viento así como del tiempo que se haya tardado COSPEC en llevar a cabo el recorrido del transecto ($\Delta t = t_2 - t_1$). La resolución de cada píxel de MODIS es de un kilómetro mientras que para COSPEC la resolución es de unos pocos metros, por lo que es posible dibujar los transectos medidos con COSPEC después de viajar a través de la pluma dentro de la imagen MODIS como se muestra en las figuras 3 y 4.

La Figura 4 muestra los transectos de las mediciones hechas con COSPEC estimados en la imagen MODIS adquirida el 7 de noviembre de 2006. Los datos obtenidos en cada uno de los transectos individuales se muestran en la Tabla 1. Para el caso analizado anteriormente, se puede observar que uno de los transectos medido por COSPEC se realizó a las 18:39 UTC (tiempo medio de la medición) a una distancia de 34 km del cráter. La imagen MODIS se obtuvo a las 19:45 UTC lo que representa un Δt de 66 minutos. Debido a que la medición COSPEC se obtuvo antes de la imagen MODIS, la zona medida por COSPEC sobre la pluma se encontraba desplazada por el viento alejándola del cráter durante este Δt con una velocidad reportada de 2 m/s. Como se muestra en la Figura 4, el transecto se estimó en la imagen MODIS a 42 km del cráter del volcán. El segundo transecto tomado por COSPEC se obtuvo después de la imagen MODIS, por lo que en esta ocasión

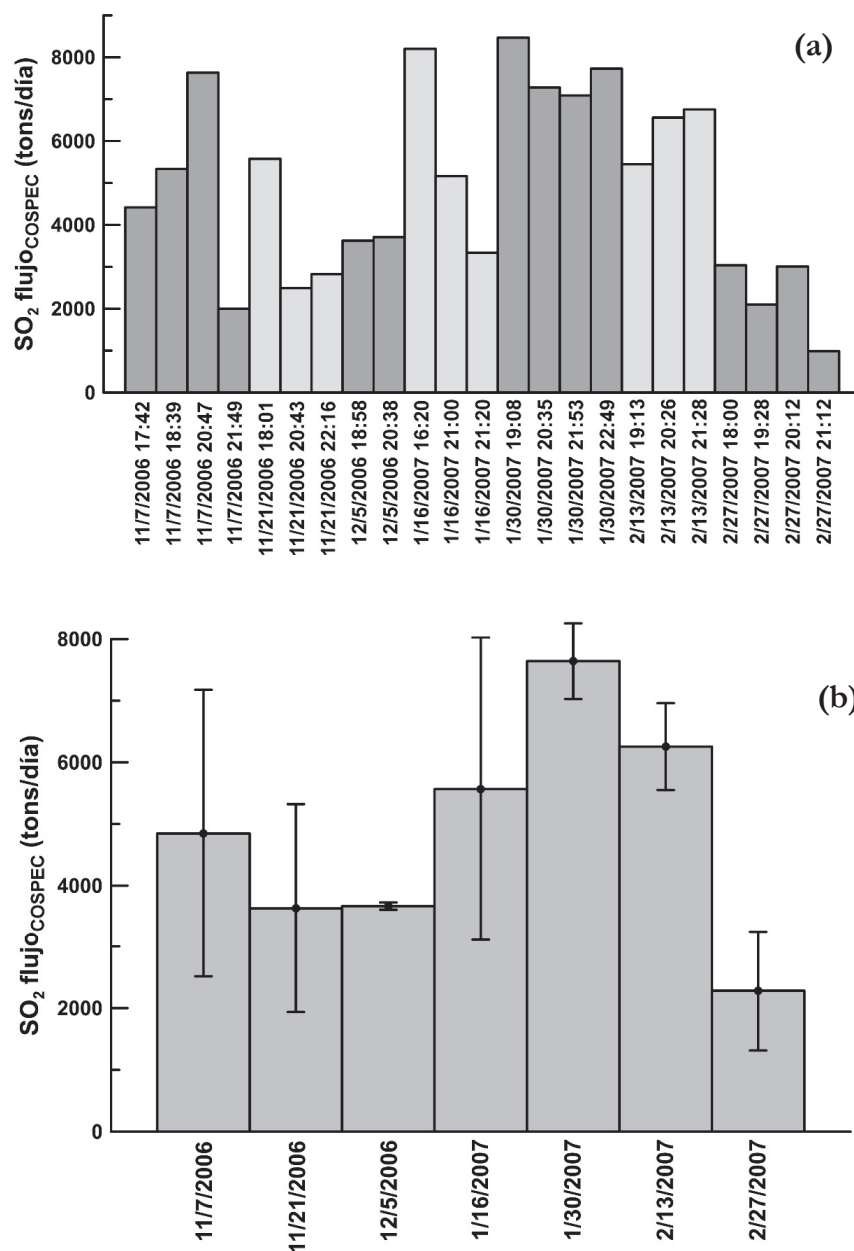


Figura 5 Mediciones del flujo de SO₂ del sensor COSPEC. a) valores del flujo de los transectos individuales tomados con el instrumento y b) promedio diario del flujo de SO₂, en donde se muestra los valores de desviación estándar de las mediciones.

se considera que esta sección de la pluma se encontrara más cerca del cráter en la dirección del desplazamiento del viento. El transecto medido por COSPEC se localizó a 29 km del cráter del volcán en este caso se estimó una velocidad del viento superior de 4 m/s, lo que originó que el

transecto de COSPEC sobre la imagen MODIS se ubicara a 14 km del cráter del volcán.

La Tabla 1 presenta el flujo de SO₂ (ton/día) obtenidos para cada transecto de COSPEC y el transecto equivalente identificado en la imagen MODIS. Similar a Matiella-Novak *et al.* (2008),

Tabla 2. Comparación del flujo promedios diarios de SO₂ estimado con las mediciones de COSPEC y extraídos de las imágenes MODIS

Fecha	COSPEC SO ₂ (flujo ton/día)	COSPEC (desv std)	MODIS SO ₂ (flujo ton/día)	MODIS (desv std)
24/01/2006	2114	528	5798	703
09/02/2006	3478	1090	3394	336
21/02/2006	2994	341	8481	297
07/11/2006	4846	2331	11376	962
21/11/2006	3630	1693	18102	331
05/12/2006	3667	59	2963	365
13/02/2007	6255	705	14194	403
27/02/2007	2282	967	6840	316
20/03/2007	3958	523	5185	493

los resultados muestran que los datos obtenidos de COSPEC y los recuperados de imágenes MODIS se encuentran en el mismo orden de magnitud. Y de igual manera, el flujo de SO₂ estimado en las imágenes MODIS presenta valores mayores que los estimados con los datos obtenidos con COSPEC. Esta sobre estimación en la técnica basada en la detección en el TIR se relaciona con la presencia de especies radiativamente activas, como ceniza y aerosoles, por errores en la geometría de la pluma y las condiciones atmosféricas y la disparidad entre la temperatura del suelo verdadera y aparente (Watson *et al.*, 2004; Matiella-Novak *et al.*, 2008).

La Figura 5a muestra los valores promedios del flujo de SO₂ en cada transecto tomado en los días que se llevaron a cabo campañas de medición con COSPEC. Los valores de cada transecto de la pluma medidos en el mismo día son promediados para obtener el valor del flujo de SO₂ diario de la medición. Estos valores de flujo diario promedio y su desviación estándar son mostrados en la Figura 5b, la cual describe el comportamiento del flujo de SO₂ del volcán Popocatepetl durante el periodo de estudio.

La Figura 5b muestra que los valores del flujo de SO₂, estimados por medio del sensor COSPEC,

durante el periodo de estudio se encontraron entre un mínimo de 2300 ton/día y un máximo de 7600 ton/día. Durante este periodo de noviembre de 2006 a febrero de 2007, se llevaron a cabo 7 días de medición, lo que representa un ~6% de tiempo cubierto con mediciones de flujo de SO₂ con el sensor COSPEC. Esto es debido a las dificultades logísticas para llevar a cabo las campañas de medición con COSPEC, por lo que en la actualidad se realizan una o dos campañas de medición al mes. Además, como ya se había mencionado, es posible obtener información sólo con luz de día, restringiendo aún más los intervalos de tiempo para vigilar el volcán por este método.

La Figura 6 muestra los valores del flujo de SO₂ emitido por el Popocatepetl entre noviembre de 2006 a febrero de 2007. Similar a los datos de COSPEC, en esta serie de tiempo contiene patrones claramente cíclicos del comportamiento del volcán. Una gran ventaja de las imágenes MODIS es de poder construir una base de datos con una alta resolución temporal que permitió obtener datos del flujo de SO₂ en el 88% de los días del periodo. Esto permite detectar cambios en el comportamiento de las emisiones del volcán que podrían ser asociados a una posible erupción explosiva (Jimenez-Escalona *et al.*, 2011). Como se

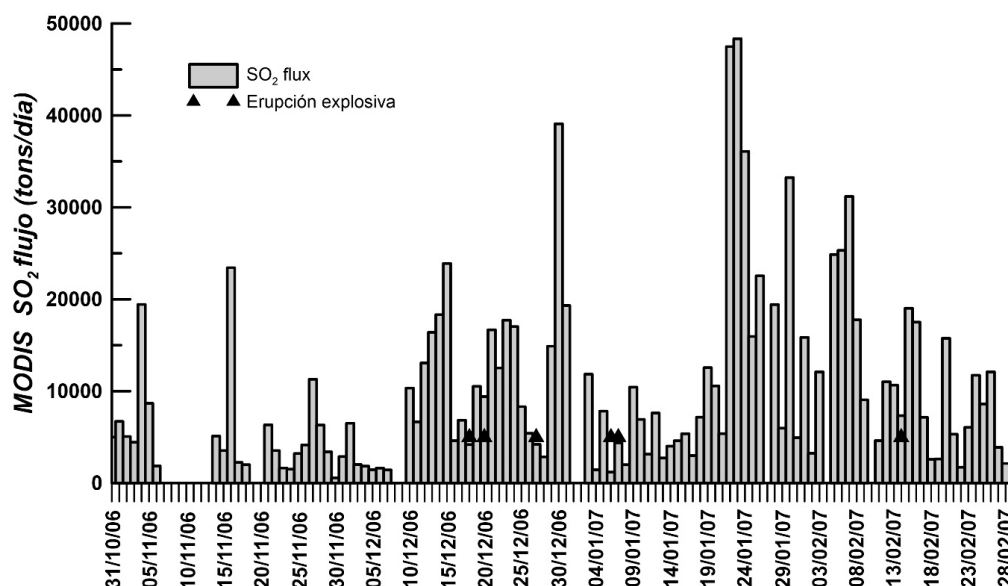


Figura 6 Estimaciones del flujo de SO₂ derivadas de las imágenes MODIS durante el periodo de estudio (noviembre 2006 a febrero 2007). Los triángulos muestran los días que fue reportadas erupciones explosivas con emisión de ceniza.

puede observar en la Figura 6, un aumento en los valores del flujo de SO₂, en algunos casos, anteceden a un evento de erupción explosiva.

Se considera que los valores obtenidos de los transectos de la pluma tomados por COSPEC son comparables a los valores de estos transectos obtenidos en las imágenes MODIS. Por lo que, si ahora se considera el cálculo del flujo promedio en la pluma completa tomada en la imagen MODIS tendremos una aproximación más real con las variaciones del flujo en el volcán. Para estimar el flujo diario de SO₂, se promedian los valores de flujo total obtenido en cada imagen MODIS de ese día. La Tabla 2 muestra la comparación entre los valores promedio diario de los flujos obtenidos con COSPEC y las imágenes MODIS para los días en que la información está disponible para ambas metodologías (enero, febrero, noviembre y diciembre de 2006, enero, febrero y marzo de 2007). Es importante mencionar que mientras los datos de COSPEC en cada medida mostrada en la Tabla 2 se obtuvieron en un periodo de 3-5 horas, la instantánea de una imagen MODIS puede representar el gas emitido durante 5-10 horas con

una visión general del evento, teniendo en cuenta variaciones en el flujo que no pueden ser detectadas con COSPEC.

Al comparar los valores de los flujos estimados a partir de las mediciones de ambos sensores, se identificó un sesgo sistemático entre los valores que dependen de la magnitud del flujo de SO₂. La Figura 7a muestra que la diferencia entre los valores de flujo de SO₂ obtenidos por ambos sensores presenta una tendencia positiva con respecto al valor del flujo estimado de las imágenes MODIS. Como se mencionó anteriormente, ambas técnicas de percepción remota (COSPEC y MODIS) tienen sus propias fuentes de error, relacionadas al tipo de radiación utilizada para detectar la presencia del SO₂. Sin embargo, ambas técnicas se derivan del análisis de la absorción de radiación que cruza la nube de SO₂, la cual es comparada con un valor de calibración en condiciones de ausencia del gas. Esta información transportada por la onda de radiación, es contaminada en el desplazamiento por la atmósfera hasta que ésta llega al sensor. Por lo que, al procesar la información es necesario conocer los elementos que inter-

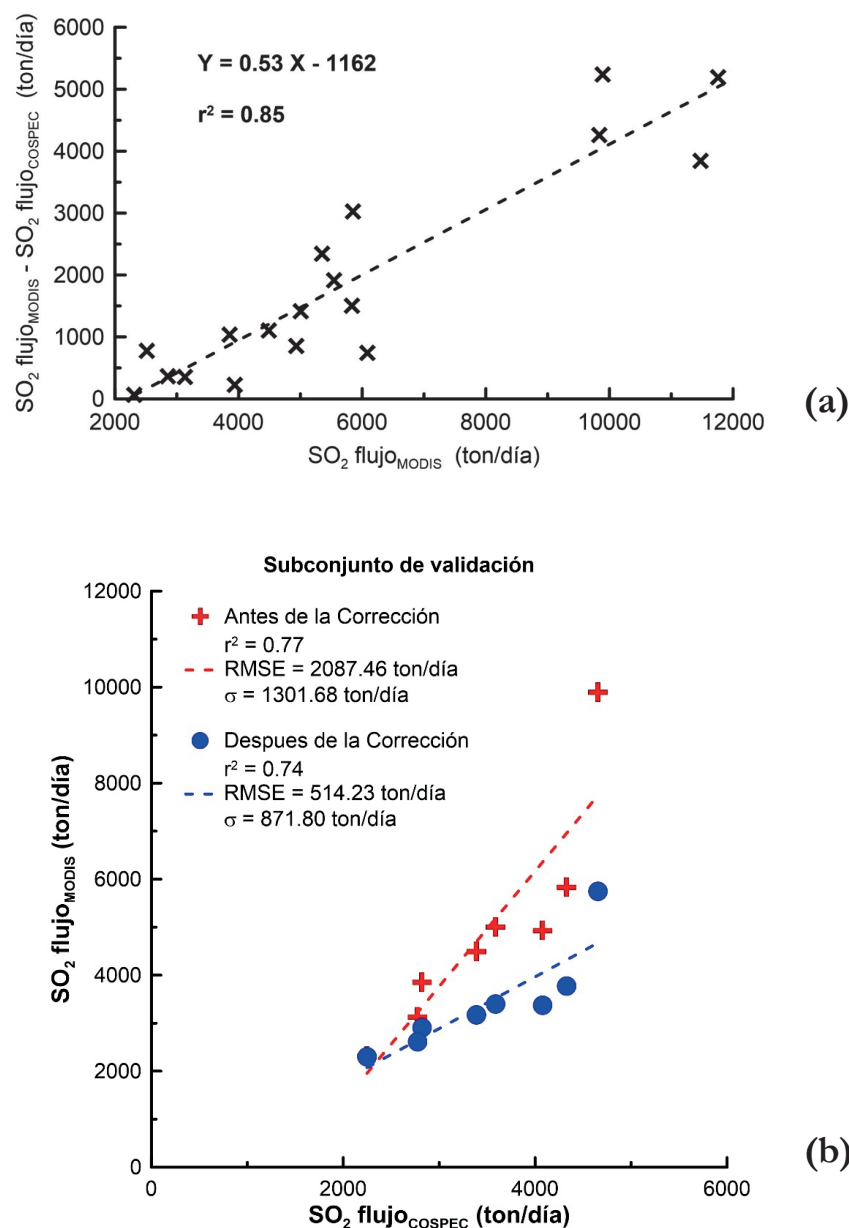


Figura 7 Acoplamiento de los valores de flujo en los transectos individuales estimados con el sensor COSPEC y con las imágenes MODIS: (a) Función de comparación entre las diferencias de los valores de flujo de SO₂ obtenida con ambos sensores y los valores de flujo obtenidos con las imágenes MODIS. (b) Datos seleccionados para calibrar la ecuación para compensar la diferencia de los flujos entre las estimaciones de COSPEC y MODIS. *Continúa en la siguiente página.*

fieren con la señal o tratar de identificar los efectos que producen en la señal con el fin de proponer un método para eliminar o mitigar dichos elementos. La diferencia de los valores de flujo entre los sensores varía entre 65 y 5240 (ton/día) durante el intervalo de estudio. A partir de la base de datos mostrada en la Tabla 1, se seleccionaron aleato-

riamente 11 puntos para calibrar la ecuación y compensar la diferencia entre las estimaciones del flujo de SO₂ con los sensores COSPEC y MODIS (ver Figura 7b). Los restantes 8 puntos se utilizaron para validar la ecuación de corrección de sesgo propuesta (véase la Figura 7c). Como se muestra en la Figura 7a, cuanto más altas son las estima-

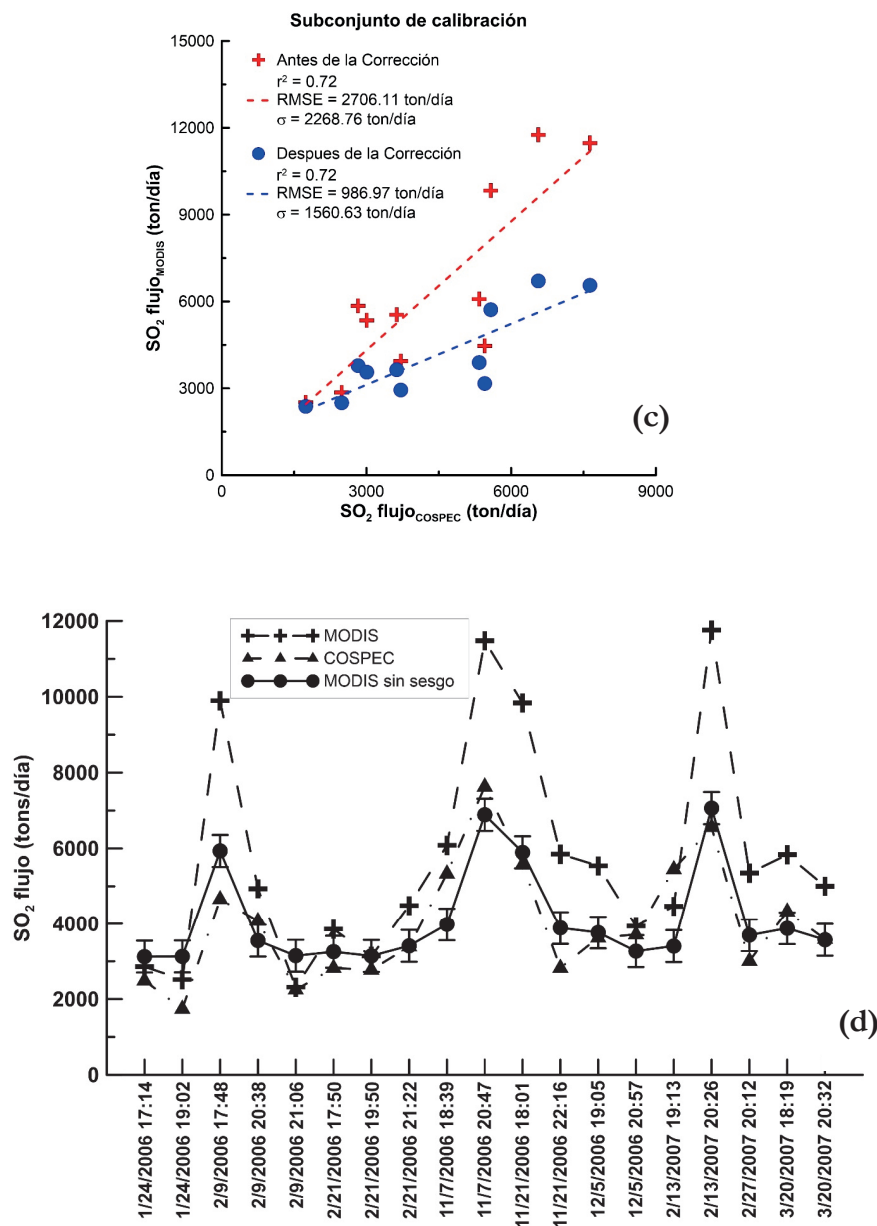


Figura 7 (Continuación) Acoplamiento de los valores de flujo en los transectos individuales estimados con el sensor COSPEC y con las imágenes MODIS: (c) Datos utilizados para validar la ecuación de corrección de sesgo. (d) Comparación entre las estimaciones del flujo estimado en los transectos de COSPEC y los estimados en las imágenes MODIS equivalentes en la hora de la medición.

ciones del flujo de SO₂ de MODIS, mayor es la diferencia. Debido a la pendiente positiva que presenta la recta de ajuste de los datos, esta tendencia de sesgo se puede representar utilizando, ya sea una función exponencial o una serie de potencias (Gentle, 2009). Ambas técnicas de ajuste de curva

fueron probadas para la base de datos de calibración y se observó que el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar eran menores cuando se representaba la tendencia usando series de potencia. Para obtener los coeficientes y el número de términos de la curva, se utilizaron las

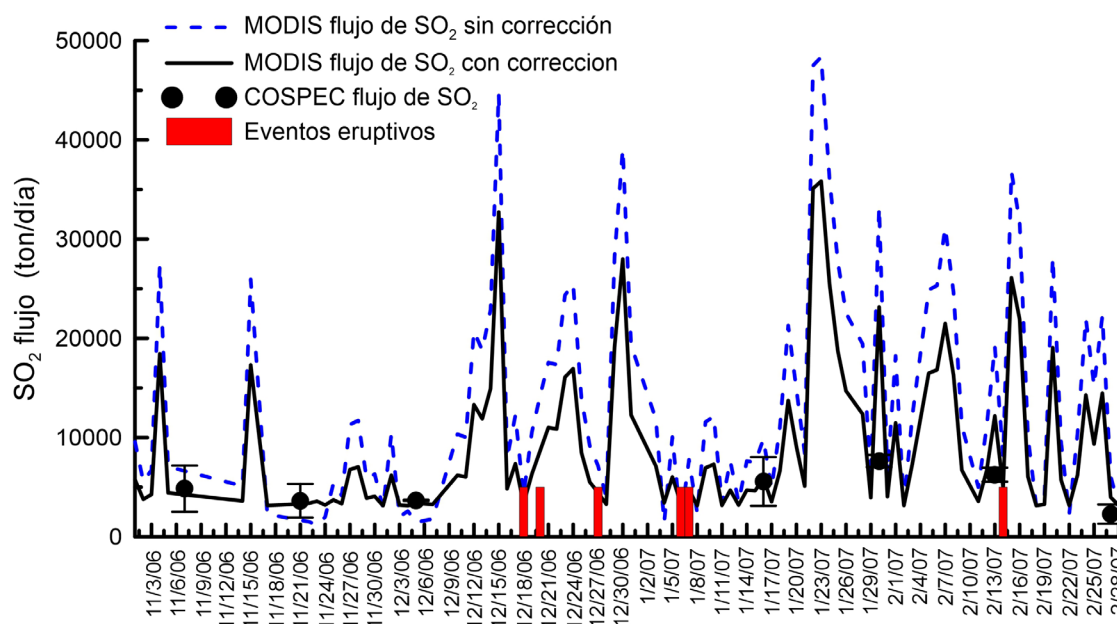


Figura 8 Serie de tiempo del flujo de SO_2 en el periodo de estudio (noviembre 2006 a febrero 2007) estimado utilizando la información proporcionada por la imágenes MODIS (línea punteada), estimaciones de flujo derivadas de las imágenes MODIS con corrección de sesgo (línea continua) y valores de flujo derivado de las mediciones de COSPEC para el volcán Popocatepetl (puntos negros). Se indican los días en lo que se presentó actividad explosiva con presencia de ceniza (barras).

herramientas de MATLAB® versión 2013A. La mejor función de ajuste para representar la tendencia de sesgo es:

$$f(x) = 3.079(x)^{0.82} - 1782 \quad (7)$$

donde x representa el flujo de SO_2 estimado utilizando imágenes MODIS en toneladas por día. Tanto para los subconjuntos de calibración como para los de validación, la aplicación de la ecuación (6) para corregir las estimaciones MODIS reduce el RMSE y la desviación estándar (ver figuras 7b y 7c). En ambos casos, el RMSE se reduce en un 33% y la desviación estándar mejora en un 40% en comparación con las estimaciones MODIS originales. Observamos que esta ecuación puede aplicarse para corregir las estimaciones de MODIS con el fin de acercarlas lo más posible a las observaciones COSPEC cuando la diferencia entre los sensores oscila entre 65 y 5240 ton/día. Para las diferencias superiores a 5240 ton/día, la ecuación necesita ser revisada con una base de datos más amplia y una nueva ecuación podría ser requerida. La Figura 7d

compara las estimaciones de COSPEC, MODIS y MODIS después de eliminar el sesgo mediante el uso de la ecuación (6) para la base de datos completa. Se observa que las estimaciones del flujo de SO_2 de las imágenes MODIS corregidas de sesgo son más cercanos a los valores del flujo de SO_2 estimados de las mediciones de COSPEC y ambos sensores representan una tendencia similar en el tiempo. Particularmente, los picos obtenidos por MODIS redujeron su amplitud para estar en el orden de magnitud de COSPEC.

5.2. MONITOREO DE LAS EMISIONES DE SO_2 DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

La Figura 8 muestra las series temporales de las estimaciones MODIS de la emisión de SO_2 (después de aplicar la Ecuación 6 al conjunto de datos) y las mediciones COSPEC, cuando están disponibles. En esta gráfica, los valores del flujo de SO_2 estimado de las mediciones de MODIS se observan dentro de las barras de variación de los datos de COSPEC durante todo el período estu-

diado. La base de datos COSPEC de 2006 a 2007 muestra valores de emisión de SO_2 por debajo de 10000 ton/día, mientras que las estimaciones MODIS alcanzan valores de alrededor de 40000 ton /día durante los períodos de ausencia de las mediciones COSPEC. La ventaja de contar con una herramienta que puede proporcionar datos para fechas en las que no hay datos de COSPEC es de suma importancia para contar con un seguimiento del comportamiento del volcán. Por otro lado, esta metodología presenta la ventaja de ser de muy bajo costo debido a que las imágenes MODIS son proporcionadas de forma gratuita y el procesamiento para la obtención de la información no requiere de equipo de cómputo de muy alto desempeño pudiéndose procesar en computadores de escritorio.

En los datos presentados en este estudio, se puede observar que desde comienzos de diciembre y hasta finales de febrero, no se habían llevado a cabo mediciones del flujo de SO_2 para el monitoreo de la actividad del volcán Popocatepetl debido a la falta de presupuesto al final del año y la llegada tardía del presupuesto del siguiente año. Esta es una de las razones por la cual se necesita contar con herramientas alternativas que permitan el uso de información de bases de datos de imágenes satelitales. En el presente trabajo, las estimaciones MODIS de las tasas de emisión de SO_2 muestran altos valores a finales de 2006 y principios de 2007. A principios de diciembre de 2006, los registros del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), muestran que hubo un terremoto volcanotectónico seguido de eventos de largo período de amplitudes variables acompañados de temblores volcánicos en las siguientes fechas. El 6 de enero de 2007, el temblor armónico se observó antes de una explosión que arrojó fragmentos balísticos a los alrededores del volcán. Se produjo un temblor más armónico en los días siguientes y cesaron el 14 de enero. Sin embargo, el 25 de enero hubo otra explosión similar a la del 6 de enero. Esta última explosión ocurrió en el pico de emisión de gases medida por la imagen MODIS en un período en el que no se realizaron

mediciones COSPEC entre el 22 y el 27 de enero. La metodología presentada en este trabajo para explotar las imágenes MODIS fue crucial para entender estos eventos. La información sísmica no está incluida porque está fuera de los objetivos de este documento.

6. Conclusiones

Este artículo presenta el análisis comparativo de las mediciones del flujo de SO_2 estimado de las mediciones *in-situ* hechas con el sensor COSPEC y el flujo del SO_2 derivado de las imágenes satelitales del sensor MODIS en el periodo de noviembre de 2006 a febrero de 2007 para el volcán Popocatepetl. En este estudio, se detectó una tendencia sistemática entre los datos del flujo de SO_2 obtenido de las imágenes MODIS y la diferencia entre los valores de flujo obtenidos por ambos sensores. Se observó que cuando el valor del flujo estimado con los datos de MODIS incrementaba su valor, también aumentaba la diferencia con las mediciones de COSPEC, por lo que se propuso una función de corrección de este sesgo con el propósito de minimizar las diferencias entre estas dos estimaciones derivadas de sensores diferentes en el mismo evento volcánico. La función de corrección de sesgo se basa en la suposición de que los datos de COSPEC presentan una mayor precisión que las estimaciones MODIS ya que el sensor COSPEC se encuentra más cerca de la pluma que el satélite y tiene una mayor resolución espacial.

La metodología descrita en este artículo tiene en cuenta la velocidad del viento y la diferencia en el tiempo de recuperación exacta entre las dos técnicas. Las diferencias entre los datos COSPEC y las estimaciones MODIS fueron modeladas con una función de series de potencia, y después de aplicar esta ecuación, el RMSE se redujo en un 33% entre los dos conjuntos de valores. El RMSE obtenido entre los dos conjuntos fue inferior a 571 ton/día. Al acoplar los datos del flujo de los sensores COSPEC y las estimaciones de MODIS corregidas, es posible observar que el volcán Popocatepetl

emitió 5000 ton/día durante la desgasificación volcánica pasiva. Además, la serie temporal de las estimaciones MODIS permitió identificar un período de actividad volcánica (emisión frecuente de SO_2), lo que sugiere la intrusión de material nuevo en el sistema interno del volcán Popocatepetl. Las estimaciones MODIS alcanzan valores de hasta 40000 ton/día durante los períodos de ausencia de las mediciones COSPEC. La ventaja de contar con una herramienta que puede proporcionar datos para fechas en las que no hay datos de COSPEC es crucial para construir una base histórica del comportamiento del volcán lo más detallada posible con el propósito de comprender su propio comportamiento. La metodología presentada en este artículo muestra el potencial de acoplamiento sinérgico de dos técnicas para crear una herramienta robusta que permita un monitoreo continuo de la actividad volcánica y su implementación se puede extender fácilmente a otros volcanes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los revisores del artículo, Dr. Fidel Costa y Dra. Charlotte Barrington, los comentarios y observaciones que permitieron mejorarlo sustancialmente. Se agradece al Ing. Lucio Cárdenas González del CENAPRED, por el apoyo en la obtención de datos de COSPEC. Esta investigación fue apoyada parcialmente por el proyecto IPN-SIP 20161546 de J.C. Jiménez-Escalona.

Referencias

- Berk, A., 2013, Voight equivalent widths and spectral-bin single-line transmittances: exact expansions and the MODTRAN5 implementation: *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 118, 102–120.
- Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Bernstein, L.S., Muratov, L., Lee, J., Fox, M., Adler-Golden, S.M., Chetwynd, J.H.jr., Hoke, M.L., Lockwood, R.B., Gardner, J.A., Cooley, T.W., Lewis, P.E., 2004, MODTRAN5: A reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5425, 341–347.
- Breeding, R.J., Lodge, J.P.jr., Pate, J.B., Sheesley, D.C., Klonis, H.B., Fogle, B., Anderson, J.A., Englert, T.R., Haagenson, P.L., McBeth, R. B., Morris, A.L., Pogue, R., Wartburg, A.F., 1973, Background Trace Gas Concentrations in the Central United States: *Journal of Geophysical Research*, 78(30), 7057–7064.
- Caltabiano, T., Romano, R., Budetta, G., 1994, SO_2 flux measurements at Mount Etna (Sicily): *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 99(D6), 12809–12819.
- Carn, S.A., Fioletov, V.E., McLinden, C.A., Li, C., Krotkov, N.A., 2017, A decade of global volcanic SO_2 emissions measured from space: *Scientific Reports*, 7, 44095.
- De la Cruz-Reyna, S., Siebe, C., 1997, Volcanology; the giant Popocatepetl stirs: *Nature*, 388, 227.
- Delgado-Granados, H. 2008, Large volcanic- SO_2 fluxes: COSPEC measurements at Popocatepetl Volcano (Mexico), in Williams-Jones, G., Stix, J., Hickson, C. (eds.), *The COSPEC Cookbook: Making SO_2 Gas Measurements at Active Volcanoes*: IAVCEI, *Methods in Volcanology*, 1, 191–217.
- Delgado-Granados, H., Cárdenas-González, L., Piedad-Sánchez, N., 2001, Sulfur dioxide emissions from Popocatepetl volcano

- (Mexico): case study of a high-emission rate, passively degassing erupting volcano: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108(1–4), 107–120.
- Edmonds, M., Herd, R.A., Galle, B., Oppenheimer, C., 2003, Automated, high time-resolution measurements of SO₂ flux at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: *Bulletin of Volcanology*, 65(8), 578–586.
- Fischer, T.P., Roggensack, K., Kyle, P., 2002, Open and almost shut case for explosive eruptions: vent processes determined by SO₂ emission rates at Karymsky Volcano, Kamchatka: *Geology*, 30(12), 1059–1062.
- Galle, B., Johansson, M., Rivera, C., Zhang, Y., Kihlman, M., Kern, C., Lehmann, T., Platt, U., Arellano, S., Hidalgo, S., 2010, Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)—A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description: *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 115(D5), D05304.
- Gentle, J.E., 2009, *Computational Statistics*: New York, U.S.A., Springer, 727 p.
- Goff, F., Janik, C.J., Delgado, H., Werner, C., Counce, D., Stimac, J.A., Siebe, C., Love, S.P., Williams, S.N., Fischer, T., Johnson, L., 1998, Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl volcano, Mexico: *GSA Bulletin*, 110(6), 695–710.
- Horton, K.A., Williams-Jones, G., Garbeil, H., Elias, T., Sutton, A.J., Mouginis-Mark, P., Porter J.N., Clegg, S., 2006, Real-time measurement of volcanic SO₂ emissions: validation of a new UV correlation spectrometer (FLYSPEC): *Bulletin of Volcanology*, 68(4), 323–327.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M., Hirabayashi, J., 2008, Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(1), 1–9.
- Jiménez-Escalona, J.C., Delgado-Granados, H., Realmuto, V.J., 2011, Use of MODIS images to study eruptive clouds from Volcán de Fuego de Colima (Mexico) and applications on volcano monitoring: *Geofísica Internacional*, 52(2), 199–210.
- Kazahaya, K., Shinohara, H., Uto, K., Odai, M., Nakahori, Y., Mori, H., Iino, H., Miyashita, M., Hirabayashi, J., 2004, Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse: *Geology*, 32(5), 425–428.
- Krueger, A.J., 1983, Sighting of El Chichón sulphur dioxide clouds with the Nimbus-7 total ozone mapping spectrometer: *Science*, 220(4604), 1377–1379.
- Martin-Del Pozzo, A.L., Rodríguez, A. Portocarrero, J., 2016, Reconstructing 800 years of historical eruptive activity at Popocatepetl Volcano, Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 78, 18.
- Matiella-Novak, M.A., Watson, I.M., Delgado-Granados, H., Rose, W.I., Cárdenas-González, L., Realmuto, V.J., 2008, Volcanic emissions from Popocatepetl volcano, Mexico, quantified using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) infrared data: A case study of the December 2000–January 2001 emissions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1–2), 76–85.

- Merucci, L., Burton, M.R., Corradini, S., Salerno, G.G., 2011, Reconstruction of SO₂ flux emission chronology from space-based measurements: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3–4), 80–87.
- Millán, M.M., 2008, Absorption correlation spectrometry, in Williams-Jones, G., Stix, J., Hickson, C. (eds.), *The COSPEC Cookbook: Making SO₂ Measurements at Active Volcanoes*: IAVCEI, *Methods in Volcanology*, 1, 1–62.
- Moffat, A.J., Millán, M.M., 1971, The application of optical correlation techniques to the remote sensing of SO₂ plumes using skylight: *Atmospheric Environment*, 5(8), 677–690.
- Okita, T., 1971, Measurements of areal emission of SO₂ and NO₂ at Kawasaki Industrial District and of SO₂ emission from Mt. Mihara using a Barringer correlation spectrometer: *Bulletin of the Institute of Public Health*, 20(1), 1, 47–53.
- Oppenheimer, C., Scaillet, B., Martin, R.S., 2011, Sulfur Degassing From Volcanoes: Source Conditions, Surveillance, Plume Chemistry and Earth System Impacts: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 73, 363–421.
- Realmutto, V.J., Abrams, M.J., Bongiorno, M.F., Pieri, D.C., 1994, The use of multispectral thermal infrared image data to estimate the sulfur dioxide flux from volcanoes: a case study from Mount Etna, Sicily, July 29 1986: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 99(B1), 481–488.
- Realmutto, V.J., Worden, H.M., 2000, Impact of atmospheric water vapor on the thermal infrared remote sensing of volcanic sulfur dioxide emissions: A case study from the Pu'u 'O'o vent of Kilauea Volcano, Hawaii: *Journal of Geophysical Research*, 105(B9), 21497–21508.
- Sheridan, M.F., Hubbard, B., Bursik, M.I., Abrams, M., Siebe, C., Macias, J.L., Delgado-Granados, H., 2001, Gauging short-term volcanic hazards at Popocatepetl: *Eos, Transactions of the American Geophysical Union*, 82(16), 185–188.
- Shinohara, H., 2008, Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity: *Reviews of Geophysics*, 46(4), RG4005.
- Siebe, C., Abrams, M., Macias, J.L., Obenholzner, J., 1996, Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future?: *Geology*, 24(5), 399–402.
- Spinetti, C., Salerno, G., Catalbiano, T., Carboni, E., Clarisse, L., Corradini, S., Grainger, R.G., Hedelt, P., Koukouli, M.E., Merucci, L., Siddans, R., Tampellini, L., Theys, N., Valks, P., Zehner, C., 2014, Volcanic SO₂ by UV-TIR satellite retrievals: validation by using ground-based network at Mt. Etna: *Annals in Geophysics*, 57, Fast Track 2, doi:10.4401/ag-6641.
- Stoiber, R.E., Jepsen, A., 1973, Sulfur Dioxide Contributions to the Atmosphere by Volcanoes: *Science*, 182(4112), 577–578.
- Stoiber, R.E., Malinconico, L.L., Williams, S.N., 1983, Use of the correlation spectrometer at volcanoes, in Tazieff, H., Sabroux, J.C. (eds.), *Forecasting Volcanic Events*: Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 425–444.
- Theys, N., Campion, R., Clarisse L., Brenot, H., van Gent, J., Dils, B., Corradini, S., Merucci, L., Coheur, P.-F., Van Roozendaal, M., Hurtmans D., Clerbaux, C., Tait, S., Ferrucci, E., 2013, Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(2), 5945–5968.

- Watson, I.M., Realmuto, V.J., Rose, W.I., Prata, A.J., Bluth, G.J.S., Gu, Y., Bader, C.E., Yu, T., 2004, Thermal infrared remote sensing of volcanic emission using the moderate resolution imaging spectroradiometer: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(1–2), 75–89.
- Werner, C., Evans, W.C., Kelly, P.J., McGimsey, R., Pfeffer, M., Doukas, M., Neal, C., 2012, Deep magmatic degassing versus scrubbing: Elevated CO₂ emissions and C/S in the lead-up to the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3), Q03015.
- Williams-Jones, G., Stix, J., Nadeau, P.A., 2008, Using the COSPEC in the Field, *in* Williams-Jones, G., Stix, J., Hickson, C. (eds.), *The COSPEC Cookbook: Making SO₂ Measurements at Active Volcanoes: IAVCEI, Methods in Volcanology*, 1, 63–120.