



Detección remota de gases volcánicos (SO₂) mediante cámaras multi-espectrales.

Álvaro Amigo Ramos^{1,2}, Florencia Rosas Sotomayor², Carolina Geoffroy Gómez².

(1) Unidad de Geología y Peligros Volcánicos, RNVV, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

(2) Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Fondap 15090013. Santiago, Chile.

* email: alvaro.amigo@sernageomin.cl

Resumen. Mediante técnicas espectroscópicas es posible la determinación de concentración de ciertos gases volcánicos, en particular el dióxido de azufre (SO₂), el cual es considerado una especie gaseosa indicadora de la desgasificación magmática. En este trabajo se presentan los resultados de flujos de SO₂ obtenidos a partir de la detección de éste en penachos volcánicos mediante cámaras multiespectrales infra-roja (IR) y ultra-violeta (UV) en volcanes del norte de Chile.

Palabras Claves:

Dióxido de azufre, penacho volcánico, cámara SO₂, espectroscopía ultravioleta e infrarroja.

1 Introducción

El estudio de la desgasificación pasiva en volcanes es una potencial aproximación a la comprensión de procesos magmáticos al interior de los centros eruptivos y por esta razón corresponde a uno de los métodos de monitoreo volcánico practicado a nivel mundial. En la mayoría de los magmas, el dióxido de azufre (SO₂) corresponde a uno de los gases más abundantes, después del vapor de agua y el dióxido de carbono (CO₂). Dado el alto contraste de concentración existente entre las descargas gaseosas volcánicas y la atmósfera, su detección es utilizada como referencia para el análisis de las emisiones. Actualmente, existen diversas técnicas remotas para detectar y cuantificar la concentración y flujo de dióxido de azufre (COSPEC, DOAS, MULTIGAS), sin embargo, las cámaras multiespectrales permiten una alta frecuencia de muestreo (hasta 1 Hz) además de un estudio bidimensional de las emisiones, lo que permite un análisis espacial detallado de estas. La obtención de imágenes de penachos volcánicos es un método expedito y seguro para obtener abundancias de gases, en particular cuando el acceso a la zona de emisión es complejo o bien durante crisis volcánicas. La detección remota de gases, en este último caso, es el único método que permite realizar inferencias del contenido gaseoso presente en las columnas eruptivas. Por otra parte, el análisis temporal de las imágenes permite un estudio en detalle de las emisiones volcánicas, que puede ser contrastado con otros parámetros de vigilancia volcánica (por ejemplo, sismicidad y deformación).

2 Metodología

La detección de SO₂ utilizando técnicas espectroscópicas, se realiza mediante la captura de radiación proveniente del penacho volcánico y la atmósfera que lo rodea. Antes de ser percibida por el instrumento, la radiación debe filtrarse en los rangos de longitudes de onda en los que este gas presenta máximos de absorción y donde la interferencia por otros gases es menor. Para el caso del espectro infrarrojo esto ocurre alrededor de los 8.6 µm y en el ultravioleta en torno a los 310 nm¹.

La cuantificación de SO₂ se realiza procesando las imágenes adquiridas con valores conocidos de radiación versus concentración. Cada imagen es tratada como una matriz donde un pixel posee un valor de concentración lineal del gas, obteniendo así las "imágenes de SO₂". Finalmente, la estimación del flujo de SO₂ se lleva a cabo integrando la concentración a lo largo de traversas perpendiculares a la dirección de desplazamiento del penacho, en consideración de la velocidad de desplazamiento, estimada desde la misma imagen o bien desde una fuente externa (en este último caso, se asume igual a la velocidad del viento).

2.1. Cámara IR: Nicair

Las imágenes infrarrojas se trabajan en unidad de temperatura de brillo, que se utiliza como simul de la radiación en el cálculo de la concentración de SO₂ (Prata y Bernardo, 2014). Para esto, deben realizarse mediciones con el filtro que absorbe SO₂ (centrado en 8.6 µm) y con el filtro que elimina absorción de vapor de agua (centrado en 10.9 µm).

La concentración lineal se calcula mediante la siguiente ecuación:

¹ El máximo de absorción del SO₂ en el rango infrarrojo es en los 7.3 µm, sin embargo el vapor de agua también absorbe radiación. Para el caso UV, en los 310 nm el ozono también absorbe radiación, por lo anterior la utilización del filtro de 330 nm puede ayudar a reducir esta interferencia.

$$m^* = \rho d = -\frac{1}{k} \cos\theta_c \cos\phi_c \ln(1 - \epsilon) \quad \text{Ec. 1}$$

donde ϵ corresponde a la emisividad efectiva y es el resultado de la combinación de diversas imágenes de temperatura de brillo, en cada filtro, calculada mediante la ecuación Ec. 2:

$$\epsilon = \frac{\left[(\Delta T_{i,j}^p - \Delta T_{i,j}^0) - \Delta T_i^p \left(1 - \frac{\Delta T_{p,i}}{\Delta T_{p,i}^p} \right) \right]}{\Delta T_{p,j} \left(1 - \frac{\Delta T_i^p}{\Delta T_{p,i}^p} \right)} \quad \text{Ec. 2}$$

El principal objetivo del procesamiento de imágenes es su conversión a unidades de temperatura de brillo y luego a concentración lineal. Para esto, se debe conocer la radiación que mide la cámara y su relación con los números digitales que captura el equipo. Dado que el detector de la cámara responde de manera lineal a la radiación, la calibración se lleva a cabo midiendo una fuente de radiación conocida para luego obtener los coeficientes lineales que relacionan los números digitales de las imágenes y radiación percibida. Finalmente, mediante la inversa de la Ley de Planck, se transforma la imagen de radiación en imágenes de temperatura de brillo y mediante la ecuación Ec. 1 se obtiene la concentración

2.2 Cámara UV: Envicam

El procesamiento de las imágenes capturadas con la cámara ultravioleta se basa en la determinación de la radiación mediante la ley de Lambert-Beer (Skoog et al., 2008):

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-L\sigma(\lambda)c] \quad \text{Ec. 3}$$

Donde $I_0(\lambda)$ representa la intensidad inicial emitida por una fuente de radiación, mientras que $I(\lambda)$ es la intensidad de la radiación luego de atravesar una capa de espesor L , que contiene una especie en concentración c . $\sigma(\lambda)$ (conocido) se refiere a la sección del espectro de absorción en una longitud de onda λ . Para determinar la absorción del gas, se mide la razón $I_0(\lambda)/I(\lambda)$, utilizando para el caso de SO_2 un $\lambda=310\text{nm}$.

$$A = c\sigma(310\text{nm})L = \log \frac{I_0(310\text{nm})}{I(310\text{nm})} \quad \text{Ec. 4}$$

Para obtener la concentración, se realizan mediciones a celdas de calibración con concentraciones de SO_2 conocidas. Finalmente, para bajas concentraciones (<2000 ppm), la ley de Lambert-Beer tiene un comportamiento lineal, por lo tanto se interpolan los valores de absorción. El mismo procedimiento puede ser realizado para $\lambda=330\text{nm}$, para disminuir el efecto de la absorción del ozono.

2.2 Estimación de flujo

Las tasas de emisión se calculan integrando la concentración a lo largo de transectas perpendiculares al desplazamiento del penacho, ponderando por la velocidad de desplazamiento del penacho, considerando el tamaño del pixel (ancho, alto u oblicuo) como el diferencial de desplazamiento. En la ecuación Ec. 5 el flujo es calculado en toneladas por día, donde v corresponde a la velocidad en m/s, $c(w)$ es la concentración del gas en ppm, dw es el diferencial y f es el factor de conversión que incluye el paso de ppm a g/m^3 y de kg/s a t/d ,

$$F_{\text{SO}_2} [\text{t/d}] = vf \sum_1^n c(w)dw \quad \text{Ec. 5}$$

3 Resultados

Algunos ejemplos de imágenes procesadas obtenidas a partir de las cámaras IR y UV, se muestran en las figuras 1 y 2 respectivamente. La unidad de medición corresponde a la concentración lineal de SO_2 en ppm (partes por millón por metro), lo que implica la concentración total integrada en la línea de visión.

Una vez determinadas las concentraciones lineales para cada imagen se debe determinar la velocidad de desplazamiento de los gases. Esto se puede realizar mediante el seguimiento de ciertas características identificables en el penacho entre imágenes consecutivas (*feature-tracking*), lo que usualmente se asume equivalente al viento dominante. Esta velocidad se pondera por la masa obtenida a través de la integración de las concentraciones a lo largo de una travesa perpendicular a la dirección de transporte (figura 3).

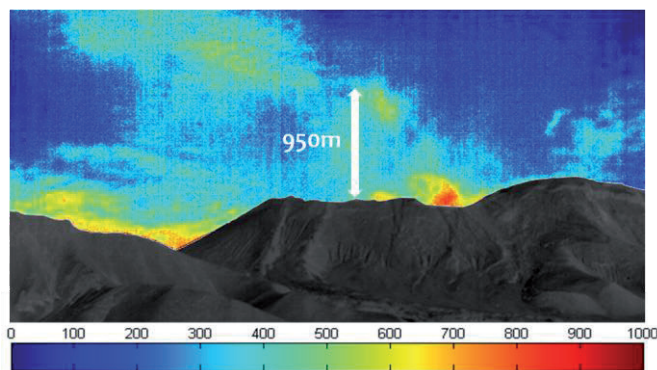


Figura 1. Emisión de SO_2 para el volcán Láscar obtenida con cámara IR desde el flanco norte de éste. La barra de colores horizontal, bajo la imagen, corresponde a la unidad de

concentración lineal (ppmm).

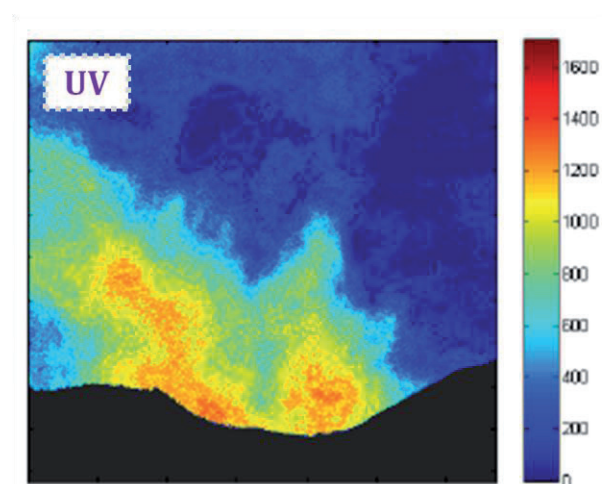


Figura 2. Detalle de la emisión cercana al cráter del volcán Láscar, obtenida mediante una cámara UV, mediante la utilización de los filtros en 310 y en 330nm. La barra de colores vertical, a la derecha de la imagen, corresponde a la unidad de concentración lineal de la imagen (ppmm).

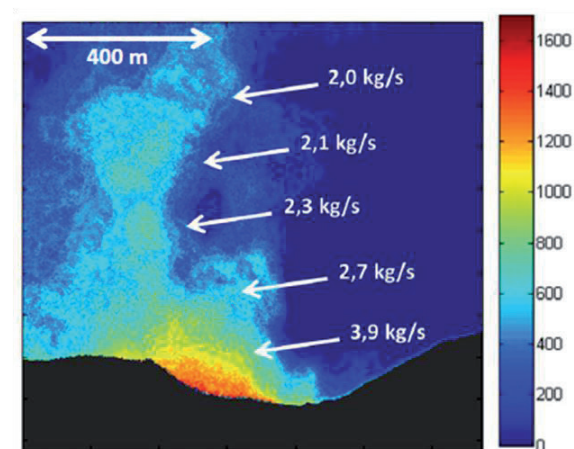


Figura 3. Flujo de gas estimado para 5 travesas en una imagen de SO_2 del volcán Láscar, obtenida mediante una cámara UV. La barra de colores vertical, a la derecha de la imagen, corresponde a la unidad de concentración lineal de la imagen (ppmm).

Un tipo de análisis de utilidad es la determinación de la variación de las emisiones para un punto fijo (figura 4), lo cual permite la evolución temporal de los flujos de SO_2 y por lo tanto una comparación con otras medidas geofísicas de vigilancia volcánica, particularmente con el registro sísmico, tanto en tipo de sismicidad como su magnitud.

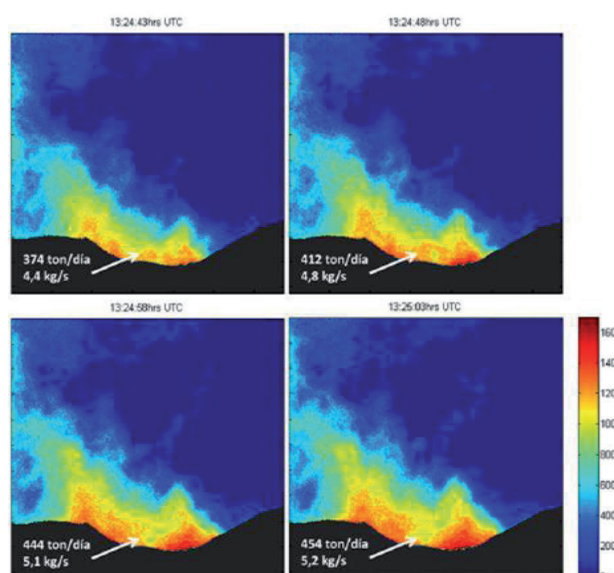


Figura 4. UV. Flujo estimado en la misma posición (travesa) en 4 imágenes de SO_2 consecutivas (20'' en total), para emisiones cercanas al cráter del volcán Láscar. La barra de colores vertical, a la derecha de la imagen, corresponde a la unidad de concentración lineal de la imagen (ppmm).

Visualmente, mediante las imágenes se puede observar la temporalidad en que las emisiones aumentan o disminuyen, lo que se verá reflejado en las diferentes travesas realizadas según la distancia a la que estén desde el centro de emisión. Para obtener la evolución temporal y espacial de las emisiones se pueden graficar las travesas realizadas en un mismo diagrama para así compararlas cuantitativamente.

4 Discusiones

Existe una serie de restricciones que hacen difícil la estimación de flujos gaseosos a partir de los métodos descritos en este trabajo, como por ejemplo la nubosidad existente detrás del penacho (1), la presencia de ceniza (2) la no perpendicularidad del desplazamiento del penacho con respecto a la visual de medición (3) o bien la precisión en la determinación de la velocidad de transporte (4).

1. Nubes y ceniza volcánica

En el primer caso, para el instrumento infrarrojo, la presencia no homogénea de nubes detrás del penacho y en la atmósfera circundante, modificará la cuantificación real de SO_2 ya que la temperatura de brillo asociada a la radiación de fondo se utiliza como parámetro de entrada en la ecuación Ec. 1. Por otra parte la presencia de ceniza en el penacho volcánico y/o atmósfera circundante también pueden aportar un error en la cuantificación del SO_2 , debido a la absorción presente en el rango infrarrojo termal.

Finalmente, un penacho muy denso o cargado de ceniza,

resultaría opaco a la radiación ultravioleta, lo que impediría el cálculo de SO_2 a partir de mediciones realizadas.

2. Orientación de las mediciones y estimación de la velocidad de transporte.

La concentración lineal obtenida a partir de las mediciones puede ser sobreestimada, ya que una línea de visión oblicua eventualmente abarcaría mayor cantidad de partículas de SO_2 , dentro del penacho, lo que podría llevar a una sobreestimación de las tasas de emisión. Sin embargo, al calcular la velocidad de transporte mediante el seguimiento de características, en el cálculo del flujo este efecto se anula ya que la velocidad calculada corresponde a la proyección de ésta en un plano bidimensional.

No obstante, la determinación de la velocidad de desplazamiento del penacho, corresponde al parámetro que mayor incerteza entrega en la determinación de los flujos debido a que opera como un coeficiente directamente proporcional el cálculo de este (ecuación Ec. 5). En este estudio, las estimaciones realizadas son de primer orden y se requiere del contraste con una fuente independiente de información. La obtención de datos meteorológicos en línea en las zonas altas de los volcanes que presentan desgasificación pasiva es posible, mediante la modelación meteorológica de alta resolución, dado que la escasez de mediciones continuas reales en los centros de emisión. Otra manera de estimar las velocidades al interior de un penacho volcánico y determinar otros procesos como turbulencia, entre otros, es mediante la técnica denominada *optical flow* (figura 5). Este algoritmo considera un desplazamiento asociado a la tasa de cambio de los valores en cada pixel, compilado a partir de una serie de imágenes. Por lo tanto permite realizar estimaciones de velocidad del penacho, lo que deriva finalmente en una estimación del flujo gaseoso emitido. Futuras comparaciones entre este método y mediciones directas permitirán la validación de la técnica y su automatización.

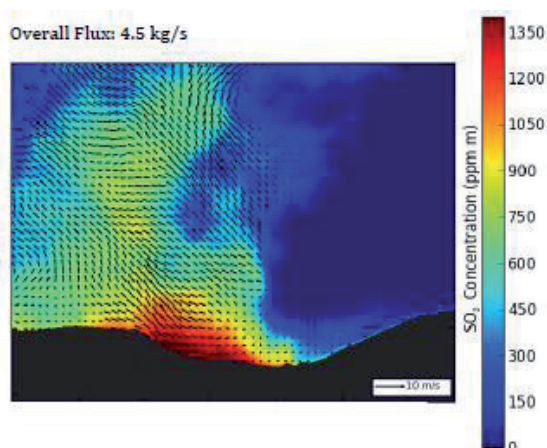


Figura 5. Flujo de SO_2 obtenido con la técnica de *optical flow*, para el volcán Lásca (imagen UV).

5 Conclusiones

Las cámaras de SO_2 pueden detectar las emisiones gaseosas de volcanes con una alta resolución temporal y espacial, de manera expedita y segura. Al visualizar el penacho volcánico se puede obtener información sobre procesos de turbulencia, dispersión y sobre la morfología de los penachos volcánicos y la influencia que los regímenes de viento tienen sobre ellos.

Debido a la configuración interna de ambos equipos, deben ser utilizados a diferentes distancias desde el objetivo y es su combinación la que puede entregar mayor información sobre la desgasificación y otros procesos que ocurren al interior del penacho y del volcán mismo.

Esta herramienta permite el análisis de conjuntos de imágenes, y por lo tanto ofrece la posibilidad de determinar las tasas de emisión para un volcán dado, así como establecer la evolución espacial y temporal de un gas asociado directamente a descargas magmáticas.

Referencias

- Prata, A.J., Bernardo, C. 2014. Retrieval of sulfur dioxide from a ground-based thermal infrared imaging camera. *Atmos. Meas. Tech.* 7. 2807-2808.
- Skoog D., Holler F., Crouch S., 2008. Principios de análisis instrumental. *Sexta edición. CENGAGE Learning*. Pp. 336-343.