

Variaciones en la anomalía termal del volcán Villarrica asociados al pulso eruptivo de Marzo 2015: Interpretaciones mediante imágenes Landsat ETM+ y OLI

Manuel Inostroza¹, Felipe Aguilera², Cristóbal González¹, Susana Layana¹, Javiera Chocobar¹

¹ Consultor Independiente

² Servicio Nacional de Geología y Minería, Avenida Santa María 0104, Santiago, Chile

* Mail: manuelinostrozap@gmail.com

Resumen. El comportamiento de la anomalía termal del volcán Villarrica detectada mediante imágenes Landsat ETM+ y OLI, indican que la radiancia termal emitida presentó valores relativamente estables entre Enero y Noviembre de 2014. Sin embargo, incrementos en la radiancia en Diciembre de 2014 y en Febrero de 2015, los cuales han sido relacionados a aumentos en la actividad sísmica y superficial, con ocurrencia de erupciones estrombolianas menores restringidos a la zona del cráter, sugieren que esta correspondió a actividad precursora del pulso eruptivo mayor del 3 de Marzo de 2015. Posterior a la erupción (8 días posteriores a la erupción), la radiancia termal decayó drásticamente, la cual estaría asociada a la obstrucción del cráter activo. El posterior incremento de radiancia durante Mayo de 2015 a valores máximos, estaría relacionado a la nueva apertura del cráter activo y aumento en la temperatura del lago de lava. El posterior descenso y estabilización de la anomalía termal desde fines de Mayo hasta Junio de 2015, aunque con valores mayores al periodo Enero-Noviembre 2014, se correlaciona directamente con la ausencia de actividad eruptiva.

Palabras Claves: Landsat ETM+ y OLI, Radiancia Termal, Anomalía Termal, Volcán Villarrica

1 Introducción

Diversos estudios se han enfocado en el análisis de actividad volcánicas utilizando sensores remotos, con la finalidad de comprender el comportamiento de las anomalías termales asociadas a centros volcánicos activos (e.g. Oppenheimer, 1993a, b; Harris et al., 2000; Flynn et al., 2001; González et al., 2015). Uno de estos parámetros utilizados para el entendimiento de estas anomalías corresponde a la radiancia espectral, cantidad de energía radiada desde un objeto en la unidad de tiempo (Oppenheimer et al., 1993a, 1993b), la que puede ser calculada a través del DN (numero digital) del pixel extraído desde diversos tipos de imágenes satelitales. En Chile, estudios recientes de anomalías termales han sido aplicados, tanto al volcán Láscar (Aguilera, 2004; González e Inostroza, 2014; González et al., 2015), como al volcán Villarrica (Chocobar et al., 2013; Chocobar, 2014), debido a su persistente actividad fumarólica y diferentes ciclos eruptivos. Estudios realizados por

Chocobar (2014), quien analizó cuantitativamente la anomalía termal del volcán Villarrica en el periodo 2000 y 2004, permitieron correlacionar los procesos eruptivos de tipo estromboliano con variaciones en la anomalía termal.

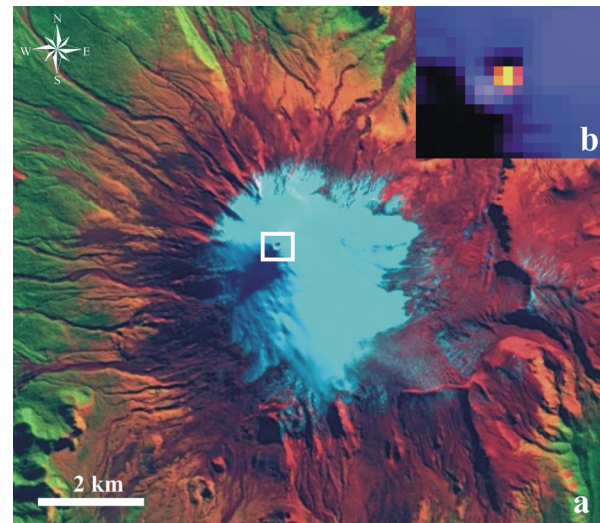


Figura 1. a) Imagen satelital Landsat 8 OLI del volcán Villarrica, combinación 763 (RGB). El cuadro blanco marca la zona de la figura b; b) detalle de la zona del cráter activo y la anomalía termal asociada, combinación 765 (RGB).

Desde fines del año 2014 y continuando a inicios del 2015, se observó un incremento paulatino en la actividad sísmica del volcán, con un posterior aumento en la actividad del cráter, donde fue detectada la emisión de productos balísticos, aunque restringidos a las inmediaciones del cráter (SERNAGEOMIN, 2015). El día 3 de Marzo de 2015 se inició un nuevo pulso eruptivo de corta duración, el cual provocó diversas alteraciones tanto en la zona del cráter como en los cursos de aguas aledaños al volcán (SERNAGEOMIN, 2015). Sin embargo, no existen datos que permitan correlacionar este comportamiento con la reciente actividad del volcán Villarrica. Con el objetivo de determinar el comportamiento de la anomalía termal previo y posterior a dicho evento eruptivo, es que se han procesado y analizado imágenes Landsat ETM+ y OLI, para la determinación de la radiancia espectral asociadas a la anomalía termal.

2 Marco Geológico

El volcán Villarrica (39,42°S; 71,93°O; 2.847 m s.n.m.; Fig. 1a), es uno de los cuatro volcanes más activos de Latinoamérica (González-Ferrán, 1995), el cual se ubica en la Zona Volcánica de los Andes del Sur (ZVAS). Es un estratovolcán, cuyo emplazamiento está controlado por el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (Lara y Clavero, 2004). Está formado por un sólo cráter abierto de 200 m de diámetro, el cual aloja un lago de lava, cuya profundidad varía entre los 100 y 150 m, y produce una pluma de gases permanente. El volcán Villarrica se encuentra cubierto de forma permanente un glaciar de grandes dimensiones.

Los productos volcánicos del Villarrica corresponden principalmente a flujos de lava, y productos piroclásticos de composición basáltica y andesítica, además de numerosos flujos laháricos. Moreno y Clavero (2006), resumen la actividad del Villarrica en tres etapas: i) Villarrica 1 (Pleistoceno Medio a Pleistoceno Superior), desarrollo de un estratovolcán compuesto por lavas y piroclastos de composición andesítica y basáltica, para culminar con el colapso del edificio volcánico y posterior formación de una caldera; ii) Villarrica 2 (Pleistoceno Superior a Holoceno), construcción de un nuevo edificio volcánico en el margen noroeste de la caldera (Clavero 1996; Clavero y Moreno, 2004), con productos de composición andesítica y basáltica, que cubren casi totalmente la caldera de la etapa Villarrica 1; iii) Villarrica 3 (Holoceno al presente), la actividad se desarrolla en el cono actual, asociada a depósitos de caída estromboliana y sub-pliniana, oleadas, flujos piroclásticos y coladas de lava de tipo aa y pahoehoe (Moreno y Clavero, 2006).

3 Historia Eruptiva

El registro eruptivo histórico de la actividad del volcán Villarrica comienza el año 1558, y desde entonces, se han producido al menos 49 erupciones (Petit-Breuilh, 1994). Estas erupciones, varían desde efusivas a moderadamente explosivas (IEV = 0-3), siendo frecuentemente acompañadas por la formación de lahares. Durante el siglo XX, las erupciones de mayor importancia ocurrieron en 1907-1908, 1948-1949 y 1984-1985, los que estuvieron asociados a la emisión de flujos de lavas y fusión parcial del glaciar, produciendo diversos lahares (Lara, 2004). En el año 2000, se registró actividad de tipo estromboliana, caracterizado por diversas explosiones en el interior del cráter (BGVN, 2001) y caída de cenizas (Ortiz et al., 2003). Eventos similares fueron registrados el año 2004 y 2005, donde además ocurrió un pequeño colapso del cono de escoria formado en el proceso anterior (Palma et al., 2008). Durante el año 2010, el lago de lava alojado en el cráter mostró altos índices de actividad, similares a los episodios anteriormente descritos. Entre el año 2011 y 2013, la actividad eruptiva es débil.

Desde fines del año 2014 hasta finales de Febrero de 2015, se registró un aumento sostenido de la actividad sísmica del Villarrica, la cual tuvo su punto más alto durante el día 3 de Marzo, con la ocurrencia de un pulso eruptivo de corta duración y de alta energía (VEI = 2-3). Debido a esta erupción, el cráter activo quedó temporalmente obstruido (OVDAS-SERNAGEOMIN, 2015a), y se verificó el aumento en el cauce de los ríos aledaños al volcán. Posterior a este evento eruptivo, la inestabilidad del sistema volcánico se mantuvo por varias semanas, para luego decrecer paulatinamente (OVDAS-SERNAGEOMIN 2015b).

4 Metodología

La radiancia espectral es la cantidad de energía radiada desde un objeto en una superficie de área específica (Oppenheimer et al., 1993a, 1993b). Esta puede captada por las bandas espectrales de sensores satelitales, las que capturan la energía electromagnética en el espectro infrarrojo cercano, onda corta y termal, correspondiente a las bandas 4, 5, 6, 7, 10 y 11 en Imágenes del tipo Landsat ETM+ y OLI (Flynn et al., 2001; Irons et al., 2012). La radiancia espectral total captada por el sensor, es obtenida a partir de la calibración de la respuesta digitalizada del sensor, en otras palabras, se determina directamente desde el número digital (DN) de cada pixel para cada longitud de onda (Chander et al., 2009). Para la obtención del valor de la radiancia espectral, en el caso de imágenes Landsat ETM+, se utilizan los coeficientes de calibración "Gain" y "Bias" (Chander et al., 2009), mientras que en imágenes Landsat OLI, se utiliza el factor de re-escalado M_L y A_L . En el caso del volcán Villarrica, fueron obtenidos recortes de las imágenes Landsat ETM+ y OLI de la zona del cráter (Fig. 1b), las cuales fueron posteriormente procesadas para determinar los valores de radiancia espectral total emitido, tanto para las bandas 5 y 7 para el caso de imágenes ETM+, y sus bandas equivalentes 6 y 7 para imágenes OLI. Finalmente, se procedió al análisis multitemporal de estas imágenes (periodo Enero 2014-Junio 2015), desde donde se obtuvo la relación del comportamiento de las anomalías termales con respecto a la actividad eruptiva.

5 Resultados y Discusión

El resultado del análisis de 67 imágenes satelitales Landsat ETM+ y OLI, de las cuales 47 han sido efectivamente utilizadas (Fig. 2), indica que los valores de radiancia termal para la banda 5 en imágenes ETM+ (equivalente banda 6 en imágenes OLI) varía ampliamente entre 0 y 142 $Mw/cm^2 sr \mu m$, mientras que en el caso de la banda 7 en imágenes ETM+ y OLI, esta cubre desde los 0,6 a 117 $Mw/cm^2 sr \mu m$. El periodo que comprende Enero-Noviembre de 2014 corresponde a un periodo de estabilidad del sistema magmático asociado al volcán Villarrica, con valores casi constantes y bajos de radiancia

espectral, el cual se correlaciona directamente con dicha estabilidad y con la presencia de un lago de lava a profundidades de unos 200 a 300 m bajo el borde del cráter activo. Los leves incrementos en los valores de radiancia para la banda 5 en Enero, Abril y Julio de 2014 podrían estar asociados a periodos de emisión de intensos y continuos pulsos de gas, tal como los observados durante los días 28 y 29 de Abril, cuando estos pulsos de gas fueron emitidos, generando columnas de gas que alcanzaron hasta 200 m sobre el cráter (www.povi.cl).

Entre el 10 de Noviembre y 3 de Diciembre de 2014, el sistema de vigilancia POVI, detectó un incremento en la anomalía térmica del volcán Villarrica, y posteriormente, el día 9 de Diciembre, se registró contenido de cenizas en la pluma de gases del volcán, ruidos de explosiones en el cráter entre los días 10 y 12 de Diciembre, y finalmente la emisión continua de intensos pulsos de gas el día 13 de Diciembre. Este primer incremento de actividad se correlaciona directamente con los aumentos de radiancia espectral detectados desde el 25 de Noviembre, alcanzando su máximo el 20 de Diciembre, con valores de 33 y 12 $\text{Mw/cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$ para las bandas 5 y 7, respectivamente. Nosotros interpretamos que el proceso de incremento de la radiancia termal y las manifestaciones superficiales de actividad, marcan el inicio de la reactivación eruptiva del volcán Villarrica. A pesar del descenso posterior en los valores de radiancia durante Enero de 2015, estos se mantienen relativamente altos (Fig. 2) en comparación a los valores del periodo Enero-Noviembre de 2014.

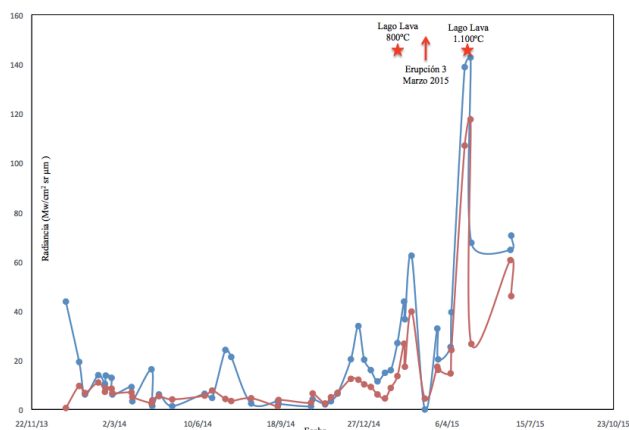


Figura 2. Radiancia termal de imágenes Landsat ETM+ y OLI del volcán Villarrica (periodo Enero 2014-Junio 2015). Líneas azules y rojas indican radiancia termal para la banda 5 y 7, respectivamente. Se indican pulso eruptivo principal (flecha roja) y temperaturas del lago de lava (estrella roja).

En el periodo que cubre todo el mes de Febrero de 2015, la anomalía termal sufrió un fuerte y sostenido incremento, llegando a valores máximos para el periodo previo a la erupción mayor del 3 de Marzo, generando valores de radiancia termal de 62 y 39 $\text{Mw/cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$ para las bandas 5 y 7, respectivamente (Fig. 2). Este incremento se correlaciona directamente con el aumento de la actividad sísmica, la ocurrencia de explosiones menores de tipo

principalmente estromboliano (acompañado de la emisión de ceniza), restringidos a la zona del cráter (SERNAGEOMIN, 2015). Durante este periodo, se produjo un aumento en el nivel del lago de lava, cuya temperatura alcanzó los 800°C, mientras que mediciones de flujo de SO_2 de la pluma de gases realizada mediante DOAS, alcanzaron valores promedio de 222 ton/día, con un valor máximo de 450 ton/día el día 16 de Febrero (www.volcano.si.edu). El incremento tanto de la radiancia como de la anomalía termal sería un evento precursor de la erupción principal, al igual que el incremento en los diversos parámetros previamente indicados (actividad sísmica y eruptiva). El hecho más notable lo constituye el dramático descenso de la radiancia termal posterior a la erupción principal del 3 de Marzo, donde los valores alcanzan los 0 y 4,42 $\text{Mw/cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$ para las bandas 5 y 7, respectivamente, el día 10 de Marzo, siete días después de ocurrida la erupción. Los principales argumentos que permitirían explicar este descenso, corresponden a que durante los primeros días posteriores a la erupción principal, el cráter se encontraba parcialmente obstruido y sin presencia del lago de lava (www.volcano.si.edu), eventos que habrían disminuido fuertemente la emisión de radiancia termal. Sin embargo, el 25 de Marzo se inició un fuerte incremento en la radiancia termal, al cual alcanzó un valor máximo el día 4 de Mayo, con valores de 142 y 117 $\text{Mw/cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$ para las bandas 5 y 7, respectivamente. Posteriormente, se produce un fuerte descenso de la radiancia, con valores relativamente estables que varían entre 64 y 70 $\text{Mw/cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$, 26 y 60 $\text{Mw/cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$ (banda 5 y 7, respectivamente), aunque considerablemente mayores a los observados durante el periodo Enero-Diciembre 2014. El ascenso en los valores de radiancia puede correlacionarse con la ocurrencia de diversos episodios eruptivos de menor intensidad ocurridos entre el 17 de Marzo y 27 de Abril, correspondiente a erupciones estrombolianas que generaron columnas de cenizas no mayores a 700 m sobre el cráter (www.volcano.si.edu). Adicionalmente, la presencia del lago de lava y el incremento en la temperatura de éste (1.100°C; www.volcano.si.edu), habrían contribuido al fuerte incremento de la radiancia termal. Procesos similares, con aumento de radiancia termal previo a una erupción de mayor magnitud, con una consecuente caída a valores mínimos de radiancia, y finalizando con un fuerte incremento de radiancia post erupción, ha sido observado en el periodos eruptivos del volcán Láscar, donde el incremento de radiancia posterior al evento eruptivo ha sido atribuido a la “limpieza” de los conductos de desgasificación (e.g. Oppenheimer et al., 1993a; González et al., 2015). En el caso del volcán Villarrica, la apertura del cráter activo, posterior a la obstrucción del mismo una vez ocurrida la erupción principal, permitiría la emisión más efectiva de radiancia termal. La ausencia en la actividad eruptiva y la estabilización del sistema magmático del volcán Villarrica hacia fines de Mayo se correlaciona directamente con el descenso y posterior estabilización de la radiancia termal entre los meses de Mayo y Junio (Fig. 2).

Referencias

- Aguilera, F. 2004. Monitoreo volcánico a través de sensores remotos: aplicado al volcán Lascar, segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo (Inédito), Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas, 114 p.
- BGVN. 2001. Pahoehoe steadily fills crater, gas discharged and explosions in October-December (2000). Bulletin of the Global Volcanism Network, 26:03.
- Chander, G.; Markham, B.; Helder, D. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 113: 893-903.
- Chocobar, J. 2014. Monitoreo del volcán Villarrica mediante imágenes Landsat: Diferencias del volumen y flujo calórico en el ago de lava del volcán Villarrica luego de los eventos eruptivos de los años 2000 y 2004. Memoria para optar al título de Geólogo (Inédito). Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas.
- Chocobar, J.; Aguilera, F.; González, R. 2013. Thermal anomaly associated to Villarrica volcano eruption in the year 2000. International Geological Congress on the Southern Hemisphere, GEOSUR, 25-27 November 2013, pp. 144-147, Viña del Mar, Chile.
- Clavero, J. 1996. Ignimbrita andesítica-andesítica postglaciar del volcán Villarrica. Andes del Sur (39°25'S) Tesis Unpublished. Universidad de Chile, 126 p.
- Clavero J.; Moreno H. 2004. Evolución de Villarrica Volcano. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, N°61.
- Flynn, L.; Harris, A.; Wright, R. 2001. Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+. Remote Sensing of Environment, 78: 180-193.
- González-Ferrán, O. 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar.
- González, C.; Inostroza, M. 2014. Procesos asociados al sistema de circulación de magma en el volcán Lascar (norte de Chile): aplicaciones mediante el uso de sensores remotos. Memoria para optar al título de Geólogo (Inédito). Universidad de Atacama, Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología.
- González, C.; Inostroza, M.; Aguilera, F.; González, R.; Viramonte, J.; Menzies, A. 2015. Heat and mass flux measurements using Landsat images from the 2000–2004 period, Lascar volcano, northern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 301: 277-292
- Harris, A.; Flynn, L.; Dean, K.; Pilger, E.; Wooster, M.; Okubo, C.; Mouginiis-Mark, P.; Garbeil, H.; Thornber, C.; De la Cruz-Reyna, S.; Rothery, D.; Wright, R. 2000. Real-time satellite monitoring of volcanic hot spot. Remote Sensing of Volcanoes. Edit by P. Mouginiis-Mark, J. Crisp and J. Fink, AGU special monograph, Geophys monograph series, 116: 139-159.
- Irons, J.; Dwyer, J.; Barsi, J. 2012. The next landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. Remote Sensing of Environment, 122: 11-21
- Lara, L. 2004. Overview of Villarrica Volcano. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, N°61.
- Lara, L.; Clavero, J. 2004. Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, N°61, 73 p.
- Moreno, H.; Clavero, J. 2006. Geología del área del volcán Villarrica, Regiones de la Araucanía y de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No., p.21, 1 mapa escala 1:50.000, Santiago
- Oppenheimer, C.; Francis, P.; Rothery, D.; Carlton, R.; Glaze, L. 1993a. Infrared image analysis of volcanic thermal features: Lascar volcano, Chile, 1984-1992. Journal of Geophysical Research, 98 (B3): 4269-4286.
- Oppenheimer, C.; Rothery, D.; Francis, P. 1993b. Thermal distributions at fumarole fields: implications for infrared remote sensing of active volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 55: 97-115.
- Ortiz, R.; Moreno, H.; García, A.; Fuentealba, G.; Astiz, M.; Peña, P.; Sanchez, N.; Tarraga, M. 2003. Villarrica volcano (Chile): Characteristics of the volcanic tremor and forecasting of small explosions by means of a material failure method. Dpto. Vulcanología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC.
- OVDAS-SERNAGEOMIN. 2015a. Volcán Villarrica. Informe de Resumen Crisis Volcán Villarrica (Febrero-Marzo 2015), Región de la Araucanía, año 2015, 17p.
- OVDAS-SERNAGEOMIN. 2015b. Volcán Villarrica (8 al 15 de Junio). Reporte de Actividad Volcánica (RAV), Región de la Araucanía, año 2015, Junio, 98: 2p.
- Palma, J.; Calder, E.; Basualto, D.; Blake, S.; Rothery, D. 2008. Correlations between SO₂ flux, seismicity, and outgassing activity at the open vent of Villarrica volcano, Chile. Journal of Geophysical Research. vol. 113, B10201.
- Petit-Breuilh, M. 1994. Análisis comparativo de la cronología eruptiva histórica de los volcanes Llaima y Villarrica (38° - 39° L. S.). 7° Congreso Geológico Chileno, Actas V, p. 366 - 370. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Sernageomin, (2015). Informe de resumen crisis volcán Villarrica Febreo-Marzo 2015. Servicio Nacional de Geología y Minería.