

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

### **ANÁLISIS TÉRMICO Y EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS DOMOS ÑUÑURCO Y CRÁTER CENTRAL DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN SANGAY, MORONA SANTIAGO, 2003-2019**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA GEÓLOGA**

**OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**HERRERÍA GUAMIALAMÁ MARÍA FERNANDA**

ma.fernandaherreria97@gmail.com

**DIRECTOR: PhD. SILVIA VALLEJO VARGAS**

svallejo@igeptn.edu.ec

**QUITO, SEPTIEMBRE 2020**

## **DECLARACIÓN**

Yo, María Fernanda Herrería Guamialamá, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

María Fernanda Herrería Guamialamá

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Fernanda Herrera Guamialamá, bajo mi supervisión.

---

Silvia Vallejo Vargas, PhD  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

A mi directora de tesis, la Dra. Silvia V, por todo el tiempo invertido para guiarme en cada una de las etapas de esta tesis. Gracias por la paciencia, enseñanzas y consejos, los cuales han sido claves para culminar este trabajo. Por las revisiones, correcciones, sugerencias y uno que otro regaño necesario. Gracias por confiar en mí y en mi trabajo desde que iniciamos con este proyecto.

A todas las personas que conforman el Instituto Geofísico, por permitirme ocupar sus instalaciones para desarrollar gran parte de mi tesis. De forma especial, gracias al Ing. Patricio R, porque sin su aporte con las imágenes visuales y térmicas no hubiese sido posible llevar a cabo este trabajo de titulación; gracias por ayudarme a resolver mis dudas y estar pendiente de este trabajo. Gracias al Ing. Jorge A, por ayudarme con la exportación de datos. Gracias Pedrito E, por colaborar con la búsqueda interminable de imágenes satelitales para el volcán Sangay.

A todos los ingenieros de la Facultad de Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional, por los conocimientos transmitidos durante la carrera.

A mis padres, por ser una parte fundamental de mi vida. Por su apoyo incondicional, por su cariño y consejos. Por no permitir que me falte nada y enseñarme que para salir adelante no hay que rendirse.

A mis hermanas, por soportar mi estrés, mal humor y acompañarme en cada paso que he dado.

A mis amigos, por compartir un pedacito de su vida conmigo. Gracias Sergio E, Samy R, Raquel T, Luis S (Jaci), hemos vividos tantas risas, tantos momentos buenos y malos también, pero que sin duda los volvería a vivir. Gracias Alejo C, Jose T, Anita A, Stalin P, por brindarme su amistad y acompañarme en este proceso.

## DEDICATORIA

*A mi mamá y a mi papá*

*A mis hermanas*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVI
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XVI
RESUMEN .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
CAPÍTULO I.....	19
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. Antecedentes .....	19
1.2. Justificación .....	19
1.2.1. Justificación Teórica.....	19
1.2.2. Justificación Metodológica .....	20
1.2.3. Justificación Práctica.....	21
1.3. Objetivos .....	21
1.3.1. Objetivo General .....	21
1.3.2. Objetivos Específicos.....	21
1.4. Alcance .....	22
1.5. Área de Estudio.....	22
1.5.1. Ubicación .....	22
1.5.2. Morfología.....	23
1.5.3. Hidrografía .....	24
1.5.4. Clima, flora y fauna .....	24
1.5.5. Población .....	25
1.6. Trabajos Previos .....	25

CAPÍTULO II .....	27
2. MARCO TEÓRICO .....	27
2.1. Geodinámica Actual del Ecuador .....	27
2.2. Geología Regional .....	28
2.3. Volcanismo Plio-cuaternario.....	30
2.3.1. Volcanes de la Cordillera Occidental.....	30
2.3.2. Volcanes del Valle Interandino.....	30
2.3.3. Volcanes de la Cordillera Real .....	31
2.3.4. Volcanes del Tras-Arco.....	31
2.4. Geología Local del Volcán Sangay.....	33
2.4.1. Desarrollo del Volcán .....	33
2.4.2. Elementos morfológicos de la cumbre.....	34
2.4.3. Actividad Eruptiva Característica.....	35
2.4.4. Peligros Asociados.....	38
2.5. Vigilancia visual y térmica del volcán Sangay .....	39
2.5.1. Adquisición de imágenes térmicas .....	40
2.6. Sensores Remotos.....	41
2.6.1. Fundamentos de la termografía infrarroja .....	42
2.6.2. Mecanismos de transferencia de calor .....	45
2.7. Cámara infrarroja .....	47
2.7.1. Historia de la cámara infrarroja .....	47
2.7.2. Diseño y operación básicos de la cámara térmica portátil.....	47
2.7.3. Imagen infrarroja.....	48
2.7.4. Anomalías térmicas.....	49
2.7.5. Aplicaciones de las imágenes térmicas para la vigilancia volcanológica .	50
CAPÍTULO III .....	52
3. METODOLOGÍA.....	52
3.1. Recopilación bibliográfica.....	52
3.2. Análisis morfológico .....	52
3.2.1. Análisis cualitativo.....	52
3.3. Análisis térmico .....	53
3.3.1. Selección de imágenes térmicas.....	53

3.3.2. Análisis térmico.....	54
3.3.3. Perfiles térmicos .....	60
CAPÍTULO IV.....	66
4. RESULTADOS .....	66
4.1. Análisis morfológico .....	66
4.1.1. Análisis cualitativo.....	66
4.2. Caracterización térmica del Cráter Central y Domos Ñuñurco.....	76
4.2.1. Análisis de anomalías térmicas 2003-2019 .....	77
4.2.2. Perfiles térmicos .....	93
CAPÍTULO V.....	103
5. DISCUSIÓN.....	103
5.1. Influencia de parámetros de entrada en las medidas de temperatura .....	103
5.1.1. Fuentes de errores en la medición de temperaturas .....	103
5.1.2. Precisión de los perfiles térmicos .....	109
5.2. Comparación con métodos satelitales.....	111
5.2.1. Cambios morfológicos.....	111
5.2.2. Periodos de actividad.....	116
5.3. Implicaciones del estilo eruptivo .....	133
CAPÍTULO VI.....	136
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	136
6.1. Conclusiones .....	136
6.2. Recomendaciones .....	138
CAPÍTULO VII.....	139
7. Bibliografía .....	139
ANEXOS .....	152

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Sangay. ....	23
Figura 2. Vista norte del volcán Sangay, se observa la cumbre alargada en sentido E-W la cual alberga los tres cráteres y un domo alineados. (Fotografía Ramón P., IG-EPN).....	24
Figura 3. Esquema del Contexto geodinámico del Ecuador. Tomado de Gutscher et al., (1999). 27	
Figura 4. Principales regiones geológicas morfoestructurales del Ecuador. Tomado de Vallejo et al., 2009. ....	28
Figura 5. Mapa de volcanes Cuaternarios del Ecuador, tomado de Bernard & Andrade (2011) en Ramón, et al., (2021).....	32
Figura 6. Mapa que muestra los tres edificios del complejo volcánico Sangay. Modificado de (Valverde, Mothes, Beate, & Bernard, 2021) .....	34
Figura 7. Elementos morfológicos de la cumbre del volcán Sangay (W-E): Domo Occidental, Cráter Occidental, Cráter Central, Cráter Noreste y Zona de Domos Ñuñurco.....	35
Figura 8. Anomalías termales registradas por el sistema satelital MODVOLC. Los rectángulos de colores separan las etapas de actividad eruptiva registradas desde el 2003 hasta la actualidad (2018). Destaca el cambio en el comportamiento del volcán desde 2015. Tomado de (Vasconez et al., 2018).....	36
Figura 9. Explosión y emisión de ceniza emitida por el Cráter Central. (Foto: Ramón P. IG EPN). .....	36
Figura 10. a) Fotografía aérea oblicua del volcán Sangay, se observa un flujo de lava que descende del Cráter Central (Fotografía Ramón P., IG-EPN), b) Flujos de lava de los Domos Ñuñurco (Fotografía Ramón P., IG-EPN), c) Flujo de lava pequeño en el flanco este del volcán (Fotografía Ramón P., IG-EPN), d) Fotografía de rango visible desde el flanco sur del volcán Sangay: (1) fisura asociada a la emisión de flujos de lava a través del viento “Domo Ñuñurco”, (2) Flujo de lava activo desde el domo Ñuñurco, (3) Cráter Central y emisión de columna de gases volcánicos, (4) Flujo piroclástico derivado del colapso del frente del flujo de lava (Tomado de IG-EPN, 2019).....	37
Figura 11. Cámaras térmicas usadas en el IG-EPN para el monitoreo térmico del volcán Sangay. a) THERMACAM PM 695. Tomado de (ASHTeAD TECHNOLOGY, s.f.), b) FLIR SC660. Tomado de (KVR Energy Limited,s.f.).....	40
Figura 12. Número de imágenes térmicas y visuales tomadas durante los sobrevuelos entre 2003 y agosto de 2019. ....	41
Figura 13. Bandas infrarrojas del espectro electromagnético. Tomado de Sánchez, (2017).....	43
Figura 14. Curvas de radiancia espectral en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la temperatura. Tomado de (Fernández, 2015).....	44
Figura 15. Absorción, reflectividad y transmisividad de la radiación incidente por un material semitransparente. Tomado de (Pastor, s.f.).....	45
Figura 16. Mecanismos de transferencia de calor. Tomado de (Domínguez, s.f.).....	46

Figura 17. Imagen térmica en diferentes paletas de colores. a) Paleta en escala de grises, b) Paleta arcoíris, c) Paleta de hierro. Imagen con sus diferentes partes: escala, temperatura máxima y mínima de escala, y anomalías térmicas. ....	50
Figura 18. Leyenda usada para el análisis cualitativo del a) Cráter Central y, b) Domos Ñuñurco. ....	53
Figura 19. Ejemplos de imágenes térmicas descartadas y seleccionadas. a) Imagen térmica descartada por la presencia de nubes; b) imagen térmica descartada por desenfoque; c) imagen térmica seleccionada de buena calidad .....	54
Figura 20. Parámetros de objeto a establecer en el programa ThermaCam Researcher 2002. ....	55
Figura 21. Representación gráfica del método “Distancia entre dos puntos en el espacio”, donde C es la posición de la cámara, V la posición del rasgo volcánico (Cráter Central) y P es la proyección del punto C. ....	56
Figura 22. Análisis de imágenes satelitales para la localización del viento del Cráter Central y del Domo Ñuñurco (puntos amarillos). a) Imagen satelital PlanetScope de 3 m de resolución: 20171031_145707_0e20_3B_AnalyticMS_SR imagen adquirida de (Planet Lab Inc, 2017) a través de Planet’s Education and Research (E&R) Program. b) imagen satelital Sentinel 2 de 10x10 m de resolución: T17MQT_20181024T153619_TCI. La posición para el Cráter Central y Domo Ñuñurco fue ubicada a través de las imágenes satelitales PlanetScope (a).....	57
Figura 23. Coordenadas UTM obtenidas de los puntos creados a través de las imágenes satelitales analizadas .....	58
Figura 24. Imágenes térmicas con las principales anomalías térmicas identificadas en la cumbre del volcán Sangay: cráter, domos, flujos de lava, fumarolas, balísticos, fisuras, columnas eruptivas. a) 13 de abril de 2012, b) 04 de septiembre de 2010 .....	58
Figura 25. Ejemplo de medidas de temperaturas obtenidas en el Cráter Central (ARO1) del volcán Sangay analizadas en el software Térmica Research 2002. ....	59
Figura 26. Registro de las medidas de temperatura de los elementos morfológicos de la cumbre del volcán Sangay, realizado a partir del año 2010. La temperatura máxima aparente registrada en cada sobrevuelo se encuentra en el Anexo 5. ....	60
Figura 27. Posición del perfil térmico en el Cráter Central (LI01). ....	61
Figura 28. Posición de los perfiles térmicos en el Domo Ñuñurco (LI01). ....	61
Figura 29. Exportación de los valores de los perfiles térmicos mediante la opción Copy Value en el software ThermaCAM Researcher 2002.....	62
Figura 30. Calculadora FOV del sitio web de FLIR SYSTEM. Las características de la cámara corresponden a la cámara FLIR GF620 24° fixed lens. ....	63
Figura 31. Hoja de cálculo con los valores del tamaño de los pixeles de la imagen para el eje “x” (cuadro rojo) y de los valores de temperatura de los perfiles térmicos realizados en el programa ThermaCAM Researcher 2002 para el eje “y” (cuadro azul). Los datos de todos los perfiles se encuentran en el Anexo 6. ....	64
Figura 32. Ejemplo de los perfiles obtenidos para el Cráter Central. a) 12 de febrero de 2011, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del cráter cuando se encontraba activo; b) 19 de	

noviembre de 2013, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del cráter cuando se encontraba inactivo; c) perfiles térmicos del cráter activo (línea verde, correspondiente a (a)) e inactivo (línea azul, correspondiente a (b)).	64
Figura 33. Ejemplo de los perfiles obtenidos para el Domo Ñuñurco1. a) 14 de julio de 2011, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del domo cuando se encontraba activo; b) 20 de septiembre de 2013, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del domo cuando se encontraba inactivo; c) perfiles térmicos del domo activo (línea azul, correspondiente a (a)) e inactivo (línea verde, correspondiente a (b)).	65
Figura 34. Imagen visible del 20 de marzo de 2003 que muestra la morfología inicial del Cráter Central (en la parte inferior, se presenta la leyenda).	67
Figura 35. Fotografía del 3 de diciembre de 2003, a) crecimiento del domo y flujo de lava hacia el flanco SE-S del volcán, b) Ampliación del Cráter Central con una vista desde el noroeste, c) esquema del cráter y del domo (b), se observa las paredes internas (PI) del cráter, el talus (T) y la depresión (D) en la superficie del domo.	68
Figura 36. 16 de noviembre de 2005, a) Cráter Central cerrado y asimétrico, b) ampliación del cráter (a), c) esquema del cráter y del domo (b).	68
Figura 37. Serie temporal fotográfica que muestra la evolución de la pared externa del Cráter Central entre 2007 a 2013. a) 29 de mayo de 2007, deslizamiento interno en el lado norte del cráter y escarpe “a” en la pared externa, b) 16 de octubre de 2009, escarpes “a” y “b” de la pared externa, c) 17 de noviembre de 2009, deslizamiento en el norte del cráter, y escarpes externo “a” y “b”, d) 13 de noviembre de 2013, cuatro deslizamientos en la pared sur correspondientes a los escarpes “a” y “b”.	70
Figura 38. Serie temporal fotográfica que muestra la evolución de la pared externa sur entre 2015 y 2019. a) 03 de diciembre de 2015, escarpe “b” y lineamiento en el cono del cráter, b) 21 de diciembre 2016, migración del escarpe “b”, c) 12 de abril de 2018 y d) 06 de agosto de 2019, deslizamiento en el lado suroriental del cono del cráter.	71
Figura 39. Serie temporal fotográfica que muestra la diferencia de pendiente en las paredes internas del cráter, a) y c) 13 de enero de 2010 y 13 de abril de 2012, cráter con las paredes internas escarpadas, b) y d) 14 de julio de 2011 y 20 de septiembre de 2013, cráter con paredes internas de baja pendiente, en b) se observa un cráter interno.	72
Figura 40. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 1 entre 2007 y 2012. a) 29 de mayo de 2007, domo hemisférico formado a partir de un flujo de lava hacia el sureste (flecha roja). Domo localizado al este de una zona fumarólica, sobre una depresión (línea azul) del flanco suoriental, b) c) y d) crecimiento del domo con flujos de lava con dos direcciones, S y SSE (b), una dirección hacia el este (c) y sureste (d); e) 12 de octubre de 2011, domo semi-elíptico, flujo de lava con dos direcciones: SE y SSE; f) 13 de abril de 2012, domo abultado debido a flujos de lava de un nuevo domo.	73
Figura 41. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 1 entre 2013 y 2018. a) 19 de noviembre de 2013, domo aplanado, compuesto por bloques, b) Imagen térmica	

de (a) que muestra las bajas temperaturas del domo, y la inactividad de este, c) y d) domo con morfología plana.....	74
Figura 42. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 2 entre 2012 y 2019. a) 13 de abril de 2012, primera aparición del domo, al sur del primero, flujo de lava con dirección sur, b) 15 de noviembre de 2015, domo con viento abierto en la parte superior, c) 12 de abril de 2018, deslizamiento en el frente del domo, d) 06 de agosto de 2019, domo activo en una quebrada que encauza los flujos de lava.....	75
Figura 43. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 3 entre 2014 y 2016. a) 11 de diciembre de 2014, domo en forma de “U” invertida, con un flujo de lava hacia el este, b) 03 de diciembre de 2015, domo con flujo de lava más extenso, c) 12 de diciembre de 2016, domo sin nueva actividad.....	76
Figura 44. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2003 y 2005: a) imagen térmica del 20 de marzo de 2003, cráter con un domo (DL) y un flujo de lava (FL), b) imagen térmica del 03 de diciembre de 2003, cráter con anomalías térmicas en su borde, el domo de lava desarrolla un talus (T), c) imagen térmica del 16 de noviembre de 2005, domo de lava con puntos críticos (punto de mayor temperatura) en su margen y, d) gráfica de las temperaturas registradas entre 2003 y 2005.....	78
Figura 45. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2007 y 2009: a) imagen térmica del 29 de mayo de 2007, cráter sin domo ni flujo de lava y con actividad fumarólica en el sur, formando una alineación, b) imagen térmica del 17 de septiembre de 2007, cráter con distribución de anomalías en forma de anillos, c) imagen térmica del 08 de abril de 2008, cráter con su más alta temperatura hacia el centro, d) y e) imágenes térmicas del 28 de agosto de 2008 y del 08 de mayo de 2009, cráter con proyectiles balísticos (B) y actividad fumarólica, f) imagen térmica del 16 de octubre de 2009, cráter inactivo que presenta una distribución uniforme de anomalías, g) imagen térmica del 17 de noviembre de 2009, cráter activo con su mayor temperatura (punto crítico) hacia su centro y actividad fumarólica en el sur, y h) gráfica de las temperaturas registradas entre 2007 y 2009. ....	79
Figura 46. Evolución de las anomalías térmicas del cráter en el año 2010: a) imagen térmica del 13 de enero, cráter con balísticos en su interior y sin actividad fumarólica, b) imagen térmica del 04 de septiembre, cráter con actividad fumarólica en el sur, c) imagen térmica del 19 de noviembre, actividad fumarólica en el sur y noreste del cráter, y d) gráfica de las temperaturas registradas en 2010.....	80
Figura 47. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2011 y 2012: a) y d) imágenes térmicas del 19 de febrero de 2011 y del 13 de abril de 2012, cráter con gran contraste de temperaturas en su interior, debido a que sus paredes internas estas frías con respecto a su centro, b) imagen térmica del 18 de marzo de 2011, cráter con paredes internas y externas de mayor de temperatura, y con balísticos en su interior y exterior, c) imagen térmica del 07 de julio de 2011, formación de un cráter interno (CI), la distribución de anomalías es en forma de anillos, y e) gráfica de las temperaturas registradas en 2011 y 2012.....	82

Figura 48. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2013 y 2019: a) imagen térmica del 20 de septiembre de 2013, cráter inactivo con pocos picos de temperatura, b) imagen térmica del 19 de noviembre de 2013, cráter sin picos de temperatura importante, leve actividad fumarólica hacia el flanco sur, c) imagen térmica del 05 de noviembre de 2015, d) imagen térmica del 21 de diciembre de 2016, distribución uniforme de anomalías y formación de un cráter sobre la pared externa sur-sureste del Cráter Central, e) imagen térmica del 28 de junio de 2017, cráter con anomalías térmicas negativas en su interior y en su pared externa este, f) imagen térmica del 12 de abril de 2018, cráter de mayor tamaño, sin picos importantes de temperatura, g) imagen térmica del 06 de agosto de 2019, cráter activo con presencia de proyectiles balísticos, y h) gráfica de las temperaturas registradas en 2013 y 2019. .... 83

Figura 49. Gráfica de las temperaturas registradas para el Cráter Central entre 2003 y 2019. .... 84

Figura 50. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco1 entre 2007 y 2008: a) imagen térmica del 29 de mayo de 2007, domo que presenta una disminución gradual de temperatura desde su viento hacia los laterales. El punto de mayor temperatura o crítico (PC) se encuentra en el viento. b) Imagen térmica del 17 de septiembre de 2007, domo con dos flujos de lava, c) imagen térmica del 01 de marzo de 2009, d) imagen térmica del 08 de abril de 2008, domo con disminución gradual de temperatura, e) imagen térmica del 28 de agosto de 2008, domo sin nuevos flujos de lava, y f) gráfica de las temperaturas registradas en 2007 y 2008 ..... 85

Figura 51. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1 entre 2009 y 2010: a) imagen térmica del 08 de mayo de 2009, domo que presenta una distribución en forma radial, b) Imagen térmica del 28 de mayo de 2009, domo con un flujo de lava hacia el este y contrastes de temperatura diferente en cada lado del punto crítico, c) imagen térmica del 16 de octubre de 2009, domo con disminución gradual alrededor del viento y contacto domo-flanco frío; d) e) y f) imágenes térmicas del 17 de noviembre de 2009, 13 de enero de 2010 y 04 de septiembre de 2010, domo con disminución gradual de temperatura desde el viento, por lo que el contacto domo-flanco presentaba mayor temperaturas, y g) gráfica de las temperaturas registradas en 2009 y 2010. ... 87

Figura 52. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1 y 2 entre 2011 y 2012: a) imagen térmica del 19 de febrero de 2011, domo que presenta una disminución drástica de temperatura alrededor del viento, b) y c) imágenes térmicas del 18 de marzo y del 14 de julio de 2011, domo con dos flujos de lava y fuertes contrastes de temperatura, d) imagen térmica del 13 de abril de 2012, formación del domo Ñuñurco 2, y e) gráfica de las temperaturas registradas en 2011 y 2012..... 88

Figura 53. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1 y 2 en 2013: a) imagen térmica del 20 de septiembre, puntos críticos asociados a fumarolas, b) imagen térmica del 19 de noviembre, puntos críticos por flujos de lava y fumarolas, y c) gráfica de las temperaturas registradas en 2013..... 89

Figura 54. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1, 2 y 3 entre 2015 y 2016: a) imagen térmica del 05 de noviembre de 2015, Ñuñurco 2 presenta picos de temperatura alrededor del viento, debido a actividad fumarólica. Aparición Ñuñurco 3 en imágenes térmicas; b) imagen térmica del 21 de diciembre de 2016, Ñuñurco 1 con distribución uniforme de temperaturas y

Ñuñurco 2 con picos de temperaturas sobre el viento y a su lado de izquierdo; y c) gráfica de las temperaturas registradas en 2015 y 2016. ....	90
Figura 55. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1, 2 y 3 entre 2017 y 2019: a) y b) imágenes térmicas del 28 de junio de 2017 y del 12 de abril de 2018, Ñuñurco 1 y 3, con una distribución uniforme, y Ñuñurco 2 con picos de temperaturas sobre el viento y a su lado de izquierdo; c) imagen térmica del 06 de agosto de 2019, Ñuñurco 2 de forma esférica con disminución de temperatura progresiva hacia la parte inferior y cambios drásticos hacia los costados; y d) gráfica de las temperaturas registradas en 2017 y 2019. ....	91
Figura 56. Gráfica de las temperaturas registradas para el Domo Ñuñurco 1 entre 2007 y 2018.	92
Figura 57. Gráfica de las temperaturas registradas para el Domo Ñuñurco 2 entre 2012 y 2019.	92
Figura 58. Gráfica de las temperaturas registradas para el Domo Ñuñurco 3 entre 2015 y 2018.	93
Figura 59. Perfil de temperatura (L01) del 14 de julio de 2011, tomado a través del cráter, que muestra cuatro zonas térmicas. La zona 1, representa un núcleo caliente o viento; la 2, un anillo con la más alta temperatura y, 3 y 4, zonas de pendientes más bajas de temperatura. ....	94
Figura 60. Perfiles de temperatura (L01) del año 2013, a) 07 de noviembre, y b) 19 de noviembre. Se observa una zona térmica entre dos puntos de baja temperatura. ....	95
Figura 61. Perfiles de temperatura (L01) de 2016 y 2018, a) 21 de diciembre de 2016, se observa tres zonas. La zona 1, representa un deslizamiento al interior del cráter; la 2, las paredes internas y 3, el borde del cráter y parte de las paredes externas. b) 12 de abril de 2018, dos zonas térmicas en el cráter. La zona 1, con picos de temperatura entre los 20 a 56°C, y la zona 2, con picos que varían de 5 a 22°C, correspondientes a zonas de deslizamientos observados en imágenes visibles. ....	96
Figura 62. Perfiles térmicos del año 2011, a través del Domo Ñuñurco 1. a) 19 de febrero, se observa dos picos importantes de temperatura, correspondientes al viento y un pico menor, por flujos de lava antiguos, b) 18 de marzo, viento con dos picos de temperatura debido a la bifurcación del flujo de lava, c) 14 de julio, viento con dos picos de temperatura, el pico a la izquierda del viento representa flujos de lava antiguos. ....	97
Figura 63. Perfiles térmicos del año 2013, a través de Ñuñurco 1 inactivo. a) 20 de septiembre, b) 07 de noviembre. Los picos de temperatura en ambos perfiles muestran actividad fumarólica. ....	98
Figura 64. Perfil térmico del 12 de abril de 2018 a través de Ñuñurco 1 inactivo. Se muestra la mayor temperatura alcanzada en este perfil. ....	99
Figura 65. Perfiles térmicos del año 2013, a través de Ñuñurco 2 inactivo. a) 20 de septiembre, b) 07 de noviembre. ....	100
Figura 66. Perfiles térmicos de 2015 y 2018, en los que se observa el viento del domo Ñuñurco 2; a) 05 de noviembre de 2015, los picos altos de temperatura representan actividad fumarólica, b) 12 de abril de 2018. ....	101
Figura 67. Perfil térmico del 06 de agosto de 2019, a través de Ñuñurco 2 activo. Las temperaturas más altas representan el viento del domo. ....	101

Figura 68. Perfiles térmicos de 2015 y 2018, a través del Domo Ñuñurco 3; a) 05 de noviembre de 2015, curva sesgada hacia la derecha, b) 12 de abril de 2018, zona térmica que alcanza los 27,9°C.....	102
Figura 69. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de emisividad.....	105
Figura 70. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de distancia. ....	106
Figura 71. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de temperatura atmosférica.....	107
Figura 72. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de humedad relativa .....	108
Figura 73. Temperatura en función de la distancia, humedad relativa (HR) y temperatura atmosférica (T atm). Las líneas continuas representan la variación de temperatura atmosférica con humedad relativa constante, mientras que en las discontinuas, el parámetro a variar es la humedad relativa. La humedad relativa y temperatura atmosférica abarcan los valores registrados en los sobrevuelos entre 2003 y 2019. Para los demás parámetros, como emisividad y temperatura ambiental, se usaron los valores originales de la imagen IR_0163. ....	109
Figura 74. Perfiles térmicos al variar la posición del Cráter Central (Tabla 6). ....	111
Figura 75. Imágenes RapidEye y PlanetScope para el volcán Sangay desde julio 2010 hasta agosto 2019. Las imágenes en recuadro rojo corresponden a las cuatro imágenes que presentan mejor visibilidad (Planet Lab Inc, 2020). ....	113
Figura 76. Identificación de rasgos morfológicos en imágenes RapidEye y PlanetScope (Planet Lab Inc, 2020), y en imágenes térmicas de a) 2011, b) 2016, c) 2018 y d) 2019. ....	114
Figura 77. Imágenes del flanco suroriental del Sangay para la identificación del Domo Ñuñurco y su flujo de lava. A la izquierda, imagen térmica en paleta de colores arcoíris, a la derecha imagen visible y centro, combinación de imagen térmica y visible (Fuente: S. Vallejo Vargas/IG-EPN, cp). ....	115
Figura 78. Comparación de la actividad volcánica, desde 2003 a septiembre de 2019, entre a) las observaciones térmicas de actividad del presente estudio, b) los periodos determinados por alertas termales (franjas azules) obtenidas de MODVOLC ( <a href="http://modis.higp.hawaii.edu/">http://modis.higp.hawaii.edu/</a> ), modificado de Vasconez et al., (2018), c) las emisiones de ceniza obtenidas de Washington VAAC ( <a href="https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html">https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html</a> ), y d) las emisiones de SO <sub>2</sub> registradas por TROPOMI.....	119
Figura 79. Línea de tiempo con los periodos de actividad del volcán Sangay en base al tipo de actividad volcánica, aparecimiento de domos de lava, la temperatura de anomalías térmicas y la presencia de escarpes. ....	121
Figura 80. Serie temporal fotográfica que muestra la evolución del Cráter Central y Domos Ñuñurco entre 2003 y 2019.....	129
Figura 81. Serie temporal que muestra la evolución del Cráter Central y Domos Ñuñurco entre 2003 y 2019.....	132

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de objeto para la imagen térmica IR_0163 _____	104
Tabla 2. Temperatura del cráter y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la emisividad. Los valores de emisividad entre 0,91 y 0,94, son los determinados para rocas andesíticas según Harris A., (2013). _____	104
Tabla 3. Temperatura del Cráter Central y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la distancia. Se tomó como primer valor, la distancia original y se incrementó desde 10 a 3000 m con respecto a este. _____	105
Tabla 4. Temperatura del Cráter Central y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la temperatura atmosférica. Se tomó como primer valor, la temperatura atmosférica original y se incrementó desde 0,5 a 30°C con respecto a este. _____	106
Tabla 5. Temperatura del Cráter Central y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la humedad relativa. Se tomó como primer valor, la humedad original y se incrementó desde 2 hasta 50% con respecto a este. _____	107
Tabla 6. Cálculo de la distancia y tamaño de pixel (IFOV) al variar las coordenadas del Cráter Central en la imagen térmica IR_92 del 07 de noviembre de 2013. _____	110
Tabla 7. Medidas de longitud del cráter y domos, obtenidas a través de imágenes térmicas e imágenes satelitales RapidEye y PlanetScope a diferentes fechas. _____	115

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Planck .....	43
Ecuación 2. Ley de Stephan Boltzmann .....	44
Ecuación 3. Ley de desplazamiento de Wien .....	44
Ecuación 4. Distancia entre dos puntos en el espacio .....	56

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Datos de los sobrevuelos y número de imágenes visuales y térmicas.....	153
ANEXO 2. Distancia calculada para las imágenes térmicas de 2011 a 2019. ....	154
ANEXO 3. Ficha técnica de las cámaras térmicas e higrómetro. ....	155
ANEXO 4. Análisis morfológico del Cráter Central y Domos Ñuñurco .....	158
ANEXO 5. Temperatura máxima aparente registrada para el cráter y los domos .....	169
ANEXO 6. Tamaño de pixel y temperaturas obtenidas para los perfiles térmicos del Cráter Central y Domos Ñuñurco.....	170
ANEXO 7. Imágenes térmicas y perfiles térmicos del Cráter Central y Domos Ñuñurco.....	174

## RESUMEN

El Sangay es uno de los volcanes más activos del Ecuador, cuya actividad eruptiva casi continua ha sido observada desde 1628. En su cumbre, extendida en sentido Este-Oeste se encuentran cinco rasgos morfológicos: Cráter Nor Este, Domos Ñuñurco, Cráter Central, Cráter Occidental y Domo Occidental. De estos, el Cráter Central (CC) y los Domos Ñuñurco (DÑ1, DÑ2, DÑ3) han presentado actividad eruptiva en los últimos 17 años, influenciando directamente en su morfología y consecuentemente en la amenaza volcánica.

En base al análisis de imágenes aéreas oblicuas de rango visible y térmico, obtenidas por el personal del IG-EPN entre el año 2003 y 2019, se identificó los principales cambios morfológicos y variaciones termales asociados al Cráter Central y los Domos Ñuñurco. Entre los años 2003 y 2005, el CC fue el único que presentó actividad, la cual se caracterizó por ser efusiva con la presencia de un domo y un flujo de lava que era emitido hacia el sur oriente. A partir del 2007 se registra un cambio en el estilo eruptivo, el CC presenta actividad explosiva, el DÑ 1 aparece en el flanco sur oriental y se evidencia la presencia de escarpes en la pared interna norte y en la pared externa sur del CC, generados por varios deslizamientos. Posteriormente el DÑ 1 cesa su actividad en el 2013 y aparece un nuevo domo al occidente, el DÑ 2 en el 2012; finalmente el DÑ 3 aparece en el 2014 al este del DÑ 1 observado y cesa su actividad en el 2015. Teniendo así, que solo el DÑ 2 es el que continúa activo hasta el presente (septiembre 2021). Adicionalmente, se pudieron estimar que importantes variaciones de temperatura se registraron en estos rasgos entre el 2003 y 2019, con valores mínimos y máximos de 13 a 381 °C para el CC y de 6 a 370 °C, 29 a 327 °C, y de 6 a 53 °C para los DÑ 1, 2 y 3 respectivamente. Dimensionalmente, algunos cambios son registrados entre los años 2011 y 2018, para el ancho del CC con 99 y 166 m, mientras que, para los DÑ 1, 2 y 3, se estimó variaciones entre 21 y 42 m, 31 y 54 m y de 18 a 36 m respectivamente.

Este análisis temporal permite proponer que el volcán Sangay ha presentado cuatro periodos de actividad entre el 2003 y el presente: P1) marzo 2003 – noviembre 2005, P2) mayo 2007 – abril 2012, P3) septiembre 2013 – abril 2018 y P4) agosto 2019 – presente; los cuales se han basado en cuatro parámetros: a. estilo de actividad volcánica, b. valor de temperatura de anomalías térmicas, c. aparecimiento de domos de lava y, d. aparecimiento de escarpes en el Cráter Central. Finalmente se propone que los deslizamientos observados desde el 2007, junto con la actividad continua del volcán, habrían provocado un debilitamiento en la pared externa sur y sur oriental del CC siendo un precedente para la generación de deslizamientos mayores en los años posteriores.

**PALABRAS CLAVE:** Volcán Sangay, Cráter Central, Domos Ñuñurco, vigilancia visual y térmica, estilo eruptivo

## ABSTRACT

Sangay is one of the most active volcanoes in Ecuador, whose activity has been observed since 1628. At its summit, extended in an East-West direction, there are five morphological features: Cráter Nor Este, Domos Ñuñurco, Cráter Central, Cráter Occidental and the Domo Occidental. From them, only the Cráter Central (CC) and the Domos Ñuñurco (DÑ1, DÑ2, DÑ3) showed eruptive activity in the last 17 years, having a direct influence over its morphology and therefore the volcanic threat.

Based on the analysis of oblique aerial visible and thermal imaging, recorded by the IG-EPN between 2003 and 2019, it was identified that the main morphological changes and thermal variations were associated to the Cráter Central and the Domos Ñuñurco. Between 2003 and 2005, the CC was the only which showed activity, characterized for being effusive with the presence of a dome and a lava flow, emitted through the south east. Since 2007, it was observed a changing on the eruptive style, the CC presents explosive activity, the DÑ1 appears over the south east flank and some scarpments are observed within the inner north wall and over the external south wall of the CC, due to the generation of some landslides. Lately, the DÑ1, stopped its activity in 2013 and a new dome is observed at the west of this dome, the DÑ2 in 2012; finally, the DÑ3 appeared in 2014 at the eastern side of the first dome and stopped its activity in 2015. Thus, only the DÑ2, is the one which continue active until those days (September 2021).

Additionally, it was possible to estimate that important temperature variations were registered over these morphological features between 2003 and 2019, with minimum and maximum values of 13 to 381 °C for the CC, and of 6 to 370 °C, 29 to 327 °C, and from 6 to 53 °C for the DÑ 1, 2 and 3 respectively. Dimensionally, some changes were registered between 2001 and 2018, having a width range of the CC between 99 and 166 m, meanwhile for the DÑ 1, 2 and 3, it was estimated variations between 21 and 42m, 31 and 54 m and 18 to 36 m respectively.

This temporal analysis allows to propose that the Sangay volcano showed four periods of activity between 2003 and those days: P1) March 2003 – November 2005, P2) May 2007 – April 2012, P3) September 2013 – April 2018 y P4) August 2019 – those days; based on four main parameters: a. volcanic activity style, b. thermal anomalies values, c. lava domes appearance, d. scarpments over the CC. Finally, it is proposed that the landslides observed sine 2007 together with the continue activity of the volcano, could have caused a weakness over the southern external wall of the CC, like those generated in the incoming years.

**KEY WORDS:** Sangay volcano, Cráter Central, Domos Ñuñurco, visual and thermal images, eruptive style

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Los volcanes ecuatorianos son parte de la Zona Volcánica Norte, que pertenece al Cinturón Volcánico Andino. El arco volcánico ecuatoriano cuaternario consta de 84 centros volcánicos (Bernard & Andrade, 2011) que se encuentran distribuidos en cuatro franjas volcánicas: Cordillera Occidental, Valle Interandino, Cordillera Real y Tras-arco. Estas franjas se diferencian entre sí por su petrografía, química, morfología y estilo de erupción (Hall, Samaniego, Le Pennec, & Johnson, 2008).

El volcán Sangay está ubicado en la Cordillera Real, provincia de Morona Santiago (2°00' S, 78°34' W; 5230 m), y corresponde al edificio más austral de la Zona volcánica Norandina (NVZ) (Monzier et al., 1999). Es uno de los volcanes más activos del Ecuador y su actividad eruptiva permanente es observada desde 1628 (Hall, 1977). Esta actividad se ha caracterizado por ser de tipo estromboliana con explosiones de bloques y cenizas, caídas de cenizas, flujos de lava, flujos piroclásticos y lahares (Monzier et al., 1999). Para Johnson et al., (2003), el comportamiento del volcán Sangay es variable y puede presentar desde explosiones muy violentas con eyecciones de magma, crecimiento de domos y flujos piroclásticos, hasta explosiones menos violentas caracterizadas por la emisión de gases. A pesar de que su actividad eruptiva es casi continua, se ha realizado muy pocos estudios detallados sobre este edificio debido al difícil acceso al volcán y al clima de la zona.

Según Monzier et al., (1999), en 1976 el Sangay era un cono casi perfecto con pendientes de ~35°, y una cumbre orientada aproximadamente W – E que se componía de tres cráteres activos y un domo activo. Actualmente, año 2020, se observa que la morfología de la cumbre del Sangay ha sido modificada, presentando nuevas estructuras volcánicas, además de cambios en su estilo eruptivo.

### 1.2. Justificación

#### 1.2.1. Justificación Teórica

Los volcanes de la Cordillera Real, como el Sangay, se caracterizan por tener erupciones mucho más frecuentes durante el Holoceno en comparación con los volcanes de la Cordillera Occidental (Hall et al., 2008). La casi continua actividad explosiva y efusiva de este volcán ha sido la responsable de la permanente modificación de la forma de su cumbre. Esta actividad ha estado relacionada con procesos tanto constructivos como destructivos, los primeros relacionados principalmente a la acumulación de material y a la emisión de flujos de lava; y los segundos, a procesos de deslizamientos y erosión.

La actividad volcánica aparte de ser causante de las variaciones morfológicas, también puede producir cambios en las anomalías térmicas. Estas anomalías se relacionan a la presencia de productos volcánicos como flujos de lava, domos de lava, emisión de gases (campos fumarólicos) o ceniza, depósitos de flujos piroclásticos; que estarían regulados por cambios en la actividad y en las tasas de extrusión de material volcánico (Spampinato et al., 2011).

La presente investigación se enfocará en realizar una correlación entre los cambios morfológicos y variaciones térmicas del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco, con el fin de comprender su dinamismo y hacer un aporte al conocimiento acerca de este edificio volcánico.

### **1.2.2. Justificación Metodológica**

El volcán Sangay se encuentra en una zona inaccesible, por lo que por mucho tiempo su vigilancia ha sido únicamente de tipo visual y térmica mediante sobrevuelos periódicos realizados por personal del IG-EPN, y por teledetección satelital. El monitoreo aéreo visual y térmico inició en el año 2003, mientras que el monitoreo sísmico permanente y de gases fue implementado en el año 2013, con el fin de identificar los periodos de mayor actividad que se presentan en este volcán (IG-EPN, 2016).

Los estudios publicados acerca del Sangay han estado enfocados al análisis petrológico, petrográfico y geoquímico tanto del edificio como de los depósitos de avalanchas (Monzier et al., 1999; Narváez, 2016; Valverde, 2014). Robles (2010) describe los cambios morfológicos y las medidas de anomalías térmicas del Sangay mediante el análisis de imágenes en el rango visible y térmico adquiridas por el personal del IG-EPN en el periodo 2003 – 2010. Siendo así, el estudio de Robles (2010), una base para el presente trabajo de titulación

En vulcanología, el uso de imágenes en el rango visible ha estado enfocado en identificar, analizar y caracterizar los cambios morfológicos de las estructuras volcánicas en el tiempo. Estas imágenes por mucho tiempo han sido analizadas de forma individual y en dos dimensiones, pero actualmente, mediante técnicas de fotogrametría, se analizan múltiples imágenes visuales para construir Modelos Digitales de Elevación (DEM) con el objetivo de cuantificar dichos cambios en tres dimensiones (Diefenbach et al., 2012).

La imagen térmica, que se obtiene a través de una cámara infrarroja, ha sido introducida en las últimas décadas en la vulcanología para analizar diferentes procesos volcánicos (Calvari et al., 2004). El análisis de imágenes térmicas permite el estudio de la evolución de los campos de fractura (camino para la fuga de gas caliente), lagos de lava, cráteres de cumbre, campos de fumarolas y domos de lava; representando así, una contribución

esencial a la vigilancia de volcanes y la evaluación de sus peligros (Spampinato et al., 2011). Por medio de las imágenes térmicas se puede determinar la temperatura máxima aparente de los rasgos morfológicos de los volcanes y determinar las variaciones térmicas que se producen en estos a lo largo del tiempo.

En base a lo mencionado, en el presente proyecto de investigación se propone describir los cambios morfológicos del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco ubicados en la cumbre del volcán Sangay a través de imágenes en el rango visible, con el uso del software Adobe Illustrator; y determinar cuantitativamente las variaciones térmicas de estos mediante el análisis de las imágenes térmicas, con el software ThermaCam Researcher 2002. Para este análisis se utilizarán las imágenes en el rango visible e imágenes térmicas, obtenidas en 39 sobrevuelos entre el 2003 y 2019 por personal del IG-EPN.

### **1.2.3. Justificación Práctica**

Los diferentes tipos de estudios que se realizan en volcanes en erupción ayudan a mejorar la comprensión de su dinámica eruptiva. En el volcán Sangay, a pesar de que es uno de los más activos del mundo no existen muchos estudios sobre el dinamismo de sus erupciones o sobre los cambios morfológicos generados como consecuencia de su continua actividad. De esta manera, todas las investigaciones que se realicen en este volcán ayudarán a complementar su conocimiento y a mejorar la vigilancia que el IG-EPN realiza continuamente. El aporte será una fuente fundamental para entender su comportamiento y su actividad eruptiva, lo que puede contribuir a la reducción de los impactos negativos que generan los fenómenos volcánicos en las poblaciones. Además, el presente trabajo se enmarcará en los objetivos promulgados por las Naciones Unidas dentro del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar y cuantificar los cambios morfológicos y térmicos del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco del volcán Sangay, mediante el análisis de imágenes térmicas y de rango visible, para un mejor entendimiento de la actividad superficial de este volcán.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Describir cualitativamente los cambios morfológicos del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco en el periodo 2003-2019

- Caracterizar térmicamente los rasgos morfológicos del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco mediante la realización de perfiles térmicos en estos dos rasgos morfológicos del volcán.
- Cuantificar los cambios térmicos del Cráter Central y de los Domo Ñuñurco en el periodo de estudio.

#### **1.4. Alcance**

- Describir la evolución morfológica del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco, mediante el análisis de las imágenes visuales obtenidas en los sobrevuelos realizados entre el 2003 y 2019.
- Identificar y describir las anomalías térmicas presentes en el Cráter Central y Domo Ñuñurco en el periodo de estudio, mediante la realización de perfiles térmicos en estos rasgos morfológicos.

#### **1.5. Área de Estudio**

##### **1.5.1. Ubicación**

El volcán Sangay (2°00' S, 78°34' W; 5230 msnm) está ubicado en el extremo este de la Cordillera Real de Ecuador, en la provincia de Morona Santiago, a una distancia aproximada de 45 km al sureste de Riobamba y a 40 km al noroeste de Macas y corresponde al volcán en erupción más sureño en el país (Fig. 1).

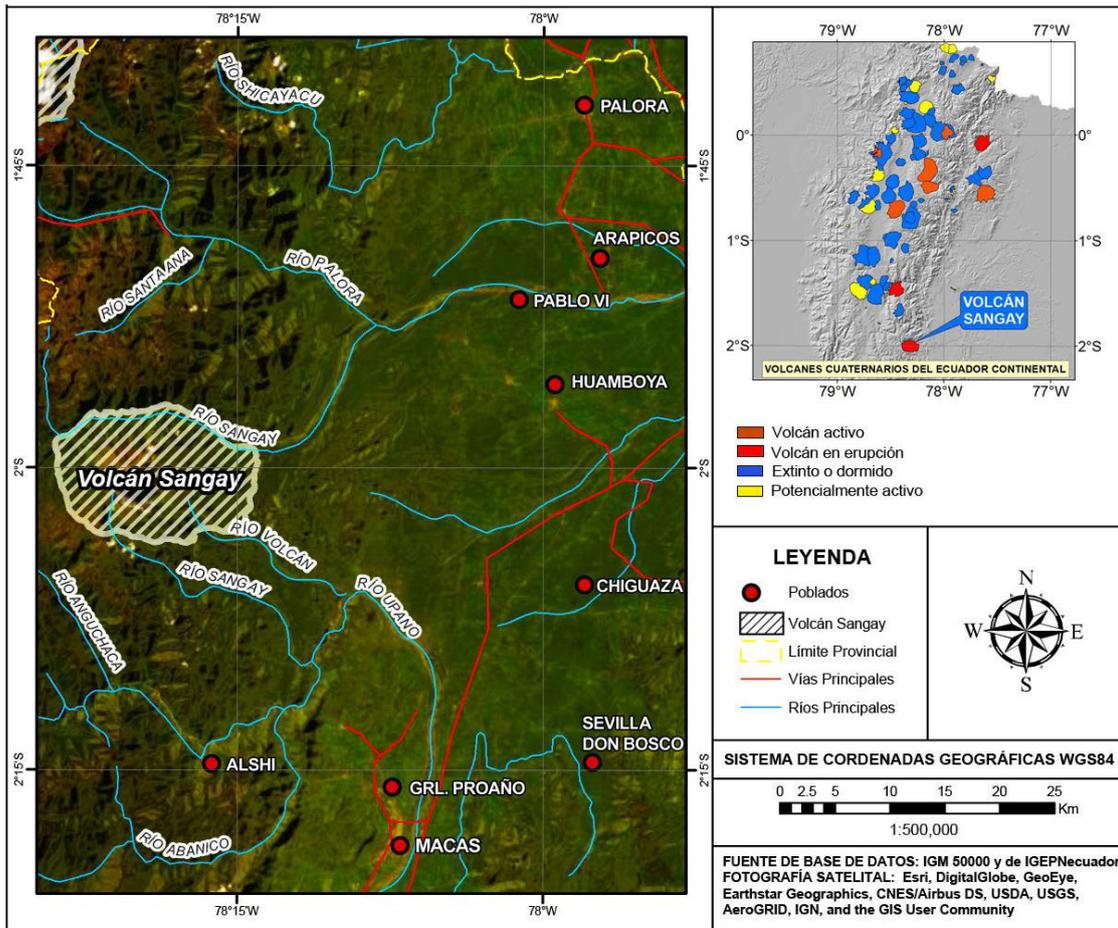


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Sangay.

### 1.5.2. Morfología

El Sangay es un estratovolcán de forma aproximadamente cónica, con un diámetro basal de 10 a 12 km, sus flancos presentan pendientes de  $\sim 35^\circ$  y una cumbre alineada en dirección E – W, la cual alberga tres cráteres y un domo de lava (Fig. 2). La forma de la cumbre ha cambiado con frecuencia debido a su continua actividad explosiva y efusiva (IG-EPN, 2020).

En 1946, un único cráter ocupaba toda la cumbre del volcán, para 1965 un nuevo cráter apareció al NE del primero, y finalmente, en 1975 se formó un nuevo cráter al occidente del central, al mismo tiempo que se formaba un domo en el extremo occidental de la cumbre (SEAN Bulletin, 1976 en Monzier et al., 1999). Posteriormente, otros cambios se han generado en la cumbre y en el flanco SE, los cuales son detallados en la Sección 2.4.2 y en el Capítulo 4.



Figura 2. Vista norte del volcán Sangay, se observa la cumbre alargada en sentido E-W la cual alberga los tres cráteres y un domo alineados. (Fotografía Ramón P., IG-EPN)

### 1.5.3. Hidrografía

El volcán Sangay está limitado por los ríos Sangay y Volcán (Fig. 1). En el flanco norte del volcán nace el río Sangay que desemboca en el río Palora. Mientras que, en las estribaciones surorientales del volcán nacen dos ríos, el río Volcán y el río Sangay (este último diferente del anteriormente mencionado) que desembocan en el río Upano. Finalmente, el río Upano inicia en la unión de los dos ríos anteriores y confluye en el Río Paute hacia el sur.

### 1.5.4. Clima, flora y fauna

La región está caracterizada por un clima tropical y subtropical, alcanzando temperaturas de entre 18 y 23 grados centígrados. Estas temperaturas se deben a los diferentes pisos climáticos que son determinados por la cuantiosa vegetación de las mesetas y valles. Las precipitaciones fluctúan entre 2000 y 5000 mm por año (Bravo, 2014).

La ubicación geográfica y las condiciones climáticas permiten que la flora y fauna de la Amazonía sea considerada como mega diversa (Bravo, 2014). En la provincia de Morona Santiago, dentro de la flora, hay una alta diversidad de plantas entre las que se destacan bejucos, chontaduros silvestre, killi, pambil, uva silvestre, uvilla, zapote silvestre, entre otras (Ecured, n.d.). Por otro lado, la fauna de esta área también es asombrosamente variada, así, el número de especies de mamíferos representa más del 50% de las especies de los bosques amazónicos tropicales del Ecuador; las especies de aves registradas

aproximadamente se constituyen en un 43% de las especies y el 70% de las familias registradas en el Oriente (Morona Santiago es Sangay, s.f.).

### **1.5.5. Población**

Los principales poblados que se encuentran cercanos al área de estudio son: Palora, Pablo VI, Huamboya, Sangay, Arapicos, Sinaí, Chiguaza, Alshi y Macas, siendo esta último la capital de la Provincia de Morona Santiago, y Alshi la población más cercana al volcán. El total de la población de estas parroquias es de 39257 habitantes (INEC, 2010). Además, en esta zona existen comunidades aisladas de la nacionalidad Shuar. Las principales actividades económicas a las que se dedican son la agricultura, ganadería y en menor número, al comercio.

## **1.6. Trabajos Previos**

Hasta la actualidad no existen estudios publicados que tengan una relación directa a los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación, por lo que a continuación se menciona investigaciones relacionadas al análisis sísmico, petrológico, petrográfico y geoquímico del volcán Sangay, y de sus depósitos de avalanchas provenientes de este. Se incluye también, un estudio enfocado en el análisis termográfico de un volcán ecuatoriano. Finalmente, se detalla un estudio no publicado el cual describe brevemente los cambios morfológicos en este volcán en el periodo 2003-2010.

- *Monzier M., Robin C., Samaniego P., Hall M., Cotten J., Mothes P., Arnaud N., (1999). Sangay volcano, Ecuador: structural development, present activity and petrology.* Este trabajo describe el desarrollo general del complejo volcánico Sangay, brinda información de los depósitos volcánicos y la actividad del cono actual; además, de realizar un estudio petrográfico y geoquímico, que son la base para la generación de un modelo petrogenético del magmatismo del volcán.
- *Rivera, (2006). Estudio de las anomalías térmicas en el volcán Cotopaxi en el periodo 2002-2005.* Esta tesis de grado de la Carrera de Ingeniería Geológica de la EPN describe las cinco zonas anómalas identificadas en el volcán Cotopaxi y cómo estas han generado la variación en la morfología del volcán debido al aumento de áreas desprovistas de hielo/nieve. Además, realiza una correlación entre la actividad sísmica y estas anomalías térmicas, lo que evidencia la interacción de un sistema hidrotermal con inyecciones o movilizaciones de fluidos magmáticos durante los años 2002, 2003, 2004 y 2005.
- *Lees J. & Ruiz M. (2008). Non-linear explosion tremor at Sangay, Volcano, Ecuador.* Es un análisis de la sísmica del Sangay, con el fin de determinar la física de su conducto, para lo cual se midieron tiempos de arribo y amplitudes de las ondas sísmicas.

- *Robles A. (2010) sin publicar. Cambios morfológicos y medidas térmicas en los flancos superiores del volcán Sangay, desde el año 2003 hasta el presente.* Este informe fue el resultado de la investigación realizada en la asignatura de Proyecto Geológico de la Carrera de Ingeniería Geológica de la EPN, en donde se describe los cambios morfológicos y las medidas térmicas del Sangay en base a imágenes digitales y térmicas en el periodo 2003 - 2010.
- *Valverde V. (2014). Los depósitos de avalanchas de escombros provenientes del volcán Sangay: caracterización petrográfica – geoquímica.* Esta tesis de grado de la Carrera de Ingeniería Geológica de la EPN describe los depósitos de avalanchas que afectaron a los poblados distales del Sangay, mediante un análisis petrográfico y geoquímico.
- *Narváez D. (2016). Constraining Mantle and Slab Components on Lavas and Olivine-Hosted Melt Inclusions from Puñalica and Sangay Volcanoes.* Esta investigación estudia las inclusiones fluidas en cristales de olivino presentes en las rocas más primitivas para analizar los procesos primordiales involucrados en la generación de magma de los volcanes Puñalica y Sangay.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Geodinámica Actual del Ecuador

El Ecuador está ubicado en un margen continental activo, sobre el límite de placas tectónicas Sudamericana y Nazca (Fig. 3). La placa Nazca se formó en el Mioceno Temprano a partir de la separación de la placa Farallón (Pennington, 1981). Esta placa subduce por debajo de la placa continental Sudamericana con una velocidad aproximada de 60-70 mm/año en una dirección W a E (Trenkamp et al., 2002; Nocquet et al., 2014). La placa oceánica se subduce continuamente hasta una profundidad de unos 200 km con una inclinación entre 25°- 35° (Guillier et al., 2001; Font et al., 2013), dicho ángulo influye directamente en el desarrollo del volcanismo en el Ecuador (Yepes et al., 2016).

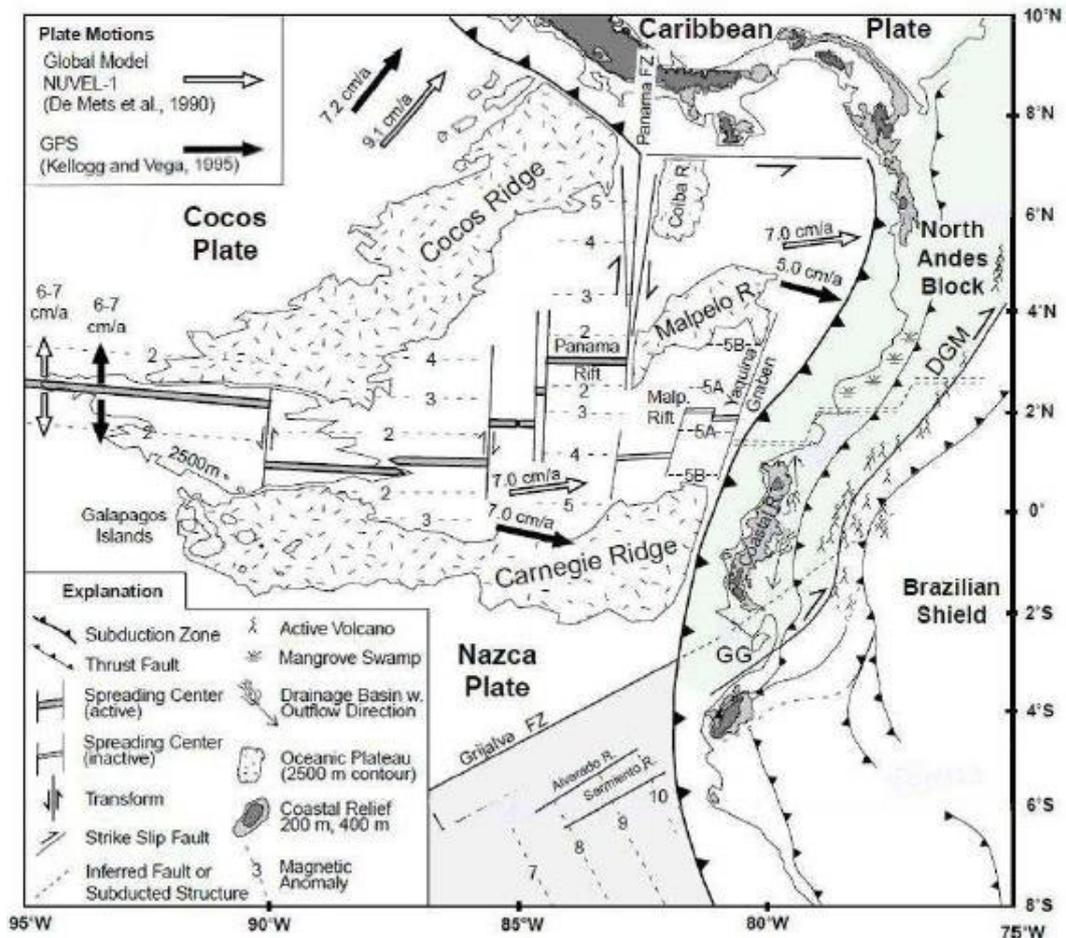


Figura 3. Esquema del Contexto geodinámico del Ecuador. Tomado de Gutscher et al., (1999).

El margen continental sufre deformaciones relacionadas a la subducción de la placa de Nazca, el sistema de rift Malpelo, la zona de Fractura de Grijalva (GFZ) y la Cordillera submarina asísmica de Carnegie (Collot et al., 2009). El inicio de la colisión de esta última

con el margen continental aún es tema de debate, debido a las varias propuestas que algunos autores plantean, proponiendo una colisión hace 1-3 Ma (Lonsdale & Klitgord, 1978), 4-5 Ma (Collot et al., 2009) y entre 9-15 Ma. (Spikings et al., 2010).

La subducción de Carnegie es la responsable del desplazamiento relativo del Bloque Norandino hacia el NNE (Witt et al., 2006), además su ingreso por debajo del continente (Fig. 3) influye directamente en la tectónica regional y la química del volcanismo activo en el Ecuador continental, esto debido a sus características geoquímicas y morfológicas (Gutscher et al., 1999; Hidalgo et al., 2007; Samaniego et al., 2009).

## 2.2. Geología Regional

El Ecuador continental puede subdividirse en cinco regiones morfotectónicas distintas (Fig. 4): el Antearco Costero, la Cordillera Occidental, el Valle Interandino, la Cordillera Oriental y la Cuenca del Oriente.

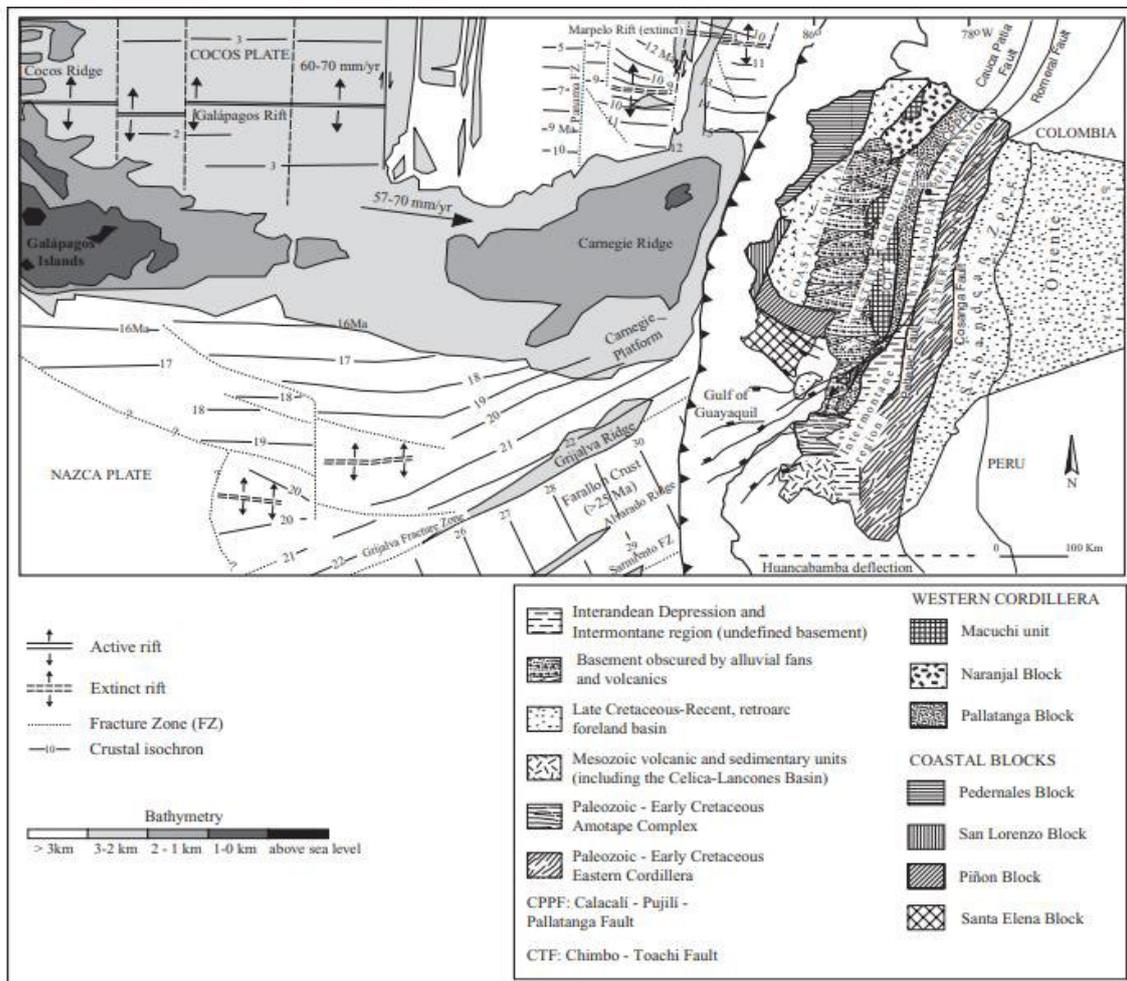


Figura 4. Principales regiones geológicas morfoestructurales del Ecuador. Tomado de Vallejo et al., 2009.

- El *Antearco Costero* está compuesto por el basamento de origen oceánico Piñón, que está datado de edad Aptiana – Albiana. Sobre este se depositan sedimentos pelágicos,

turbiditas volcanoclásticas y coladas volcánicas de arco insular (Jaillard et al., 1995), durante el Paleógeno y Neógeno. Debido a un régimen tectónico compresivo – distensivo se desarrollaron cuencas de antearco, entre las más importantes están: Borbón, Esperanza, Progreso y Jambelí que fueron rellenadas por sedimentos provenientes de la Cordillera Occidental (Jaillard et al., 1997).

- La *Cordillera Occidental* está formada por un basamento compuesto por dos terrenos; el más antiguo, el terreno Pallatanga (Cretácico) que consiste de un plateau oceánico, turbiditas básicas e intermedias (Hughes & Pilatasig, 2002), y el más joven el terreno Macuchi (Paleoceno tardío - Eoceno) que comprende una secuencia volcanosedimentaria de arco de isla. Esta cordillera presenta rocas extrusivas e intrusivas máficas e intermedias yuxtapuestas tectónicamente con depósitos sedimentarios del Cretácico tardío al Mioceno (Jaillard et al., 2004; Vallejo et al., 2009)
- El *Valle Interandino* está orientado aproximadamente NNE-SSW entre  $\sim 2^{\circ}30'S$  -  $\sim 0^{\circ}45'N$  (Hall et al., 2008). Esta depresión hospeda a depósitos volcánicos gruesos del Plioceno - Pleistoceno. Hacia el occidente, está limitado por el sistema de fallas Calacalí - Pujilí (Hughes & Pilatasig, 2002). Este sistema de fallas representa una sutura reactivada entre el margen continental sudamericano y las rocas oceánicas acumuladas (Aspden & Litherland, 1992). Su límite oriental es la Falla de Peltetec, la cual según Litherland et al. (1994), es el resultado de la acreción de los terrenos que conforman la Cordillera Real durante el Jurásico Tardío, y según Spikings et al., (2015) corresponde al resultado de la acreción del Bloque Pallatanga en el Cretácico Tardío.
- La *Cordillera Oriental o Real* está compuesta de rocas metamórficas Paleozoicas y granitoides Mesozoicos y rocas volcánicas del Mioceno. Tiene una orientación NNE-SSW que corresponden a cinco terrenos de naturaleza alóctona y autóctona desarrollados en diferentes ambientes y separados por fallas regionales (Litherland et al., 1994). Estos terrenos litotectónicos son de oeste a este: Terreno Guamote (entre las fallas Ingapirca y Peltetec), Terreno Alao (entre las fallas de Peltetec y Frente Baños), Terreno Loja (entre las fallas de Frente Baños y Llanganates), Terreno Salado (entre las fallas Llanganates y Cosanga Méndez) y Terreno Zamora.
- La *Cuenca del Oriente*, incluida la Zona Subandina, es una cuenca del retroarco Cretácico tardío - Cuaternario que se desarrolló en el margen de la placa Sudamericana, en respuesta al crecimiento de la Cordillera Oriental (Ruiz et al., 2004; Horton, 2018). Además, la Cuenca Oriente forma parte del sistema de ante-país Marañón-Oriente-Putumayo (Barragán, Baby, & Duncan, 2005) desarrollado entre el basamento Pre-Cámbrico del escudo Brasileño-Guyanés al este, y la Cordillera Oriental o Real al oeste.

Preserva un relleno sedimentario desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, sobre el basamento cratónico Precámbrico (Tschopp, 1953).

## **2.3. Volcanismo Plio-cuaternario**

Colombia y Ecuador forman parte de la Zona Volcánica Norandina. En el Ecuador, el arco volcánico está presente desde 1°N hasta los 2°S, extendiéndose aproximadamente por 350 km (en dirección NNE-SSW) desde el volcán Cerro Negro al norte hasta el volcán Sangay al sur (Fig. 5). Según Hall et al., (2008), el volcanismo del Plioceno tardío al presente, se manifiesta a lo largo de cuatro grupos o franjas lineales semi-parallelas, las cuales presentan características morfológicas, petrográficas, químicas y de estilos de erupción propias y que se mencionan a continuación:

### **2.3.1. Volcanes de la Cordillera Occidental**

El Frente Volcánico Ecuatoriano o Cordillera Occidental está conformado por una fila de volcanes que se encuentran sobre basamento compuesto de rocas basálticas y volcano-sedimentarias (Hughes & Pilatasig, 2002; Jaillard et al., 2004; Hall et al., 2008). Los volcanes de esta cordillera son estratovolcanes de 10-20 km de diámetro basal, que presentan actividad andesítica o dacítica (Bablon et al., 2019). Morfológicamente la mayoría de los centros volcánicos son conos compuestos que pueden presentar cicatrices de deslizamiento de 2-3 km de diámetro (Hall et al., 2008). La composición del magma se encuentra entre 60-66 wt. % de SiO<sub>2</sub> y 0.9 -1.5 wt. % de K<sub>2</sub>O (Hall y Beate, 1991; Hall et al., 2008).

Los principales volcanes, en sentido N-S, son: Chiles – Cerro Negro, Chachimbiro, Cotacachi – Cuicocha, Pululahua, Casitagua, Atacazo - Ninahuilca, Corazón, Illiniza Quilotoa, Carihuairazo, Chimborazo, entre otros.

### **2.3.2. Volcanes del Valle Interandino**

El Callejón Interandino está compuesto por estratoconos simples y/o grupos de volcanes. Generalmente, son edificios andesíticos antiguos y muy erosionados (Hall & Beate, 1991). La altura de estos edificios varía entre 3800 y 4700 msnm, varios de ellos presentan cicatrices de deslizamiento remanentes con crecimientos de domos en su interior. Son considerados como extintos (Hall et al., 2008), a excepción del Imbabura cuya última erupción fue durante el Holoceno (Le Pennec et al., 2011). Estos edificios volcánicos están caracterizados por andesitas básicas, que químicamente tienen 57-60 wt. % de SiO<sub>2</sub> y 0,5-1,0 % de K<sub>2</sub>O (Hall et al., 2008). Ejemplos de estos edificios volcánicos son: Ilaló, Pasochoa, Rumiñahui, Cusín, Mojanda – Fuya Fuya, Imbabura, Igualata.

### **2.3.3. Volcanes de la Cordillera Real**

Esta franja volcánica se desarrolla sobre rocas metamórficas Paleozoicas y Mesozoicas, y volcanosedimentarias del Terciario tardío. Se extiende desde el Soche al norte, hasta el Sangay en el sur (Hall & Beate, 1991). Estos edificios son estratovolcanes andesíticos con alturas entre 4700 y 5900 msnm, y diámetros basales de 15-20 km (Hall et al., 2008).

Estos volcanes han sido más activos durante el Holoceno que aquellos formados sobre la Cordillera Occidental. Su actividad característica es la generación de flujos de lava, corrientes de densidad piroclásticas, caída de ceniza y escoria con una dirección preferencial hacia el W. Así, flujos de lava en el Antisana, Cotopaxi, Tungurahua viajaron hasta 40-50 km por valles cercanos (Hall et al., 2008). Los productos de las erupciones más jóvenes son principalmente andesitas con bajo contenido de sílice y afinidad calco-alcalina (56-61% SiO<sub>2</sub>, 1-2% K<sub>2</sub>O) (Hall et al, 2008), a excepción de las lavas de los volcanes Cayambe y El Soche, cuyas lavas recientes son mayormente dacíticas (Samaniego et al., 2005).

Los principales volcanes que definen estas filas son (de Norte a Sur): El Soche, Cayambe, Pambamarca, Chacana, Antisana, Cotopaxi, Chalupas-Sincholagua, Tungurahua, El Altar y Sangay. El volcán El Reventador, a pesar de su ubicación en la zona Subandina, se lo asocia, dado su petrografía y geoquímica, con esta fila de volcanes (Barragan & Baby, 2002).

### **2.3.4. Volcanes del Tras-Arco**

Esta franja volcánica se encuentra a 50 km al este de la Cordillera Real sobre la Zona Subandina. Algunos de estos estratovolcanes, con alturas entre 2000 y 4000 m de altura, tienen forma cónica a pesar de la intensa erosión de esta zona.

Los edificios del Tras-Arco se diferencian del resto de volcanes del Arco Ecuatoriano por ser constituidos por rocas como las tefritas y las basanitas y la afinidad fuertemente alcalina de sus magmas (42-53% de SiO<sub>2</sub> y 1-5% de K<sub>2</sub>O). A este grupo de volcanes pertenecen el Sumaco, Pan de Azúcar, Yanaurco, y los conos de escoria del Puyo (Hall & Beate, 1991), estos últimos de edad de Pleistoceno medio aflorando cerca de Puyo (Hoffer et al., 2008).

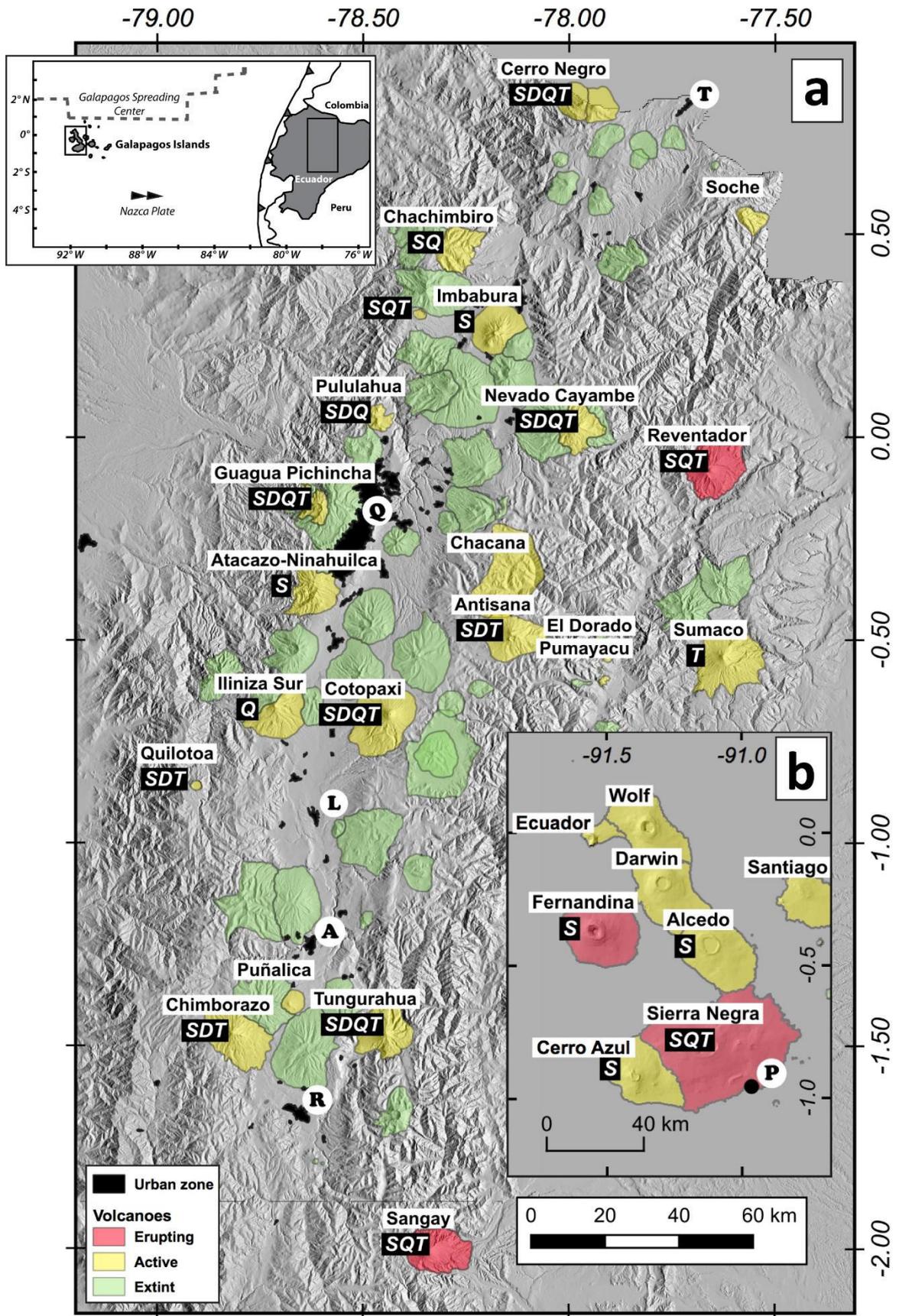


Figura 5. Mapa de volcanes Cuaternarios del Ecuador, tomado de Bernard & Andrade (2011) en Ramón, et al., (2021).

## 2.4. Geología Local del Volcán Sangay

El volcán Sangay ubicado al este de la Cordillera Real, es el último volcán activo al sur del Ecuador y de la Zona Volcánica Norandina. Está limitado por los ríos Volcán y Sangay, su flanco oriental baja hasta la selva amazónica y el occidental se une con una llanura formada de material piroclástico (principalmente ceniza y lapilli no consolidado) que se extiende por unos 15 km (Hall, 1977).

El Sangay, al igual que los demás volcanes de la Cordillera Real, yace sobre un basamento de rocas metamórficas del Paleozoico y Mesozoico (Aspden & Litherland, 1992) y rocas volcánicas del Terciario Tardío (Hall et al., 2008). Este volcán predominantemente andesítico, creció dentro de calderas en forma de herradura de dos edificios anteriores, produciendo grandes avalanchas de escombros que llegaron a las tierras bajas amazónicas (Valverde, Los depósitos de avalanchas de escombros provenientes del volcán Sangay: caracterización petrográfica - geoquímica, 2014).

Según estudios realizados por el Instituto Geofísico, la actividad del Sangay se ha caracterizado por ser principalmente de tipo estromboliana con explosiones de bloques y ceniza, caída de ceniza, flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares e intensa actividad fumarólica (Ordóñez et al., 2013).

### 2.4.1. Desarrollo del Volcán

Según Monzier et al., (1999), el complejo volcánico comprende tres edificios: Sangay I, Sangay II y Sangay III, siendo este último el cono actual (Fig. 6).

- SANGAY I: Es el edificio más antiguo, formado por un anfiteatro abierto hacia el este que rodea al Sangay I y II. La forma de “C” del edificio se interpreta como un sector de colapso, cuyos depósitos distales llegaron a las planicies amazónicas. En base a las muestras tomadas y las dataciones realizadas (Ar-Ar) se cree que el volcán Sangay I probablemente se construyó hace unos 500–250 ka.
- SANGAY II: Este edificio aparentemente tenía una forma alargada E-W. Similar a Sangay I, la historia de Sangay II terminó con un importante colapso dirigido hacia el este, que resultó en una depresión de avalancha en forma de “C” de 5 km de ancho. Debido a la datación de Ar-Ar realizada, el rango para la construcción del volcán Sangay II es de 100 a 50 ka.
- SANGAY III: Es un cono casi perfecto con pendientes de  $\sim 35^\circ$ , ligeramente alargado en un eje NE-SW. Su cumbre, orientada aproximadamente W-E, se compone de tres cráteres y un domo. Varios de sus flujos de lavas han sido cubiertos por morrenas del último periodo de glaciación (datado entre 32 y 14 ka), por lo que la edad mínima de Sangay III es de 14 ka.

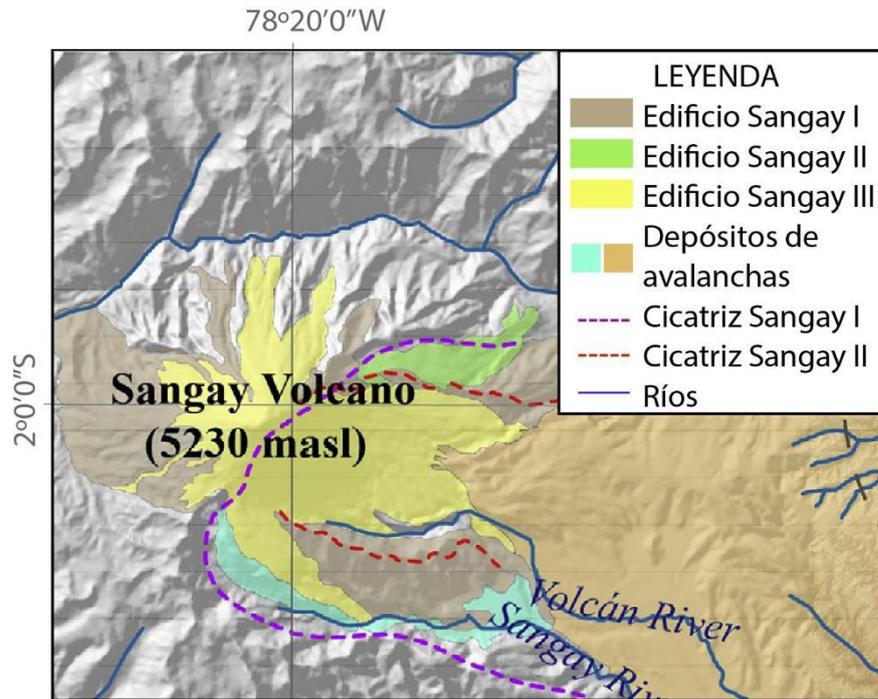


Figura 6. Mapa que muestra los tres edificios del complejo volcánico Sangay. Modificado de (Valverde, Mothes, Beate, & Bernard, 2021)

#### 2.4.2. Elementos morfológicos de la cumbre

La cumbre del volcán Sangay se encuentra alargada en sentido E - W y presenta tres cráteres y un domo los cuales han ido modificando la morfología la cumbre debido a la casi permanente actividad explosiva y efusiva del edificio (Fig. 7).

Las primeras observaciones del volcán Sangay realizadas por Monzier et al., (1999), describen que para 1946, un gran cráter activo, Cráter Central, ocupaba toda la cumbre del volcán. Para 1965, se había formado un cráter más pequeño al noreste del primero, y para 1975, otro al occidente. Al mismo tiempo, un flujo de lava surgió de una fractura ubicada en el extremo occidental de la cumbre, formando así un nuevo domo.

En 2007, a través de imágenes visuales y térmicas, se evidencia la formación de la Zona de Domos Ñuñurco al suroriente del Cráter Central, que está formada por tres domos, el primero que fue observado en mayo de 2007, el segundo en abril de 2012 y el último en diciembre de 2014.

Por lo que para finales de 2014 la cumbre del volcán Sangay presentaba los siguientes rasgos volcánicos: Domo Occidental, Cráter Occidental, Cráter Central, Cráter Noreste y Zona de Domos Sureste o Ñuñurco (Fig. 7).

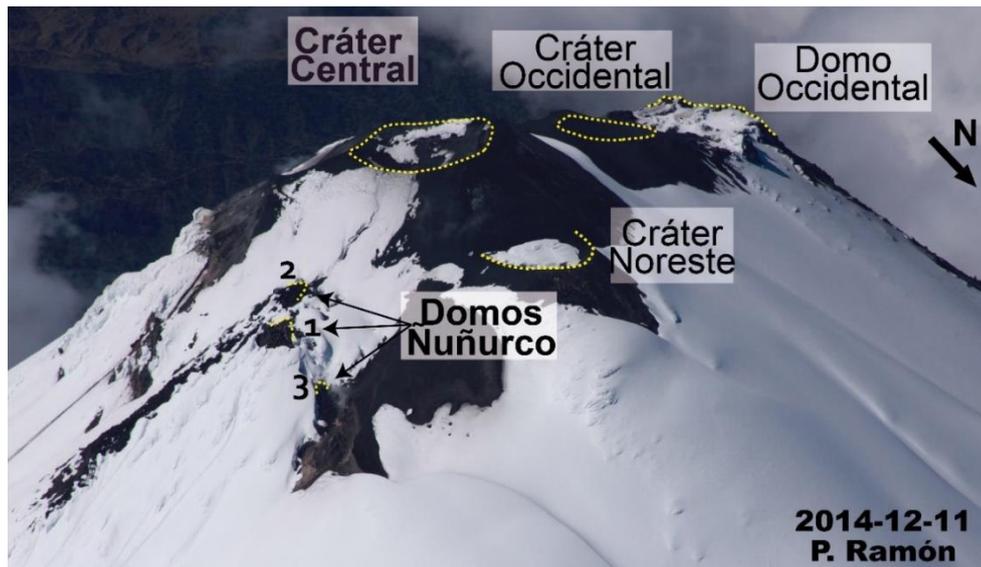


Figura 7. Elementos morfológicos de la cumbre del volcán Sangay (W-E): Domo Occidental, Cráter Occidental, Cráter Central, Cráter Noreste y Zona de Domos Nuñurco.

### 2.4.3. Actividad Eruptiva Característica

#### 2.4.3.1. Actividad superficial reportada

El Sangay es considerado uno de los volcanes más activos del Ecuador, manteniéndose en actividad eruptiva constante desde 1628 (Hall, 1977). Grandes erupciones de tipo estromboliana ocurrieron en 1628, 1728, 1738–1744, 1842–1843, 1849, 1854–1859, 1867–1874, 1872, 1903, 1934–1937 y 1941–1942 (Monzier et al., 1999). Según el monitoreo satelital de alertas termales, desde hace varias décadas este volcán se mantenía en erupción continua con periodos cortos de reposo. Sin embargo, desde el año 2015 dicho comportamiento cambió a uno cíclico, caracterizado por fases de intensa actividad (2 a 3 meses) seguidas por etapas de reposo de entre 9 a 13 meses (Fig. 8) (Vasconez et al., 2018). Las últimas fases eruptivas se registraron del 8 de agosto al 7 de diciembre de 2018, y el 7 de mayo de 2019, inició una nueva fase que se mantiene hasta la actualidad (septiembre, 2020).

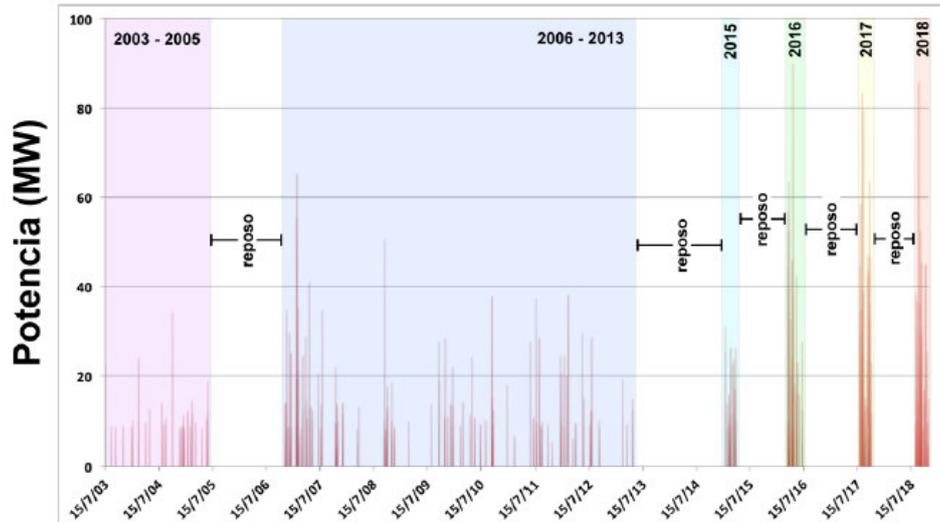


Figura 8. Anomalías termales registradas por el sistema satelital MODVOLC. Los rectángulos de colores separan las etapas de actividad eruptiva registradas desde el 2003 hasta la actualidad (2018). Destaca el cambio en el comportamiento del volcán desde 2015. Tomado de (Vasconez et al., 2018).

En las dos últimas décadas, la actividad del volcán ha sido de tipo efusiva y explosiva, y se ha centrado principalmente en el Cráter Central y los domos surorientales. Se han registrado flujos de lava emitidos por el Cráter Central, que han descendido por el flanco sur, además de emisiones moderadas de columnas de ceniza (Fig. 9) y de gases desde este centro eruptivo. Mientras que desde los Domos Ñuñurco, se ha observado la emisión intermitente de flujos de lava.



Figura 9. Explosión y emisión de ceniza emitida por el Cráter Central. (Foto: Ramón P. IG EPN).

## 2.4.3.2. Productos volcánicos asociados al volcán Sangay

### 2.4.3.2.1. Flujos de lava

El volcán Sangay ha presentado actividad efusiva durante el periodo de estudio. En 2003, 2004 y 2005, mediante fotografías aéreas oblicuas, se observó flujos de lava emitidos desde el Cráter Central con dirección S-SSE (Fig. 10a). En 2007, un nuevo flujo fue emitido en el flanco SE del volcán, formando un nuevo domo, Domo Ñuñurco 1, el cual permaneció activo hasta 2012 (Fig. 10b). Para 2012, se formó un nuevo domo debido a la emisión de

un flujo de lava al oeste del anterior (Fig. 10b), y en 2014, en imágenes visuales se observó un flujo de lava más pequeño en el flanco este del edificio (Fig. 10c). En 2015, nuevos flujos de lava, de alrededor de 900 m de longitud, descendieron desde el cráter por el lado suroriental de la cumbre (IG-EPN, 2015). A partir del año 2017, se ha observado la emisión intermitente de flujos de lava desde el domo suroriental (IG-EPN, 2017; IG-EPN, 2018), y en el último año, los flujos de lava han tenido un alcance máximo >470 m desde su punto de emisión y se han caracterizado por ser más anchos que flujos anteriores (Fig. 10) (IG-EPN, 2019).

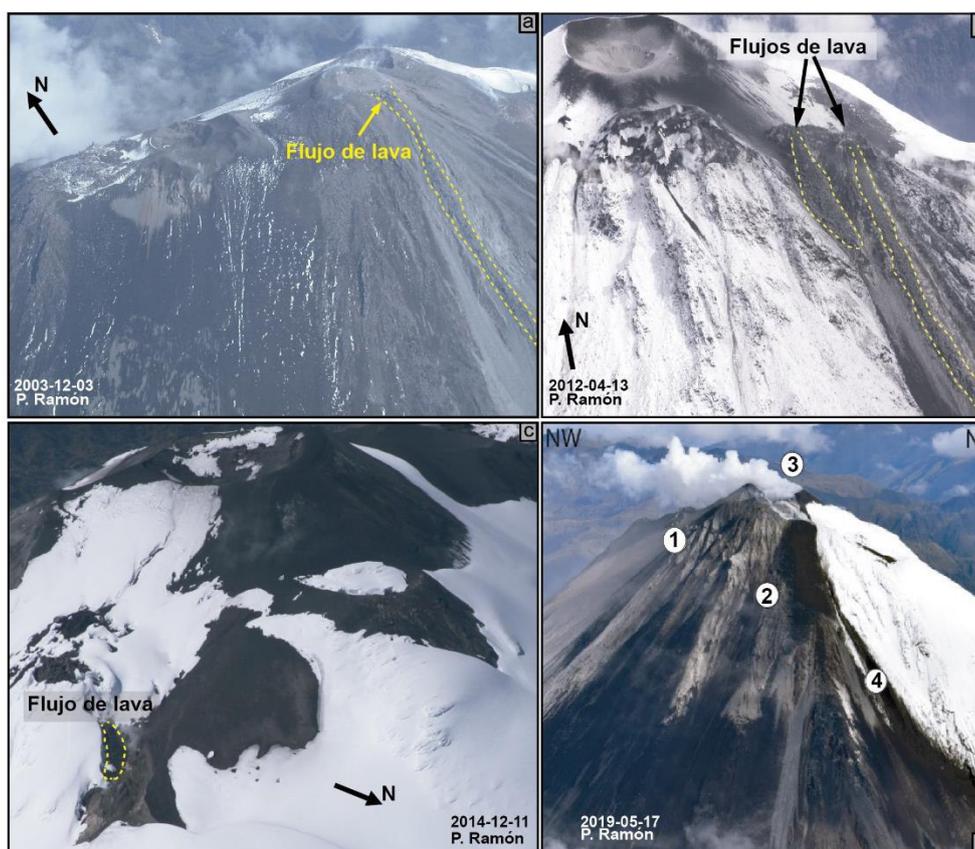


Figura 10. a) Fotografía aérea oblicua del volcán Sangay, se observa un flujo de lava que desciende del Cráter Central (Fotografía Ramón P., IG-EPN), b) Flujos de lava de los Domos Ñuñurco (Fotografía Ramón P., IG-EPN), c) Flujo de lava pequeño en el flanco este del volcán (Fotografía Ramón P., IG-EPN), d) Fotografía de rango visible desde el flanco sur del volcán Sangay: (1) fisura asociada a la emisión de flujos de lava a través del viento “Domo Ñuñurco”, (2) Flujo de lava activo desde el domo Ñuñurco, (3) Cráter Central y emisión de columna de gases volcánicos, (4) Flujo piroclástico derivado del colapso del frente del flujo de lava (Tomado de IG-EPN, 2019)

#### 2.4.3.2.2. Corrientes de densidad piroclásticas

Según Monzier et al., (1999), los depósitos de los flujos piroclásticos estaban bien expuestos en distintos sitios del edificio, presentando diferentes características composicionales. En el año 2019, se ha observado flujos piroclásticos pequeños, medianos y algunos grandes, que se han originado por colapso del frente del flujo de lava del domo suroriental o Domo Ñuñurco (Fig. 10d). Estos flujos piroclásticos han alcanzado la cuenca

y cauce superior del río Volcán (IG-EPN, 2019a) generando acumulación de material a lo largo de su cauce y en su confluencia con el río Upano, represando en varias ocasiones este río.

#### **2.4.3.2.3. Crecimiento de domos de lava**

En 1983 se formó un domo en el extremo occidental de la cumbre, a partir de lava que se desprendió lentamente por una fractura, creciendo aproximadamente durante dos décadas, generando caídas de rocas y flujos de lava (Monzier et al., 1999). Mediante la observación de fotografías aéreas oblicuas, en 2007 se registró la presencia de un domo al suroriente del Cráter Central, al cual se lo denominó Ñuñurco 1, para 2012 se formó otro domo, Ñuñurco 2, localizado al oeste de Ñuñurco 1 (Fig. 10b). De estos domos han descendido intermitentes flujos de lava. Finalmente, a partir de imágenes visuales térmica, se identificó un tercer domo de menor tamaño, Ñuñurco 3, el cual fue observado en 2014 con la emisión de un flujo de lava hacia el sur este (Fig. 10c).

#### **2.4.3.2.4. Flujos escombros y lodo**

Los constantes desprendimientos de rocas de los domos y la acumulación de material volcánico, proporcionan material adicional para la generación de los flujos de escombros, los cuales se cree que inician como flujos piroclásticos en la cima del volcán (Monzier et al., 1999). En el 2019, sobrevuelos sobre el río Volcán confirmaron el descenso de flujos de lodo (lahares) a lo largo de este río, alcanzando en algunas ocasiones el río Upano. Estos lahares se forman por la erosión del material volcánico depositado en las laderas del volcán Sangay, el cual es removido cuando hay fuertes lluvias (IG-EPN, 2019b).

#### **2.4.3.2.5. Depósitos de caídas de piroclastos**

Grandes erupciones produjeron la caída de ceniza y de escoria lapilli principalmente hacia el occidente del cono, estos depósitos de composición andesítica, raramente dacítica, estarían asociados a los edificios Sangay I y Sangay II. Por ejemplo, en 1628, una erupción del Sangay habría emitido una gran columna de ceniza con dirección noroeste, llegando a la ciudad de Riobamba, a 50 km de distancia de este centro eruptivo (Lewis, 1950 en Monzier et al., 1999). A lo largo del periodo de estudio (2003-2019), se han registrado intermitentes y ligeras emisiones de ceniza a través de la Washington Volcanic Ash Advisory Center (VAAC) (Global Volcanic Program, 2013).

#### **2.4.4. Peligros Asociados**

El volcán Sangay se encuentra en la región Amazónica, ampliamente rodeado por tierras deshabitadas, por lo que su actividad no representa un peligro inminente importante para

las áreas habitadas las que se ubican entre 30 y 100 km de distancia del volcán (Monzier et al., 1999).

Las caídas de ceniza y escoria, los flujos piroclásticos, los lahares y los desprendimientos de rocas intensos pueden representar peligros muy graves en períodos de actividad media a alta (Monzier et al., 1999), debido a que dichos fenómenos podrían alcanzar los ríos Upano y Palora afectando a poblaciones cercanas a estos.

Ordóñez et al. (2013), en su trabajo “Volcán Sangay: Peligros Volcánicos Potenciales”, describen los peligros volcánicos asociados a este edificio, en los que constan: flujos piroclásticos, flujos de lava, emisiones y caídas de piroclastos, flujos de escombros y lodo, deslizamientos y avalanchas de escombros, y gases volcánicos; además proponen zonas de amenaza, a través de la aplicación de técnicas computacionales de modelización de los fenómenos volcánicos, con datos de erupciones de volcanes andesíticos análogos, y con información geológica disponible. Estas zonas de peligro han sido definidas para flujos piroclásticos, flujos de lava y lahares proximales; para dispersión y caídas de piroclastos; y para lahares proximales.

Por su parte, estudios realizados por Valverde (2014), determinan que el volcán Sangay ha experimentado al menos dos avalanchas de escombros, una ocurrida entre 250 – 100 ka, según las edades de construcción de los edificios Sangay I y Sangay II, y otra de 29 ka, en las que involucró grandes volúmenes de material llegando a depositarse en zonas a más de 60 km de distancia del edificio, en los cuales actualmente se asientan los poblados de: Palora, Sangay, Arapicos, Santa Inés, Pablo VI, entre otras. Estos depósitos sugieren que las avalanchas del volcán Sangay se encuentran entre las más grandes del mundo y que no se puede descartar la posibilidad que este fenómeno vuelva a ocurrir en el cono actual.

En los últimos años se ha observado que la caída de ceniza ha alcanzado grandes distancias, así el 18 de septiembre de 2018 el IG-EPN reportó una ligera caída de ceniza en la ciudad de Guayaquil (Vasconez et al., 2018), y en el año 2019 ha alcanzado poblaciones de las provincias de Guayas, Chimborazo y Azuay (IG-EPN, 2019b).

## **2.5. Vigilancia visual y térmica del volcán Sangay**

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional ha realizado monitoreo visual y térmico al volcán Sangay desde el año 2003 hasta la actualidad, a través de imágenes de rango visible e imágenes térmicas tomadas durante sobrevuelos.

El primer sobrevuelo realizado fue en marzo de 2003 y a partir de esta fecha se realizaron 38 sobrevuelos más hasta agosto de 2019 (Anexo 1). Para el primero año hubo dos sobrevuelos, en 2004 uno, para 2005 dos y en 2006 ninguno. Entre 2007 y 2011, el número

de sobrevuelos realizados fue de 4 a 5 por año. Para 2013 se tiene datos de tres sobrevuelos. En los años 2015 y 2016 hubo dos sobrevuelos por año y para 2012, 2014, 2017, 2018 y 2019 uno solo. De este total de sobrevuelos (39) se descartó cuatro (18 de marzo 2005, 1 de noviembre 2007, 17 de abril de 2008 y 7 de octubre de 2016) en los cuales no se obtuvo ninguna imagen visual o térmica de buena calidad, dada las condiciones de fuerte nubosidad (Anexo 1).

### 2.5.1. Adquisición de imágenes térmicas

Las imágenes térmicas fueron obtenidas por personal del IG-EPN durante el monitoreo térmico que realiza al volcán Sangay desde el año 2003. Estas imágenes fueron capturadas con dos modelos de cámaras térmicas: FLIR THERMACAM PM 695 y FLIR SC660 (Fig.11). La primera fue utilizada hasta el año 2010 y se caracteriza por tener una resolución de 320x240 pixeles y rangos de temperaturas de -40° a 120°C, 0° a 500°C y 350° a 1500°C (FLIR SYSTEM, 2000); mientras que la segunda presenta una resolución de 640x480 pixeles y los mismos rangos de temperatura (FLIR SYSTEM, 2009), la cual es utilizada actualmente (Anexo 3).



Figura 11. Cámaras térmicas usadas en el IG-EPN para el monitoreo térmico del volcán Sangay. a) THERMACAM PM 695. Tomado de (ASHTREAD TECHNOLOGY, s.f.), b) FLIR SC660. Tomado de (KVR Energy Limited, s.f.).

La obtención de imágenes térmicas ha sido realizada preferentemente a tempranas horas del día para evitar la influencia del sol con una variación del rango de temperatura para captar con mayor precisión la medida de temperatura de las diferentes anomalías térmicas presentes en el sector. El monitoreo térmico busca captar anomalías térmicas en el edificio y además, tomar imágenes de rasgos previamente identificados.

La distancia a la que se toman las imágenes y el número de estas depende de la actividad del volcán y de las condiciones atmosféricas. La distancia se procura que sea a un radio de aproximadamente 1 km de la cumbre. Para el volcán Sangay se obtuvo un total de 1397 imágenes, con un promedio de 39 imágenes por sobrevuelo (Fig. 12).

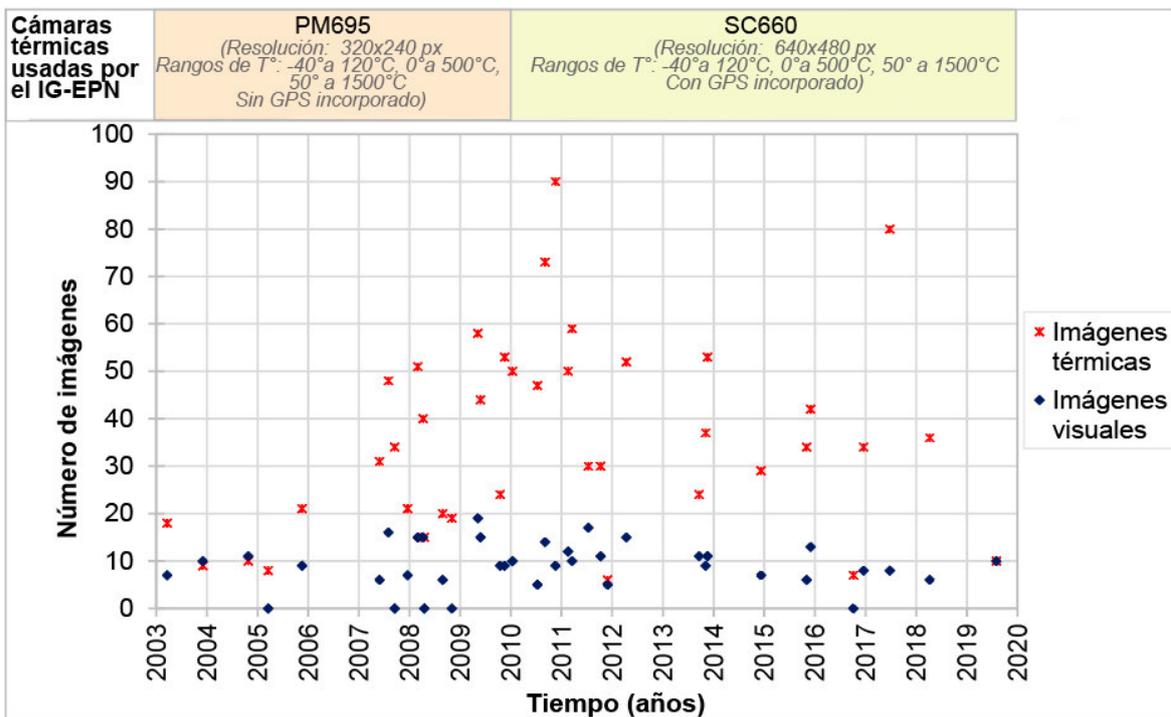


Figura 12. Número de imágenes térmicas y visuales tomadas durante los sobrevuelos entre 2003 y agosto de 2019.

## 2.6. Sensores Remotos

La percepción remota (también llamada teledetección) es la práctica de obtener información cuantitativa o semi-cuantitativa acerca de la superficie de la Tierra usando imágenes adquiridas, mediante el uso de la radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético (Campbell & Wynne, 2011). Dicho en otras palabras, es la recopilación de información relacionada con objetos sin estar en contacto físico con ellos, y los sensores remotos son los instrumentos capaces de obtener esta información.

La teledetección se puede dividir en (1) detección remota por satélite, cuando se utilizan plataformas satelitales; (2) fotografía y fotogrametría, cuando se utilizan fotografías para capturar la luz visible; (3) teledetección térmica, cuando se utiliza la zona de infrarrojos térmicos (IR) del espectro electromagnético; (4) radar (RADIO Detection and Ranging), cuando se utilizan longitudes de onda microondas; y (5) LiDAR (Light Detection And Ranging), cuando los pulsos láser se transmiten hacia el suelo y la distancia entre el sensor y el suelo se mide en función del tiempo de retorno de cada pulso (Weng, 2013).

Los sensores remotos se pueden instalar en aviones, satélites o transbordadores espaciales para tomar imágenes de los objetos o eventos en la superficie de la tierra. Estos sensores se pueden clasificar en dos tipos: sensores pasivos y sensores activos. Se conoce como sensor pasivo cuando la fuente de energía proviene del exterior de un sensor (por ejemplo, cámaras fotográficas, sensores térmicos (IR)) (Natural Resources Canada,

2019). Los sensores activos usan la energía proveniente del interior del sensor, es decir, proporcionan su propia energía que se dirige hacia el objetivo a investigar (ejemplo, radar). Los sensores activos se pueden usar para obtener imágenes de la superficie en cualquier momento, de día o de noche, y en cualquier estación del año (a diferencia de los sensores pasivos, con excepción de los sensores térmicos) (Weng, 2013).

La teledetección satelital, aérea y terrestre son herramientas cada vez más esenciales para monitorear volcanes activos o potencialmente activos, permitiendo evaluar su impacto probable, en tiempo real o promediado en el tiempo. La importancia de la teledetección en la vigilancia volcánica radica en que los volcanes a menudo son inaccesibles durante las erupciones y pueden seguir siendo inaccesibles durante períodos prolongados después de la erupción, además debido a que sus productos pueden dispersarse en escalas regionales o globales (Pyle, Mather, & Biggs, 2013). La teledetección vulcanológica abarca numerosas técnicas, regiones de longitud de onda, estrategias de recolección de datos, objetivos y aplicaciones (Ramsey & Harris, 2013), por lo que muchos aspectos de una erupción ahora se pueden estudiar en algún nivel utilizando técnicas de teledetección en el aire o en el espacio (Mouginis-Mark, 2000).

### **2.6.1. Fundamentos de la termografía infrarroja**

La termografía es considerada una rama de la teledetección que se ocupa en medir la temperatura radiante de los rasgos superficiales de la Tierra desde la distancia. Se basa en el principio físico de que cualquier objeto más caliente que el cero absoluto emite radiación. Esta emisión radiada es una manifestación del estado de energía del objeto, que puede utilizarse para recuperar la temperatura radiante del objeto, también conocida como "temperatura aparente" (Spampinato et al., 2011).

#### **2.6.1.1. Espectro electromagnético**

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética. En este espectro se distinguen diferentes regiones o bandas dependiendo de las diferentes longitudes de onda. La región del espectro correspondiente a la radiación Infrarroja (IR), se puede subdividir en varias zonas. Según las bandas de transmitancia espectral atmosférica pueden ser infrarrojo cercano (NIR) entre 0.75 y 3  $\mu\text{m}$ ; infrarrojo medio (MIR) entre 3 y 6  $\mu\text{m}$ ; infrarrojo lejano (LIR) entre 6 y 15  $\mu\text{m}$  e infrarrojo extremo (XIR) entre 15 y 1000  $\mu\text{m}$  (Fig. 13) (Sánchez, 2017).

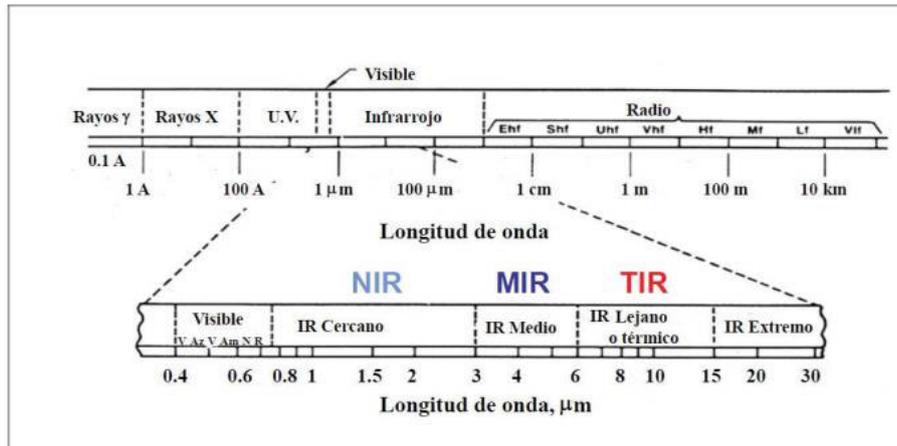


Figura 13. Bandas infrarrojas del espectro electromagnético. Tomado de Sánchez, (2017).

### 2.6.1.2. Radiación de cuerpo negro

En 1860, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) definió un cuerpo negro como una superficie que no refleja ni transmite la radiación incidente; sin embargo, un cuerpo negro es un sistema ideal que absorbe toda radiación incidente independientemente de la dirección y la longitud de onda (OMEGA, 2003).

En la naturaleza no existe una superficie con las características de un cuerpo negro, puesto que cualquier superficie siempre refleja parte de la energía transmitida sobre su superficie. La materia caliente emite radiación continua de energía desde su superficie, esta energía radiante es transportada por ondas electromagnéticas que, al incidir sobre la superficie de un cuerpo, pueden ser reflejadas, transmitidas o absorbidas. En un cuerpo, la energía que se absorbe es igual a la cantidad de energía que el cuerpo emite.

#### 2.6.1.2.1. Leyes fundamentales de la radiación

**Ley de Planck:** En 1900, Max Planck (1858–1947) planteó una expresión que describe la distribución espectral de la intensidad de radiación de un cuerpo negro, conocida hoy como la Ley de Planck (Ec. 1):

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

Ecuación 1. Ley de Planck

Donde:

$h$ : Constante de Planck =  $6.626069 \times 10^{-34}$  J

$c$ : Velocidad de la luz

$K$ : Constante de Boltzman =  $1.38065 \times 10^{-23}$  J/K

$T$ : Temperatura absoluta

$\lambda$ : Longitud de onda

La Ley de Planck da la intensidad irradiada por un cuerpo negro en función de la longitud de onda (Fig.14). Cuanto mayor es la temperatura, menor es la longitud de onda a la que se produce el pico en la salida de radiación.

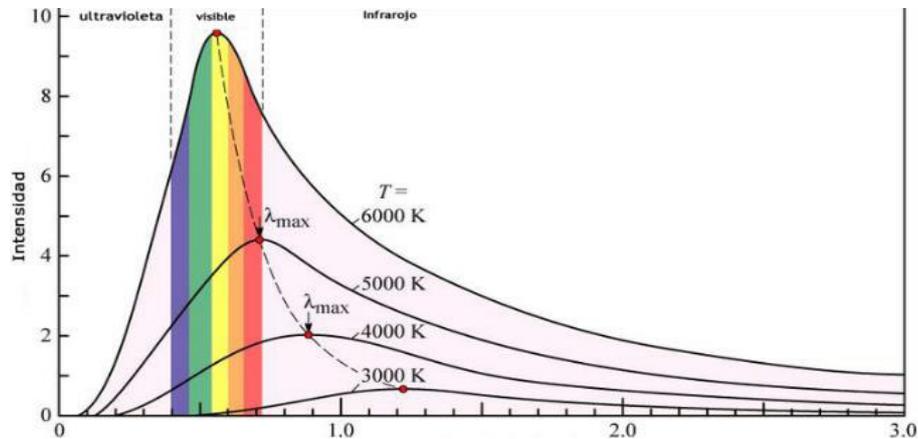


Figura 14. Curvas de radiancia espectral en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la temperatura. Tomado de (Fernández, 2015).

**Ley de Stephan Boltzmann:** En 1879, Josef Stefan (1835-1893) determinó experimentalmente una expresión simple que relaciona la emisión radiante de una superficie con su temperatura. Estos resultados fueron confirmados teóricamente en 1884 por Ludwig Boltzmann (1844-1906). Esta ley establece que la emisión de energía electromagnética por unidad de área de un cuerpo negro depende solo de la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Ec. 2).

$$I = \sigma T^4$$

*Ecuación 2. Ley de Stephan Boltzmann*

Donde:

$I$ : Energía radiada ( $W/m^2$ ).

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman =  $5.67051 \times 10^{-8} w/m^2K^4$

$T$ : Temperatura de la superficie en Kelvin (K)

**Ley de desplazamiento de Wien:** En 1893, Wilhelm Wien (1864-1928) midió las distribuciones espectrales de un cuerpo negro a diferentes temperaturas y descubrió que el pico de energía era proporcional a su longitud de onda correspondiente para diferentes temperaturas. Esta ley expresa la frecuencia (o longitud de onda) a la que la distribución de Planck tiene la intensidad específica máxima (Ec. 3).

$$\lambda_{max}T = 2,898 \times 10^{-3} mK$$

*Ecuación 3. Ley de desplazamiento de Wien*

Donde:

$T$ : Temperatura del cuerpo negro en Kelvin (K)

$\lambda_{max}$ : Longitud de onda del pico de emisión en metros

La ley de Wien explica por qué los cuerpos a elevada temperatura, generan principalmente radiación infrarroja de onda corta, mientras que los que se encuentran a baja temperatura, lo hacen solamente en forma de radiación infrarroja de onda larga.

### 2.6.1.3. Emisión de superficie real

#### 2.6.1.3.1. Emisividad ( $\epsilon$ )

Los cuerpos negros son idealizaciones, y ningún cuerpo real puede emitir la máxima radiación térmica a una temperatura dada. La emisión real de radiación térmica de cualquier objeto puede calcularse multiplicando la radiación del cuerpo negro por una cantidad que describa la influencia del objeto en estudio, la emisividad  $\epsilon$  (Vollmer & Mollmann, 2018).

La emisividad es la capacidad que tiene un cuerpo para radiar energía infrarroja. Kirchhoff en 1860 definió la emisividad, como la relación entre la radiación térmica emitida por una superficie real a una temperatura dada y la de un cuerpo negro en las mismas condiciones (temperatura, longitud de onda y dirección). Los valores de la emisividad varían entre 0 y 1 (Sánchez, 2017).

#### 2.6.1.3.2. Absorción ( $\alpha$ ), Reflectividad ( $\rho$ ), Transmisividad ( $\tau$ )

Cuando la radiación golpea una superficie, parte de ella se absorbe, parte se refleja y la parte restante, si la hay, se transmite (Fig. 15). La fracción de irradiación absorbida por la superficie se llama absorción, la fracción reflejada por la superficie se llama reflectividad, y la fracción transmitida se llama transmisividad (Pastor, s.f.).

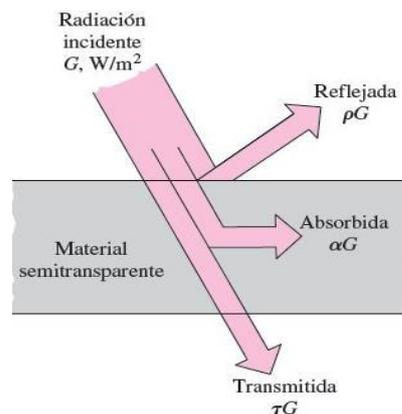


Figura 15. Absorción, reflectividad y transmisividad de la radiación incidente por un material semitransparente. Tomado de (Pastor, s.f.)

### 2.6.2. Mecanismos de transferencia de calor

#### 2.6.2.1. Calor y temperatura

El calor se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia. Es la transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos en virtud de una diferencia de temperatura. En cambio, la temperatura

es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia, es decir, es la medida del calor de un cuerpo (Beléndez, 2017). La transferencia de calor es el proceso de propagación de la energía térmica en un medio, se produce siempre que existe un gradiente térmico y persiste hasta que se alcance el equilibrio.

#### 2.6.2.2. **Conducción**

La conducción es la transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, donde las partículas más energéticas de una sustancia entregan energía a las partículas menos energéticas. Este mecanismo de transferencia puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases, pero es el único modo de transferencia en los sólidos (Fig. 16) (Hernández et al., 2010).

#### 2.6.2.3. **Convección**

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de una masa de fluido de una región del espacio a otra (Fig. 16). Este tipo de mecanismo puede ser natural o forzado. La convección natural es aquella que se da por el movimiento libre de fluidos como el aire y el agua en ambiente natural, mientras que la forzada se da cuando se aplica un estímulo externo al sistema (Corace, 2009)

#### 2.6.2.4. **Radiación**

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada (Fig. 16). Esta energía se genera a partir de los cambios en las configuraciones electromagnéticas (radiación electromagnética), es decir, que la radiación es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta (Hernández et al., 2010). La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro (Beléndez, 2017).

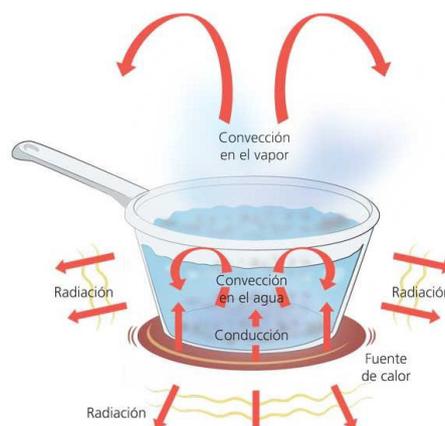


Figura 16. Mecanismos de transferencia de calor. Tomado de (Domínguez, s.f.)

## **2.7. Cámara infrarroja**

Las cámaras termográficas (cámara térmica, sistema de termografía o cámara infrarroja) son sistemas de imagen que se aproximan a la distribución de temperatura de un lugar (Budzier & Gerlach, 2011). El objetivo principal de una cámara infrarroja es convertir la radiación térmica en una imagen visual de color falso. Esta imagen visual debe representar la distribución bidimensional de la radiación térmica emitida por un objeto o una escena (Vollmer & Mollmann, 2018).

### **2.7.1. Historia de la cámara infrarroja**

En 1800, William Herschel midió la temperatura de cada uno de los colores que componen espectro; luego decidió medir la temperatura de la zona ubicada un poco más allá de la luz roja, descubriendo que esta región registraba temperaturas más altas que las anteriores. A estos rayos los denominó caloríficos y luego tomaron el nombre de "radiación infrarroja". En 1840, John Herschel logró obtener un registro primitivo de la imagen térmica en papel, que llamó un "termógrafo". Esto lo realizó utilizando un método que llamó evaporografía, el cual consistía en evaporar el alcohol de una superficie recubierta de carbono, que producía una imagen visible (Holst, 2000).

En 1946, los militares desarrollaron el primer escáner de línea infrarroja. Sin embargo, un termograma tardó una hora en producirse (Harris A. , Thermal Remote Sensing of active volcanoes, 2013). En 1954, se logró que la creación directa de una imagen bidimensional tome 45 minutos. Para 1960, el tiempo de creación de imágenes se redujo a 5 minutos (Holst, 2000).

En 1966, se introdujo el primer generador de imágenes en tiempo real, que producía 20 imágenes por segundo, siendo este el primer sistema de alta resolución temporal. Sin embargo, estos primeros sistemas no eran portátiles porque todavía dependían del escaneo, eran pesados y requerían material de soporte voluminoso. Estos sistemas podrían mirar hacia adelante, por lo que se denominaron Forward Looking Infrared (Radiometer) Systems o FLIRs (Harris A. , 2013).

En 1990, la realización de un sistema portátil se produjo con la introducción de matrices de planos focales (focal planes arrays, FPA) de alta resolución espacial. El primer sistema infrarrojos (mira fija) FPA de estilo videocámara, la serie ThermaCAM™, entró al mercado en 1995, con el primer sistema basado en microbolómetro no refrigerado (Harris A., 2013).

### **2.7.2. Diseño y operación básicos de la cámara térmica portátil**

La cámara térmica funciona de manera muy similar al radiómetro (instrumento que mide la radiación electromagnética a través de una banda de onda dada desde un solo punto en una superficie objetivo), la diferencia es que la radiación térmica o IR entrante es detectada

por una serie de detectores, conocido como FPA, para permitir la adquisición instantánea de una imagen (Harris A. , 2013).

Una vez que la radiación IR llega al sistema óptico, es enfocada por la lente hacia el FPA, donde se registra un voltaje en cada detector de la matriz. Este voltaje es una función de la radiación incidente sobre el detector. El voltaje es continuo y es muestreado por un convertidor que cuantifica el voltaje en una serie de números digitales. Estos números digitales se convierten en radiación espectral y posteriormente, a una temperatura de brillo integrada en píxeles para cada detector, mediante la Ley de Planck.

El sistema de control puede permitir la entrada de factores, tales como la configuración de ganancia, la distancia al objetivo, la emisividad o los parámetros atmosféricos, así como también el esquema de mapeo de color (paleta de colores) incluyendo la frecuencia de muestreo y duración de adquisición.

Las imágenes de salida presentan información como la fecha y la hora de la imagen, el nombre del archivo, el modelo de cámara, el número de serie y el tipo de lente, además de los parámetros ingresados por el operador (como la emisividad, la temperatura del aire, la humedad y la distancia al objetivo) e inclusive información de ubicación especial brindada por un GPS incorporado. Cada píxel en la imagen tendrá una temperatura de brillo, que puede o no haber sido corregida por la emisividad y los efectos atmosféricos.

En muchos casos, se requiere un software dependiente del fabricante para leer las imágenes y exportarlas a un formato público (e.g., jpg, bmp, mat). El mismo software permite un cierto grado de procesamiento y análisis de imágenes (Harris A. , 2013).

### **2.7.3. Imagen infrarroja**

La imagen infrarroja o térmica corresponde básicamente imágenes basadas en radiación infrarroja o térmica. En muchos casos se obtiene mapas de temperatura precisos, es decir, para medir las temperaturas de las superficies de los objetos. En otros casos, la información cualitativa es suficiente, por ejemplo, para reconocer puntos calientes en algunos objetos sin medir sus temperaturas (Paschotta, 2008).

Las imágenes infrarrojas se pueden mostrar con una escala de grises, donde la apariencia se vuelve más brillante en lugares con radiación más intensa. Alternativamente, a menudo se usan colores falsos que permite asociar los colores con las temperaturas (Fig. 17). Las distintas paletas de colores ayudan a distinguir con rapidez variaciones y patrones térmicos en una imagen. La elección de estas paletas es muy subjetivo, donde la clave está en seleccionar la paleta que muestra mejor las diferencias térmicas para su aplicación específica (Fluke Corporation, 2020).

Además de la escala de colores seleccionada, una imagen térmica presenta una temperatura mínima y máxima de escala (Fig. 17), las cuales pueden ser ajustadas mediante un software de procesamiento de imágenes térmicas.

#### **2.7.3.1. Resolución**

La resolución de la imagen se puede dividir en resolución espacial, temporal espectral y radiométrica.

La *Resolución Espacial* se define como el tamaño de la característica más pequeña posible que se puede detectar a partir de una imagen, es decir, que la resolución espacial determina el nivel de detalles espaciales que se pueden observar en la superficie de la tierra (Humboldt State University, 2014).

La *Resolución Temporal* se refiere a la cantidad de tiempo que le toma a un sensor regresar a una ubicación previamente fotografiada, comúnmente conocida como el ciclo de repetición o el intervalo de tiempo entre las adquisiciones de dos imágenes sucesivas (Natural Resources Canada, 2016).

La *Resolución Espectral* se refiere a cuántas "bandas" espectrales registra un instrumento. La resolución espectral también se define por cuán "ancha" es cada banda o el rango de longitudes de onda cubiertas por una sola banda (Weng, 2013).

La *Resolución Radiométrica* se refiere a la sensibilidad de un sensor a la radiación entrante, es decir, describe la capacidad de un sensor para discriminar diferencias sutiles en la energía detectada (Natural Resources Canada, 2016).

#### **2.7.4. Anomalías térmicas**

Una anomalía térmica se define como una característica que difiere en temperatura en comparación con las temperaturas de superficie típicas observadas para un sitio particular en el espacio o el tiempo. Por lo tanto, la superficie puede ser anómala espacial (Fig. 17) o temporalmente, y a menudo puede ser anómala tanto espacial como temporalmente al mismo tiempo (Harris A. , 2013).

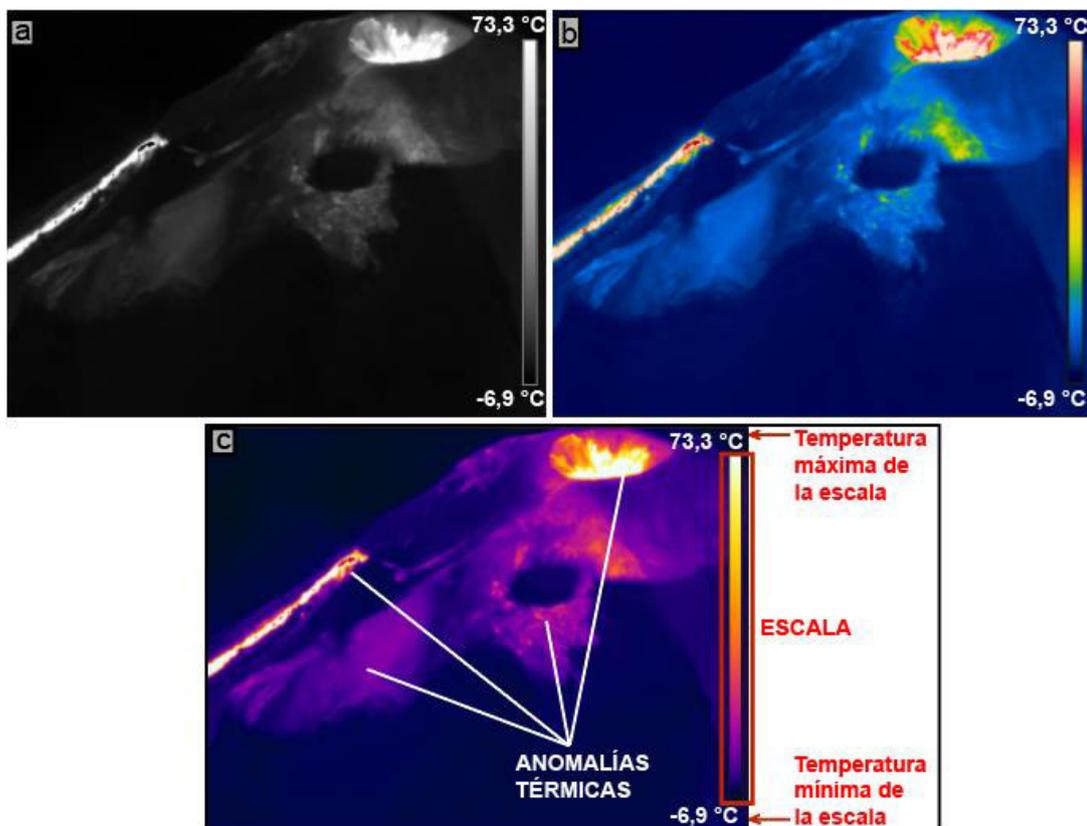


Figura 17. Imagen térmica en diferentes paletas de colores. a) Paleta en escala de grises, b) Paleta arcoíris, c) Paleta de hierro. Imagen con sus diferentes partes: escala, temperatura máxima y mínima de escala, y anomalías térmicas.

### 2.7.5. Aplicaciones de las imágenes térmicas para la vigilancia volcanológica

La imagen térmica se ha introducido recientemente en vulcanología para analizar una serie de procesos volcánicos diferentes (Calvari et al., 2004), esto se debe principalmente al desarrollo de potentes cámaras de imágenes radiométricas en forma de cámaras IR portátiles (Vollmer & Mollmann, 2018).

Según Spampinato et al., (2011), la aplicación de cámaras térmicas a la vigilancia de volcanes se divide en tres áreas: (1) el monitoreo y análisis de datos térmicos durante estados no eruptivos / intranquilos para buscar patrones o comportamientos anómalos, (2) la búsqueda de anomalías térmicas que puedan representar precursores de erupción, y (3) el monitoreo de erupciones en curso.

La vigilancia volcánica con cámaras IR puede proporcionar observaciones cualitativas en tiempo real sobre el estado de la actividad y, a través del procesamiento de datos se puede obtener información cuantitativa.

#### 2.7.5.1. Observaciones cualitativas

- **Áreas hidrotermales y campos de fumarolas:** se puede estudiar el comportamiento y la evolución de las manifestaciones hidrotermales y los campos de fumarolas para realizar un mapeo detallado de las distribuciones de temperatura que permite

determinar cambios en la temperatura del gas y flujo o rutas a través del subsuelo (Andronico et al., 2005).

- **Cuerpos de lava:** distinguir estos cuerpos (flujos, domos o lagos) permite dar un seguimiento al crecimiento de domos (Mount St. Helens, explosión lateral de 1980, Friedman et al., 1981) o dar información de pérdidas de calor en la superficie y del movimiento de un lago de lava (en el volcán Erta Ale, Oppenheimer & Yirgu, 2002)
- **Actividad explosiva y plumas volcánicas:** la investigación térmica permite estudiar la dinámica eruptiva, incluida la fotobalística y la expansión de plumas, la detección y discriminación entre diferentes estilos eruptivos (Patrick, 2007; Patrick et al., 2007; Spampinato et al., 2008) y el seguimiento del tiempo y las fases de explosiones mayores (Harris et al., 2008).
- **Depósitos de flujos piroclásticos:** las imágenes térmicas se han utilizado para caracterizar e interpretar mecanismos de formación, emplazamiento (Friedman et al., 1981) y enfriamiento de depósitos de flujo piroclástico.
- **Fracturas y grietas:** estudiar el desarrollo de fracturas o grietas permite monitorear la estabilidad de los edificios volcánicos, lo que es importante para evaluación de riesgos, puesto que la aparición de estas características puede representar precursores de fenómenos eruptivos o de cambios morfológicos (Friedman & Williams Jr, 1968).

#### 2.7.5.2. Datos cuantitativos

- **Velocidad de flujo de lava y velocidad del ascenso del jet piroclástico:** por medio de las imágenes térmicas se puede obtener la velocidad con la que la lava se emplaza y con la que ocurren las explosiones (Lautze et al., 2004), también se puede derivar alturas, tamaños y duraciones de jets (Zanon et al., 2009).
- **Variaciones de temperatura y tasas de enfriamiento:** analizar las variaciones de temperatura y tasas de enfriamiento proporciona información sobre el estado del flujo de lava que permite la predicción de sus rutas (Calvari et al., 2004); además permite caracterizar la actividad de ventos y cráteres explosivos
- **Distribución espacial de temperatura y balance térmico:** esto es realizado mediante histogramas de frecuencia que representan el área fraccional ocupada por la superficie en clases discretas de temperatura (Coppola et al., 2007). Este análisis permite revelar cambios térmicos repentinos y estimar el balance térmico de las superficies de los lagos de lava, flujos de lava, campos de fumarolas y domos de lava (Spampinato et al., 2011).

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Recopilación bibliográfica

Se recopiló publicaciones científicas, tesis de grado, informes y reportes del IG-EPN relacionados al volcán Sangay y a los temas a desarrollar en este trabajo. Además, se tuvo acceso a la base de datos de imágenes visuales y térmicas del IG-EPN, las mismas que fueron obtenidas en los 39 sobrevuelos realizados por su personal entre el año 2003 hasta 2019. La información de estos sobrevuelos con las fechas de su realización y número de imágenes se encuentra en el Anexo 1.

#### 3.2. Análisis morfológico

##### 3.2.1. Análisis cualitativo

Para el presente análisis morfológico del Sangay se analizarán el Cráter Central y la zona de Domos Ñuñurco debido a que estos han registrado cambios importantes en el periodo de estudio, con respecto a los otros rasgos morfológicos, en los cuales sus variaciones han sido imperceptibles.

Se revisó 345 imágenes de rango visible y 1397 en el rango térmico (imágenes de resolución de 320x240 pixeles hasta 2010 y de 640x480 pixeles desde 2011 a 2019). De esta revisión se seleccionó las imágenes que no presentaban nubosidad y que permitían identificar claramente las anomalías térmicas relacionadas con estructuras volcánicas.

En las imágenes visuales y térmicas seleccionadas se identificó el Cráter Central y los Domos Ñuñurco. Para describir los cambios en estas estructuras, se utilizó el software Adobe Illustrator, se realizó un esquema sucesivo de las imágenes, donde se delimitó el cráter y los domos, señalando sus características morfológicas, aparición de nuevas estructuras y cambios en su forma. Todas estas características se diferenciaron en cada imagen mediante símbolos, que luego fueron descritos en una leyenda (Fig. 18). Además, se describió los periodos de actividad basada en la ocurrencia de productos volcánicos (e.j. flujos de lava, domos de lava y columnas de ceniza) y los periodos de inactividad basados en la ausencia de anomalías térmicas en la zona de estudio (Anexo 4).

LEYENDA:		Imagen en rango visible e infrarrojo		Imagen en rango visible   infrarrojo	
	Borde del Cráter Central	<b>CNE</b>	<b>CNE</b>	Cráter Noreste	
	Borde del cono del Cráter	<b>CW</b>	<b>CW</b>	Cráter Occidental	
	Domo del Cráter	<b>DÑ</b>	<b>DÑ</b>	Domos Ñuñurco	
	Flujo de lava				
	Vento del cráter				
	Balísticos				
	Deslizamiento interno				
	Deslizamiento externo				
	Cráter interno				
	Fractura				

LEYENDA:		Imagen en rango visible e infrarrojo		Imagen en rango visible   infrarrojo	
	Domo Ñuñurco 1	<b>CNE</b>	<b>CNE</b>	Cráter Noreste	
	Domo Ñuñurco 2	<b>CW</b>	<b>CW</b>	Cráter Occidental	
	Domo Ñuñurco 3	<b>CC</b>	<b>CC</b>	Cráter Central	
	Vento del domo				
	Vento abierto del domo				
	Flujo de lava reciente del Domo Ñuñurco 1				
	Flujo de lava reciente del Domo Ñuñurco 2				
	Flujo de lava reciente del Domo Ñuñurco 3				
	Deslizamiento del frente del domo				

Figura 18. Leyenda usada para el análisis cualitativo del a) Cráter Central y, b) Domos Ñuñurco.

En base a este esquema se realizó el análisis cualitativo del Cráter Central y los Domos Ñuñurco, que consistió en la comparación de las imágenes entre fechas de sobrevuelos y la descripción de los cambios morfológicos percibidos.

Algunas de las imágenes obtenidas del volcán Sangay, han presentado nubosidad por lo que la cantidad de estas no han sido suficiente para poder realizar un análisis cuantitativo mediante la generación de Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés). Asimismo, se revisó imágenes satelitales Sentinel y Planet, pero por las condiciones climáticas de la zona no se pudo obtener un número suficiente de imágenes y además al no contar con *puntos de control* en el volcán, no fue posible generar los modelos digitales. Por esto, el análisis realizado en este estudio es únicamente de tipo cualitativo y las imágenes Planet serán presentadas como parte de la Discusión.

### 3.3. Análisis térmico

#### 3.3.1. Selección de imágenes térmicas

Las 1397 imágenes térmicas obtenidas en los sobrevuelos fueron revisadas con el programa ThermaCAM Researcher 2002. La primera selección se basó en descartar las imágenes con presencia de nubes, con baja calidad, borrosas, o desenfocadas para cada fecha (Fig. 19). Pasado este filtro, el número de imágenes a ser utilizadas y analizadas se redujo a 642.

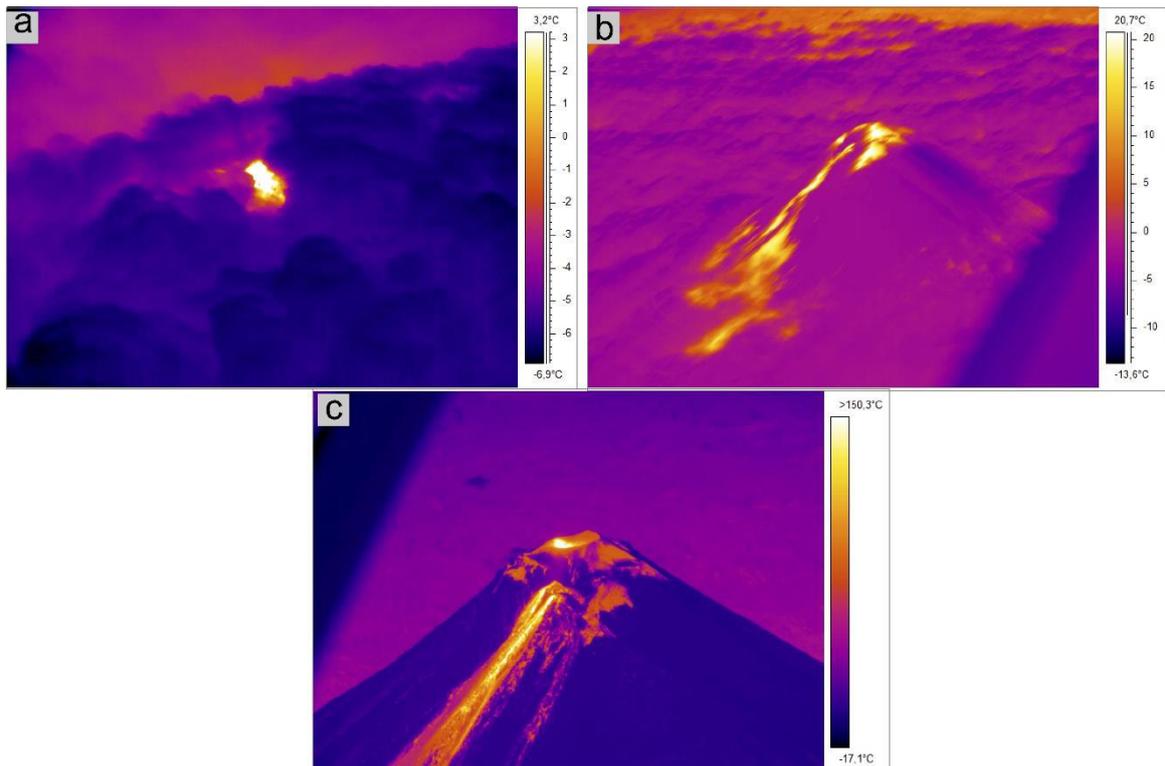


Figura 19. Ejemplos de imágenes térmicas descartadas y seleccionadas. a) Imagen térmica descartada por la presencia de nubes; b) imagen térmica descartada por desenfoque; c) imagen térmica seleccionada de buena calidad

Las 642 imágenes fueron revisadas y se seleccionaron las que presentaban una vista suroriental del volcán e imágenes con perspectiva vertical o casi vertical, que permitiesen observar directamente los cambios en el Cráter Central y Domos Ñuñurco. Finalmente se realizó un último filtro, en el cual se descartó las imágenes en las que el rango de temperatura con el que se tomó las imágenes, se encontraba por debajo de la temperatura de los productos volcánicos a analizar, por lo que el número de imágenes después de esta última selección disminuyó a 505.

### 3.3.2. Análisis térmico

Para analizar una imagen térmica con el programa ThermaCAM Researcher 2002 es necesario establecer los *Parámetros de objeto*: emisividad, distancia, temperatura ambiente, temperatura atmosférica y humedad relativa (Fig. 20). Estos parámetros permiten obtener un valor de temperatura mucho más preciso, debido a que compensan los efectos de varias fuentes de radiación que se encuentran en el entorno.

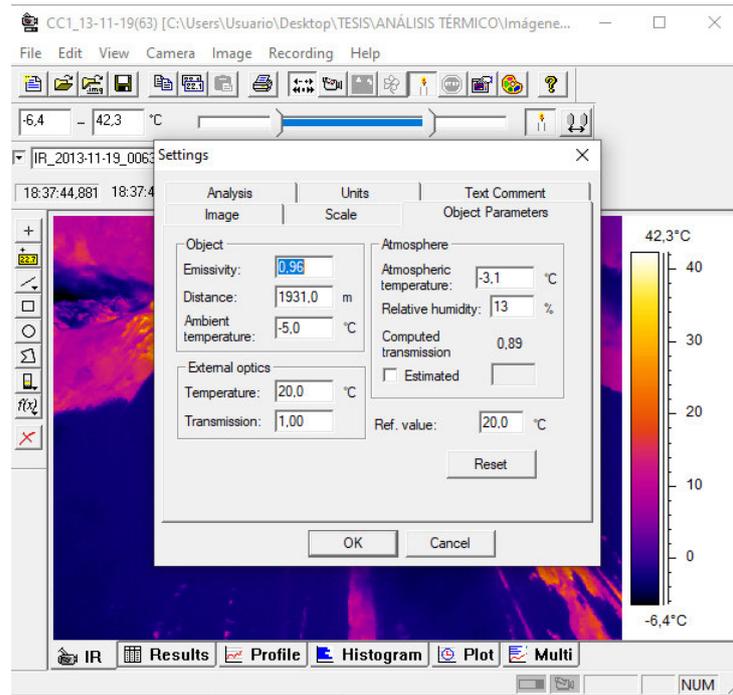


Figura 20. Parámetros de objeto a establecer en el programa ThermoCam Researcher 2002.

- **Emisividad:** la capacidad que tiene un cuerpo para radiar energía infrarroja. El valor de emisividad está entre 0 y 1, y el valor usado fue 0.96 para todas las imágenes, puesto que este corresponde al tipo de roca más común en los volcanes del país.
- **Distancia:** se refiere a la distancia entre el objeto (volcán) y el lente de la cámara (FLIR SYSTEM, 2006). La distancia fue estimada de 1000 m para las imágenes del año 2003 a 2010, y a partir del 2011, esta fue calculada por el método de distancia entre dos puntos en el espacio (Sección 3.3.3.1).
- **Temperatura ambiente:** temperatura del medio circundante, como el gas o el líquido, que entra en contacto con el objeto (Fluke Thermography, 2013). Se ha considerado dos valores en esta temperatura: con cielo despejado el valor de  $-10^{\circ}\text{C}$  y para cielo nublado de  $-5^{\circ}\text{C}$ .
- **Temperatura atmosférica:** es el estado de calor de la atmósfera. El grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinado (masmar, 2013). Esta temperatura fue medida con un termo-higrómetro TESTO 625 (Anexo 3).
- **Humedad relativa:** es el porcentaje de la humedad de saturación, que se calcula normalmente en relación con la densidad de vapor de saturación, es decir, es la capacidad que tiene el aire de absorber más humedad (HyperPhysics, 2016). La humedad relativa fue medida durante los sobrevuelos con un termo-higrómetro TESTO 625 (Anexo 3).

### 3.3.2.1. Cálculo de la distancia

Las imágenes térmicas entre 2003 y 2010 obtenidas con la cámara FLIR, modelo PM695 no presentan datos de posición debido a la ausencia de GPS incorporado en la cámara, por lo que no fue posible realizar el cálculo de la distancia, y por ende se realizó una estimación de esta en 1000 m, que era la distancia a la que se trataba de mantener el avión, por razones de seguridad en caso de explosión súbita.

Por el contrario, para las imágenes a partir de 2011, su ubicación es conocida debido a que la cámara FLIR 660 tiene un GPS incorporado. De esta manera la distancia fue calculada por el método geométrico de “distancia entre dos puntos en el espacio” (Ec. 4), donde el primer punto fue la posición de la cámara, y el segundo, las coordenadas del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco (Fig. 21) (Anexo 2, *Distancia calculada para las imágenes térmicas de 2011 a 2019*).

$$d(C, V) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

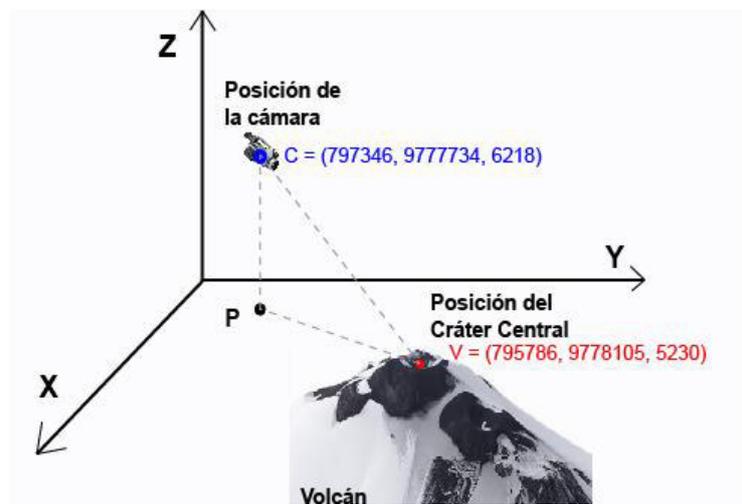
*Ecuación 4. Distancia entre dos puntos en el espacio*

Donde:

$d(C, V)$ : Distancia entre la cámara (punto 1) y el volcán (punto 2)

$x_1, y_1, z_1$ : Posición de las coordenadas del punto 1

$x_2, y_2, z_2$ : Posición de las coordenadas del punto 2



*Figura 21. Representación gráfica del método “Distancia entre dos puntos en el espacio”, donde C es la posición de la cámara, V la posición del rasgo volcánico (Cráter Central) y P es la proyección del punto C.*

Las coordenadas en los ejes “x” e “y” para la cámara fueron obtenidas de la información GPS registrada en las propiedades de cada una de las imágenes, y la posición en “z” de la altitud registrada por el personal del IG-EPN durante cada sobrevuelo (Anexo 2).

Por otro lado, las coordenadas en los ejes “x” e “y” de los rasgos volcánicos a analizar, fueron obtenidas a través de imágenes satelitales PlanetScope de la compañía americana

Planet Labs Inc (Planet Lab Inc, 2020). Estas imágenes satelitales, con resolución de 3x3 m, fueron analizadas en el Sistema de Información Geográfica de software libre, QGIS, donde se comparó imágenes de 2017 y 2019, y se creó una capa con puntos que precisen la localización del Domo Ñuñurco y del vento del Cráter Central en el volcán Sangay (Fig. 22a). Además, para verificar esta posición, se comparó estos puntos de las imágenes PlanetScope en imágenes satelitales Sentinel 2 (Fig. 22b).

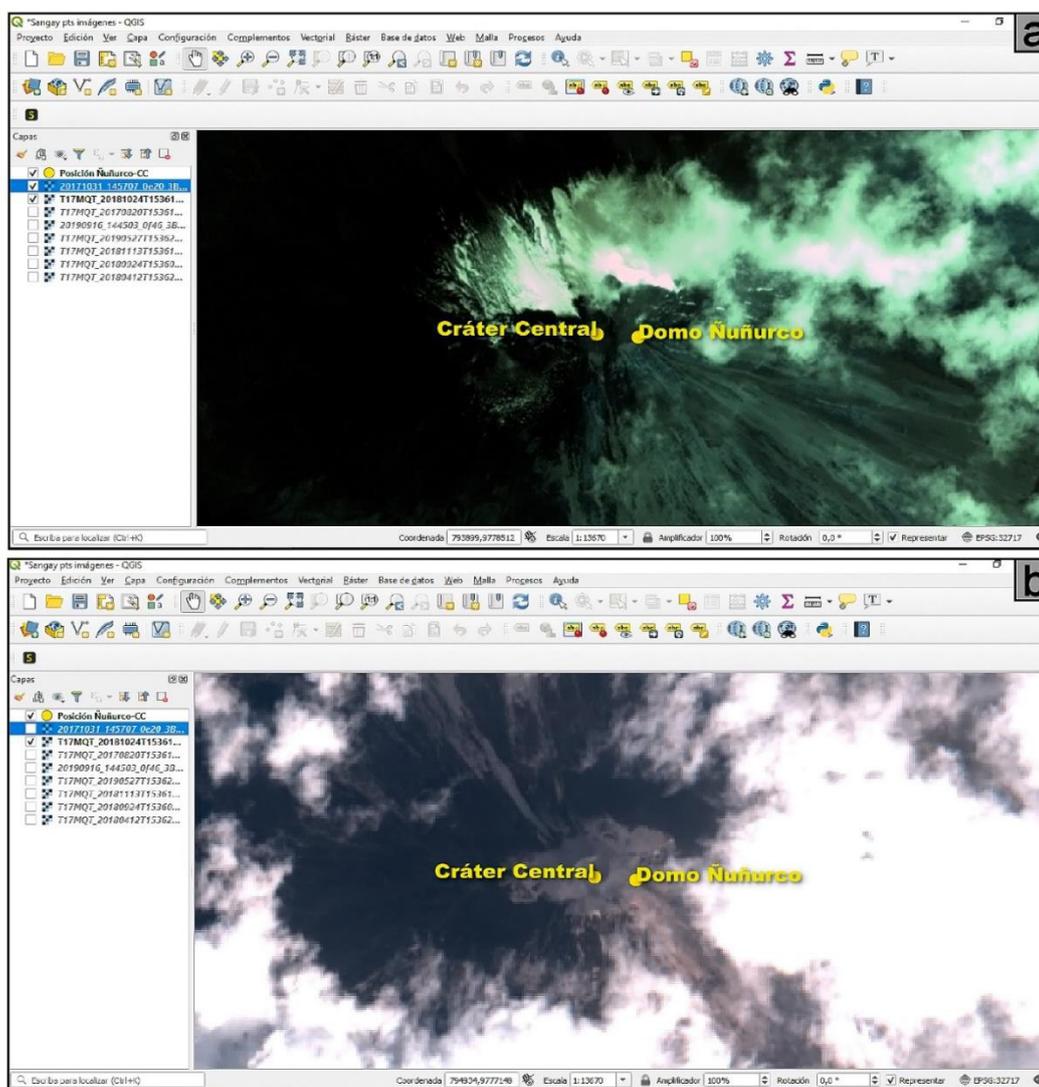


Figura 22. Análisis de imágenes satelitales para la localización del vento del Cráter Central y del Domo Ñuñurco (puntos amarillos). a) Imagen satelital PlanetScope de 3 m de resolución: 20171031\_145707\_0e20\_3B\_AnalyticMS\_SR imagen adquirida de (Planet Lab Inc, 2017) a través de Planet's Education and Research (E&R) Program. b) imagen satelital Sentinel 2 de 10x10 m de resolución: T17MQT\_20181024T153619\_TCI. La posición para el Cráter Central y Domo Ñuñurco fue ubicada a través de las imágenes satelitales PlanetScope (a).

A través del mismo programa, QGIS, se obtuvo la posición en coordenadas UTM del Cráter Central (795786.979; 9778105.639) y de los Domos Ñuñurco (795979.722; 9778089.299) (Fig. 23). Y finalmente, para establecer la coordenada en el eje “z”, se usó la altura del volcán Sangay (5230 msnm) como medida fija para todos los cálculos.

id	Punto	X	Y
1	Domo Ñuñurco	795979,722	9778089,299
2	Cráter Central	795786,979	9778105,639

Figura 23. Coordenadas UTM obtenidas de los puntos creados a través de las imágenes satelitales analizadas

### 3.3.2.2. Identificación de anomalías térmicas

Una anomalía térmica se define como una característica que difiere en temperatura en comparación con las temperaturas típicas de una superficie. Para poder determinar estas anomalías se usó la paleta iron, la cual permite una fácil interpretación: a mayor temperatura, un color más claro.

Las principales anomalías identificadas en la cumbre del volcán están relacionadas a rasgos volcánicos como cráteres y domos, y a productos volcánicos como: flujos de lava, campos fumarólicos, balísticos, columnas eruptivas, fisuras y flujos piroclásticos (Fig. 24).

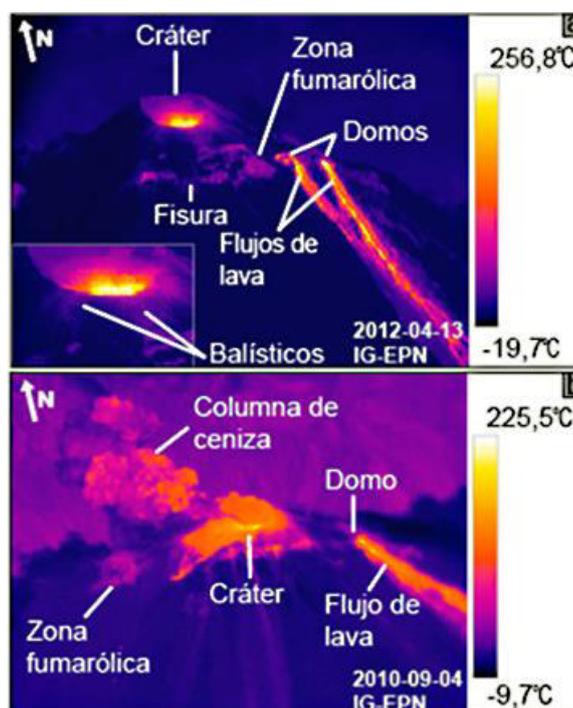


Figura 24. Imágenes térmicas con las principales anomalías térmicas identificadas en la cumbre del volcán Sangay: cráter, domos, flujos de lava, fumarolas, balísticos, fisuras, columnas eruptivas. a) 13 de abril de 2012, b) 04 de septiembre de 2010

Una vez establecidos los parámetros de objeto y la paleta de color a usar, el programa ThermaCAM Researcher 2002 permite realizar medidas térmicas de las anomalías mediante la *Barra de herramientas de análisis*, con puntos, líneas y áreas. En este caso, se usó la herramienta de *Área* para medir la temperatura de los rasgos volcánicos (Fig. 25).

Las temperaturas obtenidas corresponden a una mínima, máxima y diferencia entre las dos (Fig. 25). La temperatura a considerarse fue la máxima y corresponde a la Temperatura Máxima Aparente (TMA) del elemento a ser analizado.

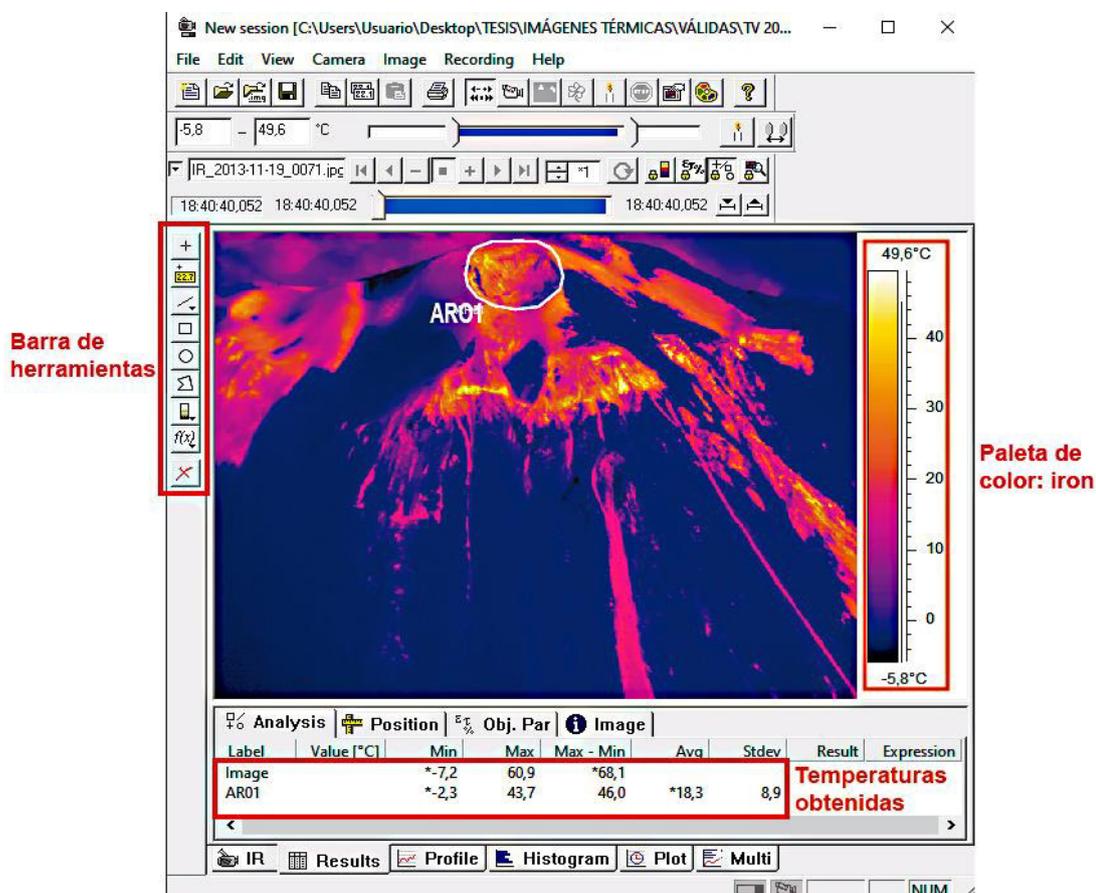


Figura 25. Ejemplo de medidas de temperaturas obtenidas en el Cráter Central (ARO1) del volcán Sangay analizadas en el software Térmica Research 2002.

Se midió la temperatura del Cráter Central y DomoÑ Nuñurco en cada una de las imágenes térmicas válidas de los sobrevuelos, y estos valores fueron registrados en una hoja de cálculo. En este programa, se calculó la mayor temperatura del elemento en cada sobrevuelo, y posteriormente, la mayor temperatura en el periodo de estudio (Fig. 26) (Anexo 5). Esto fue realizado a partir del año 2010 (395 imágenes térmicas), debido a que el análisis entre los años 2003 a 2009 fue previamente realizado por personal del IG-EPN. A partir de los datos de temperatura obtenidos, se realizó gráficas de dispersión: Fecha de los sobrevuelos vs TMA, para observar las variaciones de temperatura desde el 2003 hasta el 2019.

Fecha	# Imagen	CC	CNE	CW	DSE	DW	Zona entre CNE y DSE	Zona al S del CC	Borde N. CC	Flujo DSE	Columna cen	Zona al S del CW	T. máx
12/7/2010	78	222,9	8,4	159,7	170,2	183,2	12,4	13,1	14,9	37,5	31,8	25,3	100
4/9/2010	81	82	83	84	85	86	87	88	89	91	92	93	94
19/11/2010	2003-2005	T. Máx	Máx. Total	ZS	CC	CW	M	ZN-CW	ZS-CW	S-CC	DW	T. máx	6,7

Figura 26. Registro de las medidas de temperatura de los elementos morfológicos de la cumbre del volcán Sangay, realizado a partir del año 2010. La temperatura máxima aparente registrada en cada sobrevuelo se encuentra en el Anexo 5.

### 3.3.3. Perfiles térmicos

Los perfiles térmicos se realizaron con el objetivo de analizar la distribución de temperaturas, mediante una línea que atravesase los rasgos volcánicos estudiados (Cráter Central y Domos Ñuñurco) y para comparar los periodos de actividad e inactividad del volcán. Estos perfiles fueron realizados desde el año 2011, debido a que a partir de esta fecha las imágenes térmicas presentan información de su ubicación espacial, la cual es necesaria para el cálculo de las distancia y por ende el cálculo del tamaño de pixel.

Los perfiles fueron graficados en el software Excel, cuyos ejes son: en “x” valor de los pixeles de la imagen y en “y” valores de temperatura.

#### 3.3.3.1. Trazo de los perfiles y obtención de los valores de temperatura

Se usó la herramienta *Línea* en el software ThermaCAM Researcher 2002 para el trazo de los perfiles. La localización de los perfiles térmicos se realizó de dos formas: 1) para el Cráter Central, en las imágenes térmicas con vista aproximadamente vertical, se trazó una línea en sentido W-E, intentando atravesar el cráter y su vento (como se indica en la Fig. 27) y, 2) para los domos, en las imágenes con una vista frontal a estos, se trazó una línea en sentido W-E atravesando el centro del vento del domo (Fig. 28).

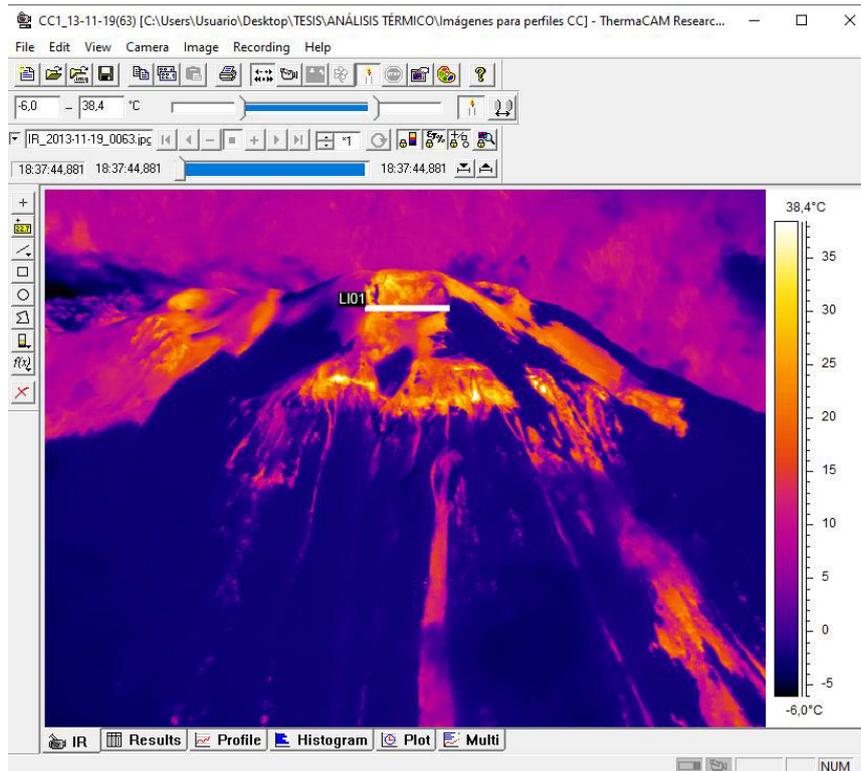


Figura 27. Posición del perfil térmico en el Cráter Central (LI01).

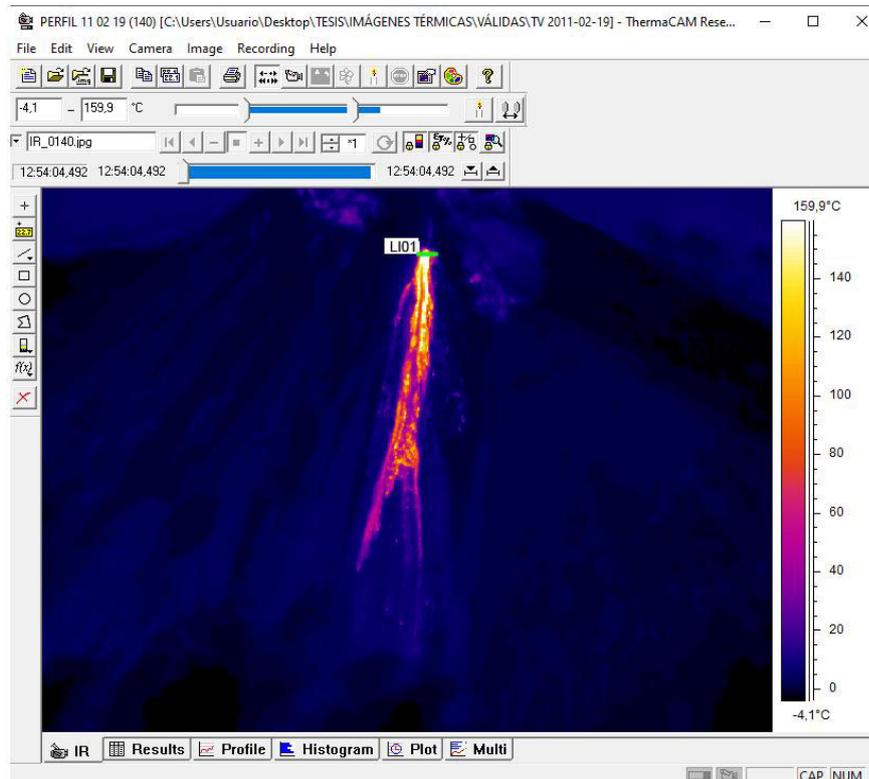


Figura 28. Posición de los perfiles térmicos en el Domo Ñuñurco (LI01).

Una vez trazado los perfiles se exportó los valores de temperatura de estos a una hoja de cálculo, para ello se usó la opción *String Data*, que se encuentra en el Menú *Edit* → *Copy*

Value →Line (Fig. 29, Fig. 31). Esta opción permite obtener los valores de temperatura registrada en la línea trazada (Anexo 6).

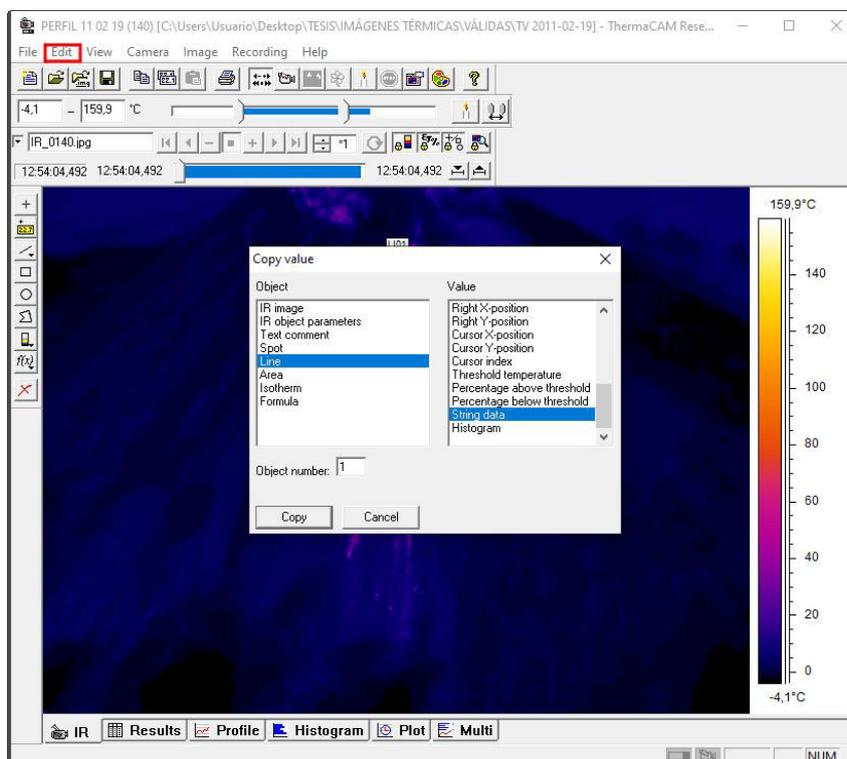
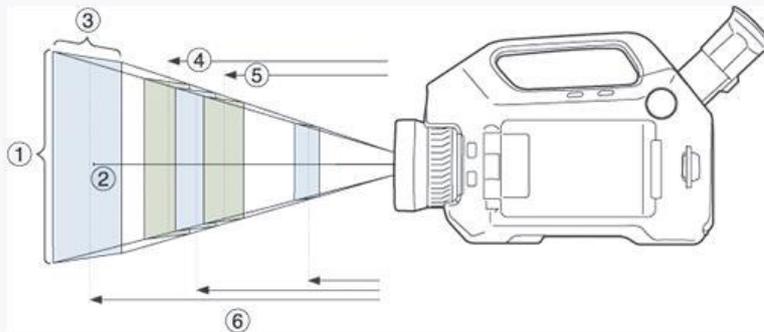


Figura 29. Exportación de los valores de los perfiles térmicos mediante la opción Copy Value en el software ThermoCAM Researcher 2002.

### 3.3.3.2. Cálculo de tamaño de los pixeles en la imagen térmica

Para calcular el tamaño de pixel o IFOV (*Instantaneous Field Of View* / Campo de visión instantáneo) se usó la “Calculadora FOV” del sitio web de FLIR SYSTEM ([https://flir.custhelp.com/app/fl\\_download\\_datasheets](https://flir.custhelp.com/app/fl_download_datasheets)). Para usar esta calculadora se debe seleccionar la cámara térmica usada, que en este caso es el modelo FLIR SC660, sin embargo, esta cámara FLIR SC660 no se encontraba en las opciones de cámara de este sitio web, por lo que se seleccionó la cámara térmica FLIR GF620 24° fixed lens, puesto que presenta propiedades similares a la cámara usada por el IG-EPN. Estas similitudes están basadas en resolución de imagen, FOV, frecuencia y distancia mínima de enfoque. Para el cálculo del IFOV fue necesario ingresar el valor de la distancia entre la cámara y el volcán, misma distancia que fue previamente calculada (Sección 3.3.3.1). Los demás campos corresponden a las características propias de la cámara térmica seleccionada (Fig. 30).

## Calculadora FOV



1. Campo de visión vertical en metros y pies.
2. Campo de visión instantáneo en mm y pulgadas.
3. Campo de visión horizontal en metros y pies.
4. Profundidad de campo límite lejano en metros y pies.
5. Profundidad de campo cerca del límite en metros y pies.
6. Distancia al objetivo en metros y pies.

Cámara: 84102-0102; FLIR GF620 24° fixed lens		
Longitud focal: 23 mm		
Resolución: 640 × 480		
Campo de visión en grados: 23.58		
Enfoque cercano: 0.3 m (1.0 ft.)		
Distancia hiperfocal: 11.68 m (38.30 ft.)		
<b>Características de la cámara térmica</b>		
Otras distancias:	<input type="text" value="2000"/>	<input type="button" value="m"/> <input type="button" value="Calcular"/> ← Distancia entre el volcán y la cámara
Introduzca una cadena de distancia separada por comas (máx. 8 valores).		
<b>D</b>	<b>2000.00</b>	<b>m</b>
HFOV	834.78	m
VFOV	626.09	m
DOF near	11.6	m
DOF far	Infinito	m
<b>IFOV</b>	<b>1304.35</b>	<b>mm</b>
<b>D</b>	<b>6557.38</b>	<b>ft.</b>
HFOV	2736.99	ft.
VFOV	2052.74	ft.
DOF near	38.0	ft.
DOF far	Infinito	ft.
IFOV	51.35	in.
<b>Leyenda:</b>		
D = Distancia al objetivo en metros y pies.		
HFOV = Campo de visión horizontal en metros y pies.		
VFOV = Campo de visión vertical en metros y pies.		
DOF near = Profundidad de campo cerca del límite en metros y pies.		
DOF far = Profundidad de campo límite lejano en metros y pies.		
IFOV = Campo de visión instantáneo (tamaño de un elemento detector) en milímetros y pulgadas		

Figura 30. Calculadora FOV del sitio web de FLIR SYSTEM. Las características de la cámara corresponden a la cámara FLIR GF620 24° fixed lens.

Los valores de IFOV, de cada imagen térmica usada para la realización de perfiles, fueron transformados de unidad, de milímetros a metros, y fueron usados para determinar los valores del eje “x” correspondiente a cada pixel del perfil de la imagen térmica (Fig. 31) (Anexo 6).

Fecha	2011-02-19				2011-07-14	
# Imagen	IR_2011-02-19_155	IR_2011-02-19_157	IR_2011-02-19_139	IR_2011-02-19_144	IR_2011-02-19_145	
ESTE	797083,621	796600,876	796695,649	797346,252	796488,893	
NORTE	9776008,432	9775791,580	9775879,946	9777734,179	9776540,540	
Altura	6096,000	6096,000	6217,920	6217,920	6217,920	
Distancia (m)	2613,334	2601,395	2599,111	1882,897	1979,445	
IFOV (m)	1,704	1,697	1,695	1,228	1,291	
Perfil	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)
	1,704	13,58	1,697	11,16	1,695	24,72
	3,409	14,54	3,393	12,02	3,390	23,18
	5,113	17,18	5,090	12,3	5,085	27,37
	6,817	22,36	6,786	12,49	6,780	28,11
	8,522	28,12	8,483	12,5	8,475	28,75
	10,226	42,3	10,179	12,53	10,170	29,39
	11,930	52,49	11,876	12,82	11,865	42,16
	13,635	64,29	13,572	23,9	13,561	41,92
	15,339	64,97	15,269	37,77	15,256	90,72
	17,044	64,07	16,966	47,93	16,951	109,82
	18,748	67,79	18,662	55,78	18,646	251,75
	20,452	74,7	20,359	77,83	20,341	298,06
	22,157	80,22	22,055	76,51	22,036	358,75
	23,861	87,78	23,752	77,31	23,731	338,81

Figura 31. Hoja de cálculo con los valores del tamaño de los pixeles de la imagen para el eje "x" (cuadro rojo) y de los valores de temperatura de los perfiles térmicos realizados en el programa ThermoCAM Researcher 2002 para el eje "y" (cuadro azul). Los datos de todos los perfiles se encuentran en el Anexo 6.

Se graficó los perfiles, tanto del Cráter Central (Fig. 32) como de los Domos Ñuñurco (Fig. 33) en Excel con gráficos de dispersión usando los valores de pixel de la imagen térmica versus los valores de temperatura.

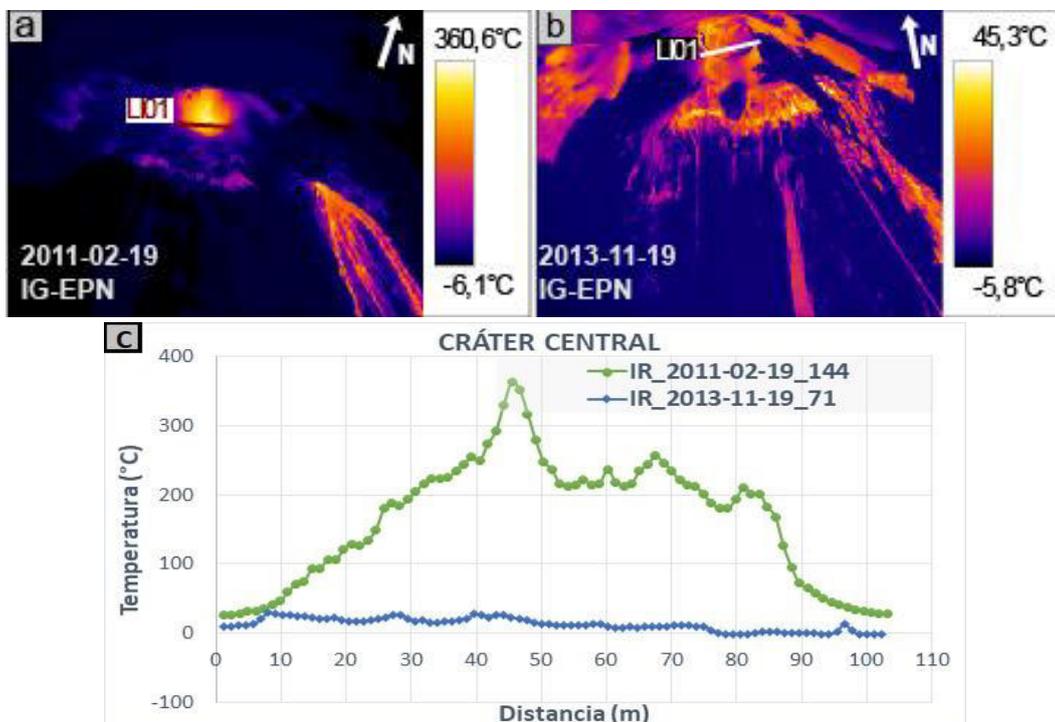


Figura 32. Ejemplo de los perfiles obtenidos para el Cráter Central. a) 12 de febrero de 2011, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del cráter cuando se encontraba activo; b) 19 de noviembre de 2013, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del cráter cuando se encontraba inactivo; c) perfiles térmicos del cráter activo (línea verde, correspondiente a (a)) e inactivo (línea azul, correspondiente a (b)).

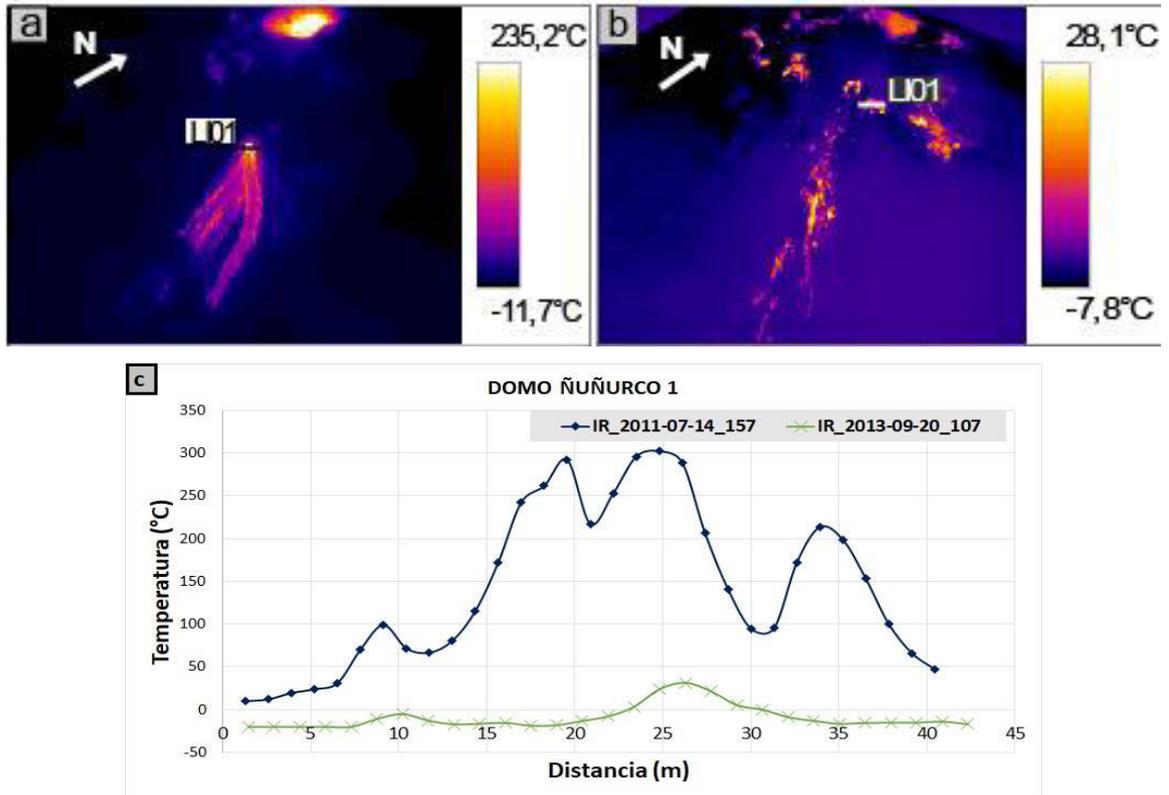


Figura 33. Ejemplo de los perfiles obtenidos para el Domo Ñuñurco1. a) 14 de julio de 2011, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del domo cuando se encontraba activo; b) 20 de septiembre de 2013, imagen térmica con el trazo del perfil (LI01) del domo cuando se encontraba inactivo; c) perfiles térmicos del domo activo (línea azul, correspondiente a (a)) e inactivo (línea verde, correspondiente a (b)).

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

En este capítulo se describe la morfología inicial del Cráter Central y de los Domos Ñuñurco, y los cambios ocurridos en ellos durante el periodo de estudio (2003-2019). Se presenta un análisis termográfico de estos rasgos volcánicos, basado en la caracterización temporal de sus anomalías térmicas y en la distribución espacial de temperaturas mediante la realización de perfiles térmicos.

#### 4.1. Análisis morfológico

##### 4.1.1. Análisis cualitativo

De los 39 sobrevuelos realizados en el periodo de estudio, se consideraron 32 fechas para el análisis cualitativo del Cráter Central y Domos Ñuñurco, debido a que en estas fechas es posible observar claramente estos rasgos volcánicos. A continuación, se presenta la descripción de las principales características morfológicas y los cambios ocurridos en el cráter y en los domos. Esta descripción fue realizada mediante el análisis de imágenes en rango visible y térmico (Sección 3.2.1)

##### 4.1.1.1. Cráter Central

El Cráter Central ubicado en las coordenadas 2°00'16.43" S, 78°20'28.240" W (determinadas en la Sección 3.3.3.1., Capítulo III); se ha caracterizado por presentar importantes cambios morfológicos durante el periodo de estudio. Estos cambios han sido registrados tanto en las paredes internas del cráter como en su pared externa sur. Adicionalmente, se ha podido determinar variaciones en su dinamismo eruptivo. Así, entre los años 2003 y 2005, su actividad fue de tipo efusivo, relacionado con el descenso de un flujo de lava hacia el sur oriente (alcanzando temperaturas de hasta 203°C). Por su parte entre los años 2007 y 2012 su actividad fue explosiva (con temperaturas máximas de 322°C) intercalada con lapsos de baja actividad y casi inactiva entre 2013 y hasta 2018 (temperaturas de <59°C). Para el año 2019 se observa un importante incremento de actividad. En los periodos de actividad efusiva se ha observado flujos y domos de lava (Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36), y en relación a actividad explosiva, columnas de gases y ceniza (Fig. 37c), fumarolas (Fig. 37a) y la presencia de balísticos en las paredes externas e internas del cráter (Fig. 39).

Las primeras observaciones del Cráter Central (marzo de 2003) mostraron un cráter activo con una morfología que se aproximaba a la de un cono truncado, abierto hacia el sureste, el cual contenía un domo, del cual un flujo de lava era emitido hacia el flanco sureste del volcán. Las paredes externas del cráter hacia el norte, eran fuertemente escarpadas y su

pendiente disminuía hacia la abertura sureste. Por otro lado, las paredes internas tenían una baja pendiente y poca profundidad debido a que el domo de lava rellenaba casi completamente el cráter. Este domo de lava, que era extruido desde el centro del cráter, presentaba un borde pobremente circular y una superficie irregular compuesta de bloques de diferente tamaño. El flujo de lava tipo bloque, era ancho y poco extenso, y su superficie era irregular similar a la del domo (Fig. 34).



Figura 34. Imagen visible del 20 de marzo de 2003 que muestra la morfología inicial del Cráter Central (en la parte inferior, se presenta la leyenda).

A finales de 2003, el cráter presentaba paredes externas (Fig. 35a) e internas (Fig. 35b) de fuertes pendientes, y además de un interior relleno de un domo de lava de mayor tamaño. Este domo presentaba una morfología que se parecía a la de un cono truncado, con una superficie aplanada de forma irregular, que desarrollaba un talus delantal escarpado alrededor de los lados del domo. Además, en el centro de su superficie se observó una depresión irregular de poca profundidad (Fig. 35b, c). Por su parte, el flujo de lava creció en extensión hasta octubre de 2004 y cesó su actividad en 2005 (Fig. 36).

En noviembre de 2005, la morfología del cráter cambió. Su forma era sub-elíptica, alargada en sentido NW-SE, y ya no presentaba la abertura en el sureste, es decir, se encontraba cerrado (Fig. 35). Su morfología general se asemejaba a la de un cono truncado asimétrico, debido a que el borde noroeste estaba aparentemente a mayor altitud que el sureste (Fig. 36a). Sus paredes internas eran suaves a diferencia de las externas que se encontraban escarpadas (Fig. 36a, b). Por otro lado, se estimó que el domo de lava a esta fecha tenía menor altura y una forma casi ovalada, su talus, con pendientes más suaves, decreció en el lado oeste y su superficie es inclinada debido a la profundización de la depresión central (Fig. 36b, c).

Por su parte, en este tiempo (2003 - 2005) no se podía identificar individualmente morfológicamente la pared sur del cráter del flanco sur del volcán. Esto debido a que los flujos de lava emitidos directamente desde el domo eran emplazados directamente sobre esta pared externa y por lo tanto sobre el flanco sur.

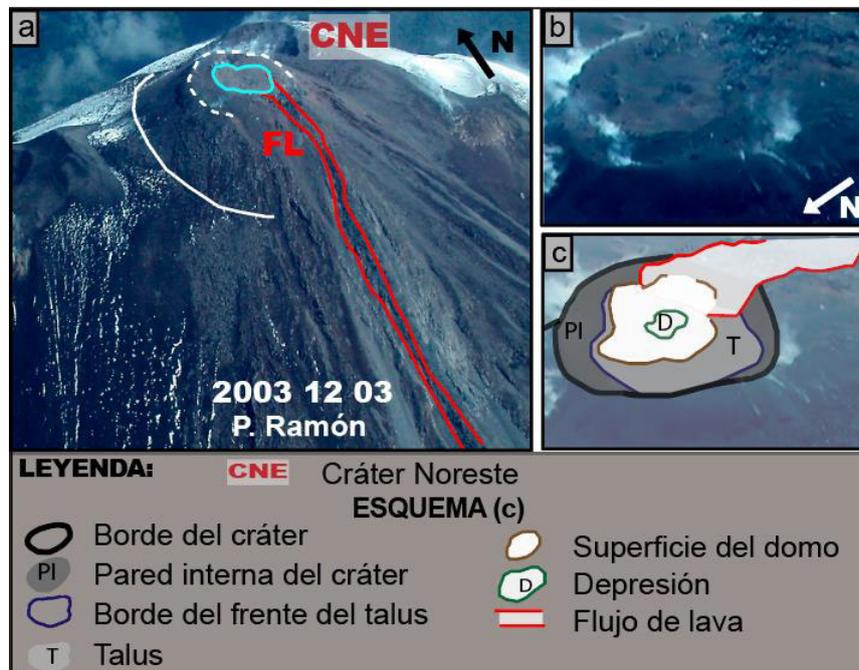


Figura 35. Fotografía del 3 de diciembre de 2003, a) crecimiento del domo y flujo de lava hacia el flanco SE-S del volcán, b) Ampliación del Cráter Central con una vista desde el noroeste, c) esquema del cráter y del domo (b), se observa las paredes internas (PI) del cráter, el talus (T) y la depresión (D) en la superficie del domo.

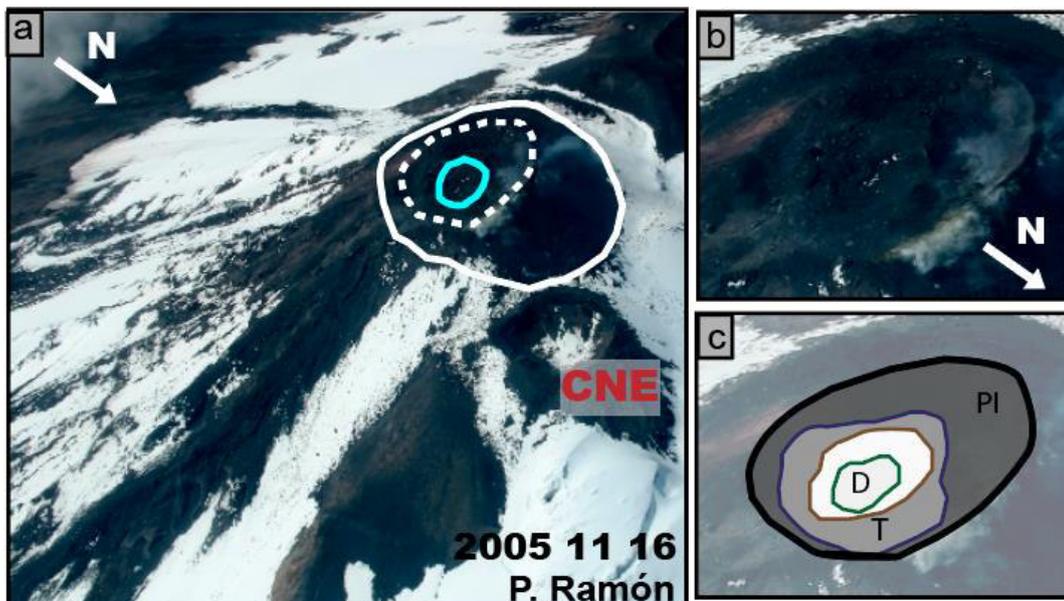


Figura 36. 16 de noviembre de 2005, a) Cráter Central cerrado y asimétrico, b) ampliación del cráter (a), c) esquema del cráter y del domo (b).

Durante el año 2006 no se tuvieron observaciones ni visuales, ni térmicas.

A partir de las observaciones realizadas en el año 2007, se determina que la actividad efusiva en el Cráter Central ha cedido completamente, y ha dado paso a una fase netamente explosiva que posiblemente comenzó en el año 2006. Por su parte, no se observa ningún rastro evidente de los flujos de lava identificados hasta noviembre del 2005 en el flanco sur. Respecto a la morfología del Cráter Central para mayo del 2007, se puede describir como la de un cono truncado hueco con paredes internas escarpadas y paredes externas irregulares hacia el sur (Fig. 37, 38). Adicionalmente, desde mayo de este mismo año, se identificó la presencia de escarpes al interior del cráter, los cuales fueron relacionados con pequeños deslizamientos ubicados principalmente en la pared interna norte del cráter. Estos escarpes fueron registrados en los años 2008, 2009, 2010, 2015, 2016 y 2018 (Fig. 37, 38), los mismos que se caracterizaron por ser poco profundos (excepto en 2018) y por tener en algunas ocasiones varios segmentos. El rastro del deslizamiento más grande fue identificado en abril de 2018, en la pared interna norte del cráter, lo que habría provocado que el este aumente significativamente de tamaño y que su forma cambie. En ese momento la forma del cráter era sea similar a la de un cuadrado redondeado con paredes internas muy empinadas (Fig. 38c). Otros deslizamientos internos fueron sub-circulares y se encontraban cerca del borde sur del cráter.

En este tiempo, importantes cambios se empezaron a registrar en la pared externa sur del Cráter Central y consecuentemente en la parte superior de este flanco del volcán. La actividad explosiva del cráter empezó a moldear la estructura de este, lográndose identificar un cráter con paredes externas con pendientes suaves debido a la depositación de piroclastos. Es así, que la pendiente del flanco sur del Cráter Central y del correspondiente flanco sur del volcán ya no era la misma, contrario a lo identificado hasta el año 2005.

Aparte de este cambio de pendiente, se identificó al menos dos pequeños escarpes en la pared externa sur del Cráter Central. El primero fue identificado en mayo del 2007 (*a*, línea roja, Fig. 37a) cuya área albergaba un campo fumarólico bien activo. Para octubre del 2009 se observa claramente el escarpe debido a que la actividad fumarólica era mínima en el sector. Para esta misma fecha se observa un segundo escarpe (*b*, línea roja, Fig. 37b), localizado al oeste del escarpe *a*. Este segundo sector albergaba en su interior un campo fumarólico muy débil. Un mes después, noviembre 2009 (Fig. 37c), estos dos escarpes se mantienen y se observa en su interior sus respectivos campos fumarólicos. Se observa que el material que se desliza de estos dos sectores se encauza en quebradas que se van perfilando y acentuando en el tiempo. El rasgo de *a* perdura, pero su zona de influencia no se modifica según las observaciones en 2013, 2015 y 2016. Respecto a *b*, se observa que parte de la corona migra verticalmente en el tiempo, alcanzando en el 2013 el borde sur

del Cráter Central (Fig. 37d). Este deslizamiento, se va profundizando y creciendo como se observa en 2015 y 2016 (Fig. 38a, b). Para este tiempo, se observa que el material que va deslizando del sector *b*, se encauza en la quebrada que, a diferencia de lo observado en el 2009, esta está muy bien marcada. Estos cambios ocurridos en el flanco sur del Cráter Central han originado que se forme una alineación con actividad fumarólica, denominada fumarolas sur (Fig. 37a), que son observadas y descritas en las imágenes térmicas (Sección 4.2.1.1).

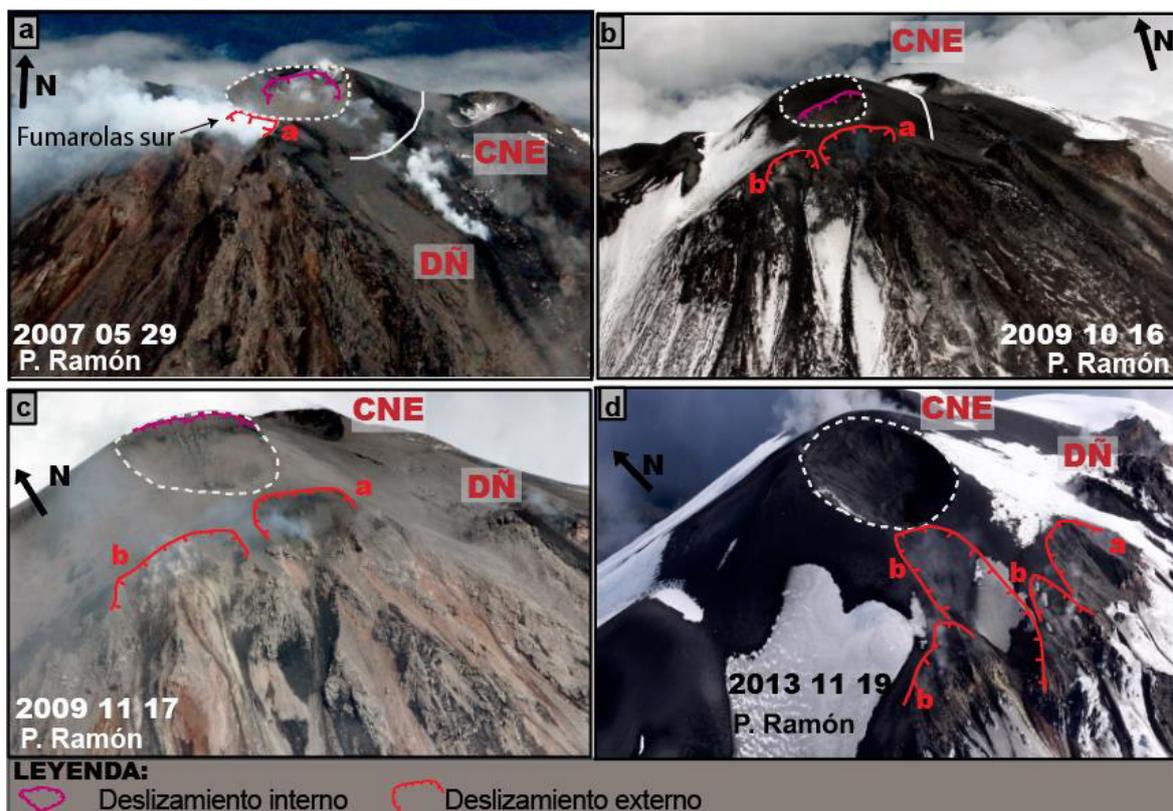


Figura 37. Serie temporal fotográfica que muestra la evolución de la pared externa del Cráter Central entre 2007 a 2013. a) 29 de mayo de 2007, deslizamiento interno en el lado norte del cráter y escarpe "a" en la pared externa, b) 16 de octubre de 2009, escarpes "a" y "b" de la pared externa, c) 17 de noviembre de 2009, deslizamiento en el norte del cráter, y escarpes externo "a" y "b", d) 13 de noviembre de 2013, cuatro deslizamientos en la pared sur correspondientes a los escarpes "a" y "b".

Adicionalmente, a finales del año 2015, se observó la presencia de lineamientos que variaban entre sub-verticales a sub-horizontales, los cuales se encontraban localizados en las paredes externas del lado oeste y sur del cráter (Fig. 38a). Y para el año, 2016, en el lado SSE del cono, se formó una pequeña depresión, la cual presentaba poca profundidad y sus paredes eran escarpadas formando un cono invertido en su interior.

En agosto de 2019, se presentó un deslizamiento importante en la pared externa sur oriental del cráter (Fig. 38d), lo cual influyó en la actividad posterior del volcán (IG-EPN, 2020).

Otros cambios ocurridos en este cráter estuvieron relacionados con la inclinación de las pendiente de sus paredes internas, estas podían estar muy escarpadas (Fig. 39a, c) o ser más suaves, dependiendo del relleno del cráter (Fig. 39c, d). Por ejemplo, en julio de 2011, el cráter se caracterizó por presentar bajas pendientes y acumulación de material volcánico en su interior (Fig. 39c), además de la presencia de un cráter interno de forma sub-circular en el centro de la superficie del cráter.

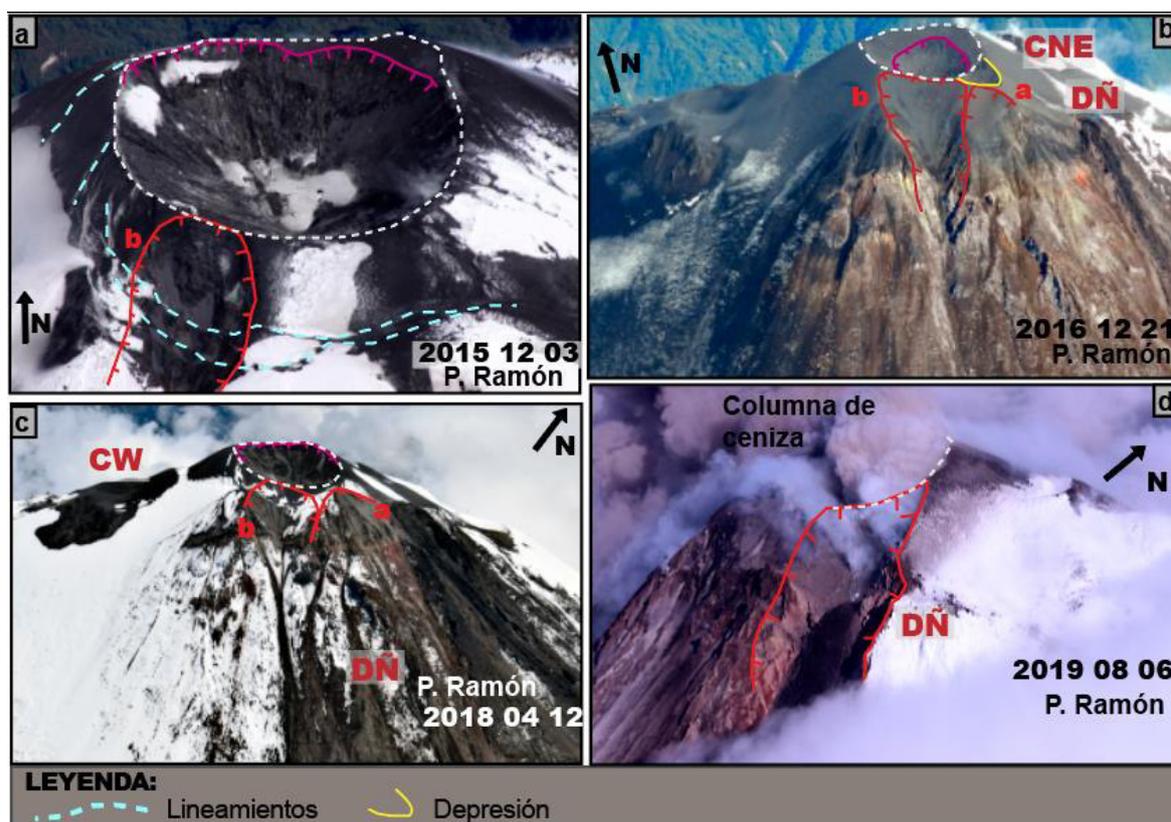


Figura 38. Serie temporal fotográfica que muestra la evolución de la pared externa sur entre 2015 y 2019. a) 03 de diciembre de 2015, escarpe “b” y lineamiento en el cono del cráter, b) 21 de diciembre 2016, migración del escarpe “b”, c) 12 de abril de 2018 y d) 06 de agosto de 2019, deslizamiento en el lado suroriental del cono del cráter.

Finalmente, otras variaciones en el Cráter Central, estuvieron relacionados al color de los depósitos; tanto el interior como exterior del cráter han cambiado su tonalidad, presentando tonos de grises claros a negros; los primeros probablemente relacionados a actividad reciente (altas temperaturas) (Fig. 37c, Fig. 39a, b y c), mientras que lo segundo pudo estar relacionado con depósitos ya fríos (Fig. 37b, Fig. 38a y c)

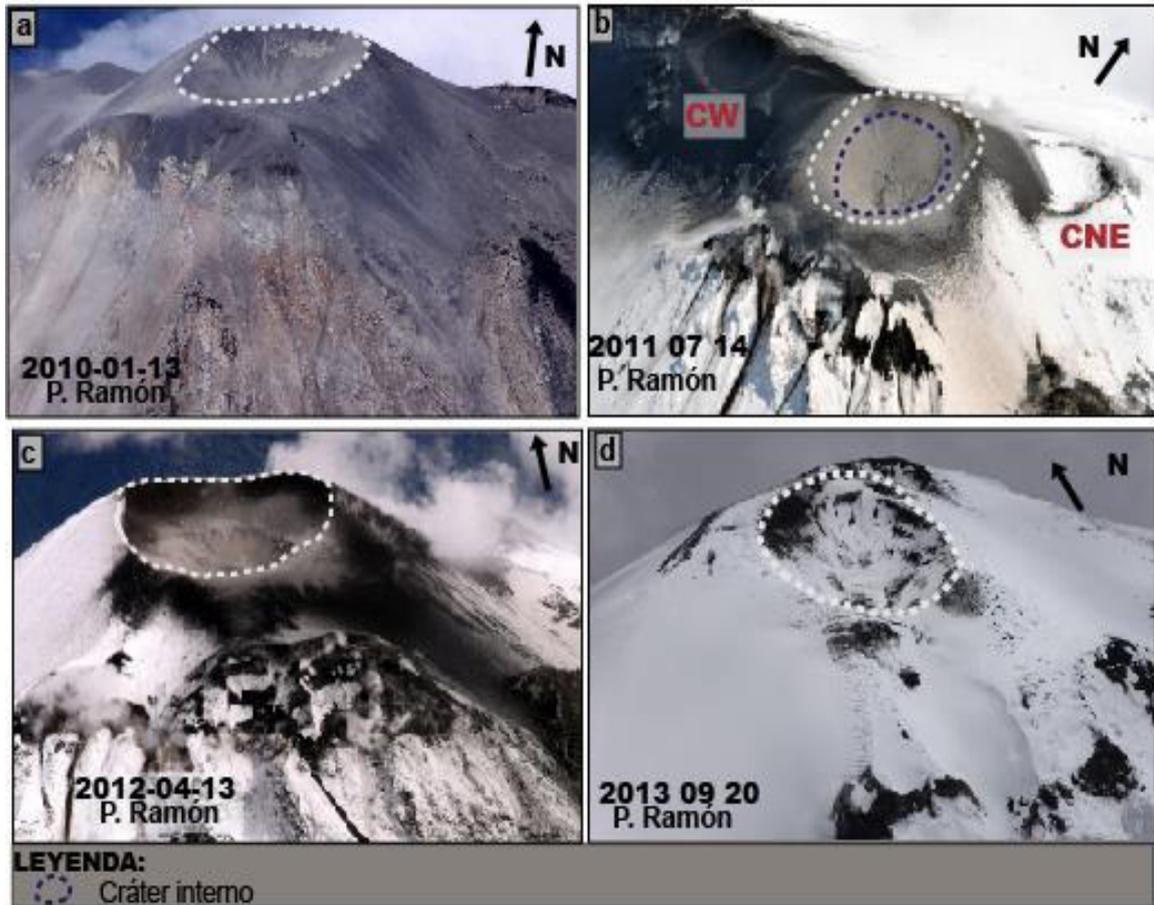


Figura 39. Serie temporal fotográfica que muestra la diferencia de pendiente en las paredes internas del cráter, a) y c) 13 de enero de 2010 y 13 de abril de 2012, cráter con las paredes internas escarpadas, b) y d) 14 de julio de 2011 y 20 de septiembre de 2013, cráter con paredes internas de baja pendiente, en b) se observa un cráter interno

#### 4.1.1.2. Domos Ñuñurco

La zona de Domos Ñuñurco (también conocidos Domos Sureste), de coordenadas  $2^{\circ}00'16.95''$  S,  $78^{\circ}20'22.011''$  W (determinadas en la Sección 3.3.3.1), está ubicada sobre el flanco superior suroriental del volcán, al este de la zona fumarólica sur y al sureste del Cráter Central. Esta zona hasta inicios del 2019 ha estado conformada por tres domos, los cuales se formaron progresivamente en distintas fechas durante el periodo de estudio. Estos domos fueron denominados en este estudio de acuerdo a su orden de formación: Ñuñurco 1, Ñuñurco 2 y Ñuñurco 3.

##### 4.1.1.2.1. Domo Ñuñurco 1

Las observaciones aéreas de mayo de 2007 confirmaron la presencia de lava extruida que formaba un domo hemisférico sobre el flanco suroriental del volcán Sangay (Fig. 40a). Estas observaciones fueron corroboradas con las anomalías térmicas del domo y de los flujos de lava emitidos. Este pequeño domo, Ñuñurco 1, se caracterizó porque su forma se asemejaba a la de una semiesfera que fue creciendo por la emisión de flujos de lava. Su

crecimiento fue casi constante hasta el año 2012 (Fig. 40), con flujos de lava con dirección principalmente hacia el suroriente (Fig. 41a, b), pero también hacia el sur, sur-sureste y este (Fig. 40c), y en ocasiones, con doble dirección (Fig. 40b, e). A partir de septiembre de 2013, no se observó más actividad en este domo (Fig. 41), lo que fue evidenciado por la drástica disminución de su temperatura, que no sobrepasaba los 60°C (a diferencia de fechas anteriores que alcanzó más de 350° C) (Fig. 41b).

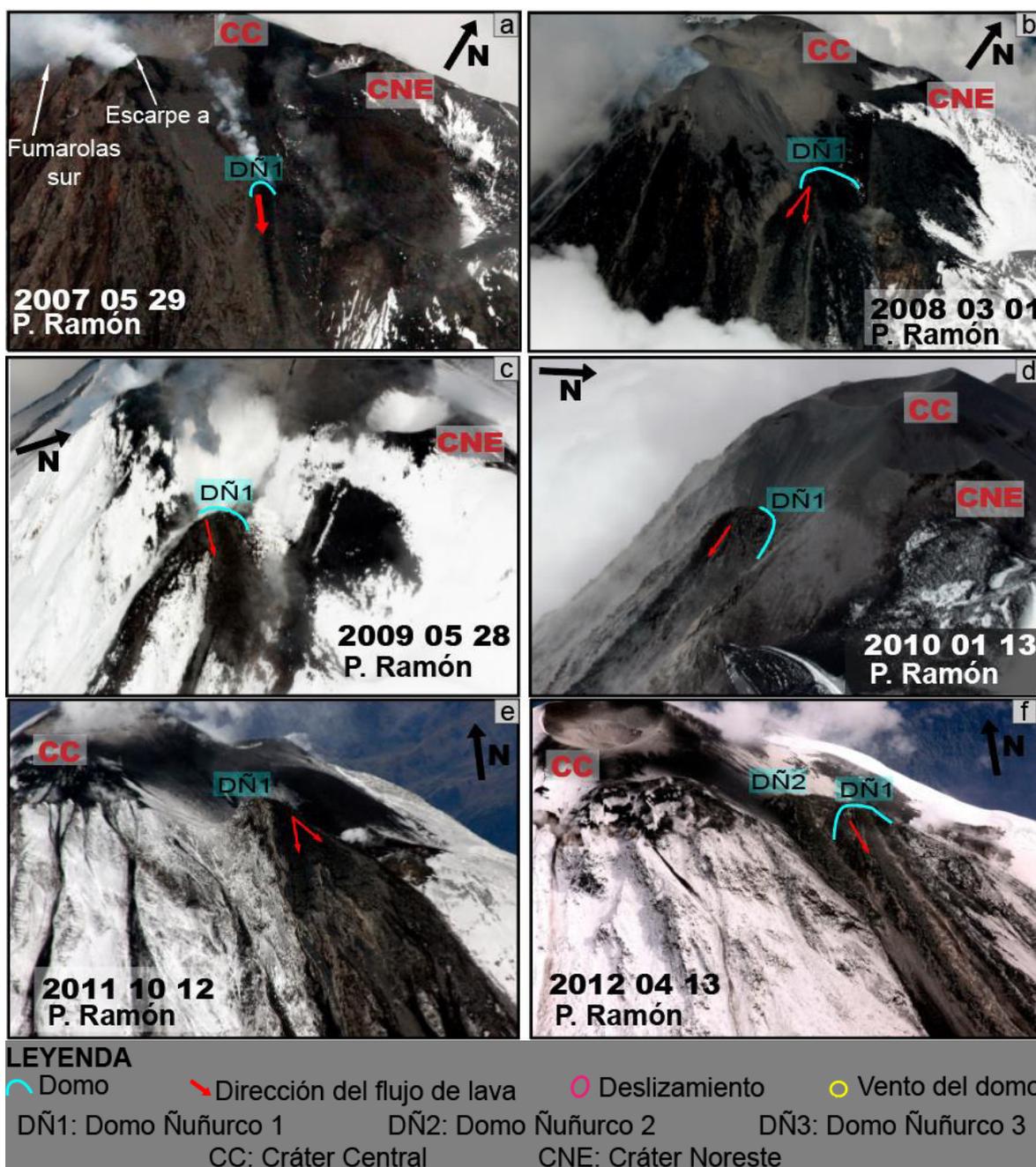


Figura 40. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Nuñurco 1 entre 2007 y 2012. a) 29 de mayo de 2007, domo hemisférico formado a partir de un flujo de lava hacia el sureste (flecha roja). Domo localizado al este de una zona fumarólica, sobre una depresión (línea azul) del flanco suoriental, b) c) y d) crecimiento del domo con flujos de lava con dos direcciones, S y SSE (b), una dirección hacia el este (c) y sureste (d); e) 12 de octubre de 2011, domo semi-elíptico, flujo de lava con dos direcciones: SE y SSE; f) 13 de abril de 2012, domo abultado debido a flujos de lava de un nuevo domo.

En marzo de 2008, se observó un crecimiento importante en el domo, puesto que su morfología era más prominente y amplia que en 2007 (Fig. 40b). En octubre de 2011, Ñuñurco 1 registra el mayor tamaño que ha alcanzado en el periodo de estudio. Su forma era similar a la de una semi-elipsoide, debido a que su elevación sobre el flanco era más marcada (Fig. 40e). Y para 2012, la prominencia del domo no es muy perceptible, ya que es cubierto parcialmente por flujos de lava emitidos desde un nuevo domo (Ñuñurco 2), formado hacia el sur del primero (Fig. 40f). La morfología del Domo Ñuñurco 1 sufrió cambios a partir de 2013. Este domo se fue aplanando y su superficie se observaba irregular conformada por bloques de distinto tamaño (noviembre 2013) (Fig. 41a), hasta llegar a ser casi indistinguible en los últimos sobrevuelos (2017, 2018 y 2019) (Fig. 41c, d).

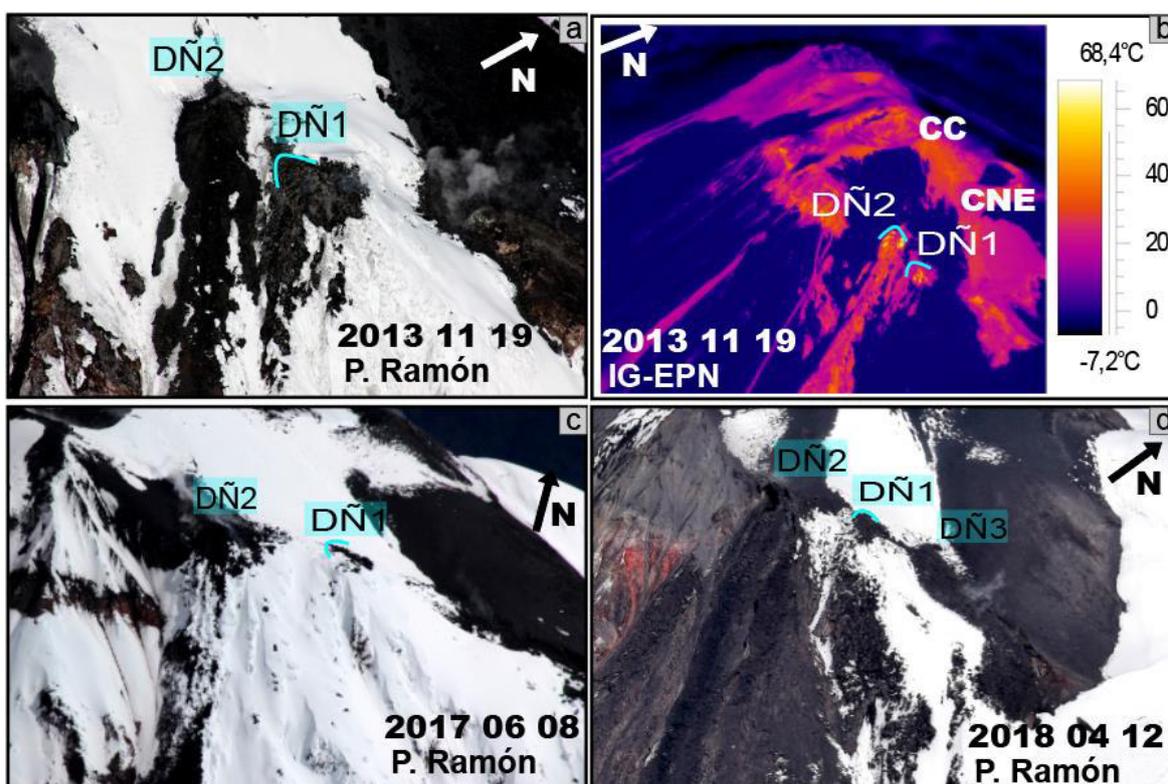


Figura 41. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 1 entre 2013 y 2018. a) 19 de noviembre de 2013, domo aplanado, compuesto por bloques, b) Imagen térmica de (a) que muestra las bajas temperaturas del domo, y la inactividad de este, c) y d) domo con morfología plana.

#### 4.1.1.2.2. Domo Ñuñurco 2

Sobrevuelos realizados en abril de 2012, mostraron la presencia de un domo (Ñuñurco 2) hacia el este del escarpe a, a una mayor altitud que el domo formado en 2007 sobre el flanco suroriental del Sangay (Fig. 42a). Este domo se formó a partir de un viento, por el cual se emitió un flujo lava hacia el flanco sur del volcán. Su morfología, al igual que Ñuñurco 1 en los primeros años, se asemejaba a la de una semiesfera, pero su crecimiento no fue igual, puesto que su actividad inició en 2012, entre 2013 y 2018 su actividad fue

poco intensa y para 2019 incrementó considerablemente (Fig. 42). Este domo registró temperaturas entre 48 y 326,8°C.

Durante 2013 y 2014, no se observó cambios en su morfología y, en noviembre y diciembre de 2015, se observó que tenía un viento circular abierto (Fig. 42b) y se observó el rastro de un flujo de lava. En los años posteriores, 2016, 2017 y 2018, se registra en las imágenes visuales un deslizamiento, el cual inició como una apertura alrededor del viento (diciembre 2016), y terminó destruyendo el frente del domo (abril 2018, Fig. 42c).

En el último año, 2019, Ñuñurco 2 se encontraba activó y aumentó significativamente de tamaño debido a la generación de nuevos flujos de lava (Fig. 42d). Las elevadas tasas de emisión de flujos de lava a través del domo habría provocado una fuerte erosión en el flanco suroriental del volcán, formando una importante quebrada o valle por el cual se encauzan los nuevos flujos de lava (IG-EPN, 2020).

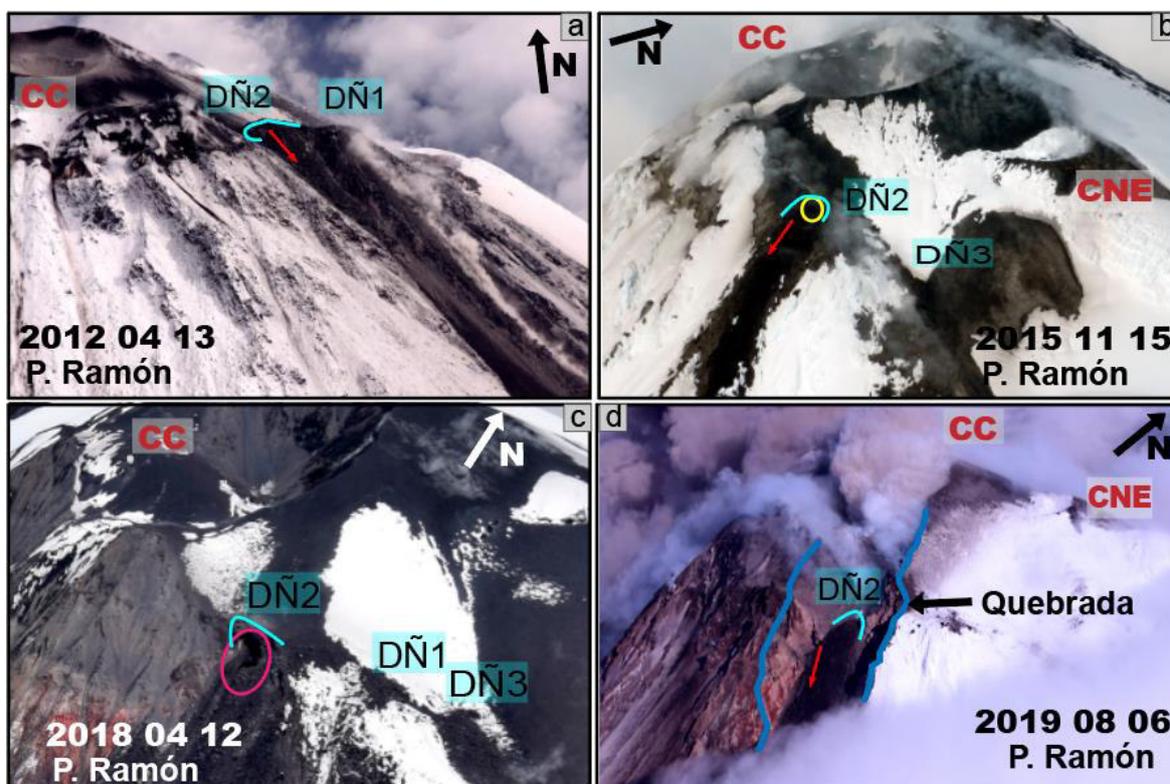


Figura 42. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 2 entre 2012 y 2019. a) 13 de abril de 2012, primera aparición del domo, al sur del primero, flujo de lava con dirección sur, b) 15 de noviembre de 2015, domo con viento abierto en la parte superior, c) 12 de abril de 2018, deslizamiento en el frente del domo, d) 06 de agosto de 2019, domo activo en una quebrada que encauza los flujos de lava.

#### 4.1.1.2.3. Domo Ñuñurco 3

Imágenes en rango visible de diciembre de 2014, mostraron la emisión de un nuevo flujo de lava desde un pequeño domo ubicado al este del Domo Ñuñurco 1. A diferencia de los dos anteriores, este es mucho más pequeño, y su morfología es más aplanada formando una "U" invertida sobre el flanco oriental del volcán (Fig. 43). En imágenes de sobrevuelos

posteriores no se evidenció cambios o crecimientos de este domo. En 2015, se observa que el flujo de lava es mucho más extenso (Fig. 43b), y a partir de 2016, el flujo conserva la misma longitud (Fig. 43c).

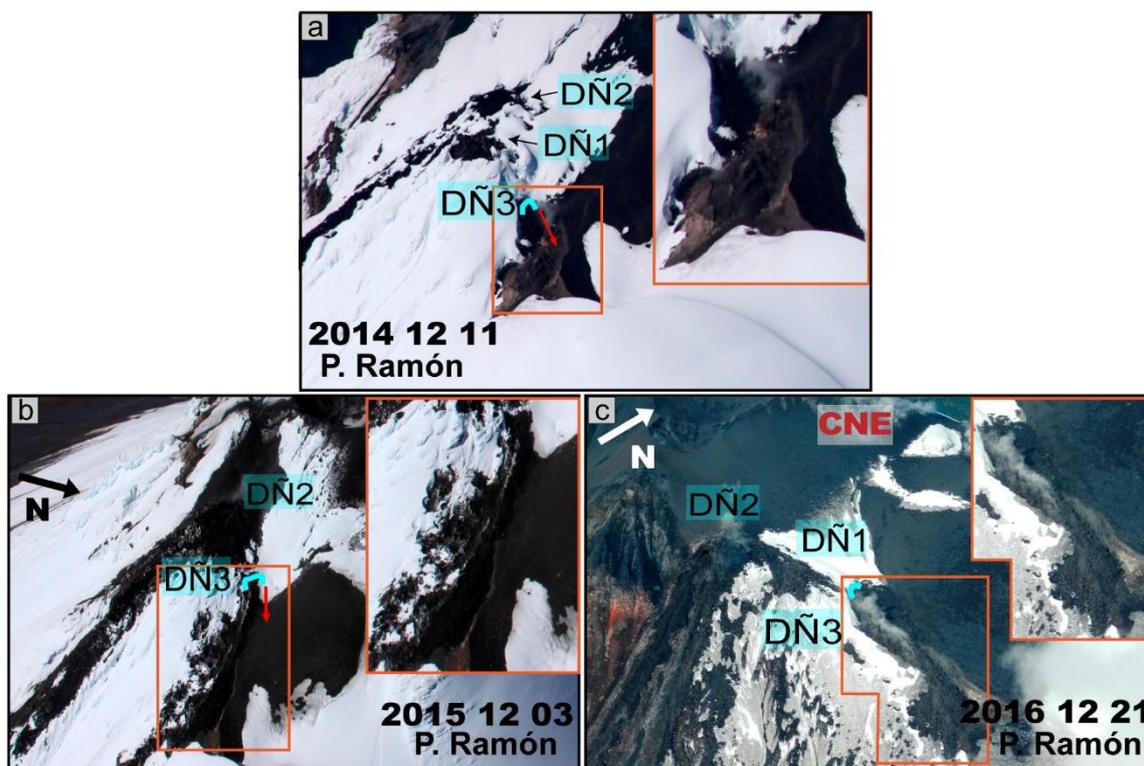


Figura 43. Serie temporal fotográfica que documenta la evolución del Domo Ñuñurco 3 entre 2014 y 2016. a) 11 de diciembre de 2014, domo en forma de "U" invertida, con un flujo de lava hacia el este, b) 03 de diciembre de 2015, domo con flujo de lava más extenso, c) 12 de diciembre de 2016, domo sin nueva actividad

## 4.2. Caracterización térmica del Cráter Central y Domos Ñuñurco

Mediante el estudio de 642 imágenes térmicas válidas y 341 imágenes visibles, ha sido posible identificar anomalías térmicas en la cumbre del volcán Sangay y asignarles una medida de temperatura. Estas anomalías se han caracterizado por cambiar tanto espacial como temporalmente, y han sido un indicador de la presencia de productos volcánicos y de la actividad del volcán. Las anomalías térmicas que mayor variación han presentado son las relacionadas al Cráter Central y a los Domos Ñuñurco. En esta sección se pretende describir la evolución térmica de la distribución de las anomalías, tanto del cráter como de los domos (Sección 4.2.1), y también analizar cuantitativamente esta distribución a través de perfiles térmicos en dichos rasgos volcánicos (Sección 4.2.2).

## **4.2.1. Análisis de anomalías térmicas 2003-2019**

### **4.2.1.1. Cráter Central**

A principios de 2003, el Cráter Central se caracterizó por presentar un domo de lava, el cual formaba una estructura térmicamente distinta de su entorno (Fig. 44a). El contacto entre el domo y el piso del cráter se definía por el contraste de temperaturas. El domo presentaba una distribución térmica uniforme, las temperaturas más altas se encontraban en su centro (180,7°C; Fig. 44d) y disminuían hacia los márgenes. Las paredes internas del cráter eran frías y había en su borde un pequeño incremento de temperatura debido a la presencia de fumarolas. Las temperaturas en estos sitios registran el calor emitido por la roca que rodea estos ventos, que es proporcional a la temperatura y al flujo de masa de los volátiles (Hutchison et al., 2013). Altas temperaturas se registraron en el sureste del cráter debido a la emisión de un flujo de lava, este flujo, al igual que el domo, presentaba su mayor temperatura en el centro y disminuía hacia el exterior (Fig. 44a).

Para diciembre de 2003, el domo de lava había desarrollado un talus, en el cual sus temperaturas eran similares a las de las paredes internas del cráter, así las altas temperaturas en la superficie superior del domo (203,3°C; Fig. 44d). Al igual que a principios de este año, el borde del cráter presentaba fumarolas que provocaba un incremento de temperatura con respecto a sus paredes externas (Fig. 44b).

En 2005, el domo del cráter presentaba una distribución distinta de temperaturas, las altas temperaturas (punto crítico) se encontraban en los márgenes de su superficie (125,1°C; Fig. 44d) y no en su centro. El centro del domo y su talus, así como las paredes internas del cráter tenían temperaturas similares (Fig. 44c).

En mayo de 2007, debido a la ausencia del domo de lava, el cráter presentaba paredes internas escarpadas y una mayor profundidad (Fig. 45a). Además, registraba temperaturas menores (80,2°C; Fig. 45h) a la de fechas anteriores. Aunque en las imágenes térmicas disponibles no fue posible observar el viento, se observó que, en el interior del cráter, las paredes internas orientales presentaban mayores temperaturas que las del oeste. En las paredes externas del cráter, en el lado sur y noreste, se observa mayores temperaturas que su entorno, debido a la presencia de fumarolas (Fig. 45a). Las fumarolas ubicadas en la pared externa sur, observadas en la mayoría de sobrevuelos del periodo, se encuentran alineadas, y probablemente esta alineación se originó por los deslizamientos (escarpes *a* y *b*) ocurridos en este flanco desde mayo 2007, debido a que en años anteriores (2003 – 2005) no fue observada.

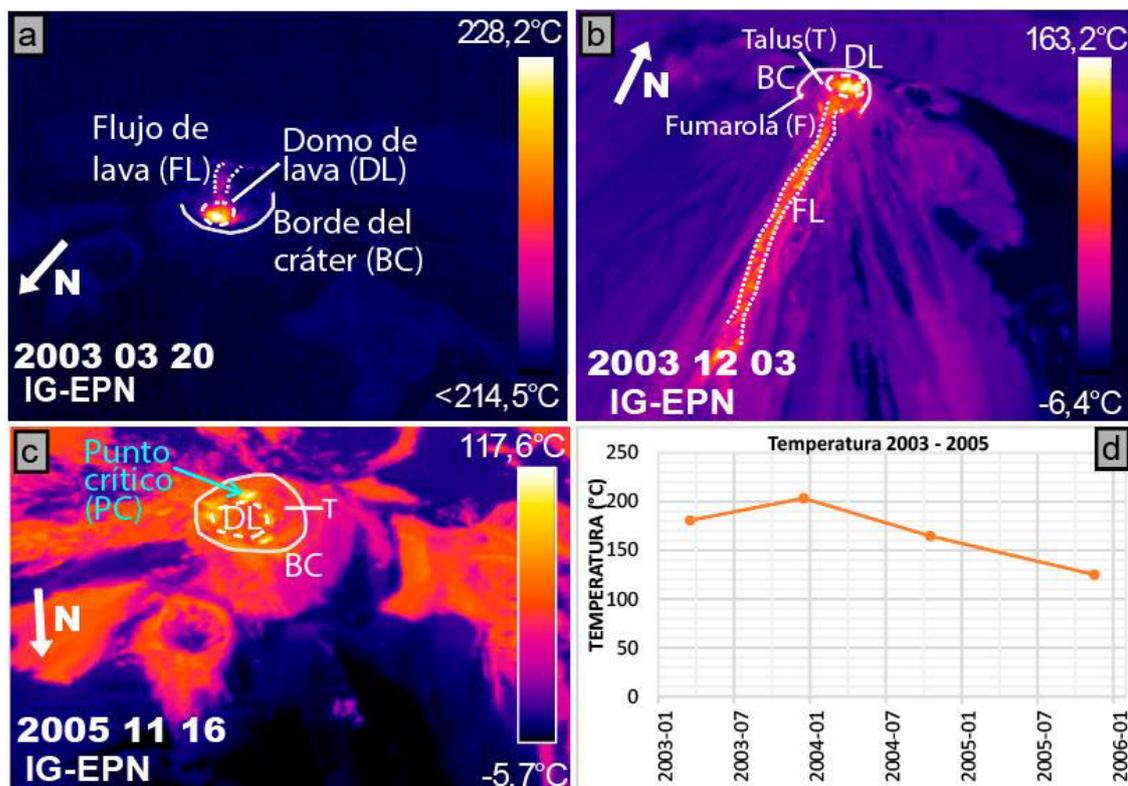


Figura 44. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2003 y 2005: a) imagen térmica del 20 de marzo de 2003, cráter con un domo (DL) y un flujo de lava (FL), b) imagen térmica del 03 de diciembre de 2003, cráter con anomalías térmicas en su borde, el domo de lava desarrolla un talus (T), c) imagen térmica del 16 de noviembre de 2005, domo de lava con puntos críticos (punto de mayor temperatura) en su margen y, d) gráfica de las temperaturas registradas entre 2003 y 2005.

Para septiembre de 2007, las imágenes térmicas permitieron observar el viento del cráter, además de una nueva distribución concéntrica de anomalías en el interior del cráter en forma de anillos. Desde el centro, se registraba un punto alto de temperatura (75°C, Fig. 45h), seguido de un anillo de temperatura menor, luego un anillo de temperatura similar al centro y finalmente dos anillos que van disminuyendo de temperatura (Fig. 45b). Y finales de este año, la temperatura incrementó significativamente (300,5°C; Fig. 45h), debido a la actividad explosiva del cráter, con emisiones de ceniza.

Después de la fecha anterior, la temperatura del cráter continuó siendo alta (313,2°C, Fig. 45h) y ya no se observó la distribución de temperatura en anillos. Así, a inicios de 2008, la mayor temperatura (punto crítico) se encontraba en el centro del cráter y disminuía gradualmente hacia el borde (Fig. 45c). Al igual que en 2007, se observó la alineación de fumarolas en la pared externa sur, y además en el lado este (Fig. 45c). Para agosto de este año, la distribución térmica fue similar, mostrando altas temperaturas (316,4°C; Fig. 45h), con la diferencia de la ausencia de fumarolas en el este (Fig. 45d). En este año, la conservación de altas temperaturas se debió a la actividad explosiva del cráter, que fue evidenciada por la presencia de balísticos a su interior (Fig. 45d).

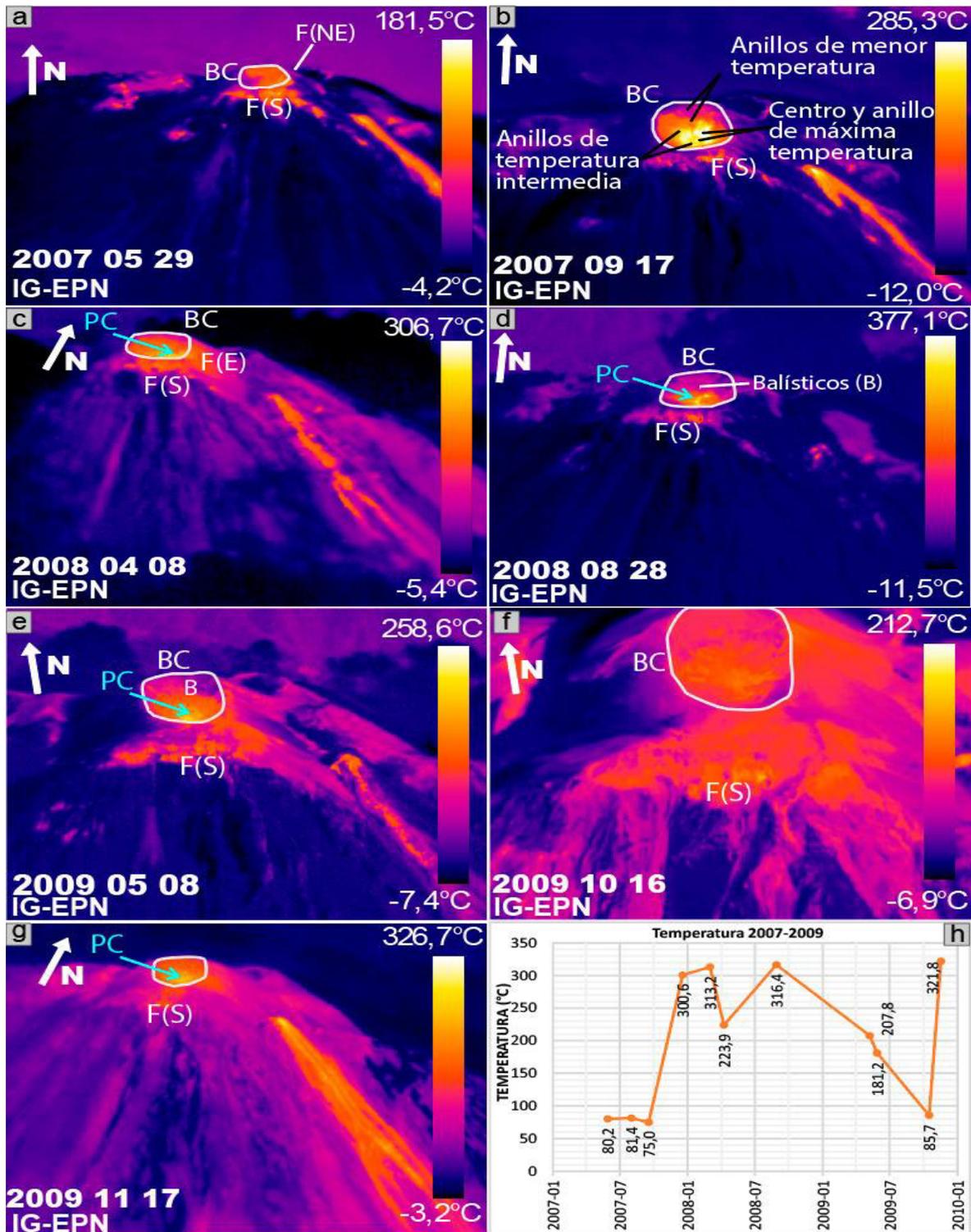


Figura 45. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2007 y 2009: a) imagen térmica del 29 de mayo de 2007, cráter sin domo ni flujo de lava y con actividad fumarólica en el sur, formando una alineación, b) imagen térmica del 17 de septiembre de 2007, cráter con distribución de anomalías en forma de anillos, c) imagen térmica del 08 de abril de 2008, cráter con su más alta temperatura hacia el centro, d) y e) imágenes térmicas del 28 de agosto de 2008 y del 08 de mayo de 2009, cráter con proyectiles balísticos (B) y actividad fumarólica, f) imagen térmica del 16 de octubre de 2009, cráter inactivo que presenta una distribución uniforme de anomalías, g) imagen térmica del 17 de noviembre de 2009, cráter activo con su mayor temperatura (punto crítico) hacia su centro y actividad fumarólica en el sur, y h) gráfica de las temperaturas registradas entre 2007 y 2009.

Para mayo de 2009, el cráter mantenía similitudes con agosto de 2008, con incremento de actividad fumarólica al sur y observándose emisión de gases al interior del cráter, al igual que balísticos (Fig. 45e). La temperatura máxima (punto crítico) medida para esta fecha fue de  $207,8^{\circ}\text{C}$  (Fig. 45h). En octubre, la temperatura disminuye notablemente ( $85,7^{\circ}\text{C}$ ; Fig. 45h), mostrando un cráter inactivo con leves picos de temperatura en el centro, hacia el borde oriental y en la alineación de la pared externa sur (actividad fumarólica) (Fig. 45f). Para noviembre, se observó un cráter nuevamente activo, con la máxima temperatura hacia el centro ( $321,8^{\circ}\text{C}$ ; Fig. 45h) y con pequeños picos en el lado sur (Fig. 45g). En el año 2010, el cráter se mantuvo activo con temperaturas entre  $173,2$  a  $275,1^{\circ}\text{C}$  (Fig. 46d), con presencia de columnas eruptivas, balísticos, y emisión intermitente de fumarolas. De modo que, en marzo, como en fechas anteriores, se observó que la mayor temperatura se hallaba en el interior del cráter, pero no se observó fumarolas a su alrededor (Fig. 46a). Para septiembre, en el exterior del cráter se observó un incremento de temperatura en las paredes externas, especialmente en la alineación sur, debido a actividad fumarólica (Fig. 46b). Y finalmente, para noviembre de este año, la actividad fumarólica disminuyó en el sur, pero se presentó también en el noreste (Fig. 46c).

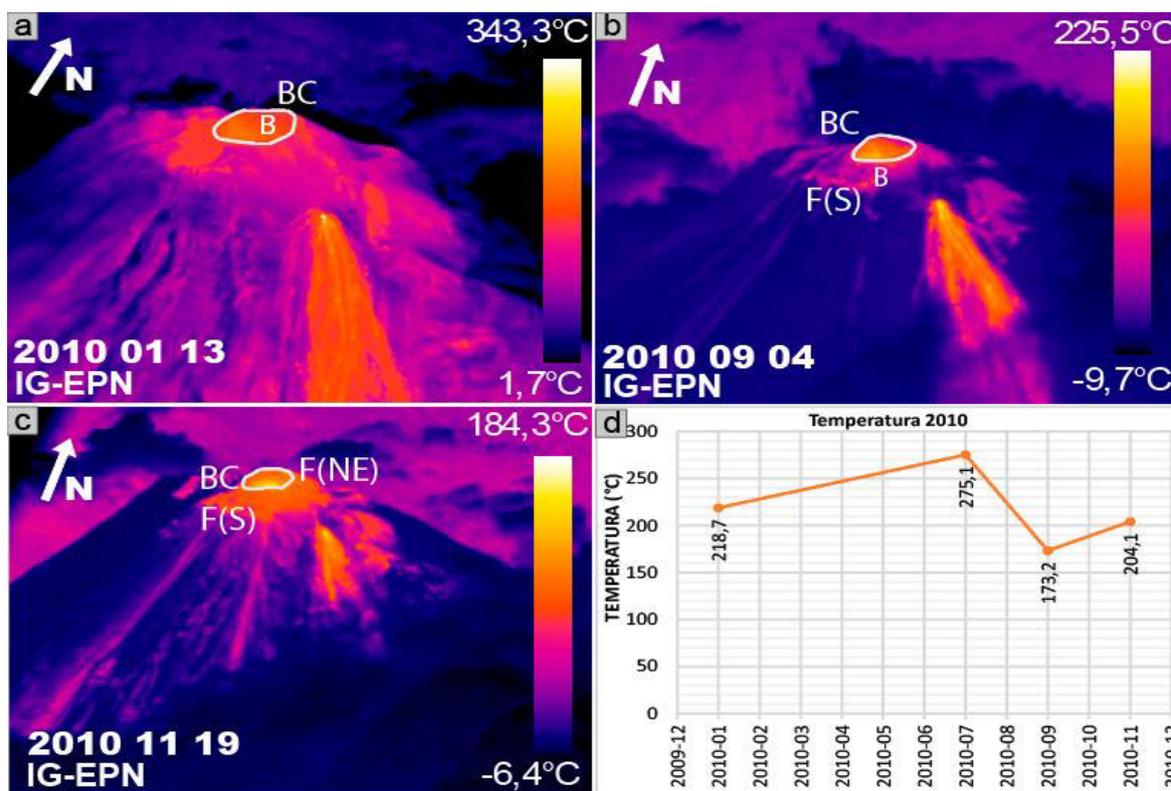


Figura 46. Evolución de las anomalías térmicas del cráter en el año 2010: a) imagen térmica del 13 de enero, cráter con balísticos en su interior y sin actividad fumarólica, b) imagen térmica del 04 de septiembre, cráter con actividad fumarólica en el sur, c) imagen térmica del 19 de noviembre, actividad fumarólica en el sur y noreste del cráter, y d) gráfica de las temperaturas registradas en 2010.

En febrero de 2011, el cráter cambió parcialmente su distribución de temperaturas. La mayor temperatura se encontraba en el centro (165,1°C; Fig. 47e), sin embargo, la disminución de esta hacia el borde fue más drástico, mostrando paredes internas y un margen de cráter, fríos (Fig. 47a). Para marzo, se registró una temperatura de 340,2°C (Fig. 47e) y se observó que las paredes externas e internas tuvieron un aumento de temperatura, haciendo que el contraste de temperaturas alrededor del centro del cráter sea más gradual que en febrero (Fig. 47b). En julio, se formó un cráter al interior del Cráter Central, lo que provocó, por un lado la máxima temperatura registrada en el periodo (381,1°C; Fig. 47e y Fig. 49), y por otro, una distribución casi concéntrica de temperaturas (similar a la de septiembre de 2007, Fig. 45b). Primero, se observó un centro (vento) de alta temperatura, seguido de un anillo de temperatura mayor, luego un anillo de temperaturas igual que el viento, y después anillos que disminuían progresivamente la temperatura hasta llegar al borde del cráter (Fig. 47c). En este año la actividad fumarólica la alineación sur y del noreste fue constante, pero de baja intensidad (Fig. 47a, b y c).

Las imágenes térmicas del año 2013, mostraron un cráter frío e inactivo con temperaturas de 21,1° a 45,6°C (Fig. 48h). En septiembre, se observó pocos picos de temperatura: en el interior, ubicados en el centro y en la pared interna norte; y en el exterior, en las paredes norte-noreste y sur (Fig. 48a). En cambio, para noviembre, no se observó picos importantes, por lo que las anomalías presentaban una distribución casi uniforme en el interior del cráter. Y para el exterior, se observó temperaturas más bajas en el este y oeste del cráter (Fig. 48b).

Al igual que en 2013, a finales de 2015, se observó un cráter frío con temperaturas que no superaron los 41°C (Fig. 48h), concluyendo así que el cráter se encontraba inactivo. En este año, tampoco se tuvo picos importantes de temperatura. Las temperaturas más bajas se encontraban en la pared externa oriental y en la pared interna norte del cráter (Fig. 48c). Para diciembre 2016, se observó una distribución de temperaturas uniforme (que no superaba los 34°C; Fig. 48h) en el interior y exterior del cráter, con pequeños picos en la pared interna noroccidental, en la pared externa sur y noreste (debido a actividad fumarólica), y en el borde este y sureste del cráter (Fig. 48d).

En el año 2017, el cráter inactivo registró una temperatura máxima de 30°C (Fig. 48h). Similar a años anteriores, no mostró picos importantes de temperatura. Y como se observó en 2015 (diferente a 2016), la pared externa este se encontraba más fría que los demás lados del exterior del cráter (Fig. 48e). La actividad fumarólica en el noreste del cráter provocó un pequeño incremento de temperatura en esta pared externa. Al sur del cráter, a pesar de la muy ligera actividad fumarólica, se observó una anomalía térmica con la alienación observada desde 2007 (Fig. 48e).

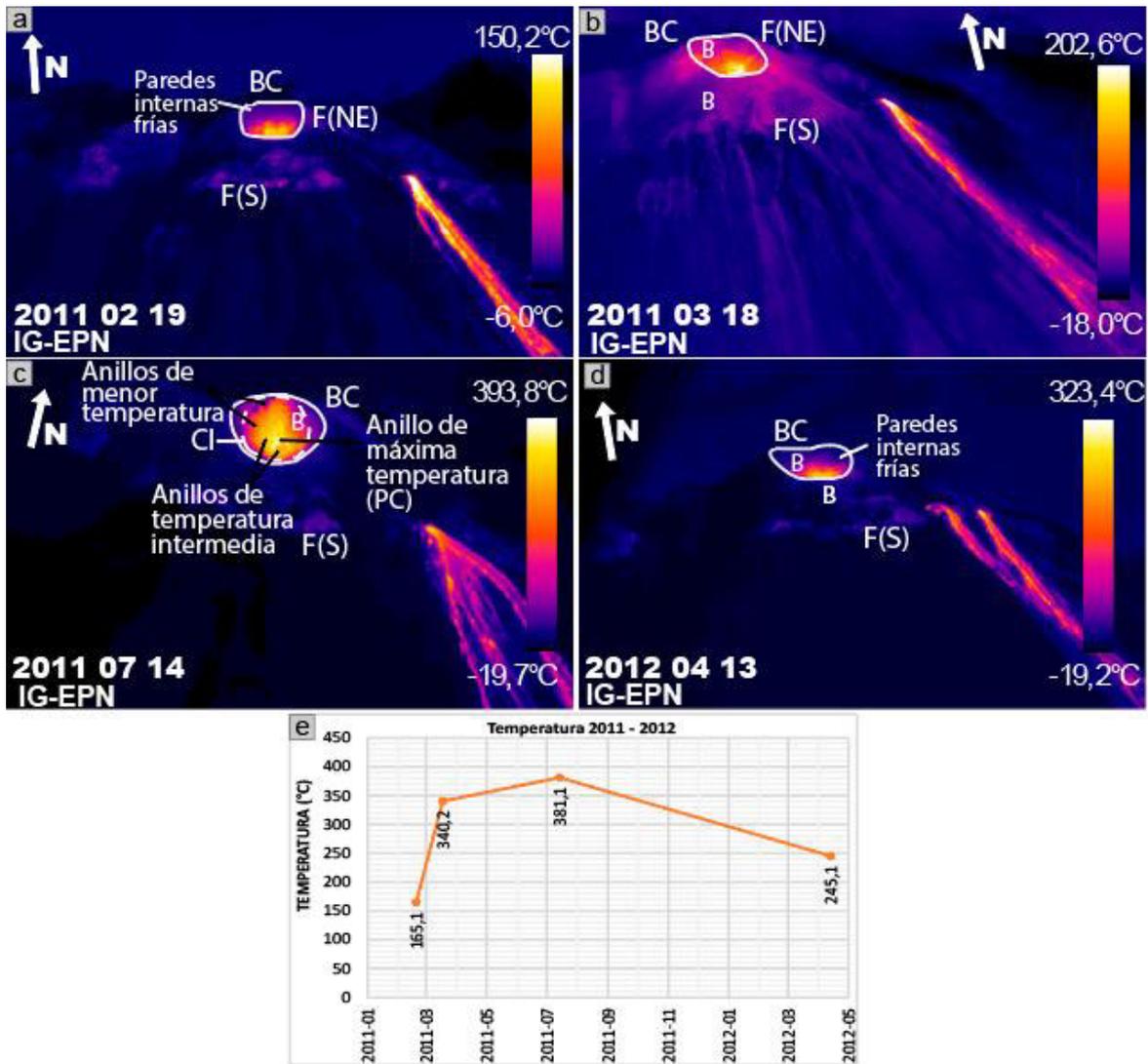


Figura 47. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2011 y 2012: a) y d) imágenes térmicas del 19 de febrero de 2011 y del 13 de abril de 2012, cráter con gran contraste de temperaturas en su interior, debido a que sus paredes internas estas frías con respecto a su centro, b) imagen térmica del 18 de marzo de 2011, cráter con paredes internas y externas de mayor de temperatura, y con balísticos en su interior y exterior, c) imagen térmica del 07 de julio de 2011, formación de un cráter interno (CI), la distribución de anomalías es en forma de anillos, y e) gráfica de las temperaturas registradas en 2011 y 2012.

En abril 2018, la distribución térmica del cráter fue análoga a la observada en el año 2013: sin picos de temperatura y con paredes externas, occidental y oriental, frías (Fig. 48b, f). Las diferencias fueron que, la temperatura del cráter es mayor (59,3°C; Fig. 48h) y que el cráter aumentó su tamaño debido a los distintos deslizamientos que ha sufrido en su interior (Ver Sección 4.1.1.1) e igual en años anteriores es posible observar la alineación al sur del cráter.

Finalmente, en agosto de 2019, se observó un cráter con distribución de anomalías diferente a los últimos años (desde 2013) y similar a cuando el cráter se encontraba activo (máximas temperaturas hacia el centro del cráter). Las imágenes térmicas de este año mostraron un incremento de temperatura significativo (143,8°C; Fig. 48h) y además

permitieron observar proyectiles balísticos en las paredes externas del cráter, confirmando así la actividad reciente de este (Fig. 48g).

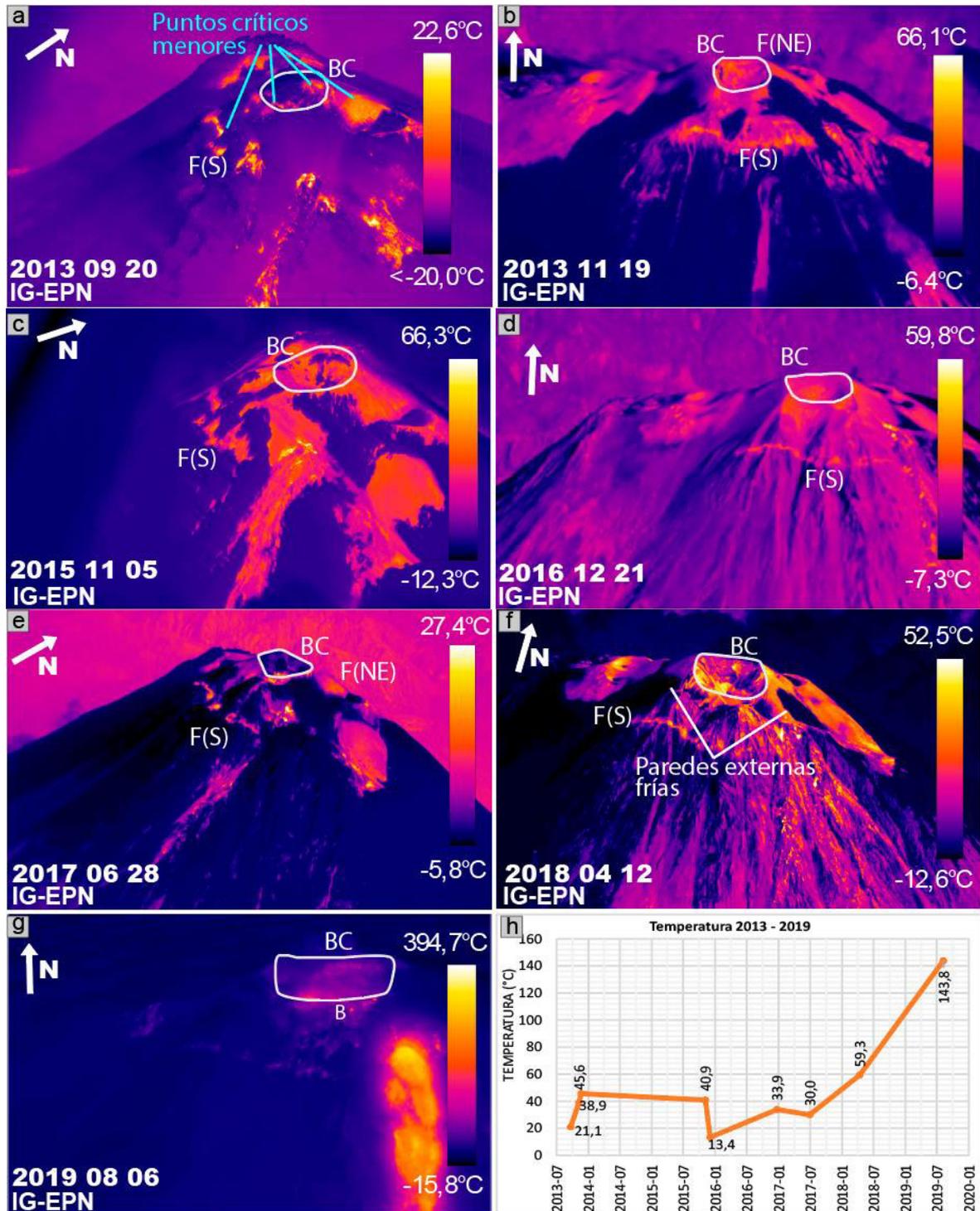


Figura 48. Evolución de las anomalías térmicas del cráter entre 2013 y 2019: a) imagen térmica del 20 de septiembre de 2013, cráter inactivo con pocos picos de temperatura, b) imagen térmica del 19 de noviembre de 2013, cráter sin picos de temperatura importante, leve actividad fumarólica hacia el flanco sur, c) imagen térmica del 05 de noviembre de 2015, d) imagen térmica del 21 de diciembre de 2016, distribución uniforme de anomalías y formación de un cráter sobre la pared externa sur-sureste del Cráter Central, e) imagen térmica del 28 de junio de 2017, cráter con anomalías térmicas negativas en su interior y en su pared externa este, f) imagen térmica del 12 de abril de 2018, cráter de mayor tamaño, sin picos importantes de temperatura, g) imagen térmica del 06 de agosto de 2019, cráter activo con presencia de proyectiles balísticos, y h) gráfica de las temperaturas registradas en 2013 y 2019.

El Cráter Central durante este periodo (2003 – 2019) presentó fuertes cambios de temperatura (Fig. 49) que estuvieron relacionados a su actividad. Se observó una disminución constante de temperatura desde marzo de 2003 hasta septiembre de 2007, para luego presentar un gran incremento hasta marzo de 2008, disminuyendo casi 100°C en abril de este mismo año. En agosto de 2008, vuelve a subir la temperatura para disminuir drásticamente en octubre de 2009. Entre noviembre de 2009 y abril de 2012, se observó temperaturas mínimas de 161°C y máximas de 381°C, siendo esta última, la mayor registrada en todo el periodo. Entre 2013 y 2018, la temperatura no alcanzó los 60°C, esto debido a que en estas fechas el cráter se encontraba inactivo. Finalmente, para 2019 hubo un incremento de temperatura, alcanzando así los 143,8°C.

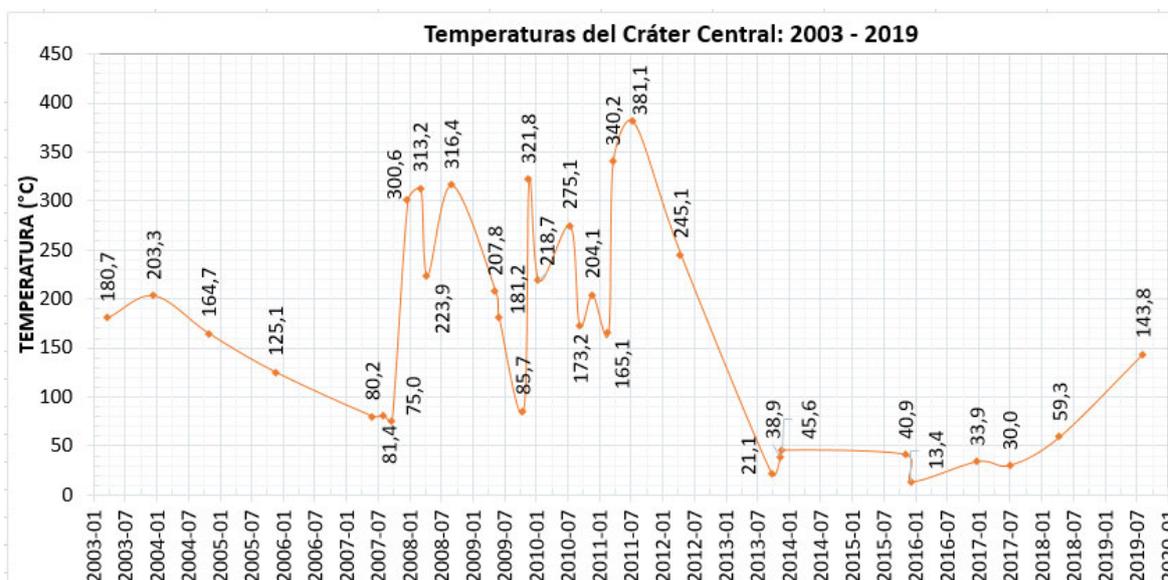


Figura 49. Gráfica de las temperaturas registradas para el Cráter Central entre 2003 y 2019.

#### 4.2.1.2. Domos Ñuñurco

En mayo de 2007, anomalías térmicas de alta temperatura (156,1°C; Fig. 50f) en el flanco suroriental del volcán confirmaron la existencia de un domo. Este domo, conocido como Ñuñurco 1, se caracterizó por ser pequeño y presentar una distribución de temperaturas que disminuían gradualmente desde el centro (vento) hacia afuera. Este domo activo emitía un flujo de lava hacia sureste, el cual presentaba ciertos picos de temperatura (Fig. 50a). Para agosto y septiembre de este año (Fig. 50b), no se observó cambios en esta distribución, pero sí un incremento de temperatura a 208,3°C (Fig. 50f). En septiembre, se observó que el domo presentaba dos flujos de lava, hacia el sur y sur-sureste (Fig. 50b), al igual que en diciembre. En marzo 2008, Ñuñurco 1 aumenta de tamaño debido a la emisión constante de flujos de lava. El viento presenta altas temperaturas (248,5°C; Fig. 50f), que disminuyen progresivamente hacia la parte superior del domo y más abruptamente hacia

los laterales (Fig. 50c). Para abril, el contraste de temperaturas es progresivo alrededor del viento (temperaturas de 185°C; Fig. 50f) (Fig. 50d). Y en agosto, el domo no presentó nuevos flujos de lava, y se distinguían una distribución de temperaturas en tres zonas: dos en su lado izquierdo y una hacia el derecho, y el centro representaba una transición entre ellas (Fig. 50e). Estas anomalías se debían a actividad fumarólica en el domo y partes de flujos antiguos aún calientes. La máxima temperatura medida en esta fecha fue de 73,3°C (Fig. 50f).

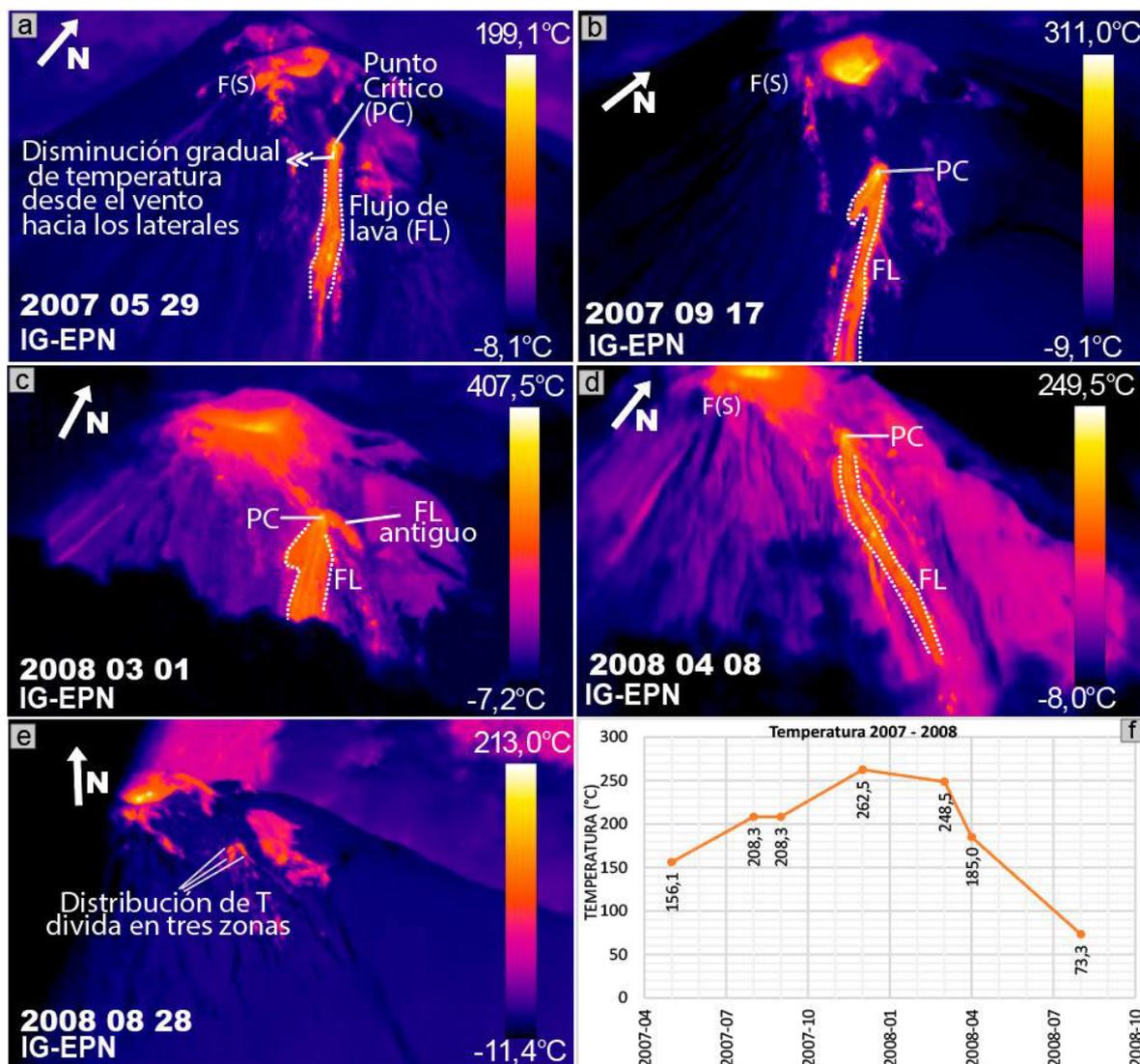


Figura 50. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñunrco1 entre 2007 y 2008: a) imagen térmica del 29 de mayo de 2007, domo que presenta una disminución gradual de temperatura desde su viento hacia los laterales. El punto de mayor temperatura o crítico (PC) se encuentra en el viento. b) Imagen térmica del 17 de septiembre de 2007, domo con dos flujos de lava, c) imagen térmica del 01 de marzo de 2009, d) imagen térmica del 08 de abril de 2008, domo con disminución gradual de temperatura, e) imagen térmica del 28 de agosto de 2008, domo sin nuevos flujos de lava, y f) gráfica de las temperaturas registradas en 2007 y 2008

Para 2009, se registraron temperaturas entre 190,9° y 291,5°C (Fig. 51g). A principios de mayo, se observó una distribución de temperaturas en forma radial, desde el centro del domo (Fig. 51a). En cambio para el 28 de mayo, debido a la emisión de nuevos flujos de

lava con dirección este, se observó que la máxima temperatura se encontraba en el viento y que la temperatura disminuía lateralmente, pero hacia la izquierda del viento se registraban mayores temperaturas que en su lado derecho (Fig. 51b). En octubre de este mismo año, se observó una disminución gradual de temperatura alrededor del viento; y una disminución más rápida en el contacto domo - flanco del volcán (Fig. 51c). Finalmente, en noviembre se observó la misma disminución alrededor del viento pero con temperaturas menores, por lo que el contraste con del contacto fue menor (Fig. 51d). En este año, el domo se mantuvo activo con la extrusión de flujos de lava: hacia el sur-sureste el 08 de mayo (Fig. 51a), hacia el este a finales de mayo (Fig. 51b) y hacia el sureste en octubre y noviembre (Fig. 51c, d).

Para el año 2010, el domo presentó una distribución de temperaturas similar a la de noviembre de 2009, con la diferencia que en enero y septiembre, el contacto domo-flanco estuvo a menor temperatura que en enero (Fig. 51e, f). Las temperaturas en este año variaron de 160,6°C a 304,8°C (Fig. 51g) y los flujos de lava emitidos tenían una dirección hacia el sureste (Fig. 51e, f).

En febrero de 2011, el principal pico de temperatura era el viento y la temperatura disminuía drásticamente a su alrededor (Fig. 52a). La temperatura registrada en esta fecha fue de 370,4°C (Fig. 52e), siendo esta la máxima temperatura medida en todo el periodo (Fig. 54). En marzo, julio y octubre, la distribución de temperaturas fue similar a la de febrero, con la diferencia que hubo dos direcciones del flujo de lava (sureste y este) (Fig. 52b, c) y que las temperaturas alcanzadas fueron menores: 353,3°C; 343,2°C y 241,8°C (Fig. 52e), respectivamente.

En abril de 2012, Ñuñurco 1 presentó una temperatura máxima de 314,5°C (Fig. 52e) con disminución gradual de esta hacia la parte superior del domo (Fig. 52d). En esta misma fecha por la emisión de flujos de lava desde un nuevo viento, se formó el Domo Ñuñurco 2. Este nuevo domo presentaba una distribución de anomalías similar a la de Ñuñurco 1 (Fig. 52d) y su temperatura alcanzó los 225,2°C (Fig. 52e).

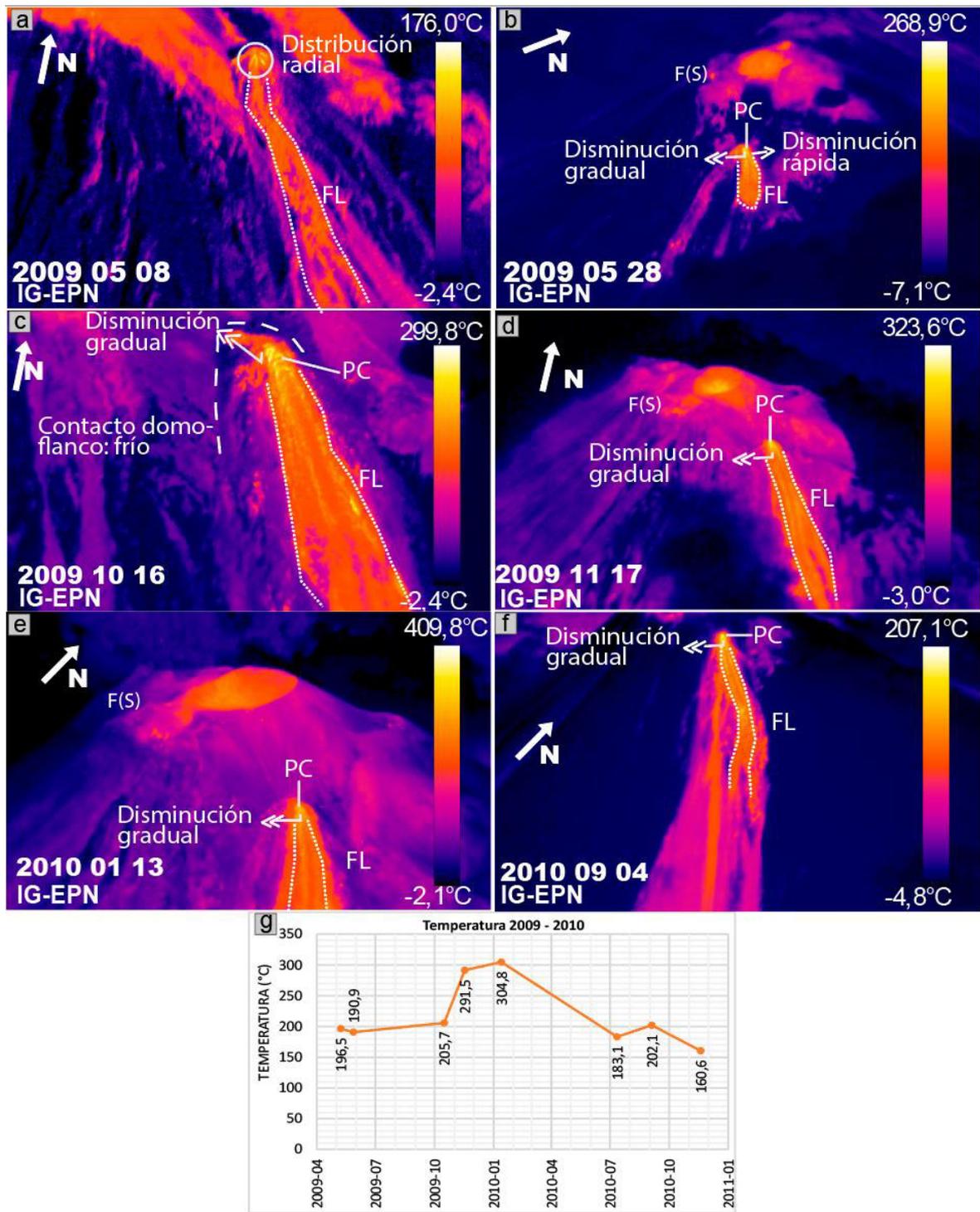


Figura 51. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1 entre 2009 y 2010: a) imagen térmica del 08 de mayo de 2009, domo que presenta una distribución en forma radial, b) Imagen térmica del 28 de mayo de 2009, domo con un flujo de lava hacia el este y contrastes de temperatura diferente en cada lado del punto crítico, c) imagen térmica del 16 de octubre de 2009, domo con disminución gradual alrededor del viento y contacto domo-flanco frío; d) e) y f) imágenes térmicas del 17 de noviembre de 2009, 13 de enero de 2010 y 04 de septiembre de 2010, domo con disminución gradual de temperatura desde el viento, por lo que el contacto domo-flanco presentaba mayor temperaturas, y g) gráfica de las temperaturas registradas en 2009 y 2010.

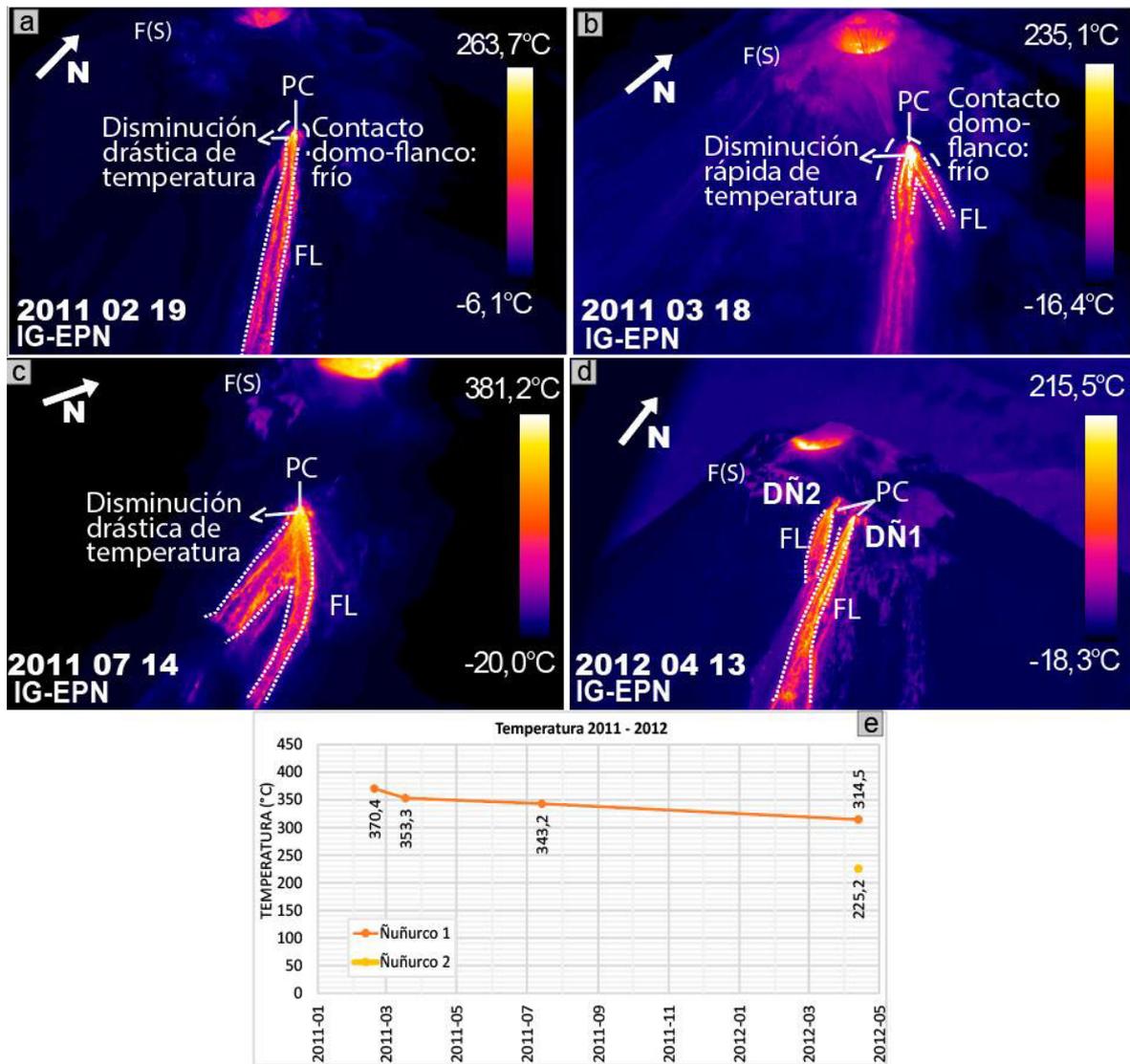


Figura 52. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1 y 2 entre 2011 y 2012: a) imagen térmica del 19 de febrero de 2011, domo que presenta una disminución drástica de temperatura alrededor del viento, b) y c) imágenes térmicas del 18 de marzo y del 14 de julio de 2011, domo con dos flujos de lava y fuertes contrastes de temperatura, d) imagen térmica del 13 de abril de 2012, formación del domo Ñuñurco 2, y e) gráfica de las temperaturas registradas en 2011 y 2012.

Para septiembre 2013, Ñuñurco 1 y 2, se encontraban inactivos con temperaturas que no superaban los 70°C (Fig. 53c). Ñuñurco 1, presentaba un pico de temperatura en la parte superior, debido a ligera actividad fumarólica (Fig. 53a). Por su parte, Ñuñurco 2, presentaba dos picos en los costados del domo por actividad fumarólica y por partes de flujos de lava aún calientes. (Fig. 53a, b). Para noviembre de este mismo año, se observó flujos de lava descendiendo de estos dos domos. El flujo de Ñuñurco 1, tenía dos direcciones y el de Ñuñurco 2, una sola, pero era más extenso que los de Ñuñurco 2 (Fig. 53b). Para esta fecha, las temperaturas de Ñuñurco 1 eran inferiores a 68°C y para Ñuñurco 2, menores a 80°C.

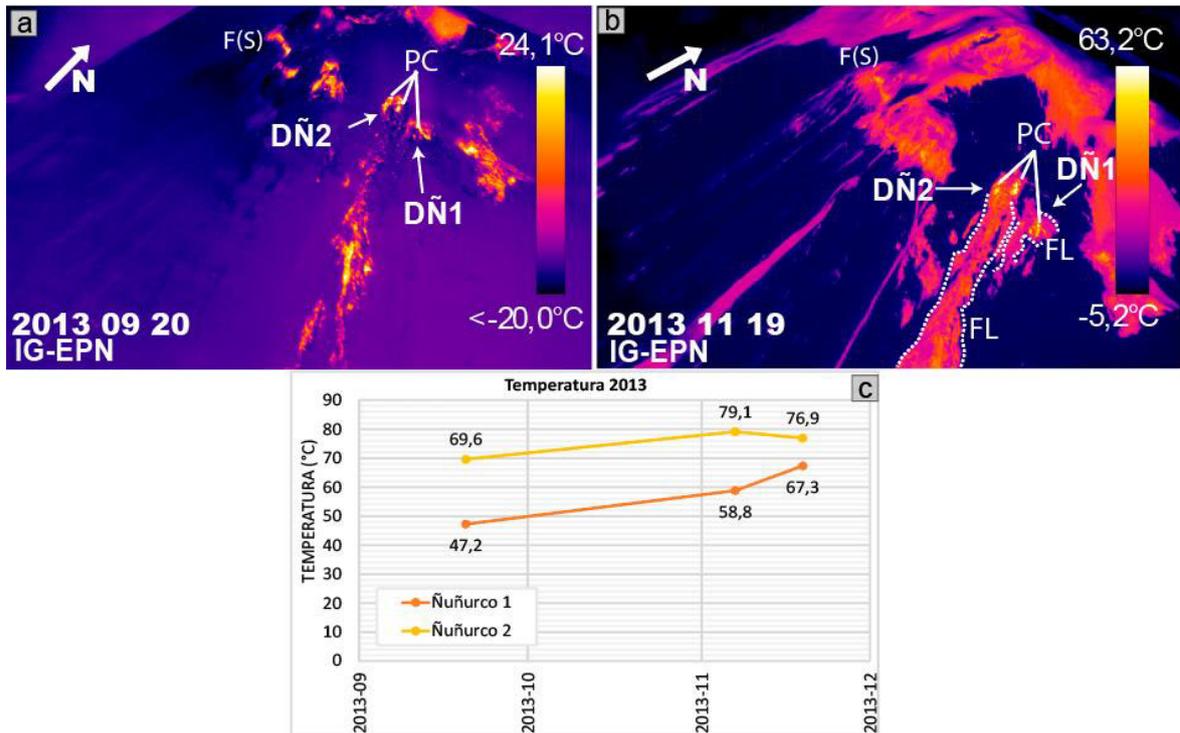


Figura 53. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1 y 2 en 2013: a) imagen térmica del 20 de septiembre, puntos críticos asociados a fumarolas, b) imagen térmica del 19 de noviembre, puntos críticos por flujos de lava y fumarolas, y c) gráfica de las temperaturas registradas en 2013.

En 2015, Ñuñurco 1, presentaba bajas temperaturas, con una distribución uniforme; mientras que Ñuñurco 2 presentaba una anomalía térmica negativa en su viento, el cual se encontraba abierto, además se observó el rastro de un flujo de lava que había descendido desde este viento. En la parte superior del viento se observó picos de temperatura, estos relacionados a la emisión de gases en esta zona (Fig. 54a). Al este de Ñuñurco 1, se observó una anomalía térmica de forma alargada que representaba el flujo de lava extruido desde un nuevo viento, Ñuñurco 3 (Fig. 54a). Este domo, de menor tamaño que sus predecesores y de forma de “U” invertida, fue observado en imágenes visibles de 2014 (Sección 4.1.1.2.3), pero para ese año no se existe imágenes térmicas para poder describir esta anomalía. En este año la máxima temperatura de Ñuñurco 1 fue de  $28,4^{\circ}\text{C}$ , para Ñuñurco 2 de  $48,1^{\circ}\text{C}$  y para Ñuñurco 3 de  $53^{\circ}\text{C}$  (Fig. 54c).

Para diciembre de 2016, las imágenes térmicas disponibles solo permitieron describir a Ñuñurco 1 y 2. Ñuñurco 1, tenía bajas temperaturas ( $13,1^{\circ}\text{C}$ ; Fig. 54c) y una distribución uniforme sin picos anómalos (Fig. 54b). Por otro lado, Ñuñurco 2, presentaba picos de temperatura sobre el viento y hacia la izquierda de este. El primer pico estaba vinculado a emisión de gases y el segundo probablemente a un pequeño deslizamiento ocurrido en el viento (Fig. 54b). La máxima temperatura para este domo fue de  $79,4^{\circ}\text{C}$  (Fig. 54c).

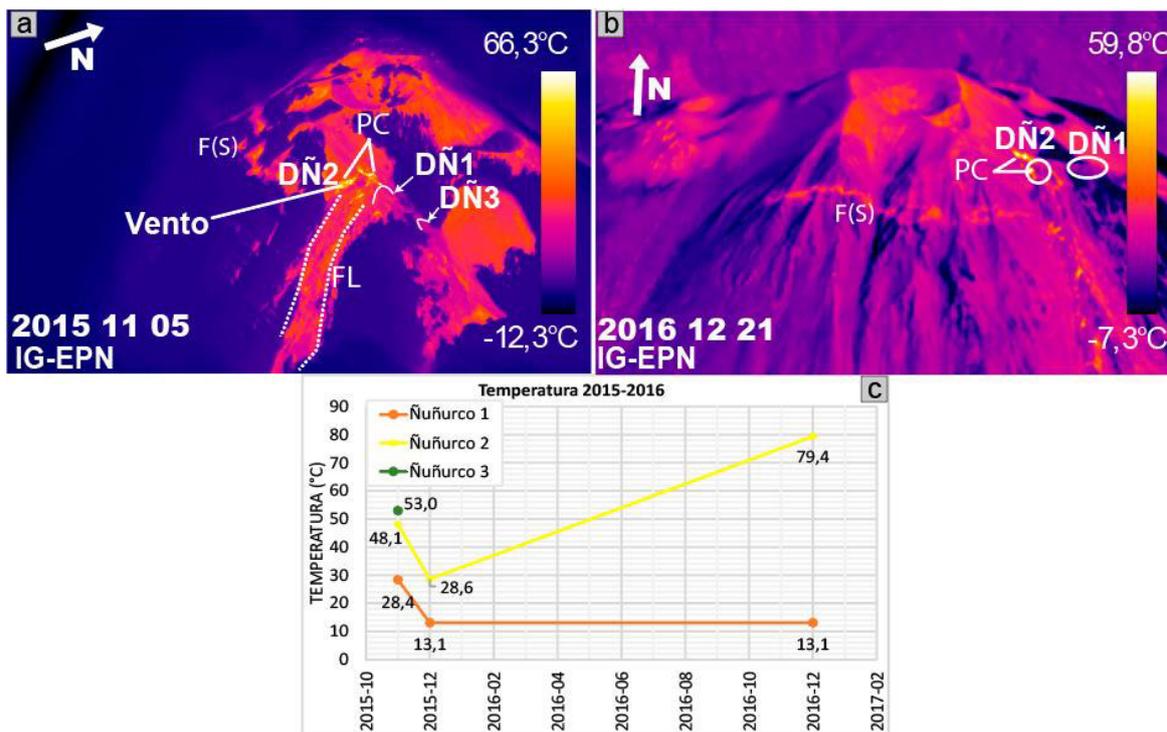


Figura 54. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1, 2 y 3 entre 2015 y 2016: a) imagen térmica del 05 de noviembre de 2015, Ñuñurco 2 presenta picos de temperatura alrededor del viento, debido a actividad fumarólica. Aparición Ñuñurco 3 en imágenes térmicas; b) imagen térmica del 21 de diciembre de 2016, Ñuñurco 1 con distribución uniforme de temperaturas y Ñuñurco 2 con picos de temperaturas sobre el viento y a su lado de izquierdo; y c) gráfica de las temperaturas registradas en 2015 y 2016.

Para el año 2017, la distribución de anomalías, tanto para Ñuñurco 1 como Ñuñurco 2, fue similar a la de 2016 (Fig. 55a), pero presentando menores temperaturas; 6,3°C para Ñuñurco 1 y 72,9°C para Ñuñurco 2 (Fig. 55d). Por otro lado, Ñuñurco 3, con 6,4°C de temperatura (Fig. 55d), presentaba una anomalía de menor tamaño que en 2015 (Fig. 55a). Su flujo de lava conservaba su longitud y mostraba picos de temperatura en ciertos sectores.

En abril de 2018, Ñuñurco 1 incrementa su temperatura a 31°C (Fig. 55b), pero su forma anómala alargada se conservaba igual que en 2016 y 2017 (Fig. 55b). Ñuñurco 2, presentaba fuertes picos de temperatura en su lado izquierdo, posiblemente relacionado al deslizamiento del frente de este domo (Fig. 55b). La temperatura de este domo subió a 128,1°C (Fig. 55d). Y la anomalía de Ñuñurco 3 de 39,7°C, incrementó su tamaño hacia los laterales, e igual que la fecha anterior, el flujo de lava presentaba picos de temperatura (Fig. 55b).

Por último, en el año 2019, con las imágenes térmicas disponibles, solo fue posible identificar a Ñuñurco 2. Este domo que creció significativamente en tamaño, presentaba una forma casi esférica, caracterizada térmicamente por una máxima temperatura ubicada en la parte superior del domo (326,8°C; Fig. 55d), que iba disminuyendo progresivamente hacia la parte inferior y más drásticamente hacia los costados (Fig. 55c).

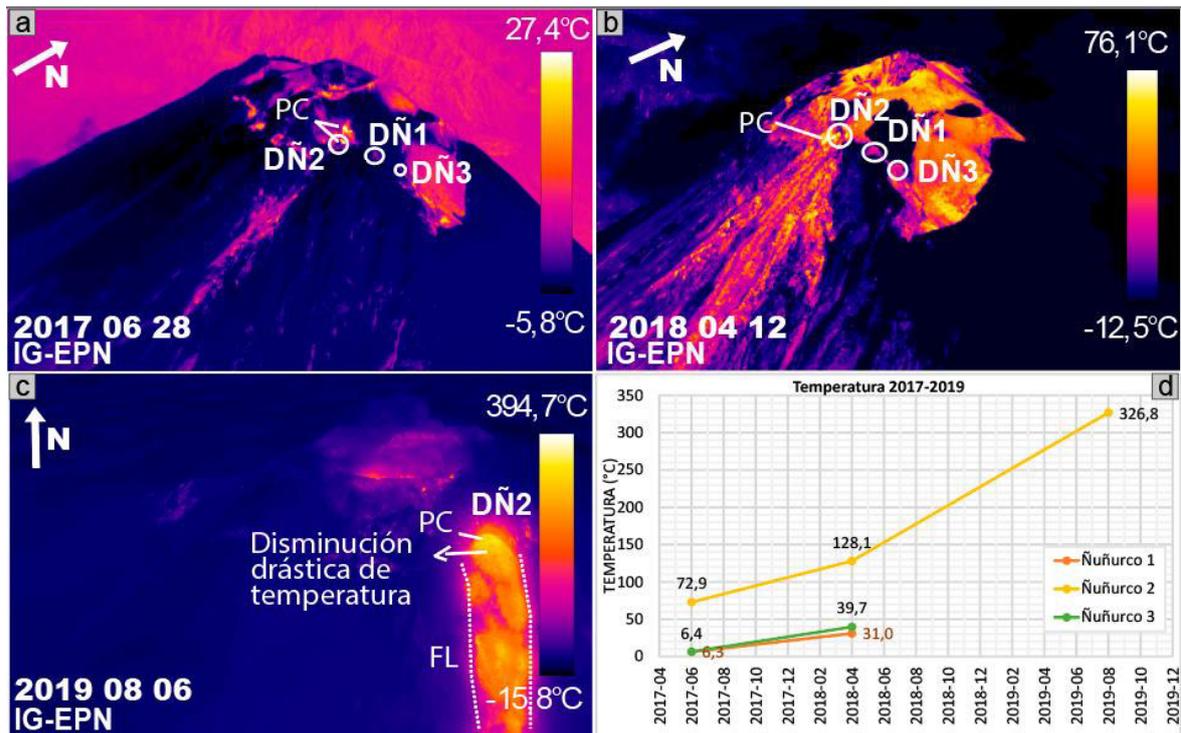


Figura 55. Evolución de las anomalías térmicas del Domo Ñuñurco 1, 2 y 3 entre 2017 y 2019: a) y b) imágenes térmicas del 28 de junio de 2017 y del 12 de abril de 2018, Ñuñurco 1 y 3, con una distribución uniforme, y Ñuñurco 2 con picos de temperaturas sobre el viento y a su lado de izquierdo; c) imagen térmica del 06 de agosto de 2019, Ñuñurco 2 de forma esférica con disminución de temperatura progresiva hacia la parte inferior y cambios drásticos hacia los costados; y d) gráfica de las temperaturas registradas en 2017 y 2019.

Al igual que el Cráter Central, el Domo Ñuñurco 1 presentó cambios importantes de temperatura, pero en este caso se los pudo dividir en cuatro grupos. 1) 2007 - 2008: inicia con temperaturas de 156°C teniendo incrementos de 50°C hasta diciembre de 2007 y disminuyendo a 73°C en agosto de 2008; 2) 2009 - 2010: inicia con temperatura que no superan los 206°C, para luego incrementar a 305°C y disminuir nuevamente a temperaturas inferiores a 203°C; 3) 2011 - 2012, corresponden a las temperaturas más altas registradas en el periodo con valores entre 314 - 370°C; y finalmente, 4) 2013 - 2018, corresponden a las temperaturas más bajas registradas en el periodo (bajo los 68°C) (Fig. 56).

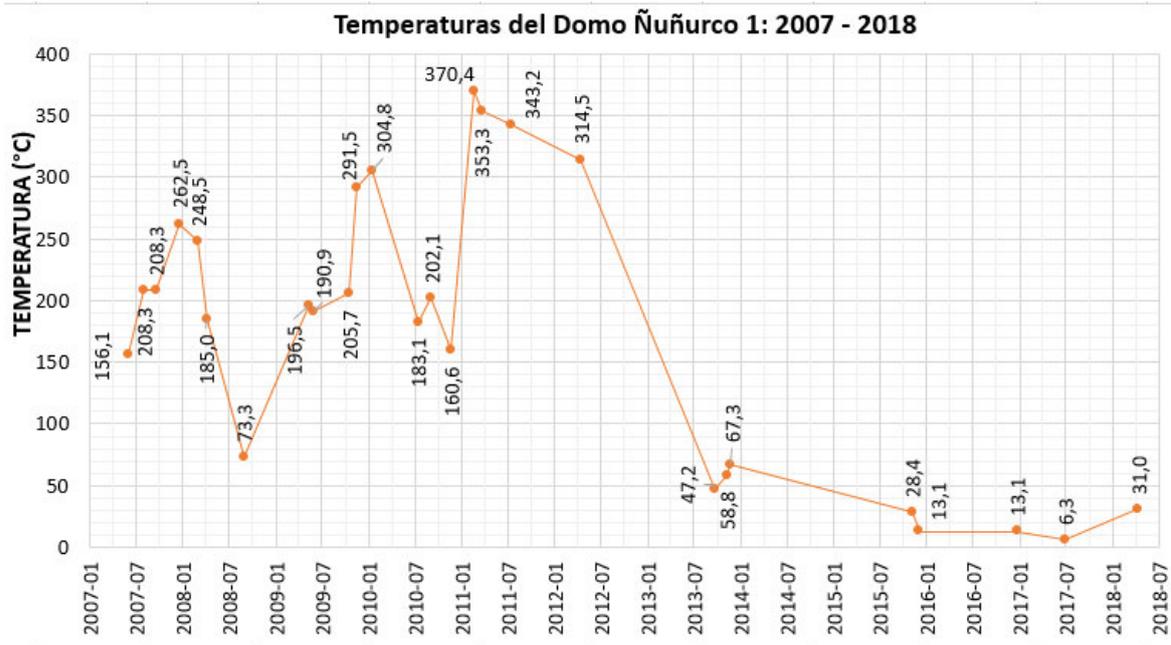


Figura 56. Gráfica de las temperaturas registradas para el Domo Ñuñurco 1 entre 2007 y 2018.

El Domo Ñuñurco 2, presenta una evolución térmica diferente a Ñuñurco 1. En 2012 se registró una temperatura de 225,2°C y disminuye notablemente entre 2013 y 2017, sin superar los 80°C. Para 2018 la temperatura aumenta 128°C para finalmente en 2019, presentar la mayor temperatura registrada en el periodo: 326,8°C (Fig. 57).



Figura 57. Gráfica de las temperaturas registradas para el Domo Ñuñurco 2 entre 2012 y 2019.

Finalmente, el Domo Ñuñurco 3, presenta temperaturas que no superan los 53°C, siendo 6,4°C, la temperatura mínima registrada (Fig. 58).

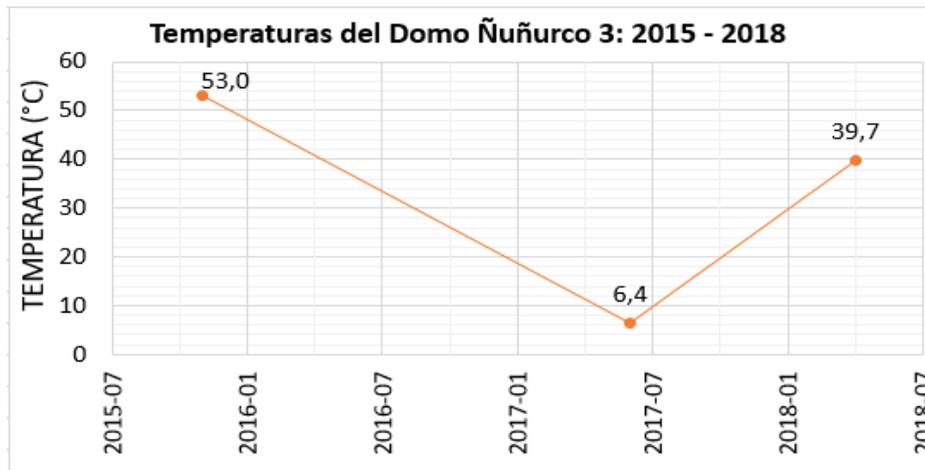


Figura 58. Gráfica de las temperaturas registradas para el Domo Ñuñurco 3 entre 2015 y 2018

#### 4.2.2. Perfiles térmicos

La Sección 4.2.1 demostró que el Cráter Central y los Domos Ñuñurco presentaban diferentes anomalías térmicas. La presencia de estas anomalías no fue constante en el periodo de estudio, puesto que en ciertas fechas fueron observadas y en otras no, y de igual forma, no conservaban una misma temperatura, ni las mismas dimensiones. Para observar y cuantificar con mayor precisión estas distintas distribuciones de temperaturas, se realizó perfiles térmicos, al interior del cráter y a través de los domos. Estos perfiles fueron elaborados a partir del año 2011, con la metodología indicada en la Sección 3.3.4.

##### 4.2.2.1. Cráter Central

Se obtuvieron 11 perfiles térmicos para el Cráter Central, correspondientes a cinco fechas de sobrevuelos entre 2011 y 2018 (Anexo 7). De estos perfiles se describen a continuación uno de cada fecha, seleccionando el perfil que tenga una orientación más horizontal, para reducir errores en las medidas.

Para el año 2011 se analizó una fecha: 14 de julio. Con imágenes térmicas con vista sur y sur-suroeste, se realizó tres perfiles no horizontales en sentido W – E. Estos perfiles, de ~93 a 99 m de longitud, muestran cuatro zonas térmicas en forma de anillos al interior del cráter (Fig. 59). La primera zona, representa un núcleo pequeño (vento) de altas temperaturas que varía de 294 a 214°C, La segunda zona es un anillo que contiene el mayor pico de temperatura (372,56°C), y se caracteriza por sus fuertes pendientes. La tercera zona tiene pendientes más suaves que las zonas anteriores y sus picos de temperatura varían de 214 a 219°C. Y finalmente, la cuarta zona representa el anillo de menor temperatura (inferiores a los 192°C) con las más bajas pendientes (Fig.59).

Se midió las dimensiones de estas regiones térmicas utilizando estos perfiles, pero estas longitudes no son exactas debido a que ningún perfil en esta fecha fue horizontal. El ancho de la primera zona es de aproximadamente 6 píxeles lo que equivaldría a 7 m. El ancho

máximo para la segunda zona es de 18 píxeles o 22 m. Y para la tercera zona la longitud es de 45 píxeles o 55 m.

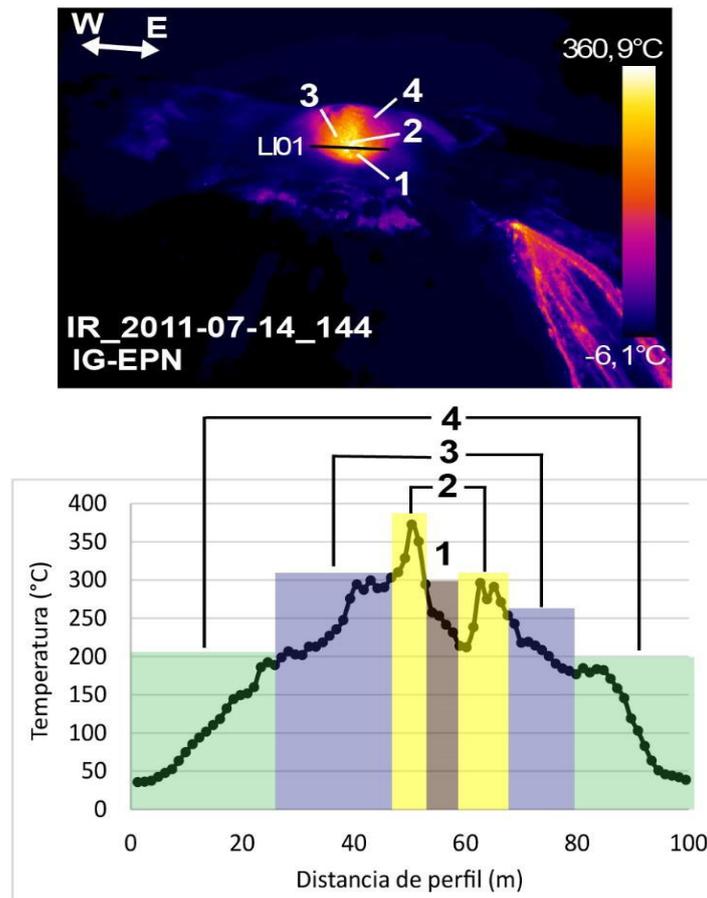


Figura 59. Perfil de temperatura (L01) del 14 de julio de 2011, tomado a través del cráter, que muestra cuatro zonas térmicas. La zona 1, representa un núcleo caliente o viento; la 2, un anillo con la más alta temperatura y, 3 y 4, zonas de pendientes más bajas de temperatura.

Para el año 2013, se obtuvieron cuatro perfiles en dos fechas distintas, en los cuales la distribución de temperaturas es diferente a la del 2011 y los valores mucho menores. La primera fecha, 07 de noviembre, se observa un cráter inactivo con temperaturas inferiores a los 26°C. En este perfil se observa dos puntos anómalos de bajas temperaturas, el primero ubicado a 10 m, con una temperatura de 10,12°C, y el segundo a 88 m con 2,05°C (Fig. 60a). Estos dos puntos están asociados a la presencia del glaciar al interior del cráter. La zona comprendida entre los puntos mencionados, tiene pocos picos importantes de temperatura, siendo 24,46°C el más alto y 17,76°C el más bajo (Fig. 60a). Esta zona tiene un ancho máximo de 78,6 m. Y la dimensión total del perfil horizontal al interior del cráter es de 97 m.

Para la segunda fecha de 2013, 19 de noviembre, se observa, al igual que la fecha anterior (Fig. 60a), un cráter frío con dos puntos importantes anómalos de temperatura (Fig. 60b). Estos puntos de 13,55 y 1,23°C, se encuentran ubicados a 16 y 86 m, respectivamente. La zona entre estos dos puntos, tiene una pendiente más pronunciada y con más picos de

temperatura que en el perfil anterior (Fig. 60b); esto podría deberse a la presencia de más puntos de nieve al interior del cráter, provocando así un mayor contraste de temperaturas, lo que fue verificado en las imágenes visibles de esta fecha.

El perfil tiene un ancho máximo de 99,3 m con temperaturas bajo los 31°C. La zona entre los puntos anómalos tiene una longitud de 71 m y picos de temperatura que varían de 12 a 31°C.

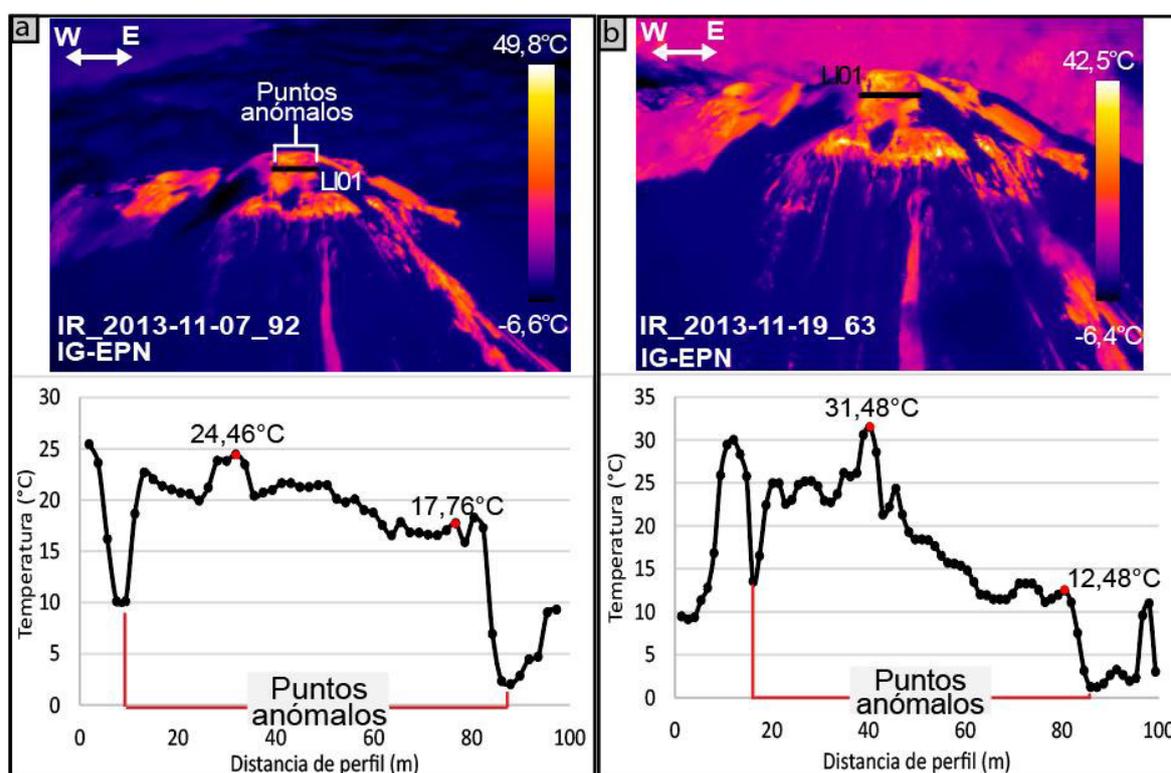


Figura 60. Perfiles de temperatura (L01) del año 2013, a) 07 de noviembre, y b) 19 de noviembre. Se observa una zona térmica entre dos puntos de baja temperatura.

En diciembre de 2016, solo se obtuvo un solo perfil horizontal. A este perfil se lo ha dividido en tres zonas, de acuerdo a la morfología interna del cráter (Fig. 61a). La primera zona representa un deslizamiento interno, en el cual la temperatura varía de 2 a 31°C. Esta zona se caracteriza por tener varios picos de temperatura (entre 21 a 31°C) en los primeros 78 m, para luego presentar una fuerte caída de temperatura bajo los 16°C. La segunda zona representa las paredes internas del cráter sin deslizamientos. La temperatura en esta zona varía entre 4 a 23°C, caracterizándose por presentar pocos picos y pendientes fuertes. Finalmente, la tercera zona corresponde al borde del cráter y parte de la pared externa (Fig. 61a). Esta zona presenta la mayor temperatura del perfil (32,22°C) debido a actividad fumarólica en el borde oriental del cráter.

La primera zona tiene una longitud de ~100 m, la segunda de ~138 m, y el ancho máximo del perfil es de ~162 m.

Finalmente, para el año 2018, se obtuvieron tres perfiles sub-horizontales entre 150 y 167 m. En esta fecha, el cráter incrementó su temperatura en  $\sim 20^{\circ}\text{C}$ . Aunque el perfil presenta fuertes variaciones de temperatura con varios picos, se lo ha dividido en dos zonas (Fig. 61b). La primera zona, presenta las más altas temperaturas con diferentes picos inferiores a  $56^{\circ}\text{C}$ ; mientras que la segunda tiene temperaturas menores a los  $27^{\circ}\text{C}$  (Fig. 61b). Las más altas temperaturas, en la primera zona de  $\sim 81$  m, podrían asociarse a deslizamientos más recientes al interior del cráter, y la segunda zona de 85 m, representaría deslizamientos más antiguos, esto se dedujo a partir de imágenes visibles de esta fecha.

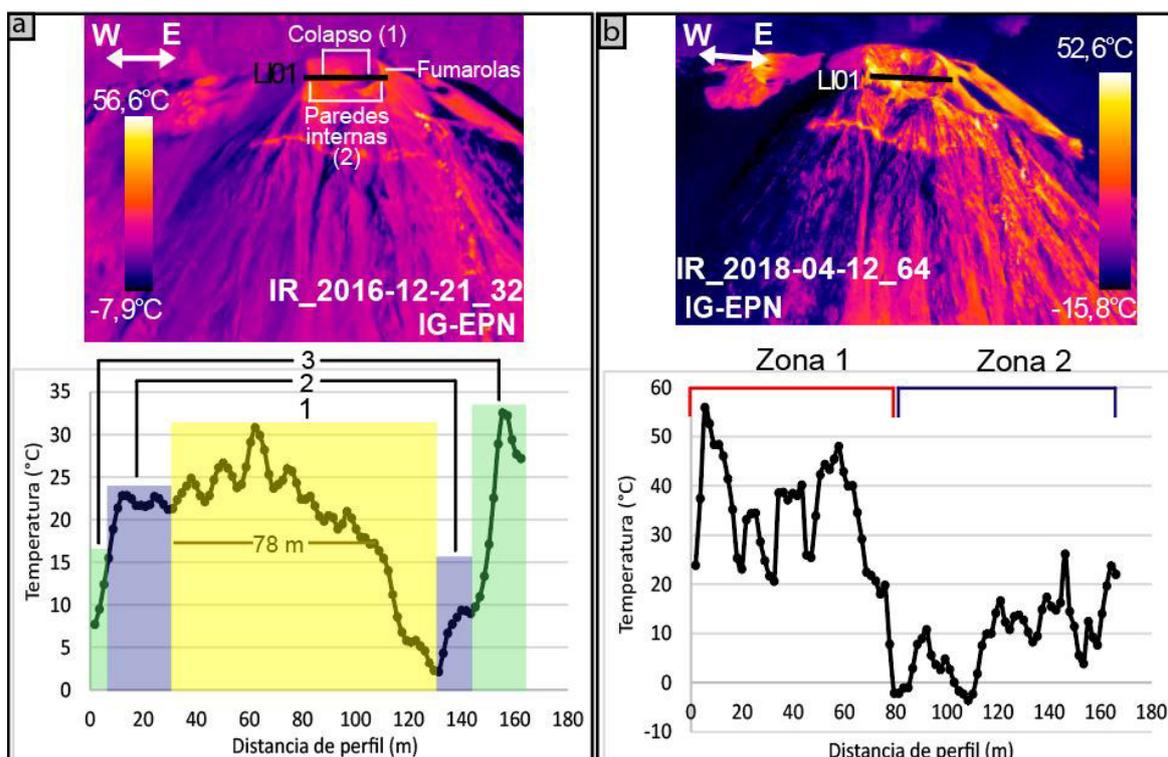


Figura 61. Perfiles de temperatura (L01) de 2016 y 2018, a) 21 de diciembre de 2016, se observa tres zonas. La zona 1, representa un deslizamiento al interior del cráter; la 2, las paredes internas y 3, el borde del cráter y parte de las paredes externas. b) 12 de abril de 2018, dos zonas térmicas en el cráter. La zona 1, con picos de temperatura entre los 20 a  $56^{\circ}\text{C}$ , y la zona 2, con picos que varían de 5 a  $22^{\circ}\text{C}$ , correspondientes a zonas de deslizamientos observados en imágenes visibles.

#### 4.2.2.2. Domos Ñuñurco

Se obtuvo 21 perfiles térmicos para los Domos Ñuñurco: 12 para Ñuñurco 1, 5 para Ñuñurco 2 y 4 para Ñuñurco 3 (Anexo 7). Estos perfiles son horizontales, atravesando el viento del domo. A continuación, se describe un perfil para cada fecha, seleccionando los perfiles que presenten las mayores temperaturas.

##### 4.2.2.2.1. Domo Ñuñurco 1

Para el año 2011, se obtuvieron nueve perfiles en tres fechas distintas. En la primera fecha, 19 de febrero, con los cuatro perfiles se observó un domo activo de 39 m de ancho (Fig. 62a). El pico máximo de temperatura alcanza los  $370,3^{\circ}\text{C}$ , además se observa dos picos

menores, uno de 266,8°C y otro de 125,6°C, que representarían los levees del flujo de lava (Fig. 62a).

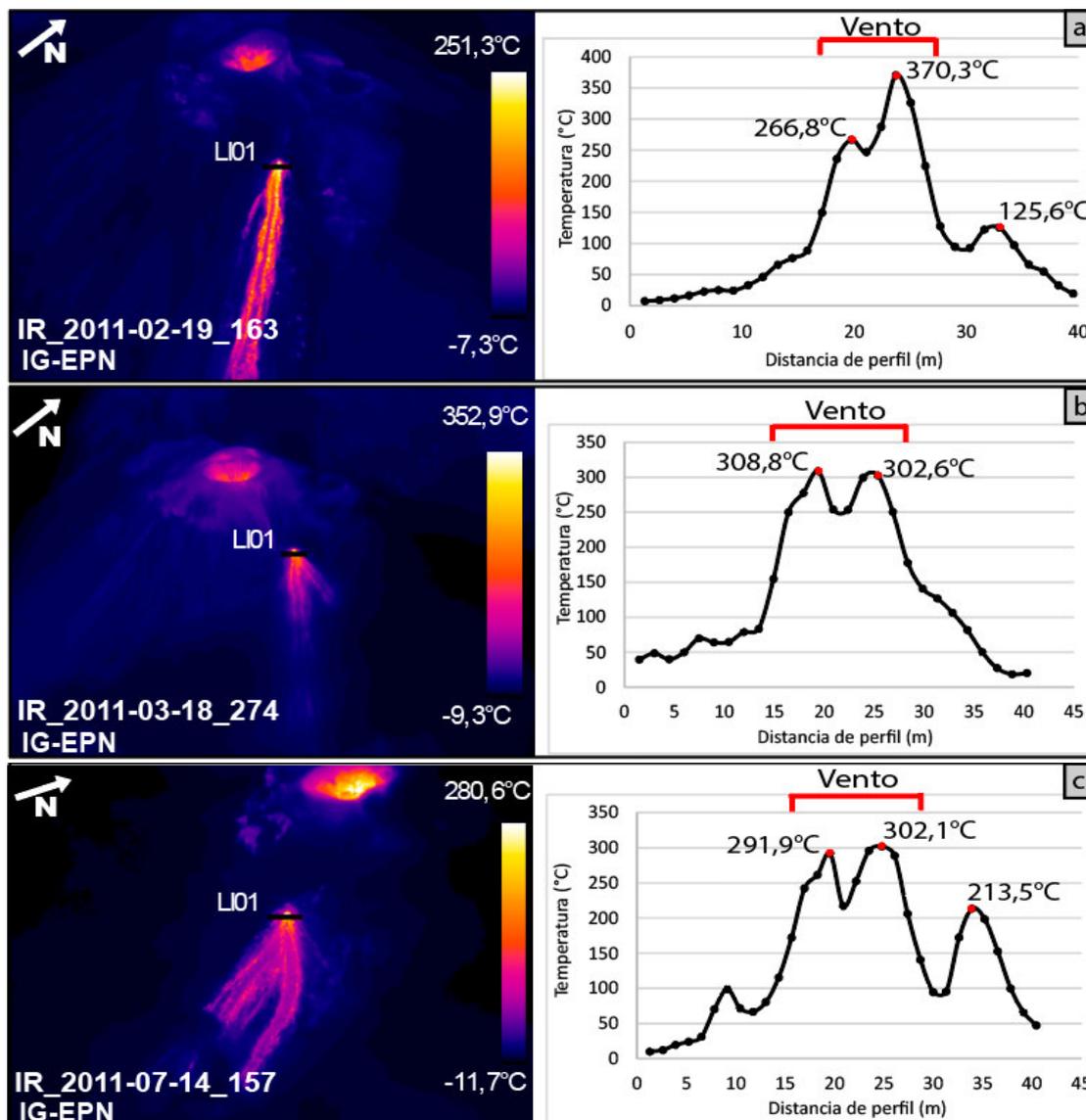


Figura 62. Perfiles térmicos del año 2011, a través del Domo Ñuñurco 1. a) 19 de febrero, se observa dos picos importantes de temperatura, correspondientes al viento y un pico menor, por flujos de lava antiguos, b) 18 de marzo, viento con dos picos de temperatura debido a la bifurcación del flujo de lava, c) 14 de julio, viento con dos picos de temperatura, el pico a la izquierda del viento representa flujos de lava antiguos.

En marzo de 2011, se obtuvo un perfil con un ancho máximo de 40 m. En este perfil se observó un viento de menor temperatura que la fecha anterior y con dos picos importantes: 308,8°C y 302,6°C (Fig. 62b). La extencia de estos dos picos indican la bifurcación del flujo de lava. El viento en este perfil tuvo un ancho máximo de 15 m.

Para julio de 2011, se obtuvieron cuatro perfiles, los cuales muestran un domo de 40 a 41 m de ancho. En esta fecha se observaron tres picos importantes de temperatura: el primero, de 291,9°C y el segundo de 302,1°C, corresponden a los nuevos flujos de lava emitidos

desde el viento; y el tercero de 213,5°C, representan un flujo de lava antiguo con emisión de gases (Fig. 62c). El viento en este perfil tuvo un ancho máximo de 14 m.

Para el año 2013, se obtuvieron dos perfiles en dos fechas distintas: 20 de septiembre (Fig. 63a) y 7 de noviembre (Fig. 63b). Estos perfiles muestran un domo con baja actividad de ~42 m, con temperaturas inferiores a 34 y 43°C, respectivamente. El perfil de septiembre, presenta un pico importante de temperatura (33,7°C), y otros picos menores, los cuales están asociados a la actividad fumarólica en este domo (Fig. 63a). El perfil de noviembre, al igual que el anterior, muestra pocos picos de temperatura (de 30,6 a 42,6°C), que de igual forma podrían asociarse a fumarolas (Fig. 63b).

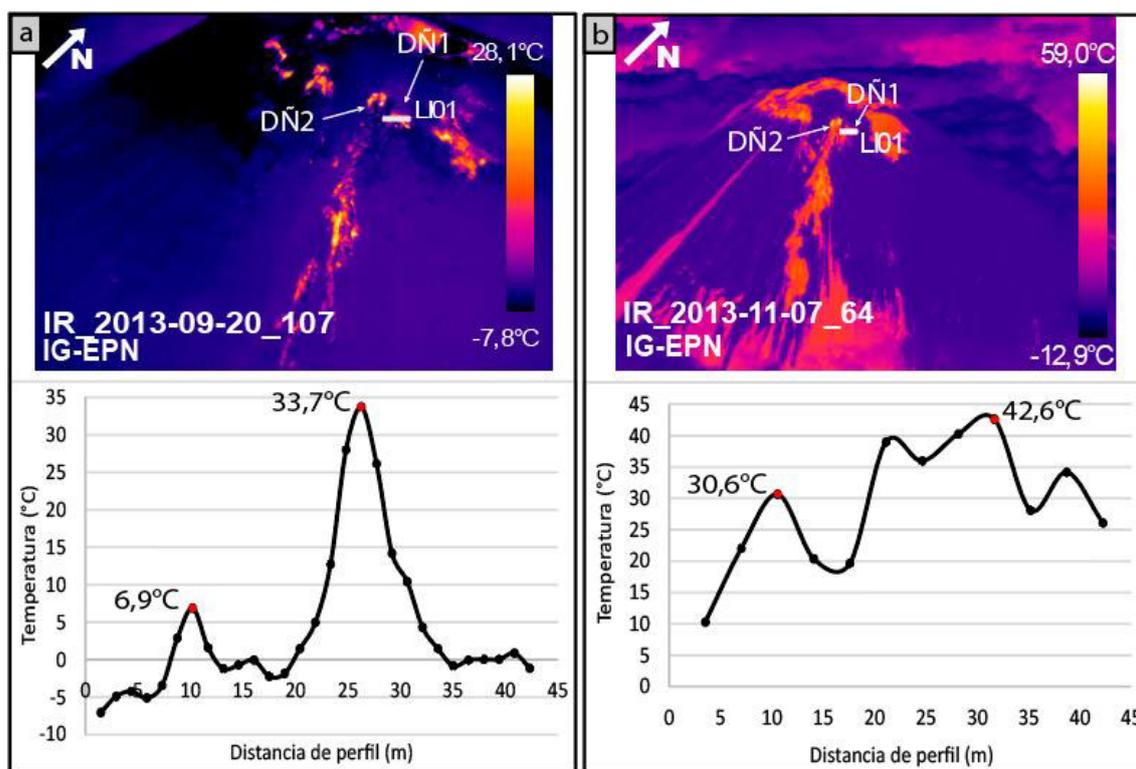


Figura 63. Perfiles térmicos del año 2013, a través de Ñuñurco 1 inactivo. a) 20 de septiembre, b) 07 de noviembre. Los picos de temperatura en ambos perfiles muestran actividad fumarólica.

En el año 2018, se obtuvo un perfil térmico, que muestra un domo más pequeño (21,5 m) que en fechas anteriores. Este perfil muestra dos picos de temperatura hacia el centro, alcanzando los 23,6°C (Fig. 64). Esta temperatura fue menor a la de 2013, debido a que no se observó actividad fumarólica en esta fecha.

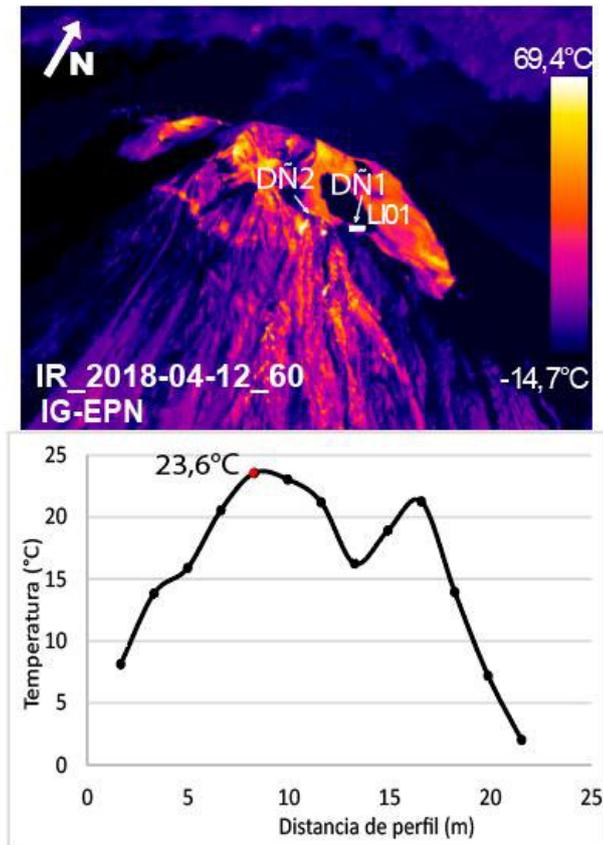


Figura 64. Perfil térmico del 12 de abril de 2018 a través de Ñuñurco 1 inactivo. Se muestra la mayor temperatura alcanzada en este perfil

#### 4.2.2.2. Domo Ñuñurco 2

Para Ñuñurco 2 se obtuvieron cinco perfiles, cada uno correspondiente a una fecha distinta. El primer perfil obtenido fue del 20 de septiembre de 2013. A esta fecha, el domo se encontraba inactivo, sus dos picos de temperatura de 60,1 y 31,2°C (Fig. 65a), representan flujos de lava aún calientes y actividad fumarólica en los bordes del domo. Las bajas temperaturas entre los dos picos, se debe a la presencia de nieve hacia el centro de Ñuñurco 2. El ancho máximo calculado para este perfil fue de 43,8 m.

En septiembre, el perfil muestra un domo con un flujo de lava que presentaba dos picos de temperatura; pero en esta fecha el pico hacia la derecha presenta mayor temperatura (61,8°C) que el de la izquierda (38,9°C); y el espacio entre estos dos puntos presenta menores pendientes que en septiembre (Fig. 65b). Este perfil de 42,2 m tiene temperaturas que varían de 1,1 a 61,8°C.

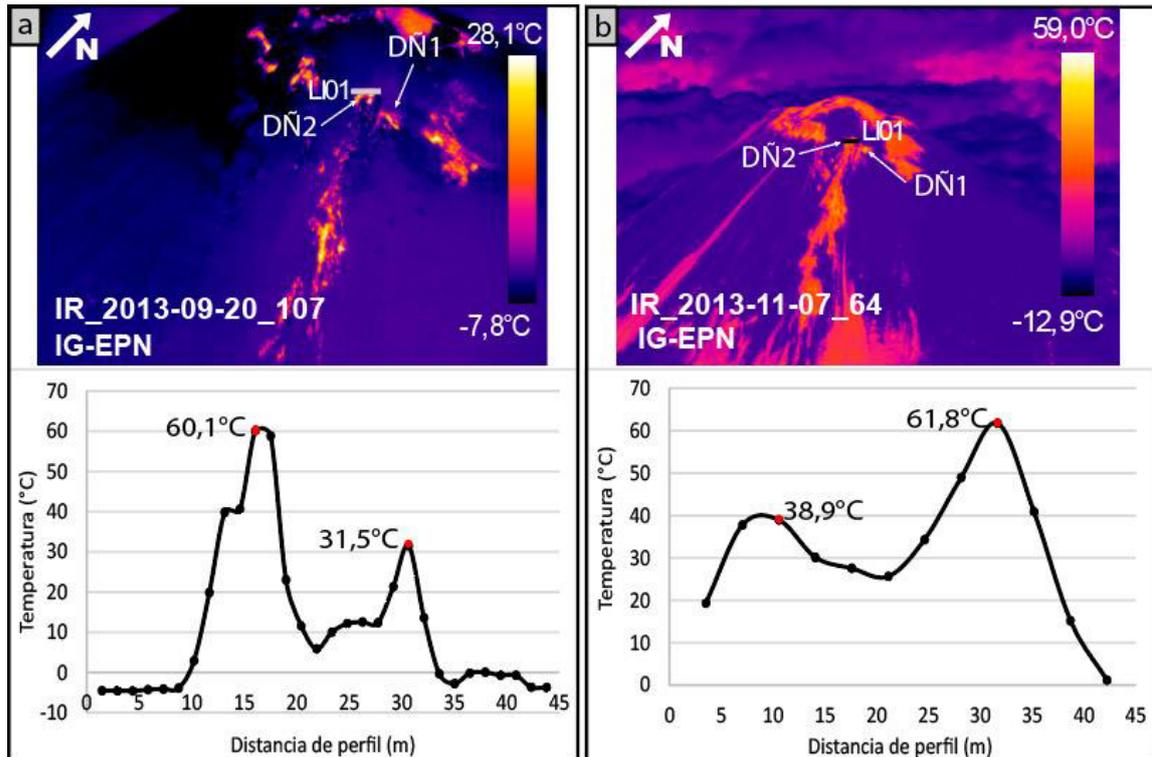


Figura 65. Perfiles térmicos del año 2013, a través de Ñuñurco 2 inactivo. a) 20 de septiembre, b) 07 de noviembre.

Para el año 2015, se obtuvo un perfil de 35,6 m. En este perfil, al igual que en la imagen térmica, se puede distinguir el viento del domo (Fig. 66a). Este viento se caracteriza por ser una depresión circular amplia en el perfil (16,6 m), con temperaturas que varían de 14 a 30°C. Fuera del viento, se observan tres picos de temperatura, estos picos de 72, 67 y 42°C, se deben a la presencia de fumarolas (Fig. 66a).

En abril de 2018, al igual que en 2015, se puede observar el viento del domo (Fig. 66). Este viento de 13,2 m de ancho, tiene temperaturas que varían de 3,5 a 22°C, y su distribución no es tan regular como en 2015. A los extremos del perfil, se observa dos picos de temperatura, el primero de 77°C y el segundo de 26,7°C (Fig. 66b). El primer pico puede ser asociado a un deslizamiento del frente del domo, puesto que en imágenes visibles no se observa actividad fumarólica.

Finalmente, para agosto de 2019 se obtuvo un perfil de 54 m de ancho. A diferencia de fechas anteriores, en 2019 el domo se encontraba activo emitiendo flujos de lava, por lo que la temperatura alcanzada fue de 326,8°C (Fig. 67). En este perfil se observó fuertes picos de temperatura dentro de lo que representaría el viento del domo y la emisión del flujo de lava (Fig. 67). Estos picos tienen temperaturas que varían de 179 a 327°C. Fuera del viento, la temperatura cambia drásticamente, llegando hasta los 29°C, esto debido al contacto entre el flujo de lava con el flanco del volcán, que provoca el contraste de temperaturas.

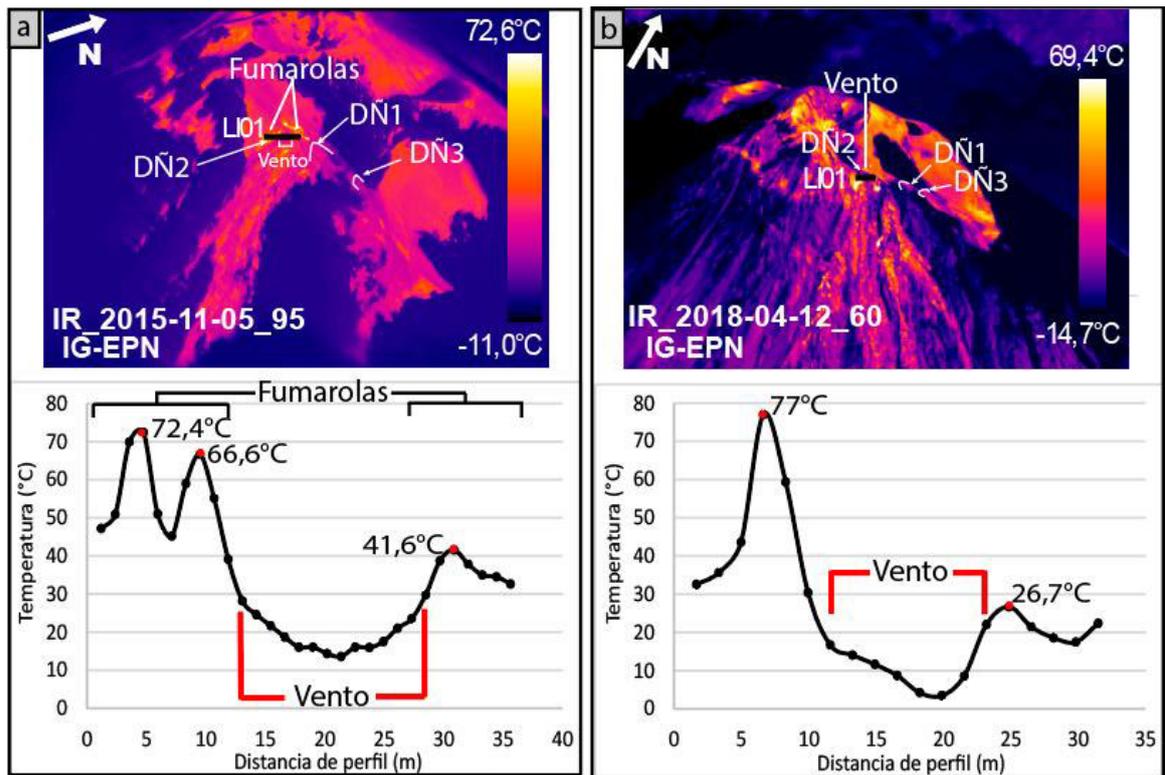


Figura 66. Perfiles térmicos de 2015 y 2018, en los que se observa el viento del domo Ñuñurco 2; a) 05 de noviembre de 2015, los picos altos de temperatura representan actividad fumarólica, b) 12 de abril de 2018.

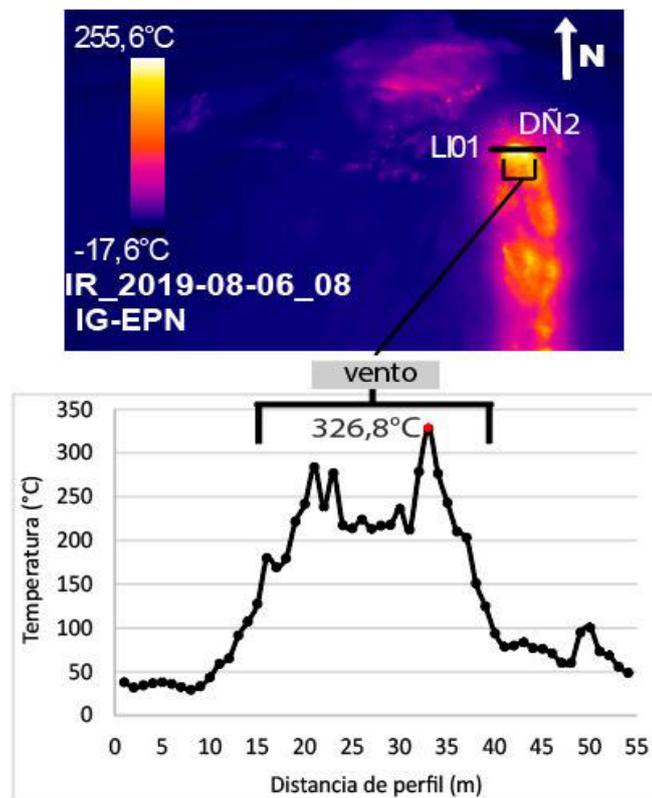


Figura 67. Perfil térmico del 06 de agosto de 2019, a través de Ñuñurco 2 activo. Las temperaturas más altas representan el viento del domo.

#### 4.2.2.2.3. Domo Ñuñurco 3

Para Ñuñurco 3 se obtuvieron cuatro perfiles, uno para el año 2015 y tres para 2018. El perfil del 5 de noviembre de 2015, tiene una longitud de 18 m, con temperaturas que varían de 2,4 a 10,6°C, mostrando así un domo pequeño e inactivo. La distribución de temperaturas está sesgada hacia la derecha, sin mostrar picos importantes de temperaturas. El mayor cambio observado en este perfil es a los 7 m, a partir del cual cambia la pendiente de la curva (Fig. 68a).

En abril de 2018, el perfil del domo muestra temperaturas mayores y una mayor longitud (34,2 m). Se observa una zona de altas temperaturas (mayores a los 20°C), con un pico de temperatura de 28°C, que luego disminuye a 20°C para luego alcanzar un máximo de 23°C (Fig. 68b). Las fuertes pendientes fuera de esta zona representarían el contacto entre el domo y el flanco del volcán.

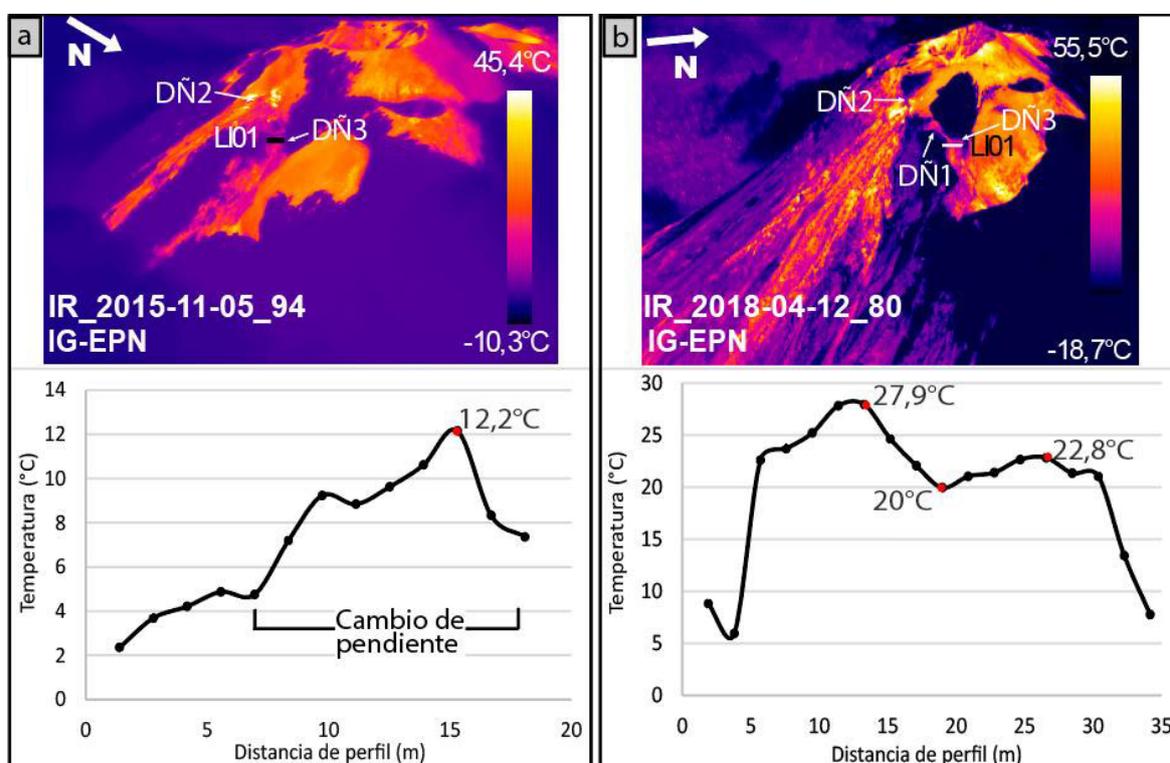


Figura 68. Perfiles térmicos de 2015 y 2018, a través del Domo Ñuñurco 3; a) 05 de noviembre de 2015, curva sesgada hacia la derecha, b) 12 de abril de 2018, zona térmica que alcanza los 27,9°C.

## **CAPÍTULO V**

### **5. DISCUSIÓN**

#### **5.1. Influencia de parámetros de entrada en las medidas de temperatura**

Al realizar un análisis térmico cuantitativo se pueden generar errores al medir la temperatura o al realizar los perfiles de temperatura; el primero, relacionado a los factores que influyen en la detección remota, y el segundo, al trazo del perfil sobre el rasgo volcánico a analizar.

Además, de estos errores, se apreció que la temperatura máxima para el cráter y domos (Sección 4.2.1) en muchas ocasiones no coincidían con la temperatura máxima registrada en su perfil térmico (Sección 4.2.2). Esto se debió a dos principales razones: 1) en algunos casos la imagen térmica usada para realizar el perfil no fue la misma en la que se registró la máxima temperatura en esa fecha; y 2) la ubicación del perfil térmico, principalmente en el cráter, no atravesaba la anomalía con la mayor temperatura.

##### **5.1.1. Fuentes de errores en la medición de temperaturas**

Las temperaturas registradas por las cámaras infrarrojas dependen de varios factores, como las características de la atenuación atmosférica, la absorción por los gases volcánicos (agua y SO<sub>2</sub>), la emisividad del objetivo, e inclusive el ángulo de visión (Ball & Pinkerton, 2006). A su vez, la atenuación atmosférica es función de la distancia entre el objeto y la cámara, la humedad, la temperatura atmosférica, las concentraciones de polvo, gas, nieve, hielo y aerosoles en el aire entre el objeto y la cámara, y el reflejo de la radiación solar; por lo que, para realizar mediciones de temperatura, se debe aplicar una corrección a los datos de radiancia medidos para tener en cuenta la absorción de radiación por las especies atmosféricas y volcánicas (Calvari et al., 2004). Para esto, fue necesario tener valores de temperatura atmosférica, humedad relativa, distancia objeto-cámara y temperatura ambiental, los cuales fueron usados en el software ThermaCAM Researcher 2002.

La temperatura atmosférica y humedad relativa fueron medidos con termómetro/higrómetro, en cada sobrevuelo. El valor usado para la emisividad fue de 0,96, este valor es usado por el Instituto Geofísico para los volcanes del país. El valor de la temperatura ambiental, al no poder ser medida o calculada, fue estimada entre dos valores: -5 y -10°C, usando la primera temperatura para cuando el cielo estaba nublado y la segunda, para cuando estaba despejado. Por último, la distancia objeto – cámara fue estimada en 1000 m para los sobrevuelos entre 2003 y 2010, y fue calculada con el método geométrico

*distancia entre dos puntos en el espacio*, a partir del año 2011 (excepto 2012) en las imágenes térmicas usadas en este estudio.

Con el fin de determinar cómo varía el valor de temperatura máximo, mediante la calibración con los diferentes parámetros, se realizó el análisis de la imagen térmica IR\_0163 del 19 de febrero de 2011, variando un único parámetro y conservando los demás (i.e. emisividad variable, y distancia, temperatura ambiental/atmosférica y humedad relativa fijas) como se muestra a continuación. Este análisis ayudará a percibir de mejor manera con cuál parámetro la temperatura es mayormente susceptible a presentar importantes variaciones.

Para la imagen térmica IR\_0163 los parámetros de objeto son los siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. Parámetros de objeto para la imagen térmica IR\_0163

<b>Parámetros de objeto</b>	
Emisividad	0,96
Distancia	2020 m
Temperatura ambiental	-10°C
Temperatura atmosférica	-3,7°C
Humedad relativa	39%

La temperatura medida para el Cráter Central fue de 165°C, si se varía solo un parámetro y se conserva los demás, se obtiene lo siguiente:

#### **Variación de la emisividad**

Al variar la emisividad entre 0,91 y 0,95 (Harris, 2013), se obtuvieron valores mayores de temperatura (hasta 171,1°C), con una variación porcentual entre 0,73 a 3,7% con respecto al dato original, concluyendo así que un valor erróneo de emisividad varía en aproximadamente un grado centígrado, conforme se aleja en una unidad con respecto al dato original o real (Tabla 2, Fig. 69), estableciendo así una relación inversamente proporcional entre la emisividad y la temperatura medida (a mayor emisividad, menor temperatura; Fig. 69). Por lo tanto, se observa que la constante de emisividad no tiene una influencia muy significativa en el cálculo de la temperatura.

Tabla 2. Temperatura del cráter y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la emisividad. Los valores de emisividad entre 0,91 y 0,94, son los determinados para rocas andesíticas según Harris A., (2013).

<b>Emisividad</b>	<b>Temperatura Cráter (°C)</b>	<b>Variación porcentual</b>
0,96	165	
0,95	166,2	0,73%
0,94	167,4	1,45%
0,93	168,6	2,18%
0,92	169,8	2,91%
0,91	171,1	3,70%

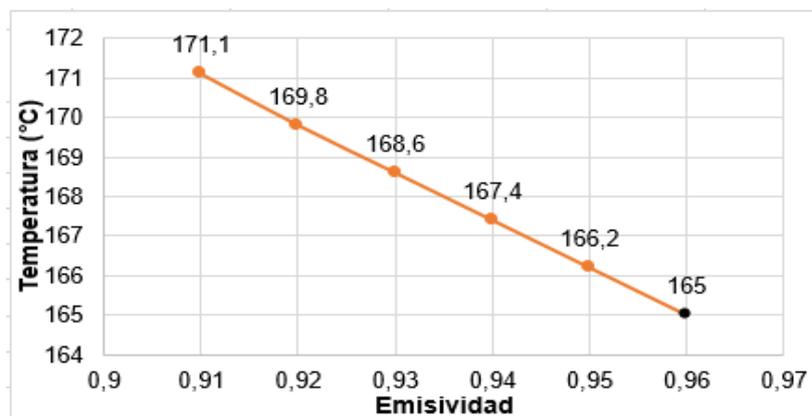


Figura 69. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de emisividad.

### Variación de la temperatura ambiental

Los valores de temperatura ambiental que se utilizaron fueron  $-5$  y  $-10^{\circ}\text{C}$ , puesto que estos fueron los únicos usados durante el periodo de estudio; sin embargo, al realizar esta variación en la imagen de ejemplo, se obtuvo el mismo valor de temperatura. Para verificar esto, se probó el cambio de la temperatura ambiental en otras imágenes térmicas y las variaciones de temperatura para el Cráter Central, fueron entre  $0$  y  $0,2^{\circ}\text{C}$ , concluyendo así que una temperatura ambiental mal atribuida, ya sea  $-5$  o  $-10^{\circ}\text{C}$ , no afectaría significativamente la temperatura máxima aparente.

### Variación de la distancia

Para evaluar cómo influye la distancia en las medidas de temperatura, se varió el valor original desde  $10$  a  $3000$  m, obteniendo una variación porcentual entre  $0,06$  y  $5,64\%$  (Tabla 3). Según los valores obtenidos, se determinó que la temperatura varía en un grado centígrado cuando la distancia varía en valores superiores a los  $200$  m con respecto al dato original o real (Tabla 3, Fig. 70).

Tabla 3. Temperatura del Cráter Central y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la distancia. Se tomó como primer valor, la distancia original y se incrementó desde  $10$  a  $3000$  m con respecto a este.

Distancia (m)	Temperatura Cráter ( $^{\circ}\text{C}$ )	Variación porcentual
2020	165	
2030	165,1	0,06%
2040	165,1	0,06%
2070	165,2	0,12%
2120	165,4	0,24%
2220	165,8	0,48%
2520	166,9	1,15%
3020	168,5	2,12%
3520	170,1	3,09%
4020	171,6	4,00%
5020	174,3	5,64%

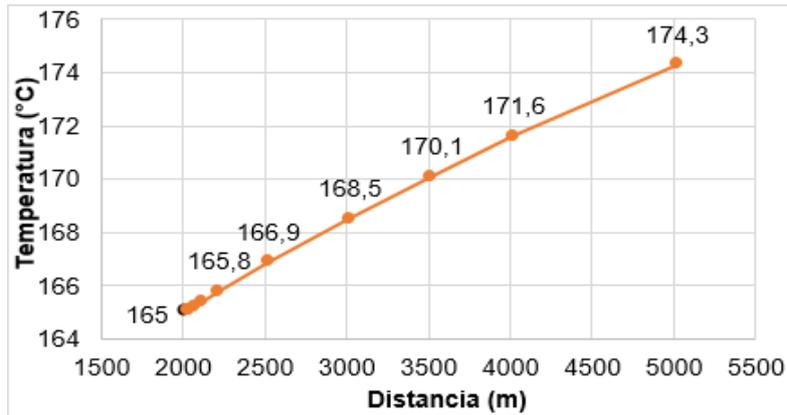


Figura 70. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de distancia.

### Variación de la temperatura atmosférica

Se varió la temperatura atmosférica en incrementos desde 0,5 a 30°C y se obtuvo una variación porcentual de 0,12 a 17,58% (Tabla 4) con respecto al valor original, por lo que la temperatura del cráter varió desde 165,2 a 194°C (Tabla 4). Con estas variaciones, se observó que a partir de una variación en aproximadamente 4°C de temperatura atmosférica se incrementó en un grado la temperatura para el cráter (Fig. 71)

Tabla 4. Temperatura del Cráter Central y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la temperatura atmosférica. Se tomó como primer valor, la temperatura atmosférica original y se incrementó desde 0,5 a 30°C con respecto a este.

Temperatura atmosférica (°C)	Temperatura Cráter (°C)	Variación porcentual
-3,7	165	
-3,2	165,2	0,12%
-2,7	165,3	0,18%
-1,7	165,6	0,36%
0,3	166,2	0,73%
6,3	168,7	2,24%
11,3	171,9	4,18%
16,3	176,4	6,91%
26,3	194	17,58%

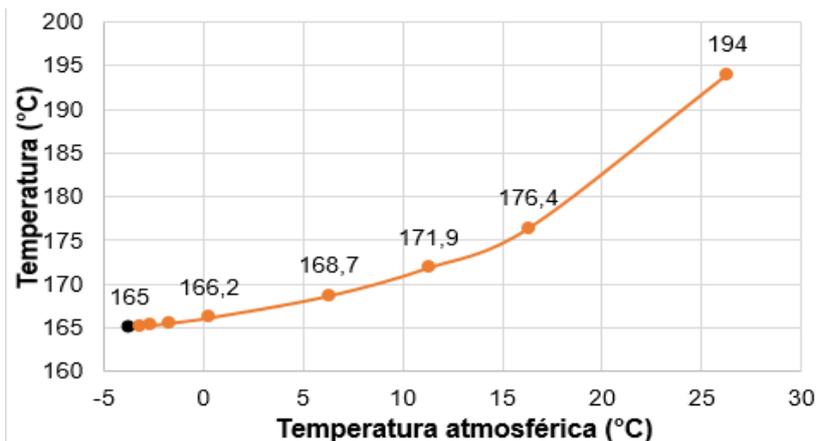


Figura 71. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de temperatura atmosférica.

### Variación de humedad relativa

Para analizar la variación de temperatura en función de la humedad relativa, se tomó como primer valor, la humedad original y esta fue incrementada desde 2 hasta llegar a 50% (Tabla 5), obteniendo así una variación porcentual de 0,18 a 3,52%, alcanzando los 170,8°C. Además, se determinó que, a estas condiciones, la temperatura del Cráter Central varió en un grado centígrado cuando la variación de humedad fue en 10% (Tabla 5, Fig. 72).

Tabla 5. Temperatura del Cráter Central y cálculo de la variación porcentual con respecto al valor original, cuando se varía la humedad relativa. Se tomó como primer valor, la humedad original y se incrementó desde 2 hasta 50% con respecto a este.

Humedad Relativa (%)	Temperatura cráter (°C)	Variación porcentual
39	165	
41	165,3	0,18%
44	165,6	0,36%
49	166,1	0,67%
54	166,7	1,03%
59	167,2	1,33%
69	168,4	2,06%
79	169,5	2,73%
89	170,8	3,52%

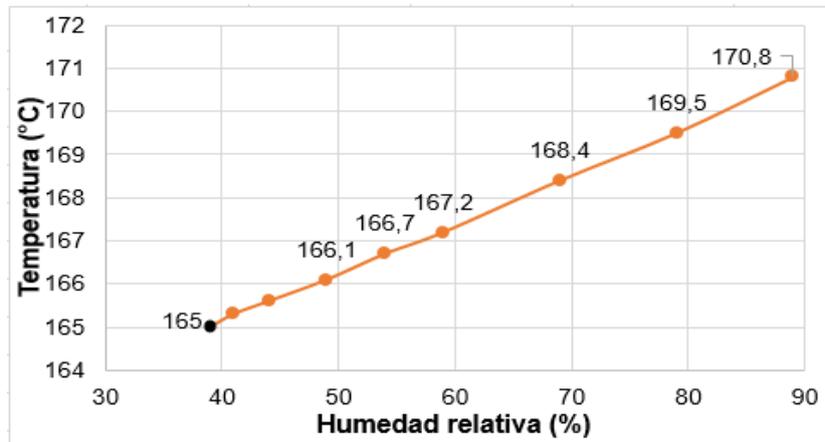


Figura 72. Temperatura del Cráter Central al variar los valores de humedad relativa

Según Ball & Pinkerton, (2006), la distancia de visualización es un factor importante para determinar las temperaturas de una superficie, y si se acorta esta distancia, el efecto de la atenuación atmosférica (temperatura atmosférica y humedad relativa) también se reduce, concluyendo así, que una distancia cercana a cero proporcionaría una resolución más alta de imagen y por ende temperaturas mejor resueltas. Esta conclusión establecida por estos autores, fue comprobada en la Fig. 73, para la cual se graficó la temperatura de cráter en función de la distancia, a tres distintos valores de humedad relativa y tres valores de temperatura atmosférica. Se observó, que a cortas distancias, la variación de temperatura del Cráter Centra; a diferentes valores de humedad o temperatura atmosférica es menor, comparada a distancias mayores.

Por ejemplo, si comparamos el efecto que tiene la humedad relativa entre 15 y 45% sobre la temperatura del cráter a una distancia de 500 y 4000 m, se obtiene que la diferencia de temperatura a 500 m es en  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ , mientras que a 4000 m es en  $4^{\circ}\text{C}$  (Fig. 73). Y si, por otro lado, comparamos el efecto de la temperatura atmosférica entre 5 y  $20^{\circ}\text{C}$  a las mismas distancias, se obtiene que, a 500 m, la variación de temperatura es en  $\sim 4^{\circ}\text{C}$ , y a 4000 m, en  $\sim 26^{\circ}\text{C}$  (Fig. 73).

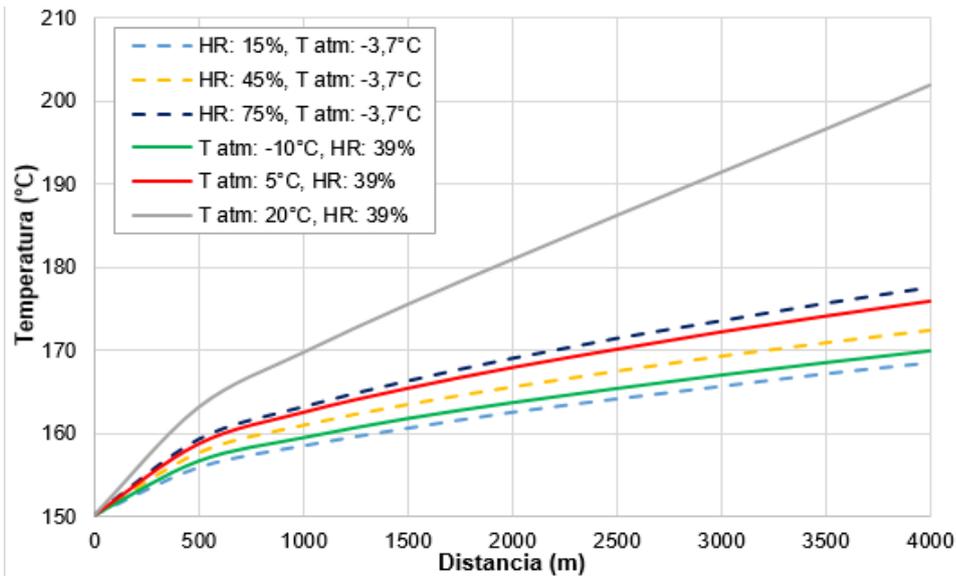


Figura 73. Temperatura en función de la distancia, humedad relativa (HR) y temperatura atmosférica (T atm). Las líneas continuas representan la variación de temperatura atmosférica con humedad relativa constante, mientras que en las discontinuas, el parámetro a variar es la humedad relativa. La humedad relativa y temperatura atmosférica abarcan los valores registrados en los sobrevuelos entre 2003 y 2019. Para los demás parámetros, como emisividad y temperatura ambiental, se usaron los valores originales de la imagen IR\_0163.

En conclusión, el parámetro de objeto que menor influencia tiene en el valor de temperatura es la temperatura ambiental, mientras que el de mayor influencia es la distancia, puesto que esta condiciona en cómo los demás parámetros afectan el valor obtenido de la temperatura.

El error por la influencia de otros factores, como ángulo de visión, absorción por gases volcánicos, concentraciones de polvo, gas, nieve, hielo y aerosoles en el aire y el reflejo de la radiación solar; no pudo ser analizada en este estudio, por lo que se consideró principalmente el efecto de la atenuación atmosférica y distancia, anteriormente descritos, para las medidas de temperatura.

### 5.1.2. Precisión de los perfiles térmicos

Al realizar los perfiles térmicos en el Cráter Central y en los domos se usó imágenes térmicas casi verticales con vista desde el sur para el Cráter Central, e imágenes con vista suroriental a oriental para el caso de los Domos Ñuñurco. La referencia para el trazo de los perfiles en el cráter fue atravesar horizontalmente el viento desde el borde inferior oeste del cráter (inicio del deslizamiento suroccidental de 2013; Sección 4.1.1.1) en sentido hacia el este; y para los domos, fue atravesar con un plano horizontal el viento. En primera instancia, la precisión de los perfiles térmicos podría estar afectada por la ubicación y la longitud de su trazo, debido a que en imágenes con una mayor distancia de visualización al elemento, resulta difícil trazar con exactitud el perfil, en comparación con imágenes adquiridas a una distancia menor.

Los perfiles están constituidos por una abscisa, eje “x”, que corresponde al espaciamiento del pixel en el segmento escogido, y un eje “y” con los correspondientes valores de temperatura. Los valores para el eje “x” se calculó con la “Calculadora FOV” del sitio web de FLIR SYSTEM, en función de la distancia cámara – volcán. A su vez, esta distancia fue calculada usando la ubicación GPS de la cámara térmica y las coordenadas del Cráter Central y de Ñuñurco 2, determinadas mediante imágenes satelitales de 3 y 10 m de resolución. Las coordenadas tanto del cráter como del domo, no se puede confirmar con exactitud que sean las correctas, por lo que las distancias calculadas podrían variar, y consecuentemente el tamaño de pixel y la longitud del perfil. Además, este dato de distancia forma parte de los parámetros de objeto para corregir la atenuación atmosférica, por lo que las temperaturas registradas en el perfil también podrían estar afectadas.

Para estimar el efecto que tiene la distancia cámara – objeto en los perfiles térmicos, se varió la ubicación del punto de coordenadas del Cráter Central (UTM: 795786,979; 9778105,639). Esta variación se realizó en incrementos de 50 m tanto en latitud (perfiles del 1 al 4), como en longitud (perfiles 5 al 8) con respecto a las coordenadas originales (P0) (Tabla 6). Por último, se variaron ambas, longitud-latitud, desde los 50 hasta los 200 m (perfiles del 9 a 12) (Tabla 6). A partir de estas coordenadas se calculó las nuevas distancias cámara – objeto, el tamaño de pixel (IFOV) y además, se obtuvo las temperaturas correspondientes de los perfiles con las distancias obtenidas. Finalmente, se graficó los perfiles con los datos de IFOV para el eje “x” y los datos de temperatura para el eje “y” (Fig. 74).

Tabla 6. Cálculo de la distancia y tamaño de pixel (IFOV) al variar las coordenadas del Cráter Central en la imagen térmica IR\_92 del 07 de noviembre de 2013.

<b>IMAGEN: IR_2013-11-07_92</b>				
<b>PERFIL</b>	<b>Coordenadas UTM</b>		<b>Distancia (m)</b>	<b>IFOV (m)</b>
	<b>X</b>	<b>Y</b>		
<b>P0</b>	<b>795786,979</b>	<b>9778105,6</b>	2868,95	1,871
P1	795786,979	9778155,6	2915,13	1,901
P2	795786,979	9778205,6	2961,44	1,931
P3	795786,979	9778255,6	3007,86	1,962
P4	795786,979	9778305,6	3054,39	1,992
P5	795836,979	9778105,6	2854,56	1,862
P6	795886,979	9778105,6	2840,98	1,853
P7	795936,979	9778205,6	2921,99	1,906
P8	795986,979	9778105,6	2816,28	1,837
P9	795736,979	9778055,6	2838,34	1,851
P10	795686,979	9778005,6	2809,16	1,832
P11	795636,979	9777955,6	2781,48	1,814
P12	795586,979	9777905,6	2755,34	1,797

Los nuevos perfiles obtenidos muestran que al variar las coordenadas entre 50 y 200 m, la distancia cámara-objeto varió entre 14 y 185 m, con respecto a las coordenadas originales (Tabla 6); sin embargo, esta variación no generó cambios significativos en los valores de temperatura (Fig. 74). Por ejemplo, al comparar el perfil original (P0, línea roja) con el perfil de mayor diferencia en distancia, P4 (línea verde gruesa), se observa que las temperaturas son similares. Del mismo modo, al calcular el IFOV, los cambios con respecto al original fueron entre 0,009 y 0,12 m (Tabla 6), por lo que la longitud de los perfiles varió en máximo 6 m, siendo este un valor no significativo (ver P0 y P4 en Fig. 74). Por esto, con el ejemplo presentado, se puede concluir que el efecto de las coordenadas en la distancia, tamaño de pixel y temperaturas es insignificante.

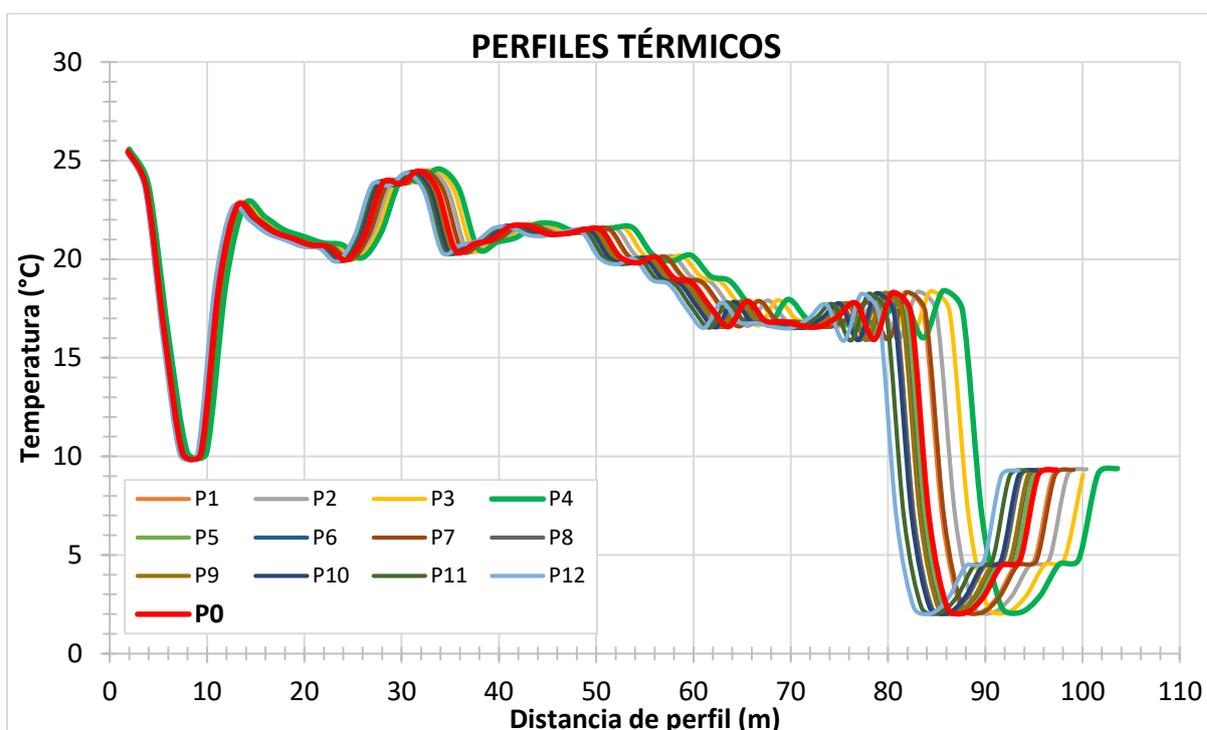


Figura 74. Perfiles térmicos al variar la posición del Cráter Central (Tabla 6).

## 5.2. Comparación con otras técnicas de vigilancia mediante sensores remotos

### 5.2.1. Cambios morfológicos

La teledetección por satélite ha desempeñado un papel cada vez más importante en la vigilancia de los volcanes durante las últimas décadas (Thomas & Watson, 2010), esto debido a las múltiples aplicaciones que posee, como: monitoreo de dispersión de cenizas y gases volcánicos, monitoreo de los flujos de calor, mediciones ópticas, mapeo de deformaciones, mapeo geológico y evaluación de peligros geológicos (Aldeghi et al., 2019). El límite de esta metodología depende principalmente de la resolución espacial y/o

temporal de las observaciones. Para solucionar este factor limitante, la compañía privada de satélites Planet Labs, Inc. ha operado constelaciones de CubeSats (o constelaciones de pequeños satélites), las cuales proporcionan imágenes PlanetScope y RapidEye con una cadencia temporal alta (~1 - 72 horas), además de una alta resolución espacial (~3 - 5 m), convirtiéndose así en una buena herramienta para el monitoreo de la actividad volcánica (Planet Lab Inc, 2017; Aldeghi et al., 2019), a diferencia de otras imágenes como Sentinel que tienen una resolución espacial de 10 m y temporal de 5 a 10 días. Sin embargo, las condiciones climáticas del sector donde se encuentra el Sangay, no siempre permiten obtener imágenes claras (despejadas); además, la identificación de rasgos volcánicos y su delimitación puede llegar a ser compleja, ya que pueden estar oscurecidos por gases y partículas volcánicas, lo que dificulta o bloquea severamente las observaciones de la actividad (Patrick et al., 2014) (Fig. 75, Fig. 76). Es en base a esto que el número de imágenes adquiridas llega a ser limitado y por ende no permiten realizar un monitoreo continuo del volcán.

A través de la aplicación al *Planet's Education & Research Program*, se tuvo acceso a descargar imágenes RapidEye (5 m de resolución) y PlanetScope (3 m de resolución) con fines de investigación no comerciales (Planet Lab Inc, 2020). Desde julio de 2010 hasta septiembre de 2019 se obtuvo un total 21 imágenes, en las que se podía observar el Cráter Central y los Domos Ñuñurco (Fig. 75), de este número se han seleccionado cuatro imágenes claras y que muestran características importantes de estos rasgos volcánicos (Fig. 76). Estas imágenes de Planet fueron comparadas con imágenes térmicas para la identificación de los principales productos volcánicos. La identificación del Cráter Central y de los domos llega a ser complicada en estas imágenes, que son de rango visible, debido a que los colores oscuros que presenta la cumbre del volcán no permiten delimitar con precisión los bordes de los elementos de interés (Fig. 76a, b y c), y además, la actividad explosiva que presenta el cráter, impide una clara identificación de su morfología (Fig. 76d). Lo contrario ocurre en las imágenes térmicas o infrarrojas, en las cuales la identificación y delimitación son sencillas debido al contraste de color dado por la variación de temperaturas, y a que con estas imágenes se puede identificar las anomalías a través de nubes, gases volcánicos y emisiones de ceniza, siempre y cuando estos no sean muy densos.

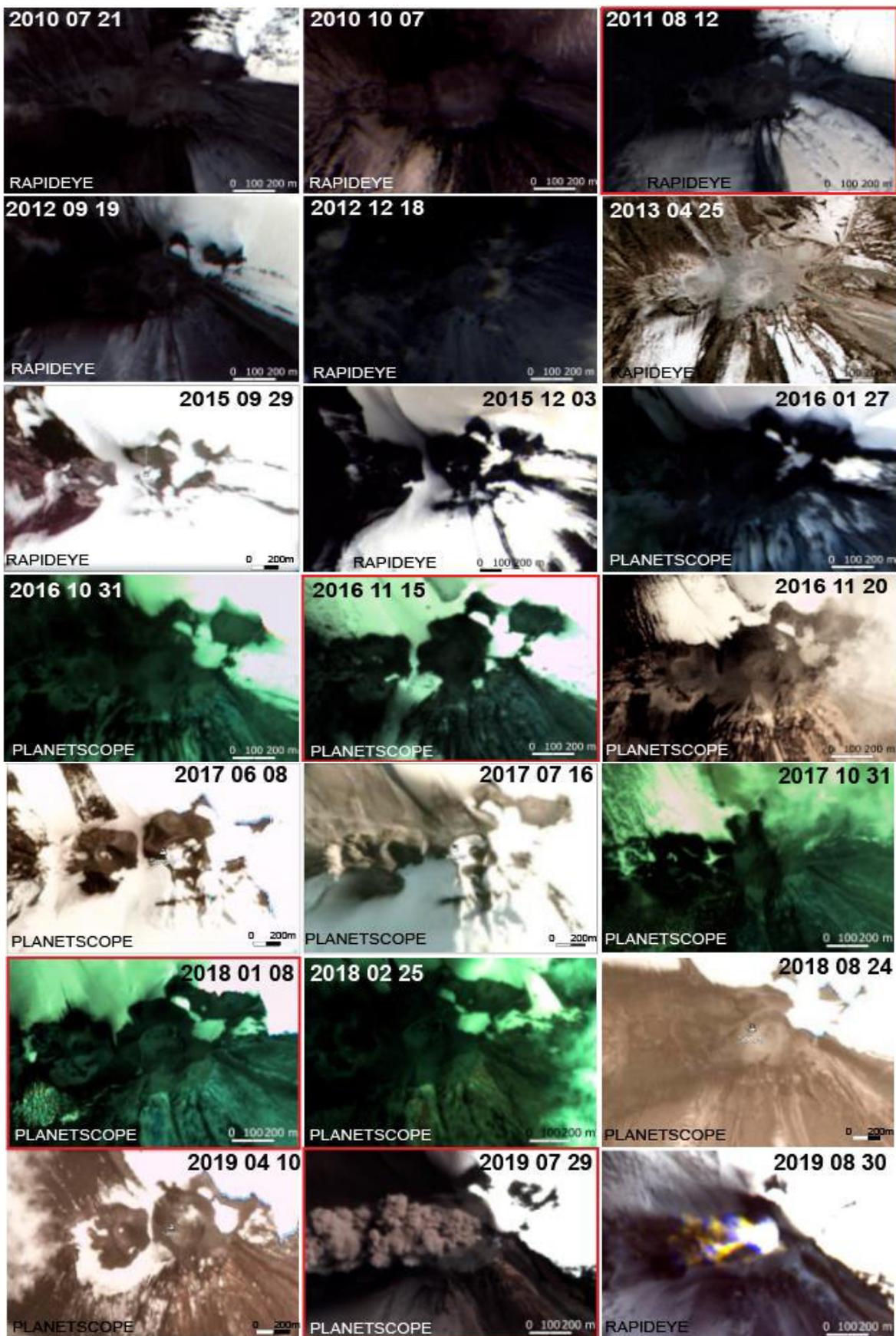


Figura 75. Imágenes RapidEye y PlanetScope para el volcán Sangay desde julio 2010 hasta agosto 2019. Las imágenes en recuadro rojo corresponden a las cuatro imágenes que presentan mejor visibilidad (Planet Lab Inc, 2020).

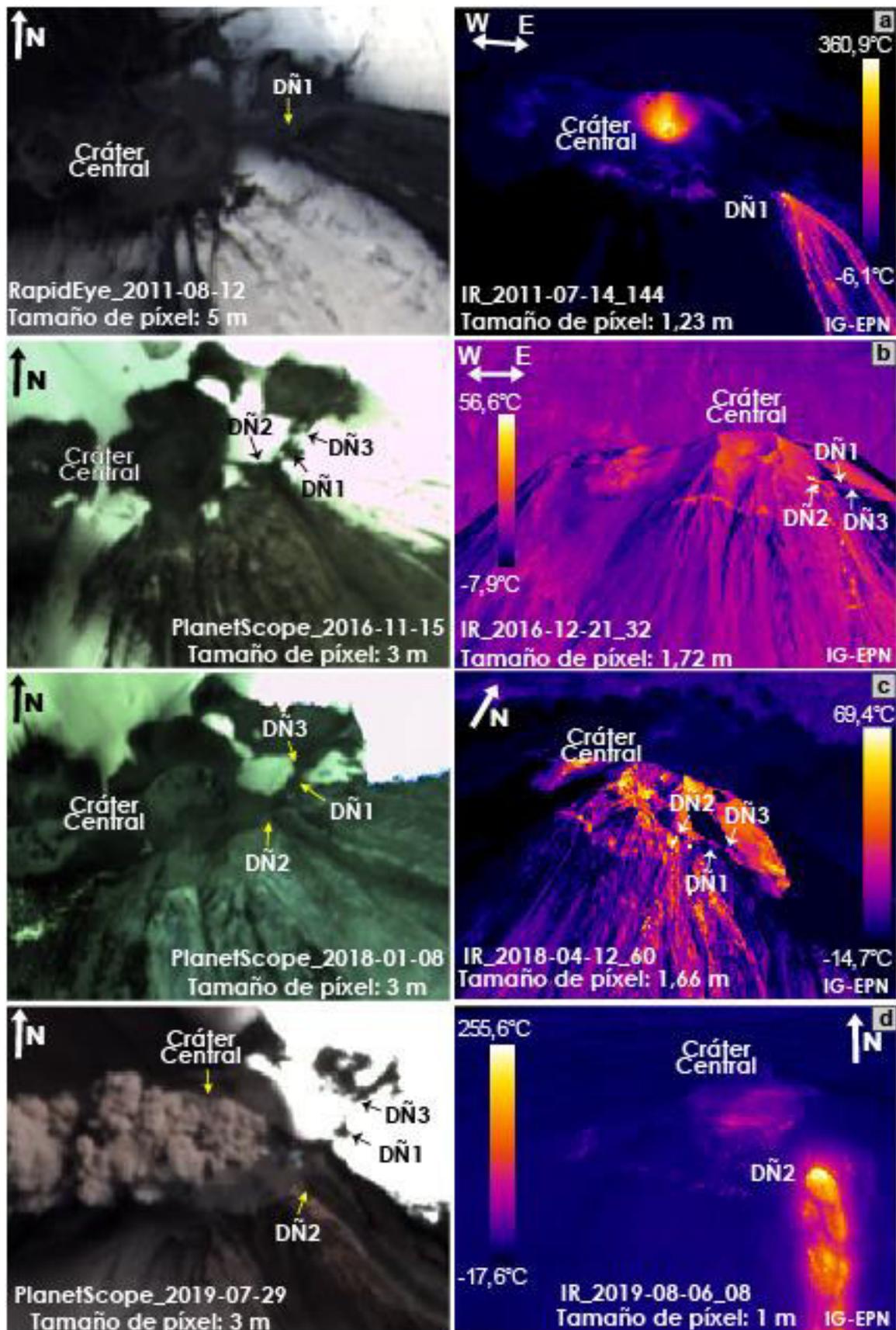


Figura 76. Identificación de rasgos morfológicos en imágenes RapidEye y PlanetScope (Planet Lab Inc, 2020), y en imágenes térmicas de a) 2011, b) 2016, c) 2018 y d) 2019.

En base a lo mencionado, se afirma que las imágenes térmicas proporcionan un complemento valioso a las imágenes visuales, ofreciendo así una descripción inequívoca de la extensión de las áreas cálidas y frías (Patrick et al., 2014), facilitando la identificación de los bordes de los distintos rasgos volcánicos. Esto puede ser comprobado en la Figura 77, en la cual se observa una imagen térmica, una de rango visible y la combinación de ambas. En la imagen visible los gases no permiten observar claramente dónde se encuentra el domo o dónde inicia el flujo de lava, mientras que con la imagen térmica se determina claramente su ubicación. El montaje entre estas dos imágenes permite identificar claramente la anomalía correspondiente al domo de lava y al flujo de lava sobre la imagen visual.

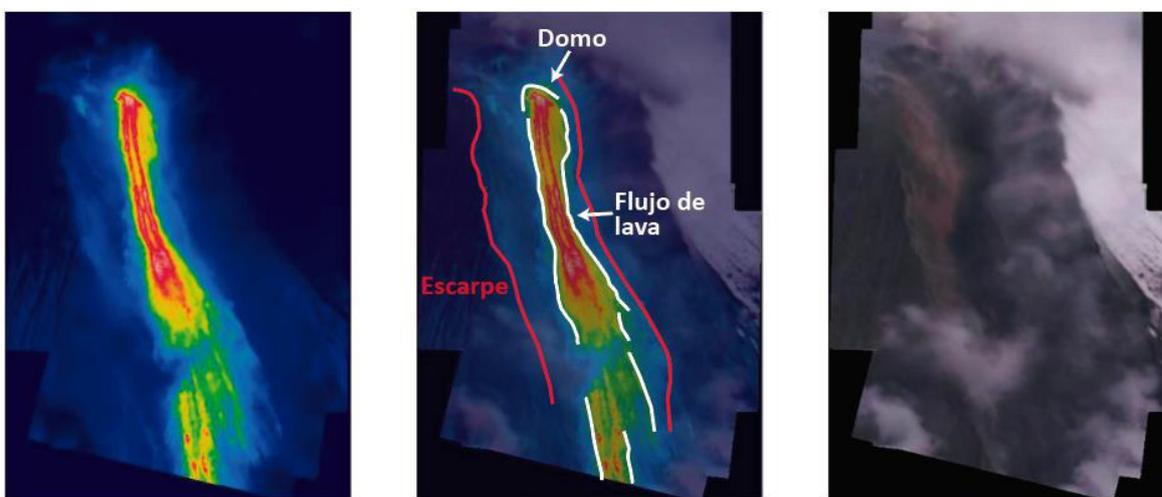


Figura 77. Imágenes del flanco suroriental del Sangay para la identificación del Domo Ñuñurco y su flujo de lava. A la izquierda, imagen térmica en paleta de colores arcoíris, a la derecha imagen visible y centro, combinación de imagen térmica y visible (Fuente: S. Vallejo Vargas/IG-EPN, cp).

Adicionalmente, de las cuatro imágenes satelitales y las imágenes térmicas mostradas en la Fig. 76 se obtuvo las dimensiones del ancho del Cráter Central y de los tres Domos Ñuñurco. A pesar de que estas medidas fueron similares, no se determinó el error entre las mismas debido a que las fechas de captura no son cercanas (Tabla 6).

Tabla 7. Medidas de longitud del cráter y domos, obtenidas a través de imágenes térmicas e imágenes satelitales RapidEye y PlanetScope a diferentes fechas.

Imagen Elemento	DIMENSIONES (m)							
	Imagen térmica (2011-07-14)	Imagen RapidEye (2011-08-01)	Imagen térmica (2016-12-21)	Imagen PlanetScope (2016-11-15)	Imagen térmica (2018-04-12)	Imagen PlanetScope (2018-01-08)	Imagen térmica (2019-08-06)	Imagen PlanetScope (2019-09-16)
Cráter Central	99,5	102,4	162,4	157	166	168,2		
Domo Ñuñurco 1	40,4	37,8			21,5	26,5		
Domo Ñuñurco 2					31,5	30,6	54,1	43
Domo Ñuñurco 3					34,2	37,6		

### **5.2.2. Periodos de actividad**

Los períodos de actividad o periodos eruptivos son grupos de erupciones que se distinguen por una estrecha asociación en el tiempo y se usan para dividir la historia de un volcán. Estos períodos pueden tener una duración de hasta varios miles de años e incluyen lo que pudo haber sido un solo grupo de erupciones, así como episodios prolongados de vulcanismo, durante los cuales hubo decenas o cientos de erupciones (Mullineaux & Crandell, 1974 en Oregon State University, 2021). Además de la asociación de las erupciones en el tiempo, los periodos eruptivos pueden definirse por la similitud de tipos de rocas o depósitos encontrados, por los fenómenos volcánicos generados y también por la intensidad de las erupciones. Estos periodos eruptivos están separados por intervalos aparentemente inactivos, que se derivan principalmente de ausencia de depósitos eruptivos o de observación de actividad superficial.

#### **5.2.2.1. Identificación de periodos de actividad mediante sensores remotos**

En volcanes que no cuentan con una red sísmica/geodésica permanente que permita obtener datos y por lo tanto caracterizar la actividad en función de esa información, es posible utilizar otras alternativas como los datos obtenidos con sensores remotos. Uno de los más utilizados corresponde a la identificación de periodos de actividad a través de alertas termales. Entre los sensores infrarrojos más usados en volcanología están: GOES, AVHRR, TOVS, ASTER, AIRS y MODIS. Este último que es detectado por el algoritmo MODVOLC. Además, es posible estudiar la actividad volcánica a través de la detección de nubes de ceniza mediante el Volcanic Ash Advisory Center (VAAC) y del monitoreo de gases como el dióxido de azufre registrado por el satélite SENTINEL-SP5.

MODVOLC es un algoritmo no interactivo que utiliza datos satelitales infrarrojos de baja resolución espacial (tamaño de píxel de 1 km) adquiridos por el Espectror radiométrico de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) para mapear la distribución global de anomalías térmicas volcánicas casi en tiempo real. MODVOLC detecta de manera confiable los puntos calientes asociados con una amplia gama de estilos eruptivos a una escala global (Wright et al., 2004).

Mediante este sistema se puede monitorear erupciones volcánicas (Wright et al., 2016), lo que a través de un análisis temporal se podrían determinar o proponer periodos de actividad y reposo.

Los Centros de Avisos de Ceniza volcánica (VAAC, por sus siglas en inglés), proporcionan información sobre la extensión lateral y vertical y, el movimiento pronosticado de las cenizas volcánicas en la atmósfera que son emitidas por un volcán en erupción (VAAC

Buenos Aires, s.f.). Esta detección de nubes de cenizas se realiza principalmente mediante el análisis de imágenes satelitales multiespectrales (visibles, infrarrojas) de plataformas de órbita geoestacionaria (GOES) y polar (POES), así como productos derivados como SO<sub>2</sub>, y datos LIDAR. Para generar el Aviso de Ceniza Volcánica (VAA), estos centros utilizan las imágenes de satélite en combinación con las observaciones de las Oficinas de Vigilancia Meteorológica locales (MWO), los Observatorios Volcánicos, los Informes Piloto (PIREP), las estaciones sísmicas, las cámaras web y las cuadrículas de pronóstico meteorológico (Brown, 2004; Salemi & Ruminski, 2011).

Existe una variedad de sensores satelitales que pueden detectar la abundancia atmosférica de SO<sub>2</sub>, pero el Instrumento de Monitoreo Troposférico TROPOMI, ha representado un cambio radical en el monitoreo de gases desde el espacio, ya que actualmente es el sensor de SO<sub>2</sub> satelital con la mayor sensibilidad por píxel y, además, mide en cuatro regiones espectrales diferentes (UV, visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta) (Queißer et al., 2019). El SO<sub>2</sub> suele ser el gas volcánico más abundante, después del vapor de agua y el CO<sub>2</sub>, y refleja la dinámica del magma, los procesos de descompresión y cristalización, por lo que es de vital importancia para el monitoreo de los volcanes y para comprender los procesos subyacentes que finalmente pueden conducir a una erupción (Theys et al., 2019).

Para el caso del volcán Sangay, se ha analizado los datos obtenidos de estos tres tipos de vigilancia volcánica con sensores remotos (MODVOLC, VAAC, TROPOMI), para establecer posibles periodos de actividad y compararlos con la actividad registrada en este trabajo (Fig. 78).

Vasconez et al., (2018), a través de las anomalías térmicas registradas por MODVOLC, entre agosto de 2003 y septiembre 2019, determina que desde el año 2003 hasta 2013, la actividad del volcán podría ser caracterizada como semi-continua, pero a partir del año 2015 y hasta 2018, presenta un comportamiento cíclico con periodos de reposo más prolongados (9 a 13 meses). Y finalmente, para 2019 la actividad es mucho más intensa que la observada en años anteriores, pero aún no se puede determinar si tendrá un comportamiento continuo o cíclico (Fig. 78b).

Estos periodos muestran una buena correlación con las observaciones de la actividad volcánica del Sangay a través de las imágenes visibles y térmicas; sin embargo, se observó que ciertas anomalías de altas temperaturas registradas en los sobrevuelos, no fueron detectadas por el algoritmo (Fig. 78a y b). De aquí, la necesidad de mantener un monitoreo continuo directo del volcán, analizar y correlacionar los datos térmicos adquiridos.

MODVOLC puede ser una buena herramienta para el monitoreo volcánico debido a que ha vigilado operativamente todos los volcanes activos y potencialmente activos de la Tierra

por más 15 años, sin embargo, no es el algoritmo de supervisión térmica de mejor rendimiento (Wright, 2016). Esto porque MODVOLC puede ser más confiable al detectar alertas termales relacionadas a lagos de lava y a la continua construcción de domos de lava.

Por otro lado, la actividad volcánica obtenida a través de las alturas de ceniza detectada por Washington VAAC, muestra una gran correlación con los periodos de actividad determinados por Vasconez et al., (2018) y con la actividad registrada en este estudio (Fig. 78a, b y c). Sin embargo, existe actividad que no fue detectada por MODVOLC pero sí en las observaciones térmicas del presente estudio (p. ej. Octubre 2005).

Por último, la actividad observada a través de las emisiones de dióxido de azufre, se restringe al año 2019, esto se debe a que el acceso a los datos de TROPOMI para el volcán Sangay inicia desde ese año, por lo que no es posible comparar con los periodos establecidos con MODVOLC, ni con la actividad volcánica entre 2003 y 2018. Al analizar los datos de 2019, se observa que la actividad volcánica más intensa se registra entre agosto y septiembre de 2019, concordando con lo observado en los datos de Washington VAAC y de MODVOLC. Además, la actividad volcánica para este año inicia en el mes de mayo, y aunque en lo observado con potencia de emisión térmica es relativamente baja, con la altura de las emisiones de ceniza y con las emisiones de SO<sub>2</sub>, se puede determinar que es alta (Fig. 78).

De estas observaciones se puede concluir que los datos con sensores remotos pueden tener alta concordancia entre sí, sin embargo, es necesario contrastarlos con las observaciones directas, las cuales proporcionan una mayor precisión de datos ya que son realizadas a tiempo real. Además, los datos directos pueden representar un monitoreo más continuo del volcán, mostrando una perspectiva más acertada de su actividad.

Aparte de estas metodologías, pueden existir otras que complementan el análisis de la actividad volcánica. Para el volcán Sangay, los datos de vigilancia sísmica y geoquímica de gases, así como de otros sensores remotos, no fueron analizados debido a que no se tuvo acceso a ellos.

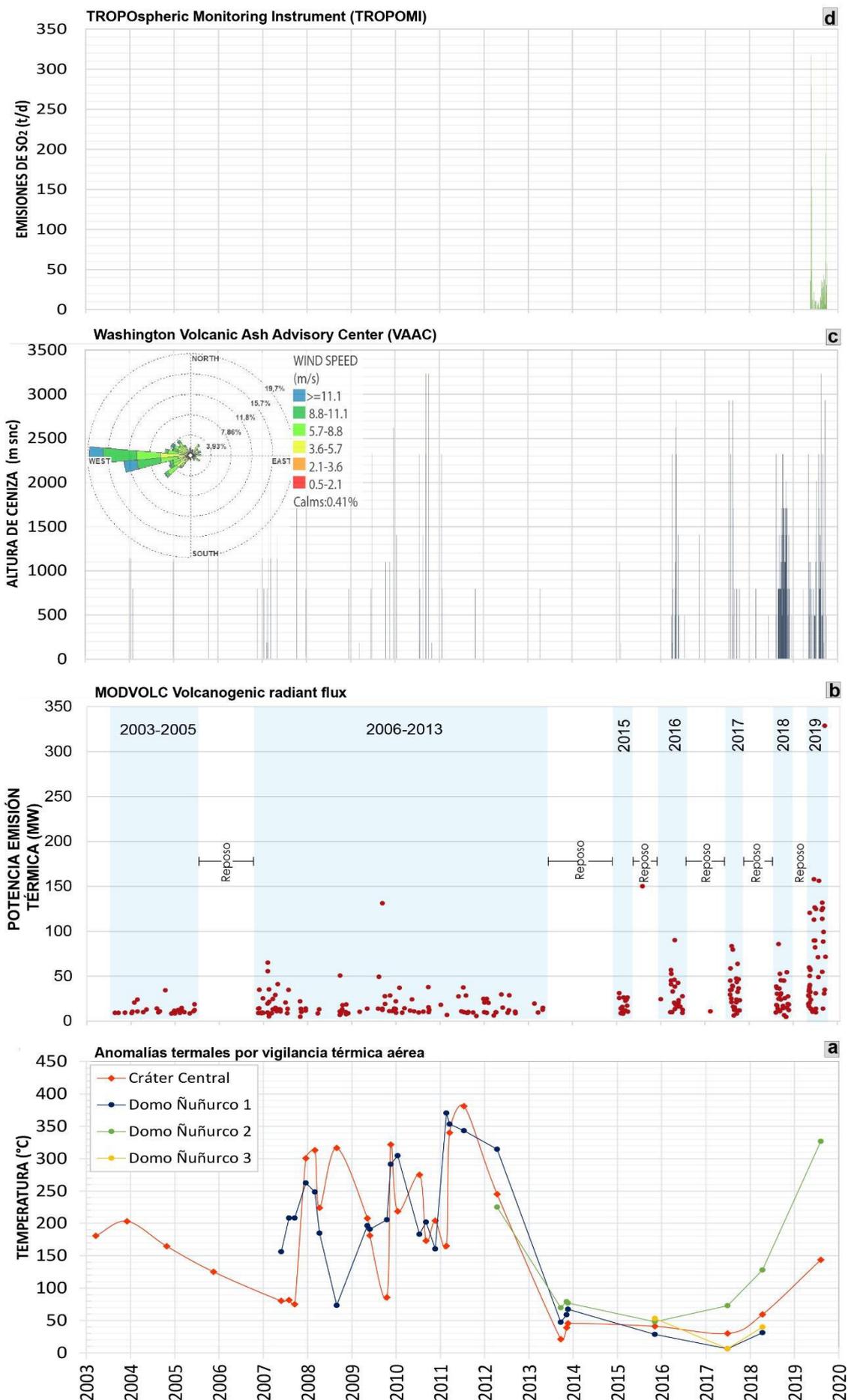


Figura 78. Comparación de la actividad volcánica, desde 2003 a septiembre de 2019, entre a) las observaciones térmicas de actividad del presente estudio, b) los periodos determinados por alertas térmicas (franjas azules) obtenidas de MODVOLC (<http://modis.higp.hawaii.edu/>), modificado de Vasconez et al., (2018), c) las emisiones de ceniza obtenidas de Washington VAAC (<https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/washington.html>), y d) las emisiones de SO<sub>2</sub> registradas por TROPOMI

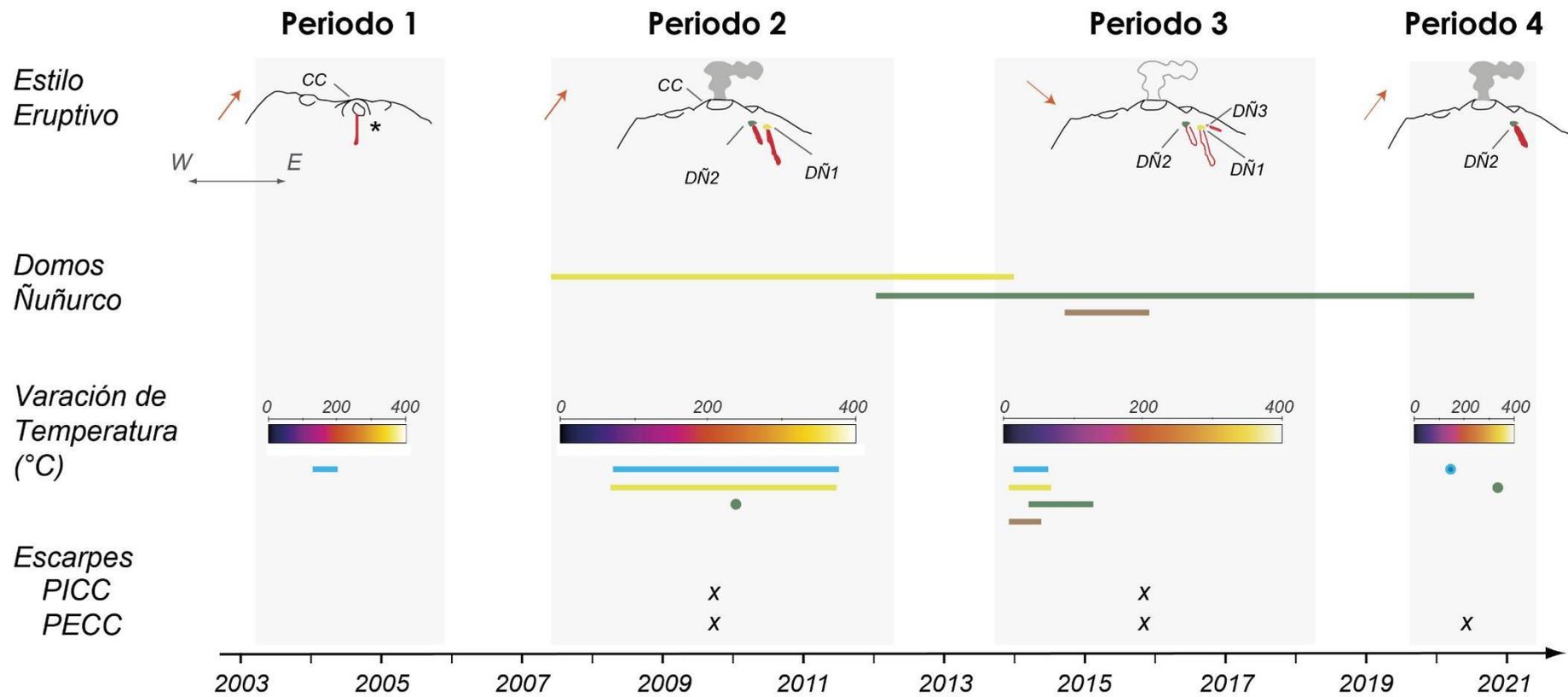
#### 5.2.2.2. Periodos según análisis térmico y morfológico

La vigilancia térmica y visual desarrollada en el volcán Sangay desde el 2003 y que continúa vigente hasta la actualidad, ha permitido estimar por un lado, las variaciones de temperatura superficial de las diferentes anomalías térmicas presentes en el volcán y por otro lado, conocer su evolución morfológica. Combinando esta información, se propone la existencia de al menos cuatro periodos de actividad del volcán Sangay entre el 2003 y 2019 (Fig. 79), *Periodo 1: 2003 – 2005; Periodo 2: 2007 – 2013; Periodo 3: 2015 – 2018; Periodo 4: 2019 – actualidad (2021 08)*. Esta clasificación se ha basado en los siguientes aspectos, los cuales han sido analizados y descritos en el presente trabajo:

- Tipo de actividad volcánica: explosiva o efusiva
- Valor de temperatura de anomalías térmicas
- Aparecimiento de domos de lava
- Aparecimiento de escarpes

El volcán Sangay consta de tres cráteres, un Domo Occidental y de la zona de Domos Ñuñurco. Su actividad eruptiva, constante desde 1628, se ha concentrado principalmente en el Cráter Central y, a partir de 2007, en los Domos Ñuñurco. Desde el año 2003 y hasta 2005, la actividad fue efusiva en el cráter, caracterizándose por la formación de un domo de lava y la extrusión de flujos de lava hacia el flanco sur. La actividad explosiva en el Cráter Central inició en el año 2007 y estuvo acompañada de flujos de lava emitidos desde el Domo Ñuñurco. Estos dos estilos eruptivos persistieron en el volcán hasta 2012, y a partir de 2013 se observó una pausa en la actividad, seguido de una reactivación en el año 2019. A continuación, se revisa con más detalle las características de cada uno de los periodos de actividad aquí propuestos, con base en los sobrevuelos realizados durante el periodo de estudio (2003 – 2019), incluyendo una descripción de la actividad registrada por los sensores satelitales ya mencionados en la Sección 5.2.2.1 y observados en la Figura 78. Además, se verificará que estos periodos que difieren con los propuestos por Vasconez et al., (2018), debido a que los criterios, ya mencionados, también son diferentes.

Al final de la descripción de los periodos se muestran imágenes representativas de cada uno de ellos, junto con la identificación de los rasgos estructurales tanto en imágenes visibles (Fig. 80) como en imágenes térmicas (Fig. 81).



Actividad volcánica - Estilo eruptivo		SIMBOLOGÍA		Escarpes	
<b>Baja</b>	<b>Alta</b>	<b>CC</b>	Cráter Central	<b>PICC</b>	pared interna del Cráter Central
Explosiva: columnas de gas con bajo contenido ceniza Efusiva: ausencia de flujos de lava	Explosiva: columnas de gas con alto contenido ceniza Efusiva: presencia de flujos de lava	<b>DÑ1</b>	Domo Ñuñurco 1	<b>PECC</b>	pared externa del Cráter Central
		<b>DÑ2</b>	Domo Ñuñurco 2		
		<b>DÑ3</b>	Domo Ñuñurco 3		
					* Cráter Central abierto al sureste

Figura 79. Línea de tiempo con los periodos de actividad del volcán Sangay en base al tipo de actividad volcánica, aparecimiento de domos de lava, la temperatura de anomalías térmicas y la presencia de escarpes.

#### **5.2.2.2.1. Periodo 1: marzo 2003 – noviembre 2005**

En este primer periodo, el volcán Sangay presentaba actividad de tipo efusiva que se caracterizaba por la presencia de un domo en el interior del Cráter Central y la emisión de flujos de lava hacia el flanco sur, acompañado de la emisión de gases en el borde de este cráter. Esta actividad produjo que el cráter presente temperaturas entre 125 - 203°C, donde la temperatura máxima se encontraba hacia el centro del domo del cráter.

A inicios de 2003, la morfología del Cráter Central era semejante a la de un cono truncado hueco abierto al sureste, con paredes externas escarpadas y paredes internas de baja pendiente. Por su parte, el domo era sub-circular con una superficie irregular compuesta de bloques, al igual que el flujo de lava (Fig. 80, Fig. 81). Para diciembre de este año, el Cráter Central presentó paredes internas y externas más escarpadas que la fecha anterior. El domo de lava había desarrollado un talus delantal escarpado, por lo que su morfología era similar a la de un cono truncado de superficie irregular. El flujo de lava creció en extensión hacia el flanco sur del volcán.

Para noviembre de 2005, la actividad efusiva se caracterizó por el domo, pero sin la emisión de nuevos flujos de lava; para esta fecha el cráter se encontraba cerrado y su morfología era como un cono truncado asimétrico, con el lado noroeste a mayor altitud que el sureste. El domo de lava de forma casi ovalada presentaba un talus de pendientes más suaves y una superficie inclinada hacia el sureste.

En este periodo, a través de MODVOLC, se evidencia que existe actividad volcánica lo cual es reflejada en la presencia de alertas termales, las cuales son inferiores a los 50MW. Por otro lado, se corrobora que la actividad del Cráter Central era principalmente de tipo efusiva, puesto que la Washington VAAC detectó solamente dos columnas de ceniza de alturas de 800 y 1000 m (Fig. 78).

#### **5.2.2.2.2. Periodo 2: mayo 2007 – abril 2012**

Entre 2007 y 2012, el Sangay se caracterizó por presentar un Cráter Central con actividad explosiva y múltiples deslizamientos en sus paredes internas y externas, y además, por la formación de dos domos de lava sobre su flanco suroriental y por la aparición de un campo fumarólico en el flanco sur (Fig. 80 y 81). El inicio de este periodo es en mayo de 2007, puesto que no se tiene datos entre diciembre de 2005 y abril de 2007.

El Cráter Central presentó actividad explosiva caracterizada por la generación de columnas eruptivas, presencia de ceniza y proyectiles balísticos. Este cráter registró temperaturas entre 75 - 381°C. La distribución de sus temperaturas se caracterizó por presentar la mayor temperatura hacia el viento y una disminución gradual de temperatura hacia las paredes internas y externas del cráter; en ciertas ocasiones, se observó una disminución más

rápida, con paredes externas frías, causado por la presencia o no de actividad fumarólica. Esta distribución fue confirmada con los perfiles térmicos realizados en julio de 2011, en el que observa el incremento de temperatura hacia el viento del cráter. Otra característica térmica identificada, es la alineación de un campo fumarólico en el flanco sur del cráter F (S), el cual tuvo actividad de distinta intensidad durante el periodo.

En mayo de 2007, la morfología de este cráter era similar a la de un cono truncado hueco, alargado en sentido oeste-este. Sus paredes externas sur y sureste eran más empinadas que en el periodo anterior, por lo que no se observaba el desnivel del cráter identificado en 2005. Adicionalmente, en esta fecha se identificó un primer escarpe en la pared interna norte del cráter, al igual que se observó un escarpe en la pared externa sur-sureste (denominado escarpe *a*), generados por pequeños deslizamientos.

Para los siguientes años, los principales cambios morfológicos del cráter estuvieron asociados a los escarpes de la pared interna y externa. Los escarpes internos ubicados generalmente en la pared norte, en ciertas fechas eran sub-circulares, provocando una mayor pendiente al interior del cráter. Por otro lado, la zona del escarpe externo *a*, creció lateralmente debido a pequeños deslizamientos. Además de este escarpe, para 2009 se identificó otro al oeste de *a* (conocido como escarpe *b*). El escarpe *b*, durante este periodo tuvo una zona de afectación similar en tamaño a la del primero.

Otra característica importante de este periodo, es la aparición del Domo Ñuñurco 1 al suroriente del Cráter Central, en mayo de 2007. Al no tener imágenes térmicas o visuales de 2006 o inicios de 2007, no se puede afirmar si este domo estuvo presente desde antes de esta fecha. Este domo se caracterizó por tener actividad efusiva casi continua, por lo que su temperatura estuvo entre 73 -370°C. Los perfiles térmicos, obtenidos para febrero mayo y julio de 2011, muestran que el pico máximo de temperatura se encontraba en el viento y la temperatura disminuía lateralmente de forma drástica; aunque esto en años anteriores a 2011, fue diferente, debido a que la disminución de temperatura podía ser más gradual.

La morfología de Ñuñurco 1 en 2007, era similar a la una semiesfera, siendo en marzo de 2008 cuando el domo tuvo un gran crecimiento tanto en ancho, como en elevación, siendo así más prominente sobre el flanco. Otro crecimiento importante fue a finales de 2009, debido al cambio de dirección de sus flujos de lava. Por lo que para 2011, el ancho de este domo alcanzó los ~41 m.

A finales de este periodo, abril 2012, por la emisión de flujos de lava desde un nuevo viento ubicado al oeste de Ñuñurco 1, se formó el Domo Ñuñurco 2, el cual registró una temperatura de 225,2°C. Su morfología era hemisférica, poco prominente sobre el flanco, similar a la de Ñuñurco 1, en sus primeros años de formación (Fig. 80 y 81).

Mediante los sensores remotos de MODVOLC y de Washington VAAC se observó un incremento de actividad en comparación al periodo anterior. Las alertas termales detectadas aumentan en número y potencia (>50 MW), lo que correspondería a la mayor actividad del cráter y a la formación de los Domos Ñuñurco 1 y 2. En cuanto a las columnas de ceniza, estas alcanzan alturas que superan los 3000 m, y de igual forma, se detectan en mayor número, lo que se explicaría por el comportamiento explosivo del Cráter Central durante este periodo.

#### **5.2.2.2.3. Periodo 3: Septiembre 2013 – abril 2018**

Entre los años 2013 y 2018, imágenes visibles y térmicas mostraron un volcán con baja actividad volcánica tanto para el Cráter Central como para los Domos Ñuñurco (Fig. 80 y 81). Al no tener datos entre mayo 2012 y agosto de 2013, se propone que este tercer periodo inicie en septiembre 2013.

En este periodo, el Cráter Central se mostró inactivo con temperaturas inferiores a los 59°C. A diferencia del periodo anterior, la distribución de temperaturas fue casi uniforme al interior y exterior del cráter. El campo fumarólico F(S) presentó actividad mucho menor que en años anteriores; sin embargo, en las imágenes térmicas aún se identificaba una anomalía en forma alargada sobre el flanco sur del volcán.

La morfología del Cráter Central fue afectada por deslizamientos internos mucho mayores que en el periodo anterior. Por lo que para 2013 el ancho del cráter era de ~99 m (similar a la de julio de 2011), para 2016 de ~162 m y para 2018 de 166 m. Por otro lado, los escarpes *a* y *b*, identificados en el periodo anterior, continúan presentes en este. El escarpe *a*, mantiene una zona de influencia similar; mientras que el escarpe *b* ha presentado algunos cambios. Para 2013, en la zona del escarpe *b*, se distinguen tres deslizamientos, de los cuales uno migra verticalmente hacia el borde del cráter, además de que aumenta su amplitud y profundidad; en 2016 y 2018, este deslizamiento sigue creciendo siendo aún más ancho y profundo.

Por otro lado, los Domos Ñuñurco presentan una baja actividad. Para 2014, al este de Ñuñurco 1, se forma un tercer domo, Ñuñurco 3, que es mucho más pequeño que sus predecesores. Ñuñurco 1, con temperaturas entre 6 - 67°C, se mantuvo activo hasta noviembre de 2013. Ñuñurco 2, estuvo activo hasta diciembre de 2015 y su temperatura en el periodo varió entre 28 - 128°C. Y Ñuñurco 3, con temperaturas de 6 - 53°C, tuvo actividad hasta 2015. Los perfiles de temperatura de estos domos, muestran varios pequeños picos de temperatura, asociado los flujos de lava o a la actividad fumarólica presente en ellos.

Para 2013 y hasta 2015, la morfología de Ñuñurco 1 era un poco aplanada, con una superficie irregular formada por bloques de distinto tamaño; para los años siguientes era más pequeño y menos prominente, por lo que era casi imperceptible en imágenes visuales de 2017 y 2018. Por su parte, Ñuñurco 2, al igual que Ñuñurco 1, tenía una morfología un poco más aplanada que años anteriores, y para 2016 y 2018, se observa un deslizamiento en el frente de este domo, haciendo que su viento sea totalmente visible. Finalmente, Ñuñurco 3, tenía una forma similar a una “U” invertida y no presentaba elevación sobre el flanco.

Mediante MODVOLC, se observa que en 2013 y 2015, el volcán estuvo activo. Las anomalías registradas en estos dos años podría deberse a la actividad de los Domos Ñuñurco, principalmente de Ñuñurco 2. De igual forma se registra actividad a inicios de 2016, finales de 2017 y 2018, lo cual podría corresponder a actividad tanto de los Domos como del Cráter Central, puesto que además de estas anomalías se detectaron varias columnas de cenizas en estos mismos años, principalmente en 2018. Esta alta actividad detectada por MODVOLC y Washington VAAC, no fue registrada en las imágenes visuales y térmicas, debido a que las fechas de los sobrevuelos realizados (noviembre y diciembre 2015, diciembre 2016, junio 2017 y abril 2018) no corresponden a las fechas en las que se detectaron dichas anomalías térmicas y columnas de ceniza.

#### **5.2.2.2.4. Periodo 4: Agosto 2019 - Presente**

Los primeros datos obtenidos después de abril de 2018, son en agosto de 2019, por lo que al no conocer la actividad en este lapso de tiempo, el inicio de este periodo es en esta fecha, pero aún no se puede determinar la culminación del mismo.

En este año no fue posible observar a Ñuñurco 1 y 3, pero el Cráter Central y Domo Ñuñurco 2, se encontraban activos (Fig. 80 y 81). El cráter con actividad explosiva se caracterizaba por la emisión de ceniza, proyectiles balísticos y fumarolas en el sur; y el domo por la emisión de flujos de lava. Con esta nueva actividad la temperatura incrementó en ambos elementos, el cráter con 143,8°C y el domo con 326,8°C. La distribución de temperaturas en el cráter mostró que el pico más alto se encontraba hacia el centro y disminuía lateralmente, además presentaba pequeñas anomalías en la pared externa, debido a la presencia de balísticos. Mientras que, el perfil térmico de 54 m para Ñuñurco 2, mostraba picos importantes hacia el viento del domo con la emisión del flujo de lava, y disminuciones abruptas hacia los extremos del perfil, debido al contacto entre el flujo con el flanco del volcán. Para esta fecha, la morfología del cráter es ovalada, con un gran deslizamiento en la pared externa suroriental que se extiende hacia el flanco del volcán, donde se encuentra Ñuñurco 2. El domo, presenta una morfología diferente a la del periodo

anterior, en la que ya no se observan los deslizamientos y los flujos de lava anchos ocupan toda su superficie, haciendo que este sea prominente, con una morfología casi esférica. A través de los sensores remotos MODVOLC, VAAC y TROPOMI (Fig. 78), se verificó la alta actividad observada en las imágenes térmicas de este año. La potencia de emisión térmica registrada supera los 300MW, siendo esta la mayor registrada en el periodo de estudio. De igual forma, se observa un alto número de columnas de ceniza, las cuales tienen alturas que alcanzan los 3000 m. Finalmente, las emisiones de SO<sub>2</sub> registradas por TROPOMI, tienen valores que van desde las 10 t/d hasta superar las 300 t/d.

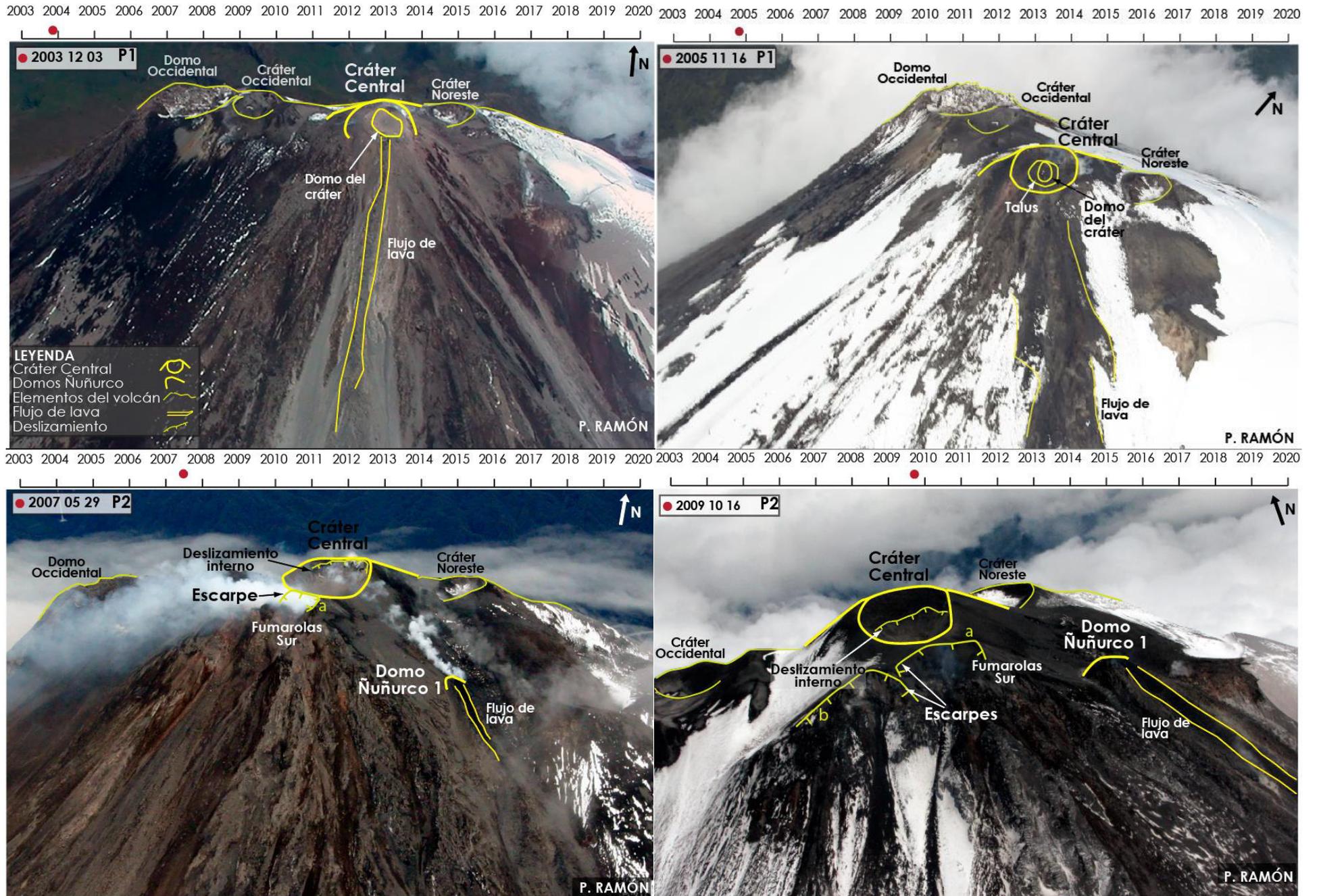


Fig. 80 (Continuación)

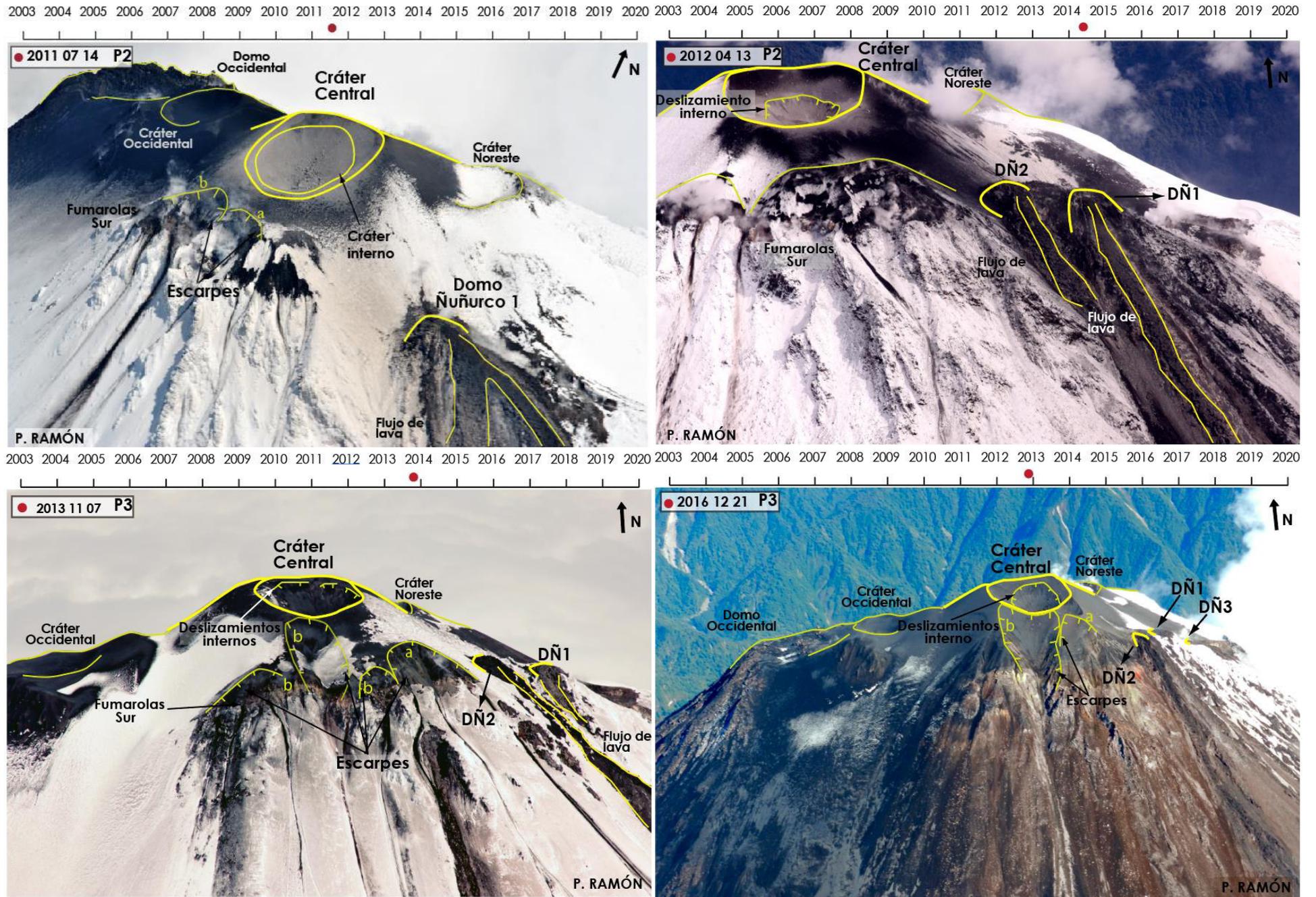


Fig. 80 (Continuación)

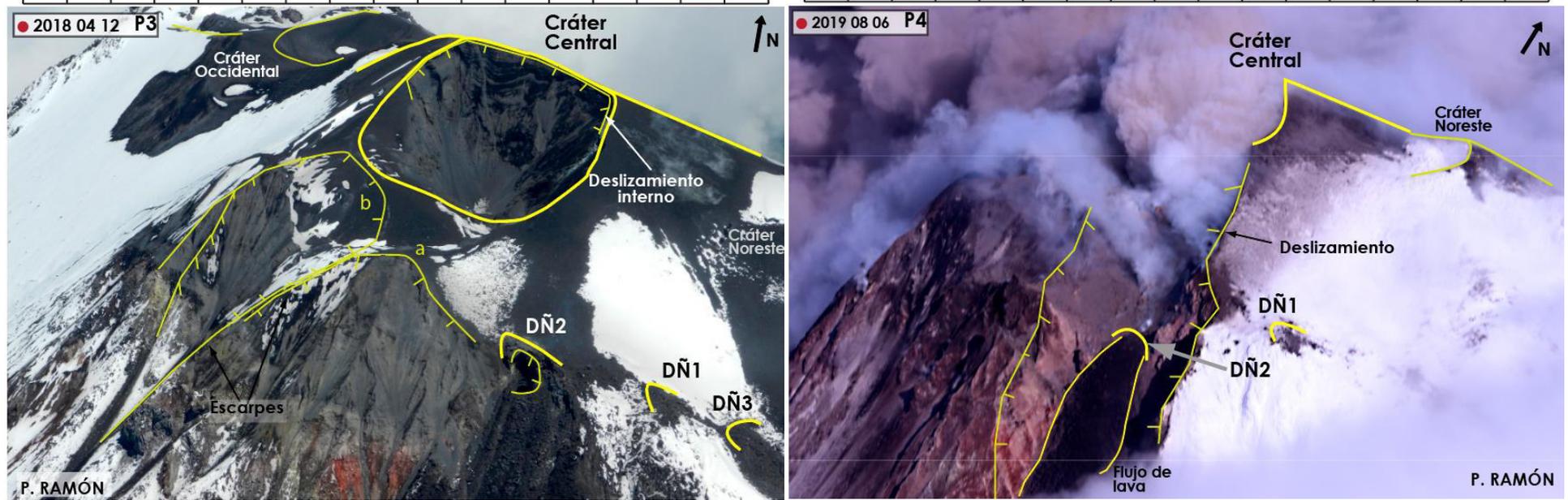
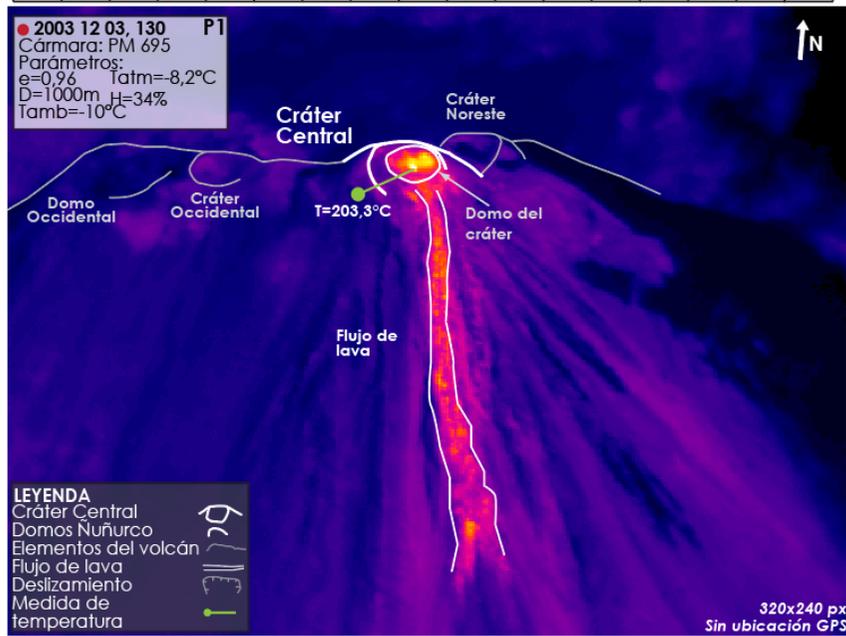


Figura 80. Serie temporal fotográfica que muestra la evolución del Cráter Central y Doms Ñuñurco entre 2003 y 2019.

2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020

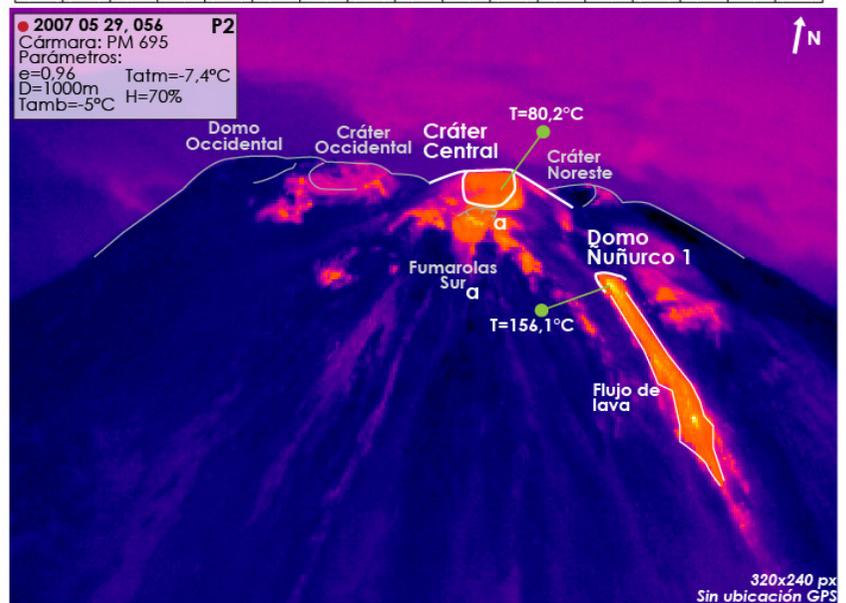
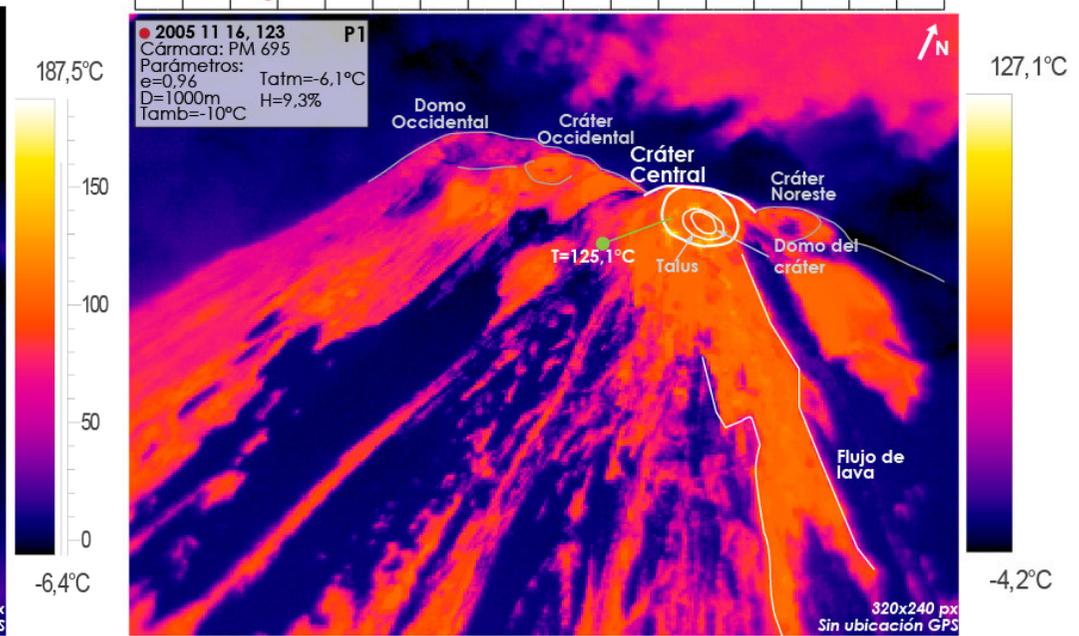
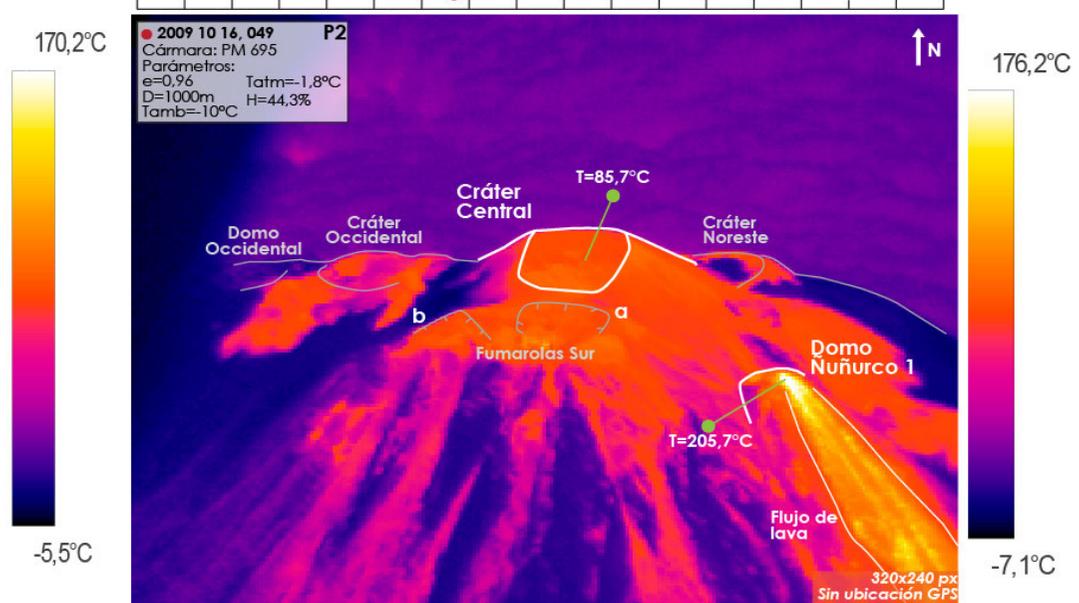


Fig. 81 (Continuación)

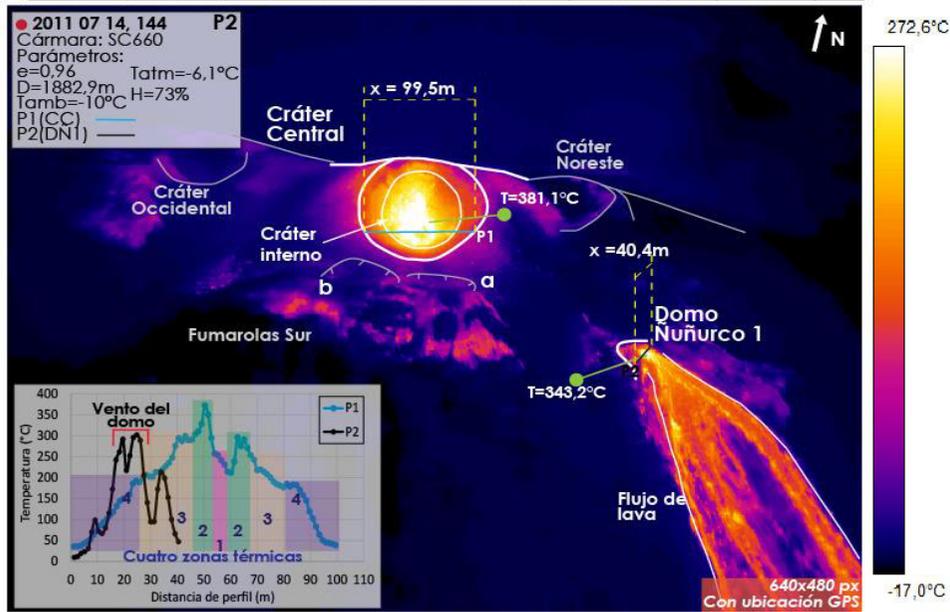
2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



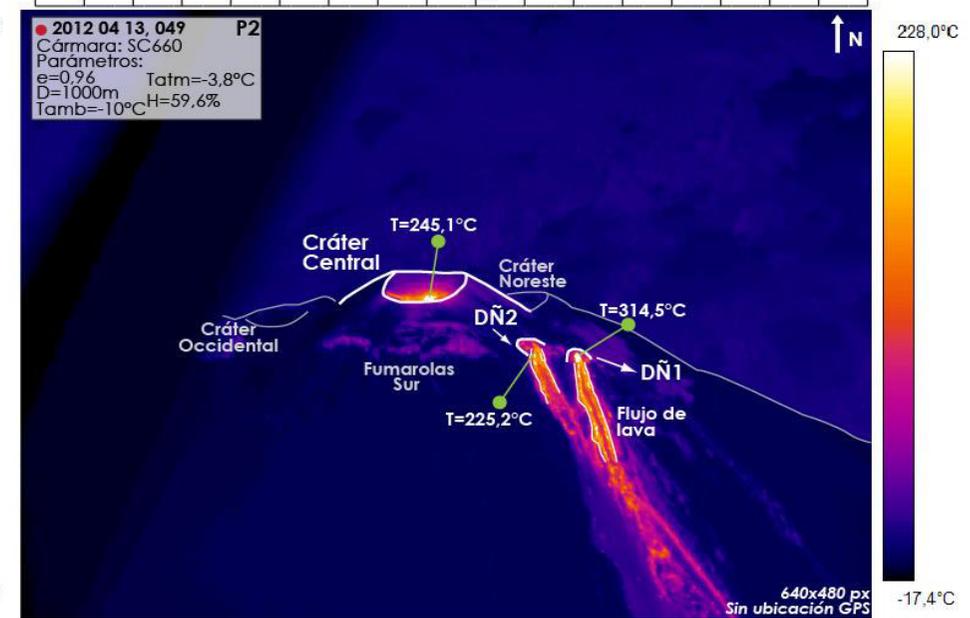
2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



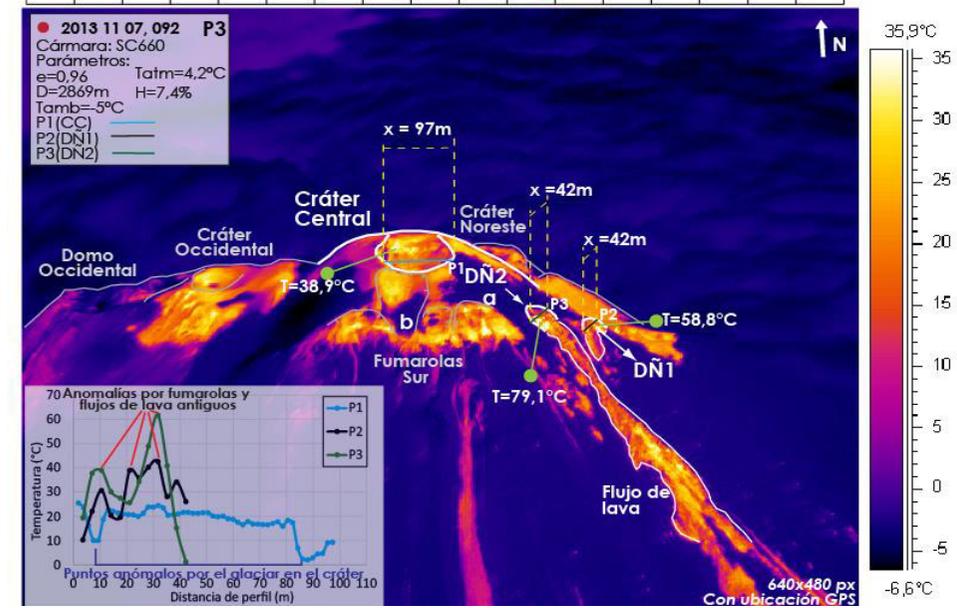
2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020

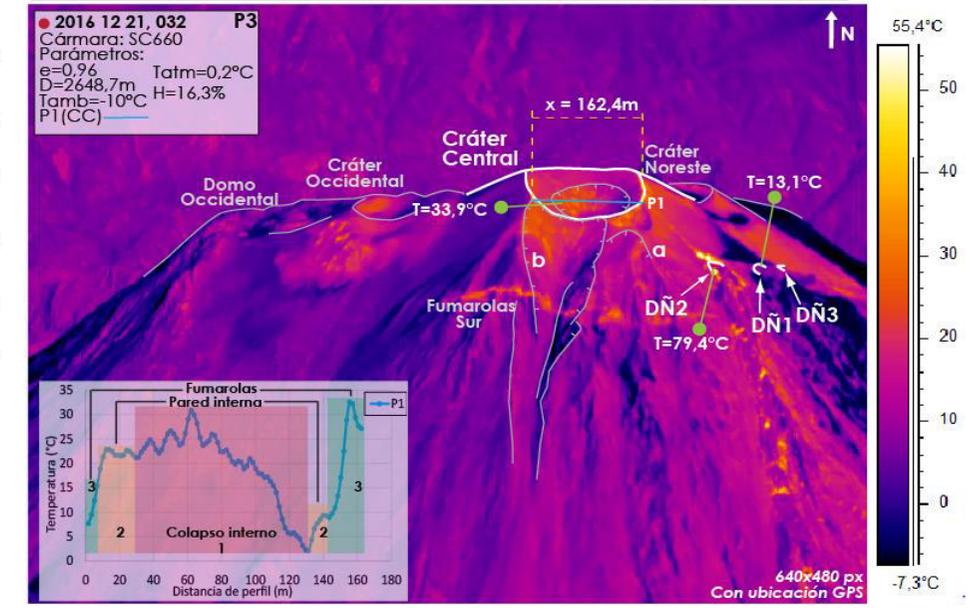
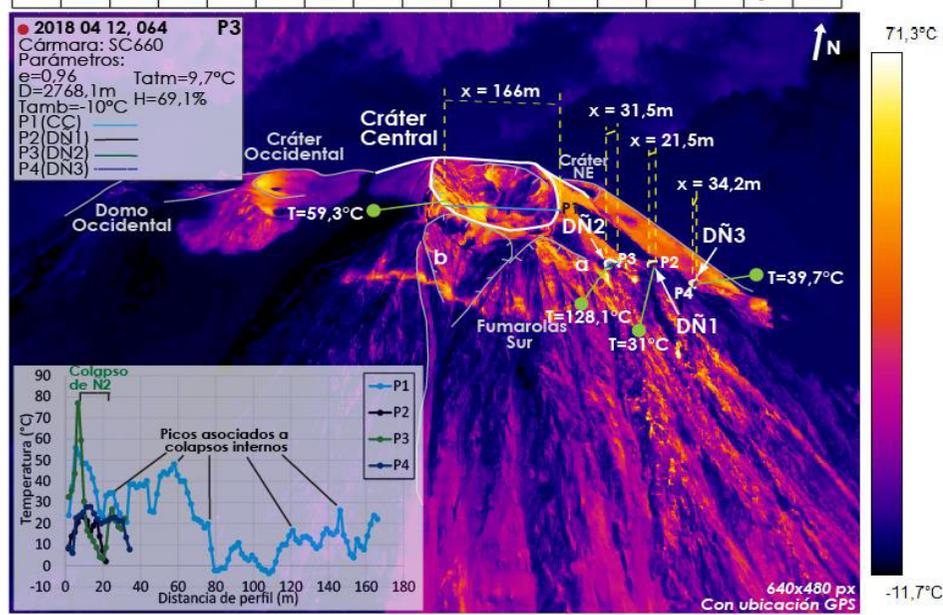


Fig. 81 (Continuación)

2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020

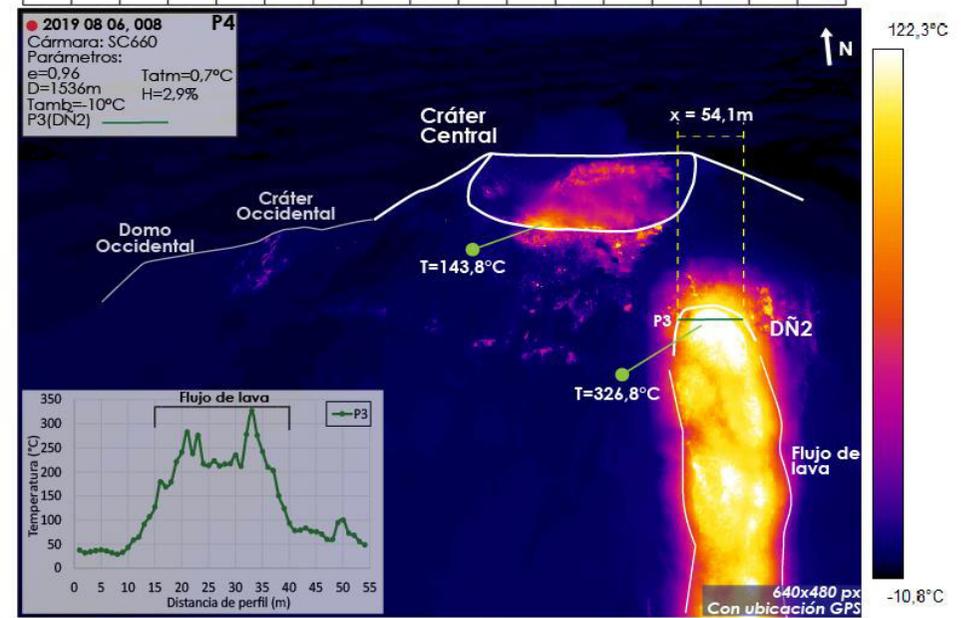


Figura 81. Serie temporal que muestra la evolución del Cráter Central y Domo Ñuñurco entre 2003 y 2019

### 5.3. Implicaciones del estilo eruptivo

El volcán Sangay ha presentado los estilos eruptivos: efusivo y explosivo, los cuales se han manifestado con diferente intensidad en los últimos 17 años. La actividad casi continua, concentrada en el Cráter Central y Domos Ñuñurco, ha sido la responsable de los distintos cambios morfológicos y variaciones termales del volcán.

En base a las observaciones de imágenes (visuales y térmicas) colectadas entre 2003 – 2005 y 2007 - 2019 se identificó diferencias bien marcadas entre estos dos periodos de toma de datos. Estos cambios estuvieron relacionados con:

1. Cambio del estilo eruptivo del Cráter Central, pasó de efusivo a explosivo;
2. Aparecimiento de escarpes en la pared interna norte y externa sur del Cráter Central
3. Aparecimiento del campo fumarólico F(S) ubicado en la pared externa sur del Cráter Central, y
4. Aparecimiento de los Domos Ñuñurco

A continuación se detalla las principales características de estos cambios anteriormente mencionados:

- Entre los años 2003 y 2005, el Cráter Central era el único centro eruptivo en el volcán. Su actividad fue efusiva con la formación de un domo en su interior y flujos de lava que eran emitidos hacia el flanco sur oriente debido a una apertura del cráter hacia ese flanco.
- En las primeras observaciones del año 2007 se determina que la actividad del Cráter Central cambió a explosiva, siendo esta caracterizada por la generación de columnas eruptivas y la presencia de bloques balísticos en y afuera de las inmediaciones del cráter, teniendo en ese momento una morfología similar a la de un cono truncado hueco.

Adicionalmente, en este tiempo se empezó a observar escarpes en la pared interna norte y la pared externa sur del Cráter Central, los cuales se asociaron con pequeños deslizamientos. Cabe mencionar que la pared externa sur (intacta entre el 2003 y 2005) presenta al menos dos sectores de deslizamientos (a y b), dando paso a la apertura de campos fumarólicos de variable intensidad. Esto se refleja térmicamente en la anomalía descrita como F (S), la cual persiste desde este año hasta el año 2018.

Estos dos sectores de escarpes crecieron con el tiempo y se diferenciaron entre sí porque el primero (a), ubicado en el flanco sur –suroriental, tuvo una zona de influencia sin mayores cambios hasta 2018; así, para 2011 tuvo un ancho máximo de ~55 m, para 2013 creció lateralmente teniendo un ancho de ~75 m, para 2016 de ~78 m y para 2018 de 88 m. Mientras que el segundo escarpe o escarpe b,

identificado en 2009 y ubicado al oeste del primero, creció vertical y lateralmente (noviembre 2013), además de que se profundizó con el tiempo. Por lo que en 2011 con un solo deslizamiento se tuvo un ancho de ~56 m, para 2013, con tres deslizamientos se obtuvieron longitudes de 37, 71 y 75 m, respectivamente, siendo el deslizamiento de 71 m el que migró hacia el borde del cráter y verticalmente hacia el flanco. Este deslizamiento para 2016 registró un ancho máximo de ~116 m y para 2018 de 141 m.

También se evidenció una migración alineada de ventos, la cual inició con un viento al suroriente del Cráter Central (Ñuñurco 1), se desplazó hacia el occidente de este (Ñuñurco 2) y retrocedió hacia el oriente del primero (Ñuñurco 3), dando lugar a la formación de los Domos Ñuñurco. La actividad de estos domos ha sido de tipo efusiva, con la emisión no continua de flujos de lava. Entre 2007 y 2012 se registró una intensa actividad para Ñuñurco 1 que a partir de 2013 se redujo notablemente. Ñuñurco 2, se formó en 2012 y fue observado con baja actividad hasta 2018, y en 2019, su actividad se caracterizó por tener una elevada tasa de emisión de flujos de lava, siendo mucho mayor que la observada en años anteriores. Finalmente, Ñuñurco 3, se caracterizó por presentar menor actividad que los otros domos y tener un periodo corto de actividad (2013-2015).

- Para 2019, se observó la formación de una importante quebrada al suroriente del borde del Cráter Central. Esta quebrada se caracteriza por ser más amplia, extensa y profunda que los deslizamientos observados en el flanco sur. Y que además encauza los flujos de lava del Domo Ñuñurco 2.

Como se analiza anteriormente, con un estilo eruptivo efusivo del Cráter Central, no se evidenciaba deslizamientos en las paredes internas o externas; a partir de 2007, con el inicio de actividad explosiva, se inició procesos de deslizamientos al interior del cráter y principalmente en el flanco sur. Los escarpes de la pared externa sur, la formación de un campo fumarólico y la migración de ventos han sido importantes indicadores de la debilitación del flanco sur y suroriental del volcán, lo que ha provisto las condiciones necesarias para la generación de deslizamientos más grandes como la formación de una gran quebrada en este sector para el año 2019-2021, concluyendo así que la actividad volcánica casi continua en el volcán es la que controla los cambios morfológicos registrados a nivel de la cumbre. Esto ha sido evidenciado en otros volcanes como en el volcán Galeras, Monte Etna, Telica, Tungurahua, entre otros (Ordóñez & Cepeda, 1997; Behncke et al., 2004; Hanagan et al., 2020; Yaguana, 2020), en los cuales procesos efusivos y/o explosivos han causado cambios profundos en la morfología de la cumbre y principalmente en el cráter principal. Así por ejemplo, Yaguana, (2020), determina que los

cambios observados en el cráter activo del volcán Tungurahua entre 2002-2016, estuvieron condicionados e influenciados principalmente por dos factores: las condiciones pre-eruptivas del cráter y los procesos syn-eruptivos asociados a la actividad volcánica. Para el volcán Sangay, los procesos syn-eruptivos son lo que se observan, han generado cambios importantes a nivel de la cumbre y flanco sur, dando paso a una morfología drásticamente diferente entre los años 2003 y 2019.

Por otro lado, la actividad volcánica ha tenido implicaciones directas en el riesgo volcánico. El riesgo como tal, es función de la amenaza (peligrosidad), vulnerabilidad y exposición. Las principales amenazas del Sangay han sido los flujos de lava, emisiones de ceniza, y para el último año (2019-2020), los flujos piroclásticos y lahares. La ausencia de población y de infraestructuras en las cercanías al Sangay hace que, la exposición disminuya frente a la generación de flujos de lava y flujos piroclásticos. De esta manera, las principales amenazas serían la emisión y caídas de ceniza y generación de lahares.

En 2018, se reportó una ligera caída de ceniza en la ciudad de Guayaquil ubicada a 170 km al occidente del volcán (Vasconez et al., 2018) y en los últimos años (2019 y 2020), la ceniza ha alcanzado poblaciones de las provincias de Morona Santiago, Chimborazo, Azuay, Cañar, Bolívar, Tungurahua, Cotopaxi, Santa Elena, Guayas, Los Ríos y El Oro (IG-EPN, 2019b; IG-EPN, 2020; IG-EPN, 2020a; IG-EPN, 2020b). Para 2019 y 2020, el descenso de lahares a lo largo del río Volcán ha sido un fenómeno recurrente, llegando a represar parcialmente el río Upano. Los lahares del río Volcán se han formado por la remoción de los depósitos volcánicos (flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica), que han sido erosionados por las fuertes lluvias del sector (IG-EPN, 2019b; IG-EPN, 2020b).

Adicionalmente a la amenaza por la emisión y caídas de ceniza y generación de lahares, se puede mencionar el riesgo relacionado con la continua presencia de escarpes en la pared interna norte y en su pared externa sur del Cráter Central desde el 2007. Estos escarpes han representado las huellas de pequeños deslizamientos que han dado paso a la manifestación superficial de un campo fumarólico en la pared externa del Cráter Central y a un posible debilitamiento progresivo de la pared sur y sur oriental de este cráter. En el presente trabajo se sugiere que este debilitamiento ha sido un precursor para la generación progresiva de la quebrada que se formó desde junio de 2019 y que continúa hasta la actualidad, agosto 2021. Por estas razones, estudiar la morfología del volcán y sus cambios, sutiles o grandes, puede ser un precedente para la ocurrencia de fenómenos más grandes, puesto que estos indicios con el tiempo pueden crecer, profundizarse y crear una inestabilidad mayor del edificio volcánico, todo esto relacionado con la variabilidad del estilo eruptivo que un volcán puede presentar.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- El volcán Sangay ha mantenido actividad casi constante en los últimos 17 años. Esta se ha caracterizado por presentar estilos eruptivos: efusivo y explosivo; el primero relacionado a domos y flujos de lava, y el segundo con la actividad explosiva que ha dado lugar a la formación de corrientes de densidad piroclástica y de emisiones de columnas de ceniza y gas, y proyectiles balísticos.
- Desde el año 2003 y hasta 2005, el Cráter Central era el único ventoso activo del volcán con la formación de un domo y la emisión de flujos de lava; a partir del año 2007 se observó actividad explosiva en el cráter y actividad de tipo efusiva sobre el flanco suroriental del Sangay, con la formación de los Domos Ñuñurco.
- Los principales cambios morfológicos registrados para el Cráter Central han estado relacionados a escarpes tanto en las paredes internas como externas de este cráter. Entre 2003 y 2004, el cráter se encontraba abierto hacia el sureste y a partir de 2007 se observó escarpes principalmente en la pared interna norte y en la pared externa sur.
- En la pared externa sur del Cráter Central, se identificó dos escarpes *a* y *b*. El primero, en el sur-suroriente, que mantuvo una zona de influencia casi constante, y el segundo, en el suroccidente, que migró verticalmente, al igual que se profundizó con el tiempo. Estos escarpes dieron lugar a la formación de una zona fumarólica sobre este flanco sur, y además representan un posible precursor del debilitamiento del flanco sur y suroriental del volcán.
- Mediante los perfiles térmicos, se determinó que el Cráter Central ha crecido en los cuatro años, así en 2011 y 2013 presentaba un ancho máximo de 99 m y para 2018, aumentó a ~166 m.
- La temperatura del Cráter Central ha variado considerablemente, en 2003 - 2005 estaba entre 125 a 203°C, en 2007 – 2012 entre 75 – 381°C, en 2013 – 2018 era inferior 59°C, y para 2019 fue de 144°C.
- En mayo 2007, sobre el flanco suroriental se formó el Domo Ñuñurco 1, presentando una forma semiesférica poco prominente que hasta 2012 creció lateral y verticalmente. Desde 2013, debido a su baja actividad, redujo su tamaño hasta ser casi imperceptible en los últimos años. En abril de 2012, al oeste de Ñuñurco 1, se forma Ñuñurco 2, presentando una morfología similar a la del primero, con la diferencia de que para 2016 y 2018 se observa un deslizamiento del frente del domo, y que para 2019 su actividad

incrementa considerablemente al igual que su tamaño. En diciembre de 2014, a través de imágenes visuales se identifica un tercer domo al este del primero. Este domo, Ñuñurco 3, es de un tamaño mucho menor que los anteriores y se encuentra activo solo hasta 2015.

- A través de perfiles térmicos se estimó que entre 2011 y 2013 el ancho máximo de Ñuñurco 1 era de ~42 m, mientras que para 2018 de 22 m. Ñuñurco 2 en 2013 y 2018 tenía un ancho de 31 a 43 m, mientras que para 2019, incrementó a 54 m. Y en 2018 Ñuñurco 3, presentó una amplitud de ~34 m.
- Los rangos de temperatura para Ñuñurco 1 varían de 73 - 370°C en 2007 – 2012, y de 6 - 67°C en 2013 - 2018. En cambio, para Ñuñurco 2, en 2012 la temperatura era de 225°C, en 2013-2018 de 29 – 128°C y para 2019 de 327°C. Finalmente, para Ñuñurco 3, en 2014 – 2015, la variación fue de 6 - 53°C.
- Se ha propuesto cuatro periodos de actividad para el volcán Sangay: 1) marzo 2003 – noviembre 2005, 2) mayo 2007 – abril 2012, 3) septiembre 2013 – abril 2018 y 4) agosto 2019 – actualidad; en base a cuatro aspectos analizados en este estudio: 1) tipo de actividad volcánica: explosiva o efusiva, 2) valor de temperatura de anomalías térmicas, 3) aparecimiento de domos de lava y, 4) aparecimiento de escarpes en el Cráter Central.
- En base a las observaciones de imágenes visuales y térmicas, se ha distinguido dos periodos de toma de datos, entre 2003 – 2005 y 2007 – 2019, los cuales se diferencian principalmente por: cambio del estilo eruptivo del Cráter Central; aparecimiento de escarpes en la pared interna norte y externa sur del Cráter Central, aparecimiento del campo fumarólico F(S) ubicado en la pared externa sur del Cráter Central, y aparecimiento de los Domos Ñuñurco.
- La actividad volcánica casi continua en el volcán ha sido la responsable de los cambios morfológicos registrados en el volcán Sangay, como se ha evidenciado en otros volcanes como en el volcán Galeras, Monte Etna, Telica, Tungurahua.
- La actividad volcánica ha tenido implicaciones directas en el riesgo volcánico, siendo las principales amenazas la emisión y caídas de ceniza y generación de lahares. Sin embargo, existe una amenaza por la continua presencia de escarpes en la pared interna norte y en la pared externa sur del Cráter Central desde el 2007, que probablemente han debilitado la pared sur y sur oriental del volcán, favoreciendo la generación de deslizamientos mayores como el observado en el último año (2019 – 2020).
- Las imágenes térmicas, además de ser una herramienta fundamental para el análisis de anomalías térmicas y de datos de temperaturas, proporcionan un complemento valioso a las imágenes visuales (imágenes aéreas oblicuas o satelitales), debido a que ofrecen

una descripción inequívoca de la extensión de las áreas cálidas y frías, que facilitan la determinación de los bordes de los distintos rasgos volcánicos.

- Los análisis térmicos cuantitativos pueden presentar errores relacionados a múltiples factores, entre los principales se encuentran la atenuación atmosférica (humedad relativa y temperatura atmosférica) y la distancia de visualización. Se determinó que la distancia es el factor que mayor influencia tiene sobre el cálculo de temperatura, ya que de esta depende el efecto de la atenuación atmosférica.
- Los perfiles térmicos demostraron ser una herramienta útil tanto para la caracterización de una distribución térmica como para estimar medidas en los rasgos volcánicos. En este último, se demostró que una posición errónea del cráter o domos, afecta de manera insignificante al cálculo de distancia y consecuentemente al IFOV, por lo que la variación de la longitud y anomalías del perfil son mínimas.
- La vigilancia volcánica realizada a través de sensores remotos necesita ser contrastada con las observaciones directas, puesto que proporcionan una mayor precisión de datos ya que son realizadas a tiempo real. Además, los datos directos pueden representar un monitoreo más continuo del volcán, mostrando una perspectiva más acertada de la actividad.

## **6.2. Recomendaciones**

- Actualizar el Mapa de Peligros del volcán Sangay tomando en cuenta los nuevos datos obtenidos en este estudio, relacionados a los cambios morfológicos (principalmente deslizamientos, externo e internos, en el edificio volcánico) ocurridos a través del tiempo.
- Realizar más sobrevuelos por año al volcán Sangay para la obtención de imágenes visuales y térmicas, para mantener el monitoreo continuo del volcán.
- Al momento de tomar las imágenes térmicas, usar los diferentes rangos de temperatura de la cámara, puesto que, al realizarlo solo con uno, altas o bajas temperaturas no pueden ser estimadas correctamente.
- En los sobrevuelos, tomar a la vez o de la misma perspectiva las imágenes térmicas y visuales, para que el montaje de una sobre otra para fechas diferentes resulte factible.

## CAPÍTULO VII

### 7. Bibliografía

- Aber, J. S., Marzolff, I., & Ries, J. B. (2010). Photogrammetry. En J. S. Aber, I. Marzolff, & J. B. Ries, *Small-Format Aerial Photography. Principles, Techniques and Geoscience Applications* (págs. 23-39). Amsterdam: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-53260-2.10003-1
- Aldegghi, A., Carn, S., Escobar-Wolf, R., & Gropelli, G. (2019). Volcano Monitoring from Space Using High-Cadence Planet CubeSat Images Applied to Fuego Volcano, Guatemala. *Remote Sens*, 11(2151), 1-18. doi:10.3390/rs11182151
- Ali, A. K. (2010). *Remote Sensing*. University of Technology.
- Andaru, R., & Rau, J.-Y. (2019). Lava dome changes detection at Agung Mountain during high level of volcanic activity using UAV photogrammetry. *The International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spacial Information Sciences, XLII-2/W13*, 173-179. Obtenido de <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-173-2019>
- Andronico, D., Branca, S., Calvari, S., Burton, M., Caltabiano, T., Corsaro, R. A., . . . Spampinato, L. (2005). A multi-disciplinary study of the 2002–03 Etna eruptions: insights into a complex plumbing system. *Bull. Volcanol.*, 67, 314-330.
- ASHTEAD TECHNOLOGY. (s.f.). *FLIR THERMACAM PM 695*. Obtenido de ASHTEAD TECHNOLOGY: [https://2mo.co.uk/pdf/Flir\\_Thermacam\\_695.pdf](https://2mo.co.uk/pdf/Flir_Thermacam_695.pdf)
- Aspden, J. A., & Litherland, M. (1992). The geology and mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. Andean Geodynamics. (R. A. Oliver, Ed.) *Tectonophysics*, 205, 187-204.
- Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Audin, L., Jomard, H., . . . Alvarado, A. (2019). Interactions between volcanism and geodynamics in the southern termination of the Ecuadorian arc. *Tectonophysics*, 751, 54-72. doi:10.1016/j.tecto.2018.12.010
- Ball, M., & Pinkerton, H. (2006). Factors affecting the accuracy of thermal imaging cameras in vulcanology. *Journal of Geophysical Research*, 111, 1-14. doi:10.1029/2005JB003829

- Barba, D., Samaniego, P., Le-Pennec, J. L., Hall, M., Robin, C., Mothes, P., . . . Ruiz, G. (2008). The 2006 eruptions of the Tungurahua volcano (Ecuador) and the importance of volcano hazard maps and their diffusion. *7th International Symposium on Andean Geodynamics*, 67-70.
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J., & Santacroce, R. (1988). Plio-quadernary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125(01), 1-14.
- Barragan , R., & Baby, P. (2002). Volcanogenic evidences of the north Andean tectonic segmentation: volcanoes Sumaco and El Reventador, Ecuador Subandean Zone. *5th International Symposium of Andean Geodynamics*, (págs. 73-76). Toulouse, France.
- Barragan, R., Baby, P., & Duncan, R. (2005). Cretaceous alkaline intra-plate magmatism in the Ecuadorian Oriente Basin: geochemical, geochronological and tectonic evidence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 670–690.
- Beléndez, A. (2017). *Calor y Temperatura*. Obtenido de Universidad de Alicante: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/95287/1/Tema-4-Calor-y-temperatura.pdf>
- Bernard, B., & Andrade, D. (2011). *Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental*. Quito: IRD.
- Bravo, E. (2014). *La Biodiversidad en el Ecuador*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Brown, A. (2004). Operations within the Washington VAAC: using multiple sensors to detect and analyze volcanic ash. *13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*. Norfolk.
- Budzier, H., & Gerlach, G. (2011). *Thermal Infrared Sensors. Theory, Optimisation and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Calvari, S., Coltelli, M., Neri, M., & Pompilio, M. (1994). The 1991–1993 Etna eruption: chronology and lava flow-field evolution. *Acta Vulcanol.*, 4, 1–14.
- Calvari, S., Lodato, L., & Spampinato, L. (2004). Monitoring active volcanoes using a handheld thermal camera. *Thermosense XXVI*. Obtenido de <https://doi.org/10.1117/12.547497>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition* (Quinta ed.). Guilford Press.

- Collot, J. Y., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., . . . Pazmiño, A. (2009). Vision general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia : implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subduccion de la Cordillera de Carnegie. (J. Y. Collot, V. Sallares, & N. Pazmiño, Edits.)
- Coppola, D., Staudacher, T., & Cigolini, C. (2007). Field thermal monitoring during the August 2003 eruption at Piton de la Fournaise (La Réunion). *J. Geophys. Res.*, *112*, 1-15.
- Corace, J. J. (2009). *UNIDAD V: MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR*. Obtenido de Universidad Nacional de Nordeste: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U05.pdf>
- Diefenbach, A., Crider, J., Schilling, S., & Dzurisin, D. (2012). Rapid, low-cost photogrammetry to monitor volcanic eruptions: an example from Mount St. Helens, Washington, USA. *Bulletin of Volcanology*, *74*(2), 579-587. doi:<https://doi.org/10.1007/s00445-011-0548-y>
- Domínguez, H. (s.f.). *Entendamos qué es la Temperatura y qué es el calor*. Obtenido de Correo del Maestro: [https://www.correodelmaestro.com/publico/html5022014/capitulo1/capitulo\\_01.htm](https://www.correodelmaestro.com/publico/html5022014/capitulo1/capitulo_01.htm)
- Dvigalo, V., Shevchenko, A., & Svirid, I. (2016). Photogramteric Survey in Volcanology: A case Study for Kamchatka Active Volcanoes. En K. Nemeth (Ed.), *Updates in Volcanology - From Volcano Modelling to Volcano Geology*. doi:10.5772/63577
- Ecured. (s.f.). *Provincia de Morona Santiago (Ecuador)*. Obtenido de Ecured: [https://www.ecured.cu/Provincia\\_de\\_Morona\\_Santiago\\_\(Ecuador\)](https://www.ecured.cu/Provincia_de_Morona_Santiago_(Ecuador))
- Fernández, G. (23 de Septiembre de 2015). *Radiación de cuerpo negro. Hipótesis de Planck*. Obtenido de FISICOQUÍMICA: <http://www.quimicafisica.com/radiacion-cuerpo-negro-hipotesis-planck.html>
- FLIR SYSTEM. (2000). *THERMACAM PM 695*. FLIR SYSTEM. Obtenido de <https://www.termogram.com/pdf/695.pdf>
- FLIR SYSTEM. (21 de Diciembre de 2006). *User`s manual ThermaCAM™ Researcher*. Obtenido de Manualzz: <https://manualzz.com/doc/6765708/user-s-manual-thermacam%E2%84%A2-researcher>

- FLIR SYSTEM. (2009). *FLIR SC660*. FLIR SYSTEM.
- FLIR SYSTEM. (2020). *Calculadora FOV*. Obtenido de FLIR SYSTEM: [https://flir-es.custhelp.com/app/utils/fl\\_fovCalc/pn/84102-0102/ret\\_url/%252Fapp%252Ffl\\_download\\_datasheets%252Fid%252F2065](https://flir-es.custhelp.com/app/utils/fl_fovCalc/pn/84102-0102/ret_url/%252Fapp%252Ffl_download_datasheets%252Fid%252F2065)
- Fluke Corporation. (2020). *How color palettes, alarms and markers improve infrared inspections*. Obtenido de Fluke Corporation: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/mejores-practicas/aspectos-basicos-de-las-herramientas-de-prueba/camaras-infrarrojas/how-color-palettes-alarms-and-markers-improve-infrared-inspections>
- Fluke Thermography. (22 de Octubre de 2013). *Ambient Temperature Defined*. Obtenido de Thermal Imaging Bloc: <http://thermal-imaging-blog.com/index.php/2013/10/22/ambient-temperature-defined-2/#.XpVFT8hKjDc>
- Font, Y., Segovia, M., Vaca, S., & Theunissen, T. (2013). Seismicity patterns along the Ecuadorian subduction zone: new constraints from earthquake location in a 3-D a priori velocity model. *Geophysical Journal International*, 193(1), 263–286. doi:10.1093/gji/ggs083
- Friedman, J. D., Olhoeft, G. R., Johnson, G. R., & Frank, D. (1981). Heat content and thermal energy of the June dacite dome in relation to total energy yield, May-October 1980. *U.S. Geol. Survey*, 1250, 557–568.
- Friedman, J. D., & Williams Jr, R. S. (1968). Infrared Sensing of Active Geologic Processes. Proc. Fifth on Remote Sens. Environ. *Univ. Mich., Ann. Arbor*, 787-820.
- Global Volcanic Program. (2013). *Sangay (352090)*. (E. Venzke, Ed.) doi:<https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>
- Guillier, B., Chatelain, J., Jaillard, É., Yepes, H., Poupinet, J., & Fels, J. (2001). Seismological evidence on the geometry of the orogenic system in central-northern Ecuador (South America). *Geophysical Research Letters*, 28(19), 3749-3752.
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letter*, 168, 255-270.
- Hall, M. L. (1977). El volcanismo en el Ecuador. *IPGH, Sección Nacional del Ecuador*, 120.

- Hall, M. L., & Beate, B. (1991). El volcanismo plio-cuaternario en los Andes del Ecuador. *Estudios Geográficos*, 4, 5-38.
- Hall, M. L., & Wood, C. A. (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13(3), 203-207.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andean Volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 1-6.
- Harris, A. (2013). *Thermal Remote Sensing of active volcanoes*. New York: Cambridge University Press.
- Harris, A. (2013). *Thermal Remote Sensing of active volcanoes*. New York: Cambridge University Press.
- Harris, A. J., Bailey, S., Calvari, S., & Dehn, J. (2005). Heat loss measured at a lava channel and its implications for down-channel cooling and rheology. *Geol. Soc. Am.*, 396, 125-146.
- Harris, A. J., Dehn, J., Patrick, M., Calvari, S., Ripepe, M., & Lodato, L. (2005). Lava effusion rates from hand-held thermal infrared imagery: An example from the June 2003 effusive activity at Stromboli. *Bull. Volcanol.*, 68, 107-117.
- Harris, A. J., Ripepe, M., Calvari, S., Lodato, L., & Spampinato, L. (2008). The 5 April 2003 Explosion of Stromboli: Timing of Eruption Dynamics Using Thermal Data. *Union Geophys.*, 305-316.
- Hernández, J. J., Rodríguez, J., & Sanz, J. (2010). *Transmisión de calor para ingenieros*. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha.
- Hoffer, G., Eissen, J., Beate, B., Bourdon, E., Fornari, M., & Cotten, J. (2008). Geochemical and petrological constraints on re-arc magma genesis processes in Ecuador: The Puyo cones and Mera lavas volcanic formations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 107–118. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.023
- Holst, G. (2000). *Common sense approach to thermal imaging*. Florida: JCD Publishing.
- Horton, B. K. (2018). Sedimentary record of Andean mountain building. *Earth-Sci. Rev.*, 178, 279-309. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.025>.
- Hughes, R. A., & Pilatasig, L. F. (2002). Cretaceous and tertiary block accretion in the Cordillera occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345, 29-48.

- Humboldt State University. (2014). *Introduction to Remote Sensing. Resolution*. Obtenido de Humboldt State Geospatial Online: [http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson3-1/resolution.html](http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson3-1/resolution.html)
- Hutchison, W., Verley, N., Pyle, D., Mather, T., & Stevenson, J. (2013). Airbone thermal remote sensing of the volcán Colima (México) lava dome from 2007 to 2010. *Geological Society, London, Special Publications Online First*. doi:10.1144/SP380.8
- HyperPhysics. (2016). *Humedad relativa*. Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Kinetic/relhum.html>
- Ibarra, C. (2005). *QUANTITATIVE SUBSURFACE DEFECT EVALUATION BY PULSED PHASE THERMOGRAPHY: DEPTH RETRIEVAL WITH THE PHASE*. Quebec: Université Laval.
- IG-EPN. (2015). *Informe Especial del Volcán Sangay N°1, 16 de marzo de 2015*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2016). *Informe Especial Volcán Sangay Nro 1. Incremento de actividad eruptiva*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2017). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2017 - N° 2*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2018). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2018 - N° 3. “Fin de la fase eruptiva”*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2019). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2019 - N° 3. “Actualización de la actividad eruptiva”*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2019a). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2019 - N° 4*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2019b). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2019 - N°6*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2019b). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2019 - N°6 “Actualización de la actividad eruptiva”*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2020). *Informe Especial del Volcán Sangay - 2020 - N°3*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2020). *Informe Especial del Volcán Sangay N° 1 – 2020*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2020a). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2020 - N° 2*. Quito: IG-EPN.
- IG-EPN. (2020b). *Informe Especial del Volcán Sangay - 2020 - N°3*. Quito: IGEPN.

- INEC. (2010). *Población por sexo, según provincia, parroquia y cantón de empadronamiento*. INEC.
- Infoagro Systems. (2020). *Termo-Higrómetro TESTO 625*. Obtenido de Infoagro Systems: [https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/medidor.asp?id=5501&\\_termo-higrometro\\_testo\\_625](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/medidor.asp?id=5501&_termo-higrometro_testo_625)
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Suarez, J., Toro, J., Iza, D., & Lugo, W. (2004). Stratigraphy of the Late Cretaceous Paleogene deposits of the cordillera occidental of Central Ecuador: geodynamic implications. *J. S. Am. Earth Sci.*, 17, 49-58.
- Jaillard, E., Caron, M., Dhont, A., Ordoñez, M., Andrade, R., Bengtson, P., & Zambrano, I. (1997). *Síntesis estratigráfica y Sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la Cuenca Oriental del Ecuador*. ORSTOM-PETROPRODUCCIÓN.
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Benitez, S., Berrones, G., Jimenez, N., Montenegro, G., & Zambrano, I. (1995). Basin development in an Accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: southern coastal Ecuador during Late Cretaceous-late Eocene time. *AAPG Memory*, 62, 615-631.
- James, M., Robson, S., Pinkerton, H., & Ball, M. (2006). Oblique photogrammetry with visible and thermal images of active lava flows. *Bull. Volcanology*, 69, 105-108.
- Johnson, J. B., Aster, R. C., Ruiz, M. C., Malone, S. D., McChesney, S. J., Lees, J. M., & Kyle, P. R. (2003). Interpretation and utility of infrasonic records from erupting volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121, 15-63.
- KVR Energy Limited. (s.f.). *FLIR SC620, FLIR SC640 and FLIR SC660*. Obtenido de KVR Energy Limited: [http://kvrel.com/index.php?id\\_product=45&controller=product&id\\_lang=1](http://kvrel.com/index.php?id_product=45&controller=product&id_lang=1)
- Lautze, N. C., Harris, A. J., Bailey, J. E., Ripepe, M., Calvari, S., Dehn, J., . . . Evans-Jones, K. (2004). Pulsed lava effusion at Mount Etna during 2001. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 137, 231–246.
- Le Pennec, J., Ruiz, A. G., Eissen, J., Hall, M., & Fornari, M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcano Imbabura, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206, 121-135.
- Litherland, M., Aspden, J., & Jemielita, R. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador* (Vol. 11). British Geological Survey, Overseas Memoir.

Lonsdale, P., & Klitgord, K. D. (1978). Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Geological Society of American Bulletin*, 89, 981-999.

masmar. (21 de Octubre de 2013). *Temperatura, la temperatura en la atmósfera*. Obtenido de masmar tu portal náutico en internet: <http://www.masmar.net/index.php/esl/Apuntes-N%C3%A1uticos/Meteorolog%C3%ADa/Temperatura.-la-temperatura-en-la-atm%C3%B3sfera>

Monzier, M., Claude, R., Samaniego, P., Hall, M., Cotten, J., Mothes, P., & Arnaud, N. (1999). Sangay volcano, Ecuador: structural development, present activity and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 49-79.

Morona Santiago es Sangay. (s.f.). *Biodiversidad*. Obtenido de Morona Santiago es Sangay: <http://www.moronasantiagoessangay.com/donde-ir/morona/biodiversidad>

Mouginis-Mark, P. J. (2000). Remote Sensing observations for volcano monitoring and hazard mitigation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, 905-910. Obtenido de [https://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part7/905\\_XXXIII-part7.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part7/905_XXXIII-part7.pdf)

Mullineaux, D., & Crandell, D. (s.f.). *The Eruptive History of Mount St. Helens*. Obtenido de Oregon State University: <http://volcano.oregonstate.edu/book/export/html/1204>

Natural Resources Canada. (06 de Agosto de 2019). *Remote Sensing Tutorials*. Obtenido de Natural Resources Canada: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>

Natural Resources Canada. (18 de Febrero de 2016). *Radiometric Resolution*. Obtenido de Natural Resources Canada: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/satellites-sensors/radiometric-resolution/9379>

Natural Resources Canada. (16 de 08 de 2019). *Fundamentals of Remote Sensing*. . Obtenido de Natural Resources Canada: [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutorial/fundam/pdf/fundamentals\\_e.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutorial/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf)

- Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., . . . Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the *Nature Geoscience*, 7(4), 287–291. doi:10.1038/ngeo2099
- OMEGA. (2003). *Blackbody Concepts*. Obtenido de OMEGA: [https://www.omega.de/literature/transactions/volume1/theoretical2.html#blackbody\\_concepts](https://www.omega.de/literature/transactions/volume1/theoretical2.html#blackbody_concepts)
- Oppenheimer, C., & Yirgu, G. (2002). Thermal imaging of an active lava lake: Erta 'Ale volcano, Ethiopia. *Int. J. Remote Sens.*, 23, 4777–4782.
- Ordóñez, J., Vallejo, S., Bustillos, J., Hall, M., Andrade, D., Hidalgo, S., & Samaniego, P. (2013). *Volcán Sangay. Peligros Volcánicos Potenciales*. Quito: IG-EPN, IRD.
- Oregon State University. (2021). *The Eruptive History of Mount St. Helens*. Obtenido de Oregon State University Web site: <https://volcano.oregonstate.edu/eruptive-history-mount-st-helens>
- Paschotta, R. (2008). *Thermal Imaging*. Obtenido de RP Photonics Encyclopedia: [https://www.rp-photonics.com/thermal\\_imaging.html](https://www.rp-photonics.com/thermal_imaging.html)
- Pastor, J. (s.f.). *Radiación térmica*. Obtenido de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/338264047/Radiacion-termica>
- Patrick, M. R. (2007). Dynamics of strombolian ash plumes from thermal video: motion, morphology, and air entrainment. *J. Geophys. Res.*, 112, 1-13. doi:10.1029/2006JB004387
- Patrick, M. R., Harris, A. J., Ripepe, M., Dehn, J., Rothery, D. A., & Calvari, S. (2007). Strombolian explosive styles and source conditions: insights from thermal (FLIR) video. *Bull. Volcanol.*, 69, 769–784.
- Patrick, M., Orr, T., Antolik, L., Lee, L., & Kamibayashi, K. (2014). Continuous monitoring of Hawaiian volcanoes with thermal cameras. *J Appl. Volcanol*, 3(1), 1-19. doi:10.1186/2191-5040-3-1
- Planet Lab Inc. (31 de octubre de 2017). *Planet Lab Inc*. Obtenido de Planet Lab Inc: <https://www.planet.com/company/>
- Planet Lab Inc. (2020). *Planet's Education and Research (E&R) Program*. Obtenido de Planet Lab Inc: <https://www.planet.com/markets/education-and-research/>

- Pyle, D. M., Mather, T. A., & Biggs, J. (2013). Remote Sensing of volcanoes and volcanic processes: integrating observation and modelling - introduction. *Geological Society. Special Publications*, 380(1), 1-13. doi:10.1144/SP380.14
- Queißer, M., Burton, M., Theys, N., Pardini, F., Salerno, G., Caltabiano, T., . . . Kazahaya, R. (2019). TROPOMI enables high resolution SO<sub>2</sub> flux observations from Mt. Etna, Italy, and beyond. *Scientific Reports*, 9(957), 1-10.
- Ramón, P., Vallejo Silvia, Mothes, P., Andrade, D., Vásquez, F., Yepes, H., . . . Santamaría, S. (2021). Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, the Ecuadorian Seismology and Volcanology Service. *Report Volcanica*.
- Ramsey, M. S., & Harris, A. (2013). Volcanology 2020: How will thermal remote sensing of volcanic surface activity evolve over the next decade? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 217-233. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.05.011
- Rivera, D. R. (2006). *Estudio de las anomalías térmicas en el volcán Cotopaxi en el periodo 2002-2005*. Quito: EPN.
- Rodríguez, D. (2017). *Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Ruiz, G. M., Seward, D., & Winkler, W. (2004). Detrital thermochronology; a new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador. *Basin Research*, 16, 413-430.
- Sahetapy-Engel, S., & Harris, A. J. (2009). Thermal structure and heat loss at the summit crater of an active lava dome. *Bull. Volcanol*, 71, 15-28. doi:10.1007/s00445-008-0204-3
- Salemi, A., & Ruminiski, M. (Diciembre de 2011). *Issuance of Volcanic Ash Advisories: Washington VAAC Perspective*. Obtenido de The SAO/NASA Astrophysics Data System: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011AGUFM.V53E2683S/abstract>
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen, J., & Cotten, J. (2005). Temporal Evolution of Magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Petrology*, 1-28.

- Sánchez, S. (2017). *Sistema de imagen infrarroja para la caracterización in-situ del comportamiento a fuego de materiales compuestos*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Sawyer, G. (2002). *Atmospheric Correction of FLIR Thermal Imagery*. Sicilia: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Spampinato, L., Calvari, S., Oppenheimer, C., & Lodato, L. (2008). Shallow magma transport for the 2002–3 Mt. Etna eruption inferred from thermal infrared surveys. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, *177*, 301–312.
- Spampinato, L., Calvari, S., Oppenheimer, C., & Boschi, E. (2011). Volcano surveillance using infrared cameras. *Earth-Science Reviews*, 63-91. doi:10.1016/j.earscirev.2011.01.003
- Spikings, R. A., Cochrane, R. S., Villagomez, D., Van der Lelij, D., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: from pangaea to the early collision of the caribbean large igneous province (290-75 Ma). *Gondwana Research*, *27*, 95-139.
- Spikings, R. A., Crowhurst, P. V., Winkler, W., & Villagomez, D. (2010). Syn-and post-accretionary cooling history of the Ecuadorian Andes constrained by their in-situ and detrital thermochronometric record. *Journal of South American Earth Sciences*, *30*(3-4), 121-133. doi:https://doi.org/10.1016/j.jsames.2010.04.002
- Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., . . . Van Roozendael, M. (2019). Global monitoring of volcanic SO<sub>2</sub> degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, *9*(2643), 1-10. Obtenido de https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y
- Thomas, H. E., & Watson, I. M. (2010). Observations of volcanic emissions from space: current and future perspectives. *Nat. Hazard*, *54*, 323-354. doi:10.1007/s11069-009-9471-3
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, *15*, 157-171.
- Tschopp, H. J. (1953). Oil explorations in the Oriente of Ecuador. *AAPG Bulletin*, 2303-2347.

- Universidad de Alicante. (s.f.). *Mecanismo de transferencia de calor*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf>
- UPCT. (s.f.). *Servicio de Termografía Infrarroja*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cartagena: <https://www.upct.es/sait/es/servicios/servicio-de-termografia-infrarroja/>
- VAAC Buenos Aires. (s.f.). *Ceniza Volcánica y Aviación*. Recuperado el 03 de Febrero de 2021, de VAAC Buenos Aires: <http://www3.smn.gob.ar/vaac/buenosaires/cenizavolcanica.php?lang=es>
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R., Luzieux, L., Heller, F., & Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. (S. Kay, V. Ramos, & W. Dickinson, Edits.) *Geological Society of America Memoirs*, 204, 197-216.
- Vallejo, S. (2012). *CALIBRATION OF VOLCANIC FLOW SIMULATIONS USING THERMAL IMAGES: THE 4th AND 9th DECEMBER 2010 ERUPTION OF TUNGURAHUA VOLCANO (ECUADOR)*. Université Blaise Pascal.
- Valverde, V. (2014). *Los depósitos de avalanchas de escombros provenientes del volcán Sangay: caracterización petrográfica - geoquímica*. Quito: EPN.
- Valverde, V., Mothes, P., Beate, B., & Bernard, J. (2021). Enormous and far-reaching debris avalanche deposits from Sangay volcano (Ecuador): Multidisciplinary study and modeling the 30 ka sector collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 411.
- Vasconez, F., Ramón, P., Encalada, M., Ortiz, M., Hidalgo, S., Palacios, P., & Bernard, B. (2018). *Informe Especial del Volcán Sangay – 2018 - N° 2 “Continúa el proceso eruptivo”*. Quito: IG-EPN.
- Vollmer, M., & Mollmann, K.-P. (2018). *Infrared thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications* (Segunda ed.). Weinheim: Wiley-VCH.
- Weng, Q. (2013). Introduction to Remote Sensing Systems, Data, and Applications. En Q. Weng, *Remote Sensing of Natural Resources* (págs. 3-20). UK: Taylor & Francis Group: doi:10.1201/b15159-3

- Wright, R. (2016). MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space. *Geological Society*.
- Wright, R., Flynn, L. P., Garbeil, H., Harris, A. J., & Pilger, E. (2004). MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135, 29-49.
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., & Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment. *Tectonics*, 35, 1249–1279. doi:10.1002/2015TC003941
- Zanon, V., Neri, M., & Pecora, E. (2009). Interpretation of data from the monitoring thermal camera: the case of Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy). *Geol. Mag.*, 146, 591-601.

# ANEXOS

**ANEXO 1. Datos de los sobrevuelos y número de imágenes visuales y térmicas.**

Año	Fecha		Altura (m)*	Parámetros de objeto*			N° Imágenes visibles	N° Imágenes térmicas		
	Mes	Día		Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Atmosférica (°C)	Humedad (%)		Totales	Válidas	Usadas para analizar cráter y domos
2003	Marzo	20	6248,4	-10	-5	28	7	18	5	5
	Diciembre	3	6644,64	-10	-8,2	34	10	9	9	5
2004	Octubre	25	6400,8	-10	-9,7	58	11	10	3	3
2005	Marzo	18					0	8	0	0
	Noviembre	16	6400,8	-10	-6,1	9,3	9	21	18	14
2007	Mayo	29	6248,4	-5	-7,4	70	6	31	22	13
	Agosto	1	5943,6	-10	-4	23	16	48	15	11
	Septiembre	17	6248,4	-10	-5,1	17,7	0	34	4	4
	Noviembre	1	6400,8	-5	3,8	40,2	0	19	0	0
	Diciembre	18	6096	-10	1,7	33,1	7	21	8	10
2008	Marzo	1	5913,12	-5	-4,6	57,5	15	51	37	18
	Abril	8	5608,32	-5	-3,2	64,8	15	40	8	4
		17					0	15	0	0
	Agosto	28	6096	-10	-5	34	6	20	17	11
2009	Mayo	8	5791,2	-10	-2,3	48,8	19	58	35	24
	Mayo	28	6248,4	-5	-5,8	47,1	15	44	22	19
	Octubre	16	5638,8	-10	-1,8	44,3	9	24	17	12
	Noviembre	17	6248,4	-5	-3,6	38,4	9	53	46	38
2010	Enero	13	5638,8	-10	-0,5	43	10	50	27	16
	Julio	12	5638,8	-5	-2,8	55,5	5	47	6	6
	Septiembre	4	5943,6	-10	-3,3	45	14	73	43	34
	Noviembre	19	6248,4	-10	-3,3	45	9	90	44	44
2011	Febrero	19	6096	-10	-3,7	39,3	12	50	41	34
	Marzo	18	5943,6	-10	-3	40	10	59	30	28
	Julio	14	6217,92	-10	-6,1	73	17	30	21	17
	Octubre	12	5334	-5	-0,2	48,9	11	30	8	6
	Noviembre	29	5791,2	-5	-2,5	66	5	6	2	0
2012	Abril	13	5638,8	-10	-3,8	59,6	15	52	20	13
2013	Septiembre	20	6096	-10	-3,8	59,6	11	24	8	7
	Noviembre	7	5943,6	-5	4,2	7,4	9	37	22	20
		19	5943,6	-5	-3,1	12,6	11	53	21	21
2014	Diciembre	11	6096	-5	-4,8	45,2	7	29	0	0
2015	Noviembre	5	6096	-10	0	50	6	34	8	8
	Diciembre	3	5961,61	-10	0,2	16,3	13	42	7	6
2016	Octubre	7					0	7	0	0
	Diciembre	21	5961,61	-10	0,2	16,3	8	34	13	11
2017	Junio	8	5961,61	-10	9,7	69,1	8	80	23	21
2018	Abril	12	5961,61	-10	9,7	69,1	6	36	27	17
2019	Agosto	6	5478,7	-10	0,7	2,9	10	10	5	5

\*Estos valores fueron tomados de las hojas de cálculo de los Datos de vuelo. Para los sobrevuelos que no tenían esta hoja, se usó los datos del vuelo anterior.

**ANEXO 2. Distancia calculada para las imágenes térmicas de 2011 a 2019.**

Coordenadas	Cráter Central	Ñuñurco 2	Altura Sangay	5230 m
X	795786,979	795979,722		
Y	9778105,639	9778089,299		

Fecha	Imagen	Coordenadas				Altura (m)	Distancia (m)
		Latitud	Longitud	X	Y		
2011-02-19	138	-2,000	-78,314	798800,686	9778718,426	6096,0	3017,22
	140	-2,005	-78,314	798860,972	9778141,083	6096,0	3009,03
	141	-2,007	-78,314	798843,821	9777866,352	6096,0	3000,45
	155	-2,024	-78,330	797083,621	9776008,432	6096,0	2613,33
	157	-2,026	-78,334	796600,876	9775791,580	6096,0	2601,39
	163	-2,004	-78,323	797796,116	9778264,577	6096,0	2019,89
2011-03-18	274	-2,009	-78,320	798108,682	9777646,221	5943,6	2288,67
	278	-2,023	-78,351	794742,200	9776111,800	5943,6	2361,39
2011-07-14	136	-1,991	-78,315	798655,638	9779640,777	6217,9	3247,09
	137	-2,007	-78,315	798517,305	9777898,209	6217,9	2729,80
	138	-2,011	-78,318	798325,541	9777485,448	6217,9	2616,01
	139	-2,025	-78,333	796695,649	9775879,946	6217,9	2599,11
	144	-2,009	-78,327	797346,252	9777734,179	6217,9	1882,90
	145	-2,019	-78,335	796488,893	9776540,540	6217,9	1979,45
2011-10-12	37	-2,020	-78,317	798427,800	9776528,100	5334,0	3077,89
	49	-1,990	-78,322	797978,600	9779772,800	5334,0	2755,62
2011-11-29	55	-2,023	-78,368	792820,000	9776120,500	5791,2	3613,68
2013-09-20	105	-1,990	-78,323	797833,800	9779771,200	6096,0	2777,32
	106	-2,004	-78,320	798115,200	9778247,700	6096,0	2488,12
	107	-2,006	-78,321	798036,802	9777922,972	6096,0	2238,12
2013-11-07	64	-2,017	-78,293	801176,345	9776829,716	5943,6	5394,50
	86	-1,995	-78,316	798575,200	9779239,200	5943,6	3093,28
	92	-2,029	-78,334	796635,582	9775459,597	5943,6	2868,95
	93	-2,030	-78,336	796366,415	9775382,554	5943,6	2874,05
2013-11-19	63	-2,022	-78,334	796221,275	9776224,275	5943,6	2058,49
	71	-2,019	-78,337	796201,349	9776572,332	5943,6	1741,25
	78	-2,006	-78,326	797490,000	9778071,400	5943,6	1846,80
2015-11-05	94	-1,990	-78,332	796824,554	9779846,614	6096,0	2133,51
	95	-1,993	-78,327	797322,248	9778962,462	6096,0	1820,64
2015-12-03	51	-2,017	-78,303	800038,900	9776826,000	5961,6	4500,17
2016-12-21	32	-2,025	-78,332	796860,851	9775938,688	6310,2	2648,72
2017-06-08	26	-2,002	-78,318	798340,200	9778508,900	6033,5	2706,87
	57	-1,986	-78,332	796763,919	9780215,583	6289,9	2501,89
2018-04-12	57	-1,977	-78,324	797651,303	9779351,025	6466,2	2431,94
	59	-1,997	-78,319	798257,600	9779082,700	6425,9	2913,55
	60	-2,031	-78,321	798018,749	9777117,109	6390,8	2702,86
	62	-2,024	-78,328	797239,607	9776067,158	6365,1	2748,45
	64	-2,026	-78,331	796968,380	9775866,587	6349,6	2768,13
2019-08-06	80	-1,995	-78,317	798534,280	9779200,235	6075,6	2911,18
	7	-2,005	-78,327	797415,600	9778196,900	5475,8	1649,59
	8	-2,016	-78,331	796946,000	9776921,500	5478,7	1536,01
	9	-2,019	-78,333	796735,800	9776634,200	5474,0	1767,75

**ANEXO 3. Ficha técnica de las cámaras térmicas e higrómetro.**

**THERMACAM PM 695**

**THERMACAM PM 695 TECHNICAL SPECIFICATIONS**

**IMAGING PERFORMANCE**

<b>THERMAL</b>	
Field of view/min focus distance	24°x18° /0.5m
Spatial resolution (IFOV)	1.3 mrad
Thermal sensitivity	0.08°C at 30°C
Image frequency	50/60 Hz non-interlaced
Electronic zoom function	4X continuous
Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5 to 13µm
Digital image enhancement	Standard
<b>VISUAL</b>	
Built-in digital video	640 x 480 pixels, full color

**IMAGE PRESENTATION**

Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video
Viewfinder	Built-in, high-resolution color LCD (TFT), optional LCD panel

**MEASUREMENT**

Temperature range	-40°C to +120°C (-40°F to +248°F), Range 1 0°C to +500°C (+32°F to +932°C), Range 2 Up to +1500°C (2732°F), optional Up to +2000°C (3632°F), optional
Measurement modes	Spot (up to 5), area (up to 5), isotherm, line profile, Delta T
Accuracy	±2°C, ±2%
Atmospheric transmission correction	Automatic, based on inputs for distance, atmospheric temperature and relative humidity
Optics transmission correction	Automatic, based on signals from internal sensors
Automatic emissivity correction	Variable from 0.1 to 1.0 or select from listings in pre-defined materials list

**IMAGE STORAGE**

Type	High capacity PC-Card, ATA compatible (160MB min)
File formats - THERMAL	14-bit radiometric IR digital image (IMG), includes header file with all radiometric data 8-bit standard bitmap (BMP), image only or image w/screen graphics Every image stored in both formats
File formats - VISUAL	Standard bitmap (BMP); visual images(s) linked with corresponding thermal images(s)
Voice annotation of images	30 sec. of digital voice "clip" stored together with the image
Text annotation of images	Prefined and field-editable text selected and stored with image. Up to 12 text fields/image

**LENSES (OPTIONAL)**

Field of view/min focus distance	3x telescope (7°x 5.3°/6m) 2x telescope (12° x 9° / 2m) 0.5x wide angle (45°x 34°/0.3m) 0.3x wide angle (80°x 60°/0.2m) 200 µm resolution close-up lens (64mm x 48mm /150mm) 100 µm resolution close-up lens (32mm x 24mm /80mm)
Lens identification	Automatic

**BATTERY SYSTEM**

Type	Internal rechargeable nickel metal hydride (NIMH) battery, field replaceable
Operating time	2 hours continuous operation
Charging system	4 bay intelligent charger 110/240 VAC, 50/60 Hz, autosensing
Charging time	1 hour
AC Adapter	Included

**ENVIRONMENTAL SPECIFICATION**

Operating temperature range	-15°C to +50°C (5°F to 122°F)
Storage temperature range	-40°C to +70°C (-40°F to 158°F)
Humidity	Operating and storage 10% to 95%, non-condensing
Encapsulation	IP 54 IEC 359 (metal casing)
Shock	Operational: 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational: 2G, IEC 68-2-6

**PHYSICAL CHARACTERISTICS**

Weight	2.0 kg (4.4lbs.), excluding battery, 2.4 kg (5.3 lbs.), including battery
Size	220mm x 133mm x 140mm (8.7"x5.2"x5.5")
Tripod mounting	1/4" - 20

**INTERFACE**

Remote-control options	Remote focus (standard), RS-232 (standard) Remote control panel (optional)
------------------------	---



*The ThermoCAM PM 695 is the first IR predictive maintenance camera to provide both thermal and visual imaging in one system.*



**FLIR SYSTEMS, BOSTON**  
USA Thermography Center  
16 Esquire Road  
North Billerica, MA 01862 USA  
Telephone: +1 (978) 901-8000  
Toll Free: +1 (800) GO-INFRA

**FLIR SYSTEMS, AB**  
Worldwide Thermography Center  
Rinkebyvagen 19  
SE-182 11  
Danderyd, SWEDEN  
Telephone: +46 (0) 8 753 25 00

**FLIR SYSTEMS, LTD**  
UNITED KINGDOM  
Telephone: +44 (0) 1732 220 011

**FLIR SYSTEMS**  
BELGIUM  
Telephone: +32 (0) 3 287 87 10

**FLIR SYSTEMS, GMBH**  
GERMANY  
Telephone: +49 (0) 69 95 00 900

**FLIR SYSTEMS, SARL**  
FRANCE  
Telephone: +33 (0) 1 41 33 97 97

**FLIR SYSTEMS, SRL**  
ITALY  
Telephone: +39 (0) 2 39 09 121

**FLIR SYSTEMS LTD**  
CANADA  
Telephone: +1 800 613 0507

**FLIR SYSTEMS COMPANY, LTD**  
HONG KONG  
Telephone: +852 2792 8955

**1 (800) GO INFRA**  
**www.flir.com/pm695**

**I101000PL** SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE ©Copyright 2000, FLIR Systems, Inc. All other brand and product names are trademarks of their respective owners.

(FLIR SYSTEM, 2000)

# FLIR SC660 Technical Specifications

<b>Imaging and optical data</b>		<b>Camera includes:</b>	
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	24° × 18° / 0.3 m	Hard transport case	
Spatial resolution (IFOV)	0.65 mrad	Infrared camera with lens	
Thermal sensitivity / NETD	<30 mK @ +30°C	Battery (2 ea., one inserted in camera, one outside camera)	
Image frequency	30 Hz (60/120 Hz with windowing)	Battery charger	
Focus	Automatic (one shot or follow the laserspot) or manual (electric or on the lens)	Calibration certificate	
Zoom	1–8× continuous, digital zoom, including panning	FLIR QuickReport™ PC software CD-ROM	
Focal Plane Array (FPA) / Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5–13 μm	FireWire cable, 4/6	
IR resolution	640 × 480 pixels	FireWire cable, 6/6	
<b>Image presentation</b>		Headset	
Display	Built-in widescreen, 5.6 in. LCD, 1024 × 600 pixels	Lens cap (mounted on lens)	
Viewfinder	Built-in, tiltable LCD, 800 × 600 pixels	Lens cap (2 ea.)	
Automatic image adjustment	Continuous / manual; linear or histogram based	Mains cable	
Manual image adjustment	Level/span / max / min	Memory card-to-USB adapter	
Contrast optimization	Automatic, adjustable DDE	Memory card with adapter	
Image modes	IR-image, visual image, thermal fusion, picture in picture, thumbnail gallery	Power supply	
Reference image	Shown together with live IR image	Printed Getting Started Guide	
<b>Measurement</b>		Shoulder strap	
Temperature range	–40°C to +1500°C	USB cable	
Accuracy	±1°C or ±1% of reading for limited temperature range, ±2°C or ±2% of reading	User documentation CD-ROM	
<b>Measurement analysis</b>		Video cable	
Spotmeter	10	Warranty extension card or Registration card	
Area	5 boxes or circles with max. / min. / average	<b>Supplies &amp; Accessories</b>	
Automatic hot / cold detection	Max / Min temp. value and position shown within box, circle or on a line	Close-up IR lens 0.5X, f = 75 mm (fits 24° IR lens) for ThermoCAM and FLIR 600 series	
Isotherm	2 with above / below / interval	IR lens f = 76 mm, 12°, incl. case for FLIR 600 series	
Profile	1 live line (horizontal or vertical)	IR lens, f = 131 mm, 7°, incl. case for FLIR 600 series	
Difference temperature	Delta temperature between measurement functions or reference temperature	IR lens f = 19 mm, 45°, incl. case for FLIR 600 series	
Reference temperature	Manually set or captured from any measurement function	IR lens f = 38 mm, 24°, incl. case for FLIR 600 series	
Emissivity correction	Variable from 0.01 to 1.0 or selected from editable materials list	Macro lens 1x (25 μm) with case	
Measurement corrections	Reflected temperature, optics transmission, atmospheric transmission and external optics	High temperature option +2000°C	
Measurement function alarm	Audible/visual alarms (above / below) on any selected measurement function	High temperature option +1500°C	
Humidity alarm	1 humidity alarm, including dew point alarm	Battery	
Insulation alarm	1 insulation alarm	Battery charger, incl. power supply and cable	
<b>Set-up</b>		Battery charger, incl. power supply and cable	
Set-up commands	Configurable measurement tools menu; configure information to be shown in image; 2 Programmable buttons; user profiles; local adaptation of units, language, date and time formats	Battery charger, incl. power supply and cable	
<b>Storage of images</b>		Battery charger, incl. power supply with multi plugs	
Image storage	Standard JPEG, including measurement data, on memory card	Power supply, incl. multi plugs	
Image storage mode	Built-in RAM for burst recording	SD memory card, 1 GB	
Image storage mode	IR / visual images; simultaneous storage of IR and visual images	Adapter, SD memory card to USB	
Image storage mode	Visual image is automatically associated with corresponding IR image	Memory card micro-SD with adapters	
Periodic image storage	Every 10 seconds up to 24 hours	USB cable Std A <-> Mini-B, 2 m	
Panorama	For creating panorama images in FLIR Reporter Building software	FireWire cable 6/6, 2.0 m	
<b>Image annotations</b>		FireWire cable 4/6, 2.0 m	
Voice	60 seconds stored with the image	Video cable, RCA <-> RCA, 2.0 m	
Text	Predefined text or free text from PDA (via IrDA) stored with the image	Cigarette lighter adapter kit, 12 VDC, 1.2 m	
Image marker	4 on IR or visual image	Hard transport case for FLIR B/P/SC640	
GPS	Location data automatically added to every image from built-in GPS	Headset, 3.5 mm plug	
<b>Video recording and streaming</b>		Remote Control Unit	
Radiometric IR-video recording	Real-time to built-in RAM, transferable to memory card.	FLIR Reporter Ver. 8.3 Professional (Sec. device)	
Radiometric IR-video streaming	Real-time full dynamic to PC using FireWire 30 Hz or 60/120 Hz with windowing using FLIR ResearchIR	FLIR Reporter Ver. 8.3 Professional	
Non-radiometric IR-video recording	MPEG-4 to memory card	FLIR Reporter Ver. 8.3 Standard (Sec. device)	
Non-radiometric IR-video streaming	MPEG-4 to PC using USB or WLAN (optional)	FLIR Reporter Ver. 8.3 Standard	
<b>Digital camera</b>		FLIR BuildIR	
Built-in digital camera	3.2 Mpixel, auto focus, and video lamp	FLIR Reporter Ver. 8.5 Standard	
<b>Laser pointer</b>		FLIR Reporter Ver. 8.5 Professional	
Laser	Activated by dedicated button	FLIR Reporter Ver. 8.5 Professional	
Laser mode	Auto Focus/Level/Spotmeter	Cover Visual Camera mkII	
Laser alignment	Position is automatic displayed on the IR image		
<b>Data communication interfaces</b>			
Interfaces	USB-mini, USB-A, IrDA, composite video, headset connection		
<b>Power system</b>			
Battery	Li Ion, 3 hours operating time		
Charging system	In camera (AC adapter or 12 V from a vehicle) or 2-bay charger		
Power management	Automatic shutdown and sleep mode (user selectable)		
<b>Environmental data</b>			
Operating temperature range	–15°C to +50°C		
Storage temperature range	–40°C to +70°C		
Humidity (operating and storage)	IEC 68-2-30/24 h 95% relative humidity +25°C to +40°C		
Encapsulation	IP 54 (IEC 60529)		
Bump	25 g (IEC 60068-2-29)		
Vibration	2 g (IEC 60068-2-6)		
<b>Physical data</b>			
Camera weight, incl. lens and battery	1.8 kg		
Cameras size, incl. lens (L × W × H)	299 × 144 × 147 mm		
Tripod mounting	UNC ¼"-20		



Optional software for R&D requirements



Asia Pacific Headquarter  
 Hong Kong  
 FLIR Systems Co Ltd.  
 Room 1613 – 16, Tower 2 Grand Central Plaza  
 138 Shatin Rural Committee Road, N.T, Hong Kong  
 Tel: +852 2792 8955 Fax: +852 2792 8952  
 Email: flir@flir.com.hk Web: www.flir.com/hkg



100319 SC660 datasheet\_en

Specifications and prices subject to change without notice. Copyright © 2009 FLIR Systems. All right reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form.

(FLIR SYSTEM, 2009)

## TERMO-HIGRÓMETRO TESTO 625

Sonda flexible

Funciones: HOLD/MAX/MIN

Mediciones de Humedad Relativa: 5 a 95%

Características	
Sensor de humedad relativa:	5.0 ... 95.0 %RH Exactitud: +/-3.0 %RH (5.0 ... 95.0 %RH) Resolución: +/-0.1 %RH (5.0 ... 95.0 %RH)
Sensor de humedad Punto de rocío:	-20.0 ... 50.0 °C td
Sensor de Temperatura NTC:	-10.0 ... 60.0 °C Exactitud: +/-0.5 °C (-10.0 ... 60.0 °C) Resolución: +/-0.1 °C (-10.0 ... 60.0 °C)
Pantalla:	LCD, 2 líneas
Temperatura almacenamiento:	-20.0...70.0 °C
Temperatura funcionamiento:	0.0...50.0 °C
Tipo de pila:	Alcalina manganeso
Vida de la pila:	100.0 h
Peso:	300 g
Medidas:	57.0 x 190.0 x 42.0 mm

(Infoagro Systems, 2020)

# ANEXO 4. Análisis morfológico del Cráter Central y Domos Ñuñurco

## ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL CRÁTER CENTRAL

<b>LEYENDA:</b> Imagen en rango visible e infrarrojo	Imagen en rango visible e infrarrojo	Imagen en rango visible e infrarrojo	Imagen en rango visible e infrarrojo
	<ul style="list-style-type: none"> <li> Borde del Cráter Central</li> <li> Borde del cono del Cráter Central</li> <li> Domo del Cráter Central</li> <li> Flujo de lava</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Vento del cráter</li> <li> Balísticos</li> <li> Deslizamiento interno</li> <li> Deslizamiento externo</li> <li> Cráter Central SSE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> CNE</li> <li> CW</li> <li> DN</li> </ul>

IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	MORFOLOGÍA				DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
	FORMA	PARED EXTERNA	PARED INTERNA	DOMO DE LAVA	
<b>2003 03 20</b> 	Subcircular, asimétrico  Cono truncado	Escarpada, abierta en el SE	Escarpada	Forma subcircular. Superficie irregular	Cráter subredondeado abierto en el SE Actividad: efusiva Producto volcánico: domo de lava, flujo de lava
<b>2003 12 03</b> 	Subcircular, asimétrico  Cono truncado	Escarpada, irregular, abierta en el SSE	Escarpada, poco profunda	Forma irregular. Superficie irregular, depresión en el centro Paredes laterales (talus) subverticales	Las paredes internas son menos profundas debido a la presencia del domo de lava Actividad: efusiva Producto volcánico: domo de lava, flujo de lava Emisión de gases en el borde NE y SW del cráter
<b>2004 10 25</b> 	Subcircular, asimétrico  Cono truncado	Escarpada, abierta en el SSE		Forma irregular.	Actividad: efusiva Producto volcánico: domo de lava, flujo de lava. Emisión de gases en el interior del cráter
<b>2005 11 16</b> 	Ovalada  Cono truncado asimétrico	Escarpada en el N y W, menor pendiente al SE	Baja pendiente, irregular	Forma subcircular, superficie irregular	Cráter cerrado de forma ovalada, con desnivel: el borde NW se encuentra a mayor altitud que el SE. Actividad: efusiva Producto volcánico: domo de lava, flujo de lava
<b>2007 05 29</b> 	Ovalada  Cono truncado	Escarpada, irregular en el S. Deslizamiento en el SSE	Escarpada, con deslizamientos en el N del cráter		Cráter de forma ovalada, con paredes internas escarpadas y con deslizamientos en el lado norte. Deslizamiento externo cerca del borde Actividad: explosiva Producto volcánico: ceniza gris clara al interior del cráter Emisión de gases en las paredes internas y externas del cráter

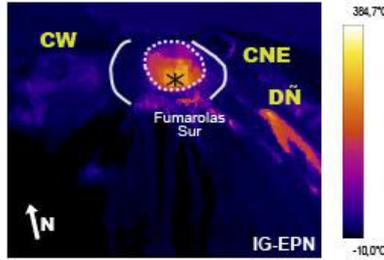
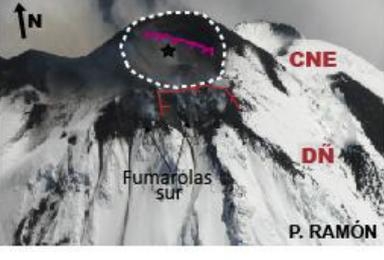
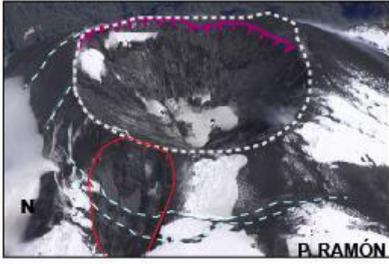
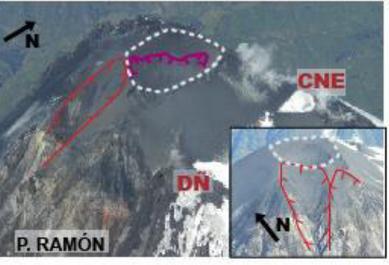
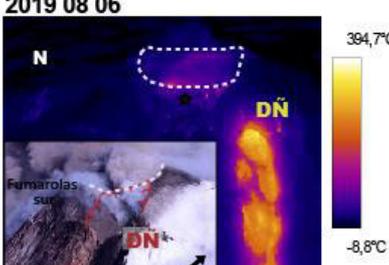
IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	MORFOLOGÍA					DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
	FORMA	PARED EXTERNA	PARED INTERNA	DOMO DE LAVA	CRÁTER INTERNO	
<p>2007 08 01</p> 	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada, deslizamiento en el SSE</p>	<p>Escarpada</p>			<p>Cráter de forma circular, con paredes internas y externas escarpadas. Deslizamiento externo en el sur</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Emisión de gases al interior y exterior del cráter</p>
<p>2007 09 17</p> 	<p>Circular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada, irregular en el S</p>	<p>Escarpada</p>			<p>Cráter de forma circular, con paredes internas escarpadas, y el interior de base amplia</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Incandescencia en el interior del cráter y pared externa sur.</p>
<p>2007 12 18</p> 	<p>Circular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada, formación de dos escarpes en la pared sur</p>	<p>Escarpada</p>			<p>Cráter de forma circular, con paredes internas escarpadas, y pared externa sur irregular, con dos zonas de deslizamientos</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Emisión de ceniza.</p> <p>Fumarolas de tonos azules en la pared externa sur</p>
<p>2008 03 01</p> 	<p>Circular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada, irregular en el S</p>	<p>Escarpada, con deslizamientos en el N del cráter</p>			<p>Cráter de forma circular, con paredes internas escarpadas y deslizamientos internos en el lado norte y externos en el sur</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Emisión de gases en las paredes internas y externas del cráter.</p> <p>Emisión de ceniza</p>
<p>2008 04 08</p> 	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Irregular en el S</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido. Colapso en el N</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas muy escarpadas, formando un cono invertido. Deslizamiento en la pared interna N y en la pared externa sur</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Emisión de gases en el exterior del cráter</p>
<p>2008 08 28</p> 	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Dos escarpes en el sur: SW y SSE</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido. Deslizamiento en el NE</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas. Presenta con un deslizamiento interno más amplio. Dos escarpes en el flanco sur</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos en el interior</p> <p>Acumulación de material piroclástico en el interior.</p> <p>Emisión de gases en la pared externa S</p>

IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	MORFOLOGÍA					DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
	FORMA	PARED EXTERNA	PARED INTERNA	DOMO DE LAVA	CRÁTER INTERNO	
<p><b>2009 05 08</b></p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada</p> <p>Deslizamiento en el S</p>	<p>Escarpada.</p> <p>Dos deslizamientos irregulares</p>			<p>Cráter de forma subcircular, de superficie interna amplia.</p> <p>Deslizamientos en el interior, uno cerca del borde del cráter y otro más interno en el SW. Escarpe en la pared externa</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos en el interior</p> <p>Emisión de gases en el interior y exterior del cráter</p>
<p><b>2009 05 28</b></p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada</p> <p>Deslizamiento en el S</p>	<p>Poco escarpada.</p> <p>Deslizamiento subcircular</p>			<p>Cráter de forma subcircular con paredes internas poco escarpadas y un deslizamiento interno que provoca que la pendiente incremente.</p> <p>Escarpe en la pared externa</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos, ceniza blanca al interior del cráter</p> <p>Emisión de gases en el interior y exterior del cráter</p>
<p><b>2009 10 16</b></p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Deslizamientos hacia el flanco sur</p>	<p>Mayor pendiente.</p> <p>Deslizamiento subcircular</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas con una mayor pendiente y una superficie interna amplia, y con deslizamientos en paredes internas y externas</p> <p>Actividad: ninguna</p>
<p><b>2009 11 17</b></p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado asimétrico</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter.</p> <p>Escarpada y con dos escarpes hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, escarpes múltiples en el lado NE</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas formando un cono invertido</p> <p>Dos escarpes en el flanco sur que aumentan la pendiente de esta pared</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Emisión de ceniza.</p> <p>Emisión de gases en la pared externa S</p>
<p><b>2010 01 13</b></p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter.</p> <p>Escarpada y con dos escarpes hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas escarpadas, y un deslizamiento en el interior.</p> <p>Deslizamientos externos en el flanco sur</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos y ceniza blanca al interior del cráter</p>
<p><b>2010 07 12</b></p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada, irregular en el S</p>	<p>Escarpada</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas y externas escarpadas</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Emisión de gases al interior y exterior del cráter</p>

IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	MORFOLOGÍA					DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
	FORMA	PARED EXTERNA	PARED INTERNA	DOMO DE LAVA	CRÁTER INTERNO	
<p>2010 09 04</p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter. Deslizamientos hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en el N</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas escarpadas, y deslizamientos en el interior y exterior</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos y ceniza en las paredes internas y externas.</p> <p>Emisión de gases en la pared externa S</p>
<p>2010 11 19</p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter. Escarpada y con los dos escarpes hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en el N</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas escarpadas, y un deslizamiento en el interior y dos escarpes en el exterior</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos en las paredes internas y ceniza en pared interna y externa.</p> <p>Emisión de ceniza</p> <p>Fumarolas en NE</p>
<p>2011 02 19</p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter. Escarpada y con dos escarpes hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en el N</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas escarpadas, y deslizamientos en el interior y exterior</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Producto volcánico: balísticos y ceniza gris clara en las paredes internas y externas</p> <p>Emisión de gases en el S y NE</p>
<p>2011 03 18</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter. Escarpada y con dos escarpes hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en el NW</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas formando un cono invertido, con deslizamientos en el interior y exterior</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Productos volcánicos: balísticos en las paredes internas, y ceniza gris clara al interior y exterior</p> <p>Ligera emisión de gases en la pared externa S</p>
<p>2011 07 14</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de menor pendiente cerca del borde del cráter. Escarpada y con escarpes hacia el flanco sur</p>	<p>Baja pendiente</p>		<p>Subcircular, con acumulación de material volcánico en el centro</p>	<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas menos escarpadas. Presencia de un cráter interno subcircular con paredes de mayor pendiente. Escarpes en el exterior</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Productos volcánicos: balísticos y ceniza gris clara en las paredes internas.</p> <p>Acumulación de material volcánico en el interior del cráter</p>
<p>2011 10 12</p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de baja pendiente cerca del borde del cráter. Escarpada hacia el flanco sur</p>	<p>Poco escarpada, deslizamiento en el centro que causan mayor pendiente</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas poco escarpadas. Deslizamiento en paredes internas, causando mayores pendientes hacia el interior del cráter</p> <p>Actividad: explosiva</p> <p>Productos volcánicos: balísticos y ceniza gris clara en las paredes internas.</p> <p>Leve emisión de gases al S y NE</p>

IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	MORFOLOGÍA					DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
	FORMA	PARED EXTERNA	PARED INTERNA	DOMO DE LAVA	CRÁTER INTERNO	
<p>2012 04 13</p>	<p>Ovalada</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Regular y de baja pendiente cerca del borde del cráter. Escarpada hacia el flanco sur</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en el centro</p>			<p>Cráter de forma ovalada, con paredes internas escarpadas. Deslizamiento circular en el interior del cráter Actividad: explosiva Productos volcánicos: balísticos y ceniza gris clara en el interior y exterior del cráter</p>
<p>2013 09 20</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpada, irregular hacia el flanco S</p>	<p>Baja pendiente, deslizamiento en el E</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas de baja pendientes y deslizamiento interno en el E Actividad: ninguna</p>
<p>2013 11 07</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Cuatro escarpes en el sur. Uno de ellos migra hacia el borde del cráter</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en N y E</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas y deslizamientos el interior (N y E). Pared externa con cuatro escarpes y uno de ellos inicia desde el borde SW del cráter Actividad: ninguna</p>
<p>2013 11 19</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Escarpes en el sur. Uno de ellos migra hacia el borde del cráter</p>	<p>Escarpada formando un cono invertido, deslizamiento en el NE y S</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con deslizamientos en las paredes internas (NE y S) y externas sur.</p>
<p>2014 12 11</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Cuatro escarpes en el sur. Uno de ellos migra hacia el borde del cráter</p>	<p>Escarpada, deslizamiento en el SSE</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con deslizamientos la pared interna SSE y en la pared externa sur Actividad: ninguna</p>
<p>2015 11 05</p>	<p>Subcircular</p> <p>Cono truncado</p>	<p>Profundización del escarpe que inicia en el borde del cráter</p>	<p>Escarpada</p>			<p>Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas. Escarpe SW más profundizado en la pared externa Actividad: ninguna</p>

IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	MORFOLOGÍA					DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
	FORMA	PARED EXTERNA	PARED INTERNA	DOMO DE LAVA	CRÁTER INTERNO	
<b>2015 12 03</b> 	Subcircular  Cono truncado	Profundización del escarpe que inicia en el borde del cráter	Escarpada, colapso en el N			Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas. Deslizamiento en el interior del cráter, y colapso SSW de la pared externa más profundo. Lineaciones en la pared externa del cráter. Actividad: ninguna
<b>2016 12 21</b> 	Subcircular  Cono truncado	Escarpes del SW más amplio, profundo y extenso	Escarpada, deslizamiento NW-SW			Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas. Deslizamiento en el interior del cráter en el NW, y escarpe externo SW más grande y profundo. Escarpe SSE no profundo Actividad: ninguna
<b>2017 06 28</b> 	Subcircular  Cono truncado	Escarpada Deslizamiento SSW en forma de valle	Escarpada en forma de cono invertido			Cráter de forma subcircular, con paredes internas escarpadas y Escarpe externo SW profundo Actividad: ninguna
<b>2018 04 12</b> 	Cuadrado redondeado  Cono truncado asimétrico	Escarpada. Escarpes amplios hacia el flanco S.	Escarpada, deslizamiento en el N			Cráter más amplio y de forma de un cuadrado redondeado, con paredes internas con fuertes deslizamientos, desde el borde N. Deslizamientos externos más amplios Actividad: ninguna
<b>2019 08 06</b> 	Ovalada  Cono truncado	Deslizamiento en el SE, que se extiende hasta el domo suroriental	Escarpada			Cráter ovalado con paredes internas y externas escarpadas. Deslizamientos en la pared externa SE. Actividad: explosiva Producto volcánicos: balísticos en el lado sur de la pared externa. Emisión de ceniza Emisión de gases hacia el sur

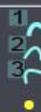
## ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LOS DOMOS ÑUÑURCO

### LEYENDA:

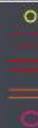
Imagen en rango visible e infrarrojo

Imagen en rango visible e infrarrojo

Imagen en rango visible infrarrojo



Domo Ñuñurco 1  
Domo Ñuñurco 2  
Domo Ñuñurco 3  
Vento del domo



Vento del domo  
Flujo de lava reciente del Domo Ñuñurco 1  
Flujo de lava reciente del Domo Ñuñurco 2  
Flujo de lava reciente del Domo Ñuñurco 3  
Deslizamiento del domo



CNE Cráter Noreste  
CW Cráter Occidental  
CC Cráter Central

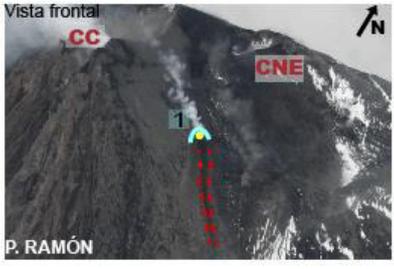
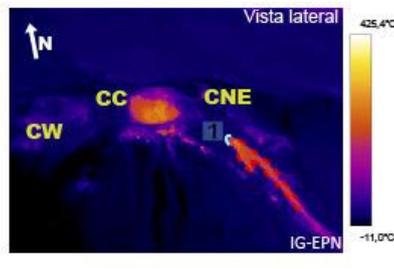
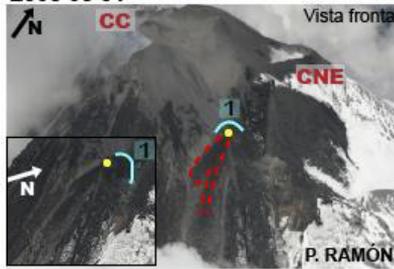
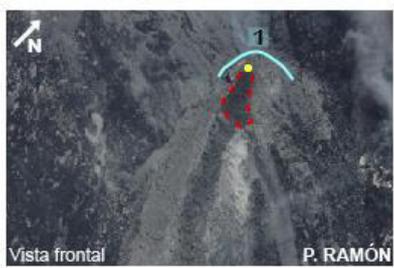
IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	DOMO	MORFOLOGÍA			DIRECCIÓN DEL FLUJO DE LAVA	DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
		FORMA	TAMAÑO	COLAPSO		
<b>2007 05 29</b> Vista frontal  P. RAMÓN	1	Hemisférica	Poco prominente, angosto		Sureste	Domo de forma hemisférica, poco prominente. Actividad: activo con flujo de lava con dirección sureste
<b>2007 08 01</b> Vista frontal  Vista lateral P. RAMÓN	1	Hemisférica	Poco prominente, angosto		Sureste	Domo de forma hemisférica, poco prominente. Actividad: activo con flujo de lava con dirección sureste
<b>2007 09 17</b> Vista lateral  IG-EPN	1	Hemisférica	Poco prominente		Sur y sur-sureste	Domo de forma hemisférica, poco prominente. Actividad: activo con flujo de lava con dos direcciones, hacia el sur y al sur-sureste
<b>2008 03 01</b> Vista frontal  P. RAMÓN	1	Hemisférica	Prominente, ancho		Sur y sur-sureste	Domo de forma hemisférica más prominente y ancho que fechas anteriores. Actividad: activo con flujo de lava con dos direcciones, hacia el sur y al sur-sureste
<b>2008 04 08</b> Vista frontal  P. RAMÓN	1	Hemisférica	Prominente, ancho		Sur-sureste	Domo de forma hemisférica prominente y ancho. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur-sureste

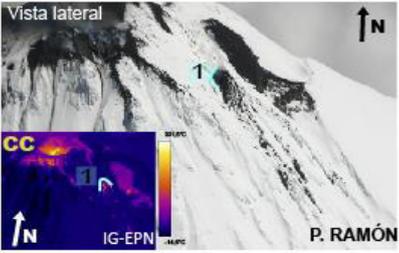
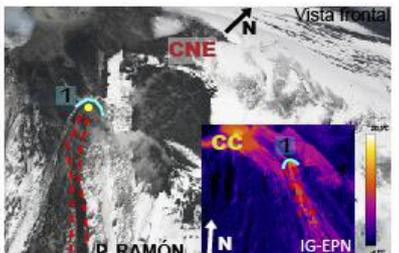
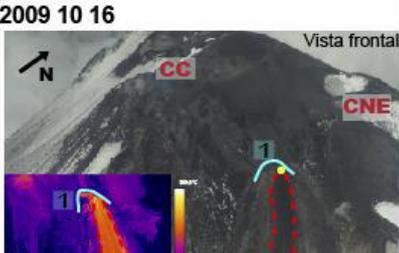
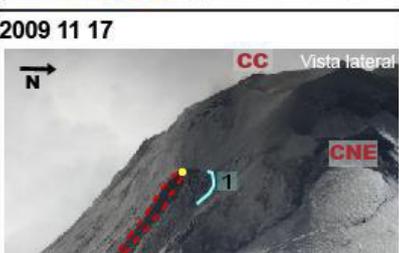
IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	DOMO	MORFOLOGÍA			DIRECCIÓN DEL FLUJO DE LAVA	DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
		FORMA	TAMAÑO	COLAPSO		
<b>2008 08 28</b> Vista lateral 	1	Hemisférica	Prominente			Domo de forma hemisférica prominente. Actividad: inactivo Emisión de gases
<b>2009 05 08</b> Vista frontal 	1	Hemisférica	Prominente, ancho		Sur-sureste	Domo de forma hemisférica ancha y prominente. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur-sureste
<b>2009 05 28</b> Vista frontal 	1	Hemisférica	Prominente, ancho		Este	Domo de forma hemisférica ancha y prominente. Actividad: activo con flujo de lava hacia el este
<b>2009 10 16</b> Vista frontal 	1	Hemisférica	Prominente, muy ancho		Sureste	Domo de forma hemisférica prominente y más ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste
<b>2009 11 17</b> Vista lateral 	1	Hemisférica	Prominente, muy ancho		Sureste	Domo de forma hemisférica prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste
<b>2010 01 13</b> Vista lateral 	1	Hemisférica	Prominente, muy ancho		Sureste	Domo de forma hemisférica prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste

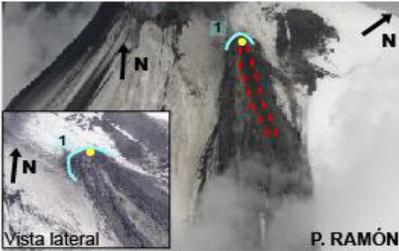
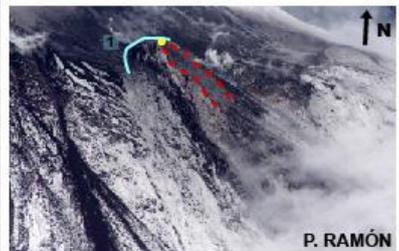
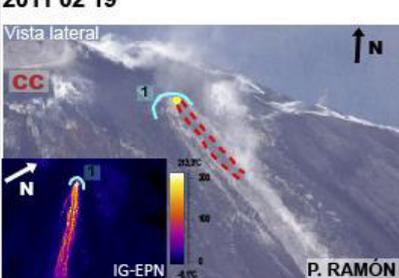
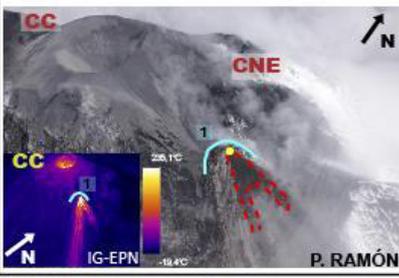
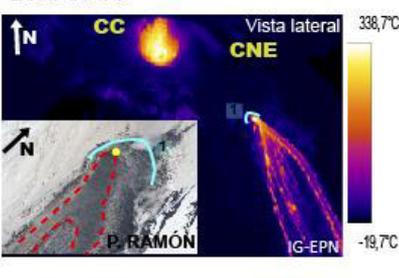
IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	DOMO	MORFOLOGÍA			DIRECCIÓN DEL FLUJO DE LAVA	DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
		FORMA	TAMAÑO	COLAPSO		
<p>2010 09 04</p> 	1	Hemisférica	Prominente, muy ancho		Sureste	Domo de forma hemisférica prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste
<p>2010 11 19</p> 		Hemisférica	Muy prominente, muy ancho		Sureste	Domo de forma hemisférica más prominente y ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste.
<p>2011 02 19</p> 	1	Hemisférica	Muy prominente, muy ancho		Sureste	Domo de forma hemisférica más prominente y ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste. Máxima temperatura alcanzada por el domo: 363 °C
<p>2011 03 18</p> 	1	Hemisférica	Muy prominente, muy ancho		Sureste y este	Domo de forma hemisférica muy prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste y este
<p>2011 07 14</p> 	1	Hemisférica	Muy prominente, muy ancho		Sureste y este	Domo de forma hemisférica muy prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste y sur-sureste
<p>2011 10 12</p> 	1	Semielipsoide	Muy prominente, muy ancho		Sureste y sur-sureste	Domo de forma hemisférica muy prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sureste y sur-sureste

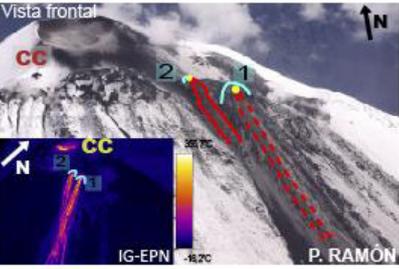
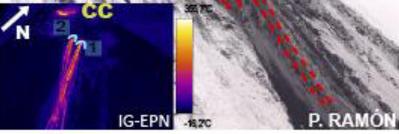
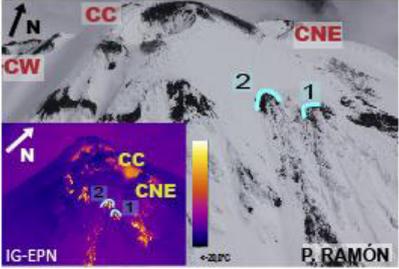
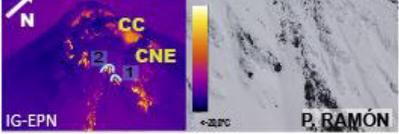
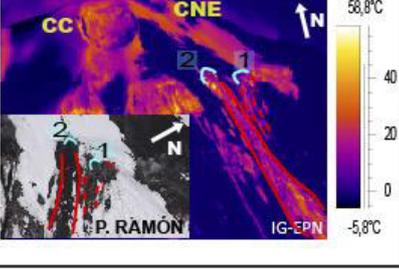
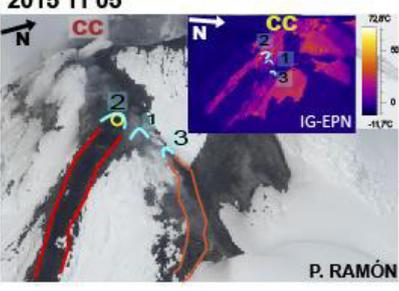
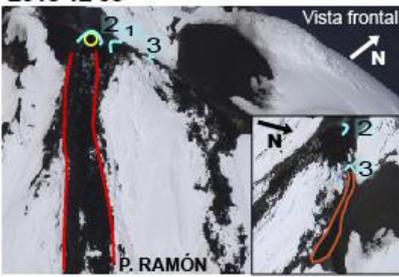
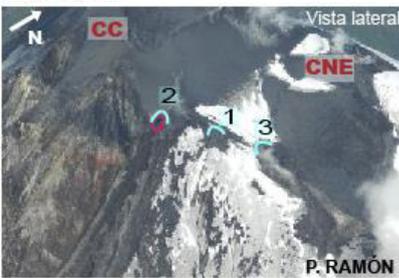
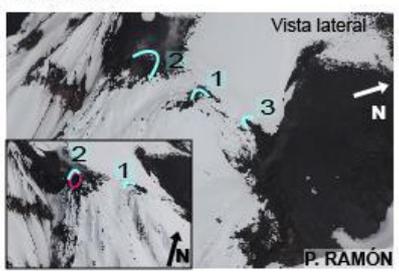
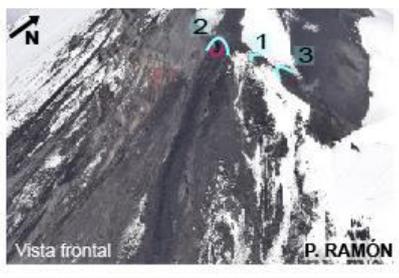
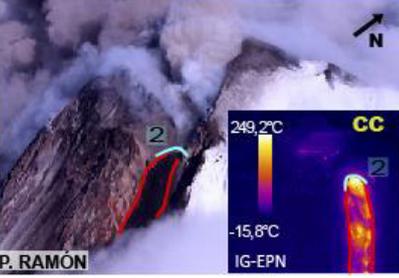
IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	DOMO	MORFOLOGÍA			DIRECCIÓN DEL FLUJO DE LAVA	DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
		FORMA	TAMAÑO	COLAPSO		
<b>2012 04 13</b> Vista frontal 	1	Hemisférica	Muy prominente, muy ancho		Sur	Domo de forma hemisférica muy prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur
	2	Hemisférica	Poco prominente, angosto		Sur	Domo de forma hemisférica poco prominente y angosta. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur
<b>2013 09 20</b> 	1	Hemisférica	Prominente, muy ancho			Domo de forma hemisférica prominente y muy ancha. Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto			Domo de forma hemisférica prominente y angosta. Actividad: inactivo
<b>2013 11 07</b> 	1	Hemisférica, superficie irregular	Poco prominente, muy ancho		Sur	Domo de forma hemisférica prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur Emisión de gases
	2	Hemisférica	Prominente, angosto		Sur	Domo de forma hemisférica prominente y angosta. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur
<b>2013 11 19</b> 	1	Hemisférica, superficie irregular	Poco prominente, muy ancho		Sur	Domo de forma hemisférica prominente y muy ancha. Actividad: activo con flujo de lava hacia el su Emisión de gases
	2	Hemisférica	Prominente, angosto		Sur	Domo de forma hemisférica prominente y angosta. Actividad: activo con flujo de lava hacia el sur
<b>2014 12 11</b> 	1	Hemisférica, superficie irregular	Poco prominente, muy ancho		Sur	Domo de forma hemisférica, poco prominente y muy ancho Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto		Sureste	Domo de forma hemisférica, prominente y angosto. Actividad: flujo de lava al SE
	3	"U" invertida	No prominente, pequeño		Este	Domo pequeño en forma de "U" invertida de bajo relieve. Actividad: activo con flujo de lava hacia el este
<b>2015 11 05</b> 	1	Aplanado, superficie irregular	No prominente, pequeño			Domo de forma aplanada poco prominente. Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto		Sur	Domo de forma hemisférica, prominente y angosto, con viento abierto Actividad: flujo de lava al sur
	3	"U" invertida	No prominente, pequeño		Este	Domo pequeño en forma de "U" invertida de bajo relieve. Actividad: activo con flujo de lava más extenso hacia el este

IMAGEN EN RANGO VISIBLE O INFRARROJO	DOMO	MORFOLOGÍA			DIRECCIÓN DEL FLUJO DE LAVA	DESCRIPCIÓN/ ACTIVIDAD
		FORMA	TAMAÑO	COLAPSO		
<b>2015 12 03</b> 	1	Aplanado, superficie irregular	No prominente, pequeño			Domo de forma aplanada poco prominente. Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto		Sur	Domo de forma hemisférica, prominente y angosto, con viento abierto. Actividad: flujo de lava al sur
	3	"U" invertida	No prominente, pequeño		Este	Domo pequeño en forma de "U" invertida de bajo relieve. Actividad: activo con flujo de lava extenso hacia el este
<b>2016 12 21</b> 	1	Hemisférica, superficie irregular	Poco prominente, muy ancho			Domo de forma hemisférica, poco prominente y muy ancho. Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto	Alrededor del viento		Domo de forma hemisférica, prominente y angosto. Deslizamiento del frente del domo. Actividad: inactivo
	3	"U" invertida	No prominente, pequeño			Domo pequeño en forma de "U" invertida de bajo relieve. Actividad: inactivo
<b>2017 06 08</b> 	1	Hemisférica	Poco prominente, muy ancho			Domo de forma hemisférica, poco prominente y muy ancho. Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto	Alrededor del viento		Domo de forma hemisférica, prominente y angosto. Deslizamiento del frente del domo. Actividad: inactivo
	3	"U" invertida	No prominente, pequeño			Domo pequeño en forma de "U" invertida de bajo relieve. Actividad: inactivo
<b>2018 04 12</b> 	1	Hemisférica	Poco prominente, muy ancho			Domo de forma hemisférica, poco prominente y muy ancho. Actividad: inactivo
	2	Hemisférica	Prominente, angosto	Colapso del frente del domo		Domo de forma hemisférica, prominente y angosto. Deslizamiento más grande del frente del domo. Actividad: inactivo
	3	"U" invertida	No prominente, pequeño			Domo pequeño en forma de "U" invertida de bajo relieve. Actividad: inactivo
<b>2019 08 06</b> 	1					
	2	Hemisférica	Prominente, ancho		Sur-sureste	Domo de forma hemisférica, más ancho que fechas anteriores. Actividad: flujo de lava hacia el SSE
	3					

**ANEXO 5. Temperatura máxima aparente registrada para el cráter y los domos**

Fecha	Parámetros de objeto					Imagen	Temperatura máxima aparente (°C)			
	Emisividad	Temperatura ambiental (°C)	Temperatura atmosférica (°C)	Humedad (%)	Distancia (m)		Cráter Central	Domo Ñuñurco 1	Domo Ñuñurco 2	Domo Ñuñurco 3
2003-03-20	0,96	-10	-5	28	1000		180,7			
2003-12-03	0,96	-10	-8,2	34	1000		203,3			
2004-10-25	0,96	-10	-9,7	58	1000		164,7			
2005-11-16	0,96	-10	-6,1	9,3	1000		125,1			
2007-05-29	0,96	-5	-7,4	70	1000		80,2	156,1		
2007-08-01	0,96	-10	-4	23	1000		81,4	208,3		
2007-09-17	0,96	-10	-5,1	17,7	1000		75,0	208,3		
2007-12-18	0,96	-10	1,7	33,1	1000		300,6	262,5		
2008-03-01	0,96	-5	-4,6	57,5	1000		313,2	248,5		
2008-04-08	0,96	-5	-3,2	64,8	1000		223,9	185,0		
2008-08-28	0,96	-10	-5	34	1000		316,4	73,3		
2009-05-08	0,96	-10	-2,3	48,8	1000		207,8	196,5		
2009-05-28	0,96	-5	-5,8	47,1	1000		181,2	190,9		
2009-10-16	0,96	-10	-1,8	44,3	1000		85,7	205,7		
2009-11-17	0,96	-5	-3,6	38,4	1000		321,8	291,5		
2010-01-13	0,96	-10	-0,5	43	1000		218,7	304,8		
2010-07-12	0,96	-5	-2,8	55,5	1000	80	275,1	183,1		
2010-09-04	0,96	-10	-3,3	45	1000	105	173,2			
						135		202,1		
2010-11-19	0,96	-10	-3,3	45	1000	123	204,1			
						92		160,6		
2011-02-19	0,96	-10	-3,7	39,3	2019,9	163	165,1	370,4		
2011-03-18	0,96	-10	-3	40	2288,7	274		353,3		
					2361	278	340,2			
2011-07-14	0,96	-10	-6,1	73	1883	144		343,2		
					1979,4	145	381,1			
2011-10-12	0,96	-5	-0,2	48,9	3077,9	37	57,8	241,8		
2011-11-29	0,96	-5	-2,5	66	3613,7	55	26,2			
2012-04-13	0,96	-10	-3,8	59,6	1000	66		314,5		
						66	245,1		225,2	
2013-09-20	0,96	-10	-3,8	59,6	2777,3	105		47,2		
					2488,1	106	21,1		69,6	
2013-11-07	0,96	-5	4,2	7,4	3093,3	86	38,9	58,8	79,1	
2013-11-19	0,96	-5	-3,1	12,6	1846,8	78	45,6	67,3	76,9	
2015-11-05	0,96	-5	-4,8	45,2	1820,6	95	40,9	28,4	48,1	53,0
2015-12-03	0,96	-10	0	50	4500,2	51	13,4	13,1	28,6	
2016-12-21	0,96	-10	0,2	16,3	2648,7	32	33,9	13,1	79,4	
2017-06-28	0,96	-10	9,7	69,1	2706,9	26	30,0	6,3	72,9	6,4
2018-04-12	0,96	-10	9,7	69,1	2913,6	59	59,3	31,0	128,1	39,7
2019-08-06	0,96	-10	0,7	2,9	1536,0	8	143,8		326,8	

**ANEXO 6. Tamaño de pixel y temperaturas obtenidas para los perfiles térmicos del Cráter Central y Domo Ñuñurco**

**Cráter Central**

Fecha	2011-07-14						2013-11-07						2013-11-19						2016-12-21						2018-04-12					
# Imagen	139		144		145		92		93		63		71		32		60		62		64									
X	796695,649	797346,252	796488,893	796635,582	796366,415	796221,275	796201,349	796860,851	798018,749	797239,607	796968,380	9775879,946	9777734,179	9776540,540	9775459,597	9775382,554	9776224,275	9776572,332	9775938,688	9777117,109	9776067,158	9775866,587								
Y	6217,920	6217,920	6217,920	5943,600	5943,600	5943,600	5943,600	6310,200	6390,800	6365,100	6349,600	2599,111	1882,897	1979,445	2868,953	2874,050	2058,487	1741,252	2648,719	2702,859	2748,451	2768,134								
Altura (m)	1,695	1,228	1,291	1,871	1,874	1,342	1,136	1,727	1,762	1,792	1,805	1,695	1,228	1,291	1,871	1,874	1,342	1,136	1,727	1,762	1,792	1,805								
Distancia (m)	Eje x (m)		Eje y (°C)		Eje x (m)		Eje y (°C)		Eje x (m)		Eje y (°C)		Eje x (m)		Eje y (°C)		Eje x (m)		Eje y (°C)		Eje x (m)		Eje y (°C)							
1	1,695	38,62	1,228	35,59	1,291	35,81	1,871	25,46	1,874	7,9	1,342	9,46	1,136	9,49	1,727	7,7	1,762	49,85	1,792	33,81	1,805	23,86								
2	3,390	42,44	2,456	36,13	2,582	39,14	3,742	23,63	3,749	8,04	2,685	9,14	2,271	10,07	3,455	9,5	3,524	59,47	3,585	45,97	3,611	37,44								
3	5,085	53,53	3,684	37,57	3,873	54,27	5,613	16,22	5,623	9,04	4,027	9,35	3,407	10,38	5,182	12,4	5,287	54,03	5,377	54,48	5,416	55,89								
4	6,780	60,48	4,912	42,61	5,164	61,29	7,484	10,12	7,498	8,71	5,370	11,34	4,542	11,62	6,910	15,49	7,049	52,58	7,170	51,38	7,221	52,64								
5	8,475	142,9	6,140	47,67	6,455	72,32	9,355	10,12	9,372	10,27	6,712	12,78	5,678	12,48	8,637	18,89	8,811	53,73	8,962	50,84	9,027	48,39								
6	10,170	179,31	7,368	52,7	7,746	108,96	11,226	18,69	11,246	11,01	8,055	16,83	6,814	12,89	10,365	21,37	10,573	50,98	10,755	50,93	10,832	48,39								
7	11,865	216,88	8,596	63,58	9,037	123,95	13,097	22,7	13,121	13,48	9,397	25,9	7,949	14,49	12,092	22,83	12,335	53,07	12,547	54,13	12,637	46,07								
8	13,561	230,83	9,824	74,87	10,328	143,17	14,968	22,04	14,995	19,97	10,740	29,44	9,085	18,08	13,819	22,84	14,097	54,21	14,340	53,86	14,442	41,42								
9	15,256	270,75	11,052	85,43	11,619	153,72	16,839	21,38	16,869	22,95	12,082	30	10,220	31,81	15,547	22,47	15,860	51,74	16,132	48,8	16,248	35,19								
10	16,951	285,47	12,280	94,03	12,910	179,19	18,711	21,05	18,744	20,35	13,425	28,36	11,356	28,17	17,274	21,68	17,622	47,76	17,925	45,12	18,053	25,34								
11	18,646	343,84	13,508	101,74	14,200	194,33	20,582	20,71	20,618	16,67	14,767	25,77	12,492	25,91	19,002	21,7	19,384	44,63	19,717	44,22	19,858	23,11								
12	20,341	382,89	14,736	110,3	15,491	210,58	22,453	20,62	22,493	17,41	16,110	33,55	13,627	24,98	20,729	21,58	21,146	46,23	21,510	43,79	21,664	33,11								
13	22,036	360,52	15,964	118,41	16,782	205,64	24,324	19,95	24,367	19,51	17,452	36,53	14,763	23,91	22,457	21,77	22,908	45,24	23,302	35,57	23,469	34,36								
14	23,731	332,52	17,192	132,14	18,073	206,24	26,195	21,24	26,241	17,97	18,795	22,42	15,898	22,46	24,184	22,71	24,670	41,18	25,095	22,68	25,274	34,47								
15	25,426	284,83	18,420	144,43	19,364	211,11	28,066	23,86	28,116	17,88	20,137	24,97	17,034	23,82	25,911	22,47	26,433	35,18	26,887	17,9	27,080	28,64								
16	27,121	252,41	19,648	149,56	20,655	224,76	29,937	23,81	29,990	17,24	21,480	24,97	18,170	23,51	27,639	21,8	28,195	18,42	28,680	36,19	28,885	24,78								
17	28,816	293,63	20,876	151,85	21,946	230,63	31,808	24,46	31,864	16,02	22,822	22,56	19,305	22,46	29,366	21,21	29,957	14,27	30,472	38,16	30,690	21,7								
18	30,511	305,61	22,104	159,85	23,237	249,19	33,679	23,49	33,739	13,93	24,165	23,06	20,441	20,67	31,094	21,31	31,719	32,84	32,264	34,85	32,495	20,63								
19	32,206	251,1	23,332	186,05	24,528	247,77	35,550	20,43	35,613	11,1	25,507	24,79	21,576	17,8	32,821	22,33	33,481	31,57	34,057	27,18	34,301	38,55								
20	33,901	233,77	24,560	192,44	25,819	261,29	37,421	20,76	37,488	8,8	26,850	25,19	22,712	16,45	34,549	23,14	35,243	32,1	35,849	22,8	36,106	38,65								
21	35,596	232,39	25,788	188,82	27,110	286,64	39,292	21	39,362	8,71	28,192	25,23	23,848	16,83	36,276	23,95	37,006	27,95	37,642	21,03	37,911	37,14								
22	37,292	211,47	27,016	198,72	28,401	271,88	41,163	21,66	41,236	9,04	29,535	24,61	24,983	17,8	38,003	24,85	38,768	24,7	39,434	19,06	39,717	38,45								
23	38,987	215	28,244	206,75	29,692	318,98	43,034	21,66	43,111	9,84	30,877	22,92	26,119	19,03	39,731	24,09	40,530	22,69	41,227	15,86	41,522	38,05								
24	40,682	203,55	29,472	202,72	30,983	362,69	44,905	21,28	44,985	12,03	32,220	22,74	27,254	21,55	41,458	22,84	42,292	21,64	43,019	21,03	43,327	40,14								
25	42,377	185,33	30,700	201,98	32,274	381,4	46,776	21,28	46,860	9,75	33,562	23,7	28,390	25,51	43,186	22,13	44,054	17,08	44,812	36,24	45,133	25,97								
26	44,072	173,19	31,927	212,96	33,565	355,92	48,647	21,47	48,734	8,52	34,905	26,17	29,526	28,47	44,913	22,85	45,816	15,47	46,604	41,86	46,938	25,46								
27	45,767	158,29	33,155	212,94	34,856	329,2	50,518	21,47	50,608	8,57	36,247	25,77	30,661	28,73	46,641	24,68	47,579	14,78	48,397	39,26	48,743	33,89								
28	47,462	160,72	34,383	218,57	36,147	336,31	52,389	20,14	52,483	8,38	37,590	26,17	31,797	27,61	48,368	26,1	49,341	18,3	50,189	37,46	50,548	42,3								
29	49,157	143,44	35,611	227,13	37,438	299,24	54,260	19,8	54,357	8,95	38,932	30,6	32,932	27,09	50,095	26,68	51,103	22,93	51,982	38,31	52,354	44,32								
30	50,852	147,57	36,839	235,54	38,729	304,09	56,132	20,09	56,231	10,22	40,275	31,48	34,068	25,03	51,823	26,06	52,865	32,31	53,774	42,78	54,159	43,36								
31	52,547	153,81	38,067	247,76	40,019	281,48	58,003	19,03	58,106	12,44	41,617	28,58	35,204	25,07	53,550	25,13	54,627	37,82	55,567	40,99	55,964	45,45								
32	54,242	161,23	39,295	275,9	41,310	277,58	59,874	18,79	59,980	13,12	42,960	21,31	36,339	28	55,278	23,76	56,389	39,81	57,359	42,2	57,770	48,02								
33	55,937	138,74	40,523	294,47	42,601	283,65	61,745	17,56	61,855	15,18	44,302	22,23	37,475	25,56	57,005	24,16	58,152	41,47	59,152	41,08	59,575	42,88								
34	57,632	137,68	41,751	287,36	43,892	286,4	63,616	16,57	63,729	8,04	45,645	24,33	38,610	29,54	58,733	26,18	59,914	38,17	60,944	43,65	61,380	40								
35	59,327	102,72	42,979	299,47	45,183	301,73	65,487	17,86	65,603	0,42	46,987	21,31	39,746	26,44	60,460	29,11	61,676	38,22	62,736	47,83	63,186	40,05								
36	61,023	105,57	44,207	289,44	46,474	226,55	67,358	16,87	67,478	-2,09	48,330	19,28	40,882	25,51	62,187	30,82	63,438	41,23	64,529	50,93	64,991	34,57								
37	62,718	83,97	45,435	290,49	47,765	219,91	69,229	16,82	69,352	-1,98	49,672	18,42	42,017	24,58	63,915	29,91	65,200	45,39	66,321	49,71	66,796	29,19								
38	64,413	75,63	46,663	303,24	49,056	218,95	71,100	16,62	71,226	-0,75	51,015	18,42	43,153	19,97	65,642	28,18	66,962	46,51	68,114	48,01	68,601	22,46								
39	66,108	52,11	47,891	310,35	50,347	211,28	72,971	16,57	73,101	0,78	52,357	18,33	44,288	20,86	67,370	25,32	68,725	48,44	69,906	48,29	70,407	21,82								
40	67,803	49,6	49,119	328,62	51,638	203,2	74,842	17,07	74,975	3,81	53,700	17,65	45,424	20,9	69,097	23,7	70,487	47,62	71,699	50,07	72,212	20,69								
41	69,498	49,14	50,347	372,56	52,929	208,65	76,713	17,76	76,850	6,93	55,042	16,53	46,560	19,22	70,825	24,13	72,249	43,73	73,491	48,89	74,017	18,04								
42	71,193	47,7	51,575	350,4	54,220	200,52	78,584	15,92	78,724	13,16	56,385	15,7	47,695	18,13	72,552	24,64	74,011	50,53	75,284	41,52	75,823	19,8								
43	72,888	43,62	52,803	294,45	55,511	196,39	80,455	18,3	80,598	9,8	57,727	15,6	48,831	15,81	74,279	25,99	75,773	50,62	77,076	38,51	77,628	7,82								
44	74,583	41,29	54,031	257,73	56,802	182,06	82,326	17,32	82,473	0,57	59,070	15,35	49,966	13,59	76,007	25,71	77,535	46,32	78,869	38,01	79,433	-2,14								
45	76,278	30,61	55,259	253,41	58,093	167,49	84,197	6,96	84,347	2,8	60,412	14,8	51,102	12,73	77,734	24,31	79,298	47,76	80,661	38,41	81,239	-2,14								
46	7																													

51	86,449	15,9	62,627	296,22	65,838	131,35	95,424	9,05			68,467	11,45	57,916	11,77	88,099	19,84	89,871	32,05	91,416	21,21	92,070	10,78
52	88,144	14,47	63,855	275,09	67,129	136,65	97,295	9,32			69,809	12,07	59,051	11,15	89,826	20,47	91,633	28,33	93,208	10,52	93,876	5,59
53	89,839	12,02	65,083	291,13	68,420	136,21					71,152	13,29	60,187	10,79	91,554	20,26	93,395	23,79	95,001	-0,97	95,681	3,67
54	91,534	10,69	66,311	271,19	69,711	133,44					72,494	13,29	61,322	11,05	93,281	18,93	95,157	26	96,793	-2,74	97,486	2,66
55	93,229	6,33	67,539	253,72	71,002	106,28					73,837	13,29	62,458	10,07	95,009	19,51	96,919	28,71	98,586	-0,89	99,292	4,82
56			68,767	242,7	72,293	98,44					75,179	12,53	63,594	8,76	96,736	20,96	98,682	33,42	100,378	0,98	101,097	2,73
57			69,995	218,01	73,584	94,91					76,522	11,14	64,729	8,07	98,464	20,19	100,444	18,48	102,171	3,68	102,902	0,07
58			71,223	219,35	74,875	92,5					77,864	11,5	65,865	8,28	100,191	18,92	102,206	6,87	103,963	10,38	104,707	-1,68
59			72,451	214,49	76,166	81,96					79,207	11,96	67,000	7,69	101,918	17,96	103,968	13,95	105,756	6,79	106,513	-2,3
60			73,679	208,42	77,457	69,42					80,549	12,48	68,136	7,64	103,646	17,85	105,730	12,61	107,548	0,83	108,318	-3,62
61			74,907	200,6	78,748	51,9					81,892	11,08	69,272	8,65	105,373	17,17	107,492	7,01	109,341	4,61	110,123	-2,3
62			76,135	190,58	80,039	48,66					83,234	7,53	70,407	7,48	107,101	17,22	109,255	11,44	111,133	3,18	111,929	1,85
63			77,363	184,58	81,330	47,94					84,577	3,14	71,543	5,8	108,828	16,35	111,017	11,7	112,926	-0,06	113,734	7,54
64			78,591	181,19	82,621	46,45					85,919	1,23	72,678	7,32	110,556	15,45	112,779	16,09	114,718	-2,2	115,539	9,92
65			79,819	176,9	83,912	46,6					87,262	1,23	73,814	9,6	112,283	14,02	114,541	16,83	116,511	-3,13	117,345	9,98
66			81,047	184,67	85,203	45,67					88,604	1,64	74,950	8,12	114,010	11,19	116,303	15,34	118,303	-1,89	119,150	14,16
67			82,275	179,23	86,494	43,52					89,947	2,62	76,085	6,24	115,738	8,59	118,065	11,31	120,095	1,72	120,955	16,62
68			83,503	183,44	87,785	40,85					91,289	3,25	77,221	1,31	117,465	6,8	119,828	8,44	121,888	2,31	122,760	12,36
69			84,731	182,22	89,076	34,91					92,632	2,62	78,356	-1,39	119,193	5,81	121,590	8,04	123,680	1,72	124,566	10,85
70			85,959	171,02	90,366	29,36					93,974	1,93	79,492	-1,69	120,920	5,62	123,352	7,56	125,473	4,76	126,371	13,46
71			87,187	158,48	91,657	24,29					95,317	2,28	80,628	-1,51	122,648	5,82	125,114	5,97	127,265	7,89	128,176	13,78
72			88,415	145,63	92,948	23,44					96,659	9,56	81,763	-1,33	124,375	5,16	126,876	3,93	129,058	10,45	129,982	12,75
73			89,643	118,97	94,239	24,48					98,002	10,98	82,899	-0,62	126,102	4,59	128,638	3,28	130,850	14,03	131,787	10,32
74			90,871	102,87	95,530	22,82					99,344	3,02	84,034	0,84	127,830	3,17	130,401	6,18	132,643	8,03	133,592	8,29
75			92,099	83	96,821	21,03							85,170	1,83	129,557	2,3	132,163	12,35	134,435	5,67	135,398	9,51
76			93,326	63,95	98,112	19,65							86,306	3,7	131,285	2,14	133,925	12,28	136,228	4,9	137,203	14,86
77			94,554	50,96		381,4							87,441	3,86	133,012	4,32	135,687	15,97	138,020	4,19	139,008	17,36
78			95,782	45,85									88,577	3,86	134,740	6,67	137,449	10,78	139,813	4,11	140,813	15,49
79			97,010	44,05									89,712	7,53	136,467	7,75	139,211	14,46	141,605	4,19	142,619	14,8
80			98,238	42,18									90,848	1,25	138,194	8,55	140,974	16,15	143,398	9,65	144,424	16,25
81			99,466	38,79									91,984	3,13	139,922	9,36	142,736	17,94	145,190	15,92	146,229	26,14
82													93,119	8,28	141,649	9,31	144,498	24,53	146,983	16,8	148,035	14,48
83													94,255	12,43	143,377	8,99	146,260	24,13	148,775	18,88	149,840	11,44
84													95,390	9,02	145,104	9,76	148,022	26,56	150,567	17,04	151,645	5,59
85													96,526	13,64	146,832	10,96	149,784	30,02	152,360	12,61	153,451	3,89
86													97,662	9,49	148,559	13,37			154,152	6,09	155,256	12,42
87													98,797	-0,98	150,286	17,12			155,945	4,68	157,061	9,24
88															152,014	22,54			157,737	6,09	158,866	7,68
89															153,741	28,9			159,530	10,78	160,672	14,04
90															155,469	32,56			161,322	11,96	162,477	19,68
91															157,196	32,22			163,115	16,86	164,282	23,74
92															158,924	29,4			164,907	22,27	166,088	22
93															160,651	27,69			166,700	25,72		
94															162,378	27,18						

### Domo Ñuñurco 1

Fecha	2011-02-19						2011-03-18						2011-07-14						2013-09-20		2013-11-07		2018-04-12	
# Imagen	138	140	141	163	274	136	137	138	157	107	64	60												
X	798800,7	798861,0	798843,8	797796,1	798108,7	798655,6	798517,3	798325,5	797494,8	798036,8	801176,3	798018,7												
Y	9778718,4	9778141,1	9777866,4	9778264,6	9777646,2	9779640,8	9777898,2	9777485,4	9778943,7	9777923,0	9776829,7	9777117,1												
Altura	6096,0	6096,0	6096,0	6096,0	5943,6	6217,9	6217,9	6217,9	6217,9	6096,0	5943,6	6390,8												
Distancia (m)	3017,2	3009,0	3000,5	2019,9	2288,7	3247,1	2729,8	2616,0	2000,4	2238,1	5394,5	2539,7												
IFOV (m)	1,968	1,962	1,957	1,317	1,493	2,118	1,780	1,706	1,305	1,460	3,518	1,656												
Píxeles	Eje x	Eje y (°C)	Eje x	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)		
1	1,968	4,84	1,962	11,64	1,957	17,66	1,317	7,24	1,493	39,6	2,118	35,98	1,780	33,45	1,706	23,28	1,305	9,91	1,460	-7,07	3,518	10,29	1,656	8,14
2	3,935	11,11	3,925	18,93	3,914	22	2,635	8,9	2,985	48,52	4,235	43,87	3,561	27,04	3,412	38,73	2,609	12,19	2,919	-4,92	7,036	22,07	3,313	13,84
3	5,903	22,87	5,887	26,03	5,870	24,08	3,952	11,69	4,478	39,84	6,353	54,24	5,341	52,2	5,118	45,32	3,914	19,52	4,379	-4,25	10,554	30,64	4,969	15,89
4	7,871	32,04	7,850	34,58	7,827	29,62	5,269	16,38	5,970	49,9	8,471	63,96	7,121	66,95	6,824	63,06	5,218	23,94	5,839	-5,12	14,073	20,38	6,625	20,57
5	9,839	48,91	9,812	51,19	9,784	48,91	6,587	22,69	7,463	69,65	10,588	89,84	8,902	63,75	8,530	69,53	6,523	31,12	7,298	-3,47	17,591	19,64	8,282	23,56
6	11,806	59,82	11,774	61,18	11,741	73,08	7,904	25,11	8,956	63,92	12,706	140,4	10,682	72,51	10,237	108,51	7,828	70,24	8,758	2,86	21,109	38,97	9,938	23,05
7	13,774	69,12	13,737	76,6	13,698	96,47	9,221	24,28	10,448	64,62	14,824	201,14	12,462	99,48	11,943	212,35	9,132	98,9	10,217	6,87	24,627	35,96	11,594	21,21
8	15,742	117,66	15,699	139,95	15,655	182,07	10,539	32,92	11,941	78,73	16,941	255,37	14,242	148,99	13,649	210,92	10,437	71,55	11,677	1,59	28,145	40,25	13,251	16,26

9	17,710	224,11	17,662	241,94	17,611	216,69	11,856	46,1	13,433	83,24	19,059	265,67	16,023	164,93	15,355	206,51	11,741	66,67	13,137	-1,22	31,663	42,61	14,907	18,92
10	19,677	267,44	19,624	256,7	19,568	199,46	13,173	65,61	14,926	154,82	21,177	230,73	17,803	231,54	17,061	253,86	13,046	80,56	14,596	-0,71	35,182	28,1	16,563	21,27
11	21,645	306,38	21,587	285,85	21,525	230,5	14,491	76,49	16,419	249,97	23,294	251,01	19,583	204,02	18,767	205,09	14,351	115,3	16,056	-0,08	38,700	34,16	18,220	13,97
12	23,613	220,52	23,549	276,13	23,482	277,4	15,808	88,49	17,911	277,58	25,412	256,95	21,364	215,16	20,473	213,21	15,655	172,3	17,516	-2,24	42,218	26,08	19,876	7,19
13	25,581	125,53	25,511	154,45	25,439	236,6	17,125	149,46	19,404	308,8	27,530	219,8	23,144	208,4	22,179	197,86	16,960	242,4	18,975	-1,85			21,532	2,03
14	27,548	94,47	27,474	98,33	27,395	140,08	18,442	235,83	20,897	254,09	29,647	153,85	24,924	176,23	23,885	185,17	18,264	261,58	20,435	1,46				
15	29,516	99,72	29,436	106,98	29,352	73,59	19,760	266,8	22,389	253,42	31,765	115,82	26,705	203,11	25,591	176,27	19,569	291,91	21,895	4,95				
16	31,484	83,58	31,399	118,42	31,309	73,9	21,077	247,11	23,882	299,34	33,883	133,41	28,485	246,39	27,297	218,01	20,874	217,15	23,354	12,76				
17	33,452	53,7	33,361	80,78	33,266	57,45	22,394	287,73	25,374	302,59	36,000	143,58	30,265	210,11	29,004	99,35	22,178	252,61	24,814	28,02				
18	35,419	37,27	35,323	51,6	35,223	75,84	23,712	370,32	26,867	250,59	38,118	99,07	32,045	157,74	30,710	58,52	23,483	295,79	26,274	33,74				
19	37,387	22,48	37,286	32,88	37,180	35,78	25,029	326,33	28,360	177,73	40,236	54,96	33,826	111,74	32,416	36,04	24,787	302,06	27,733	26,12				
20	39,355	18,66	39,248	20,83	39,136	21,71	26,346	224,53	29,852	140,83			35,606	61,03	34,122	23,52	26,092	288,92	29,193	14,2				
21							27,664	127,66	31,345	126,79			37,386	39	35,828	18,77	27,397	206,12	30,652	10,42				
22							28,981	94,67	32,837	106,54			39,167	29,05	37,534	15,81	28,701	140,61	32,112	4,3				
23							30,298	92,71	34,330	81,63			40,947	23,87	39,240	13,88	30,006	94,62	33,572	1,46				
24							31,616	122,28	35,823	50,05					40,946	12,52	31,310	95,3	35,031	-0,84				
25							32,933	125,6	37,315	27,16							32,615	172,41	36,491	-0,08				
26							34,250	97,16	38,808	18,61							33,920	213,54	37,951	0,04				
27							35,568	66,16	40,300	20,09							35,224	198,52	39,410	0,04				
28							36,885	55,06									36,529	152,81	40,870	0,85				
29							38,202	32,62									37,833	99,86	42,330	-1,15				
30							39,520	19,25									39,138	66,01						
31																	40,443	47,25						

### Domo Nuñurco 2

Fecha	2013-09-20		2013-11-07		2015-11-05		2018-04-12		2019-08-06	
# Imagen	107		64		95		60		8	
X	798036,802		801176,345		797322,248		798018,749		796946,000	
Y	9777922,972		9776829,716		9778962,462		9777117,109		9776921,500	
Altura (m)	6096,000		5943,600		6096,000		6390,800		5478,700	
Distancia (m)	2238,124		5394,503		1820,644		2539,732		1536,001	
IFOV (m)	1,460		3,518		1,187		1,656		1,002	
Pixeles	Eje x (m)	Eje y (°C)								
1	1,460	-4,52	3,518	19,35	1,187	47,22	1,656	32,51	1,002	37,72
2	2,919	-4,52	7,036	37,74	2,375	50,94	3,313	35,64	2,003	31,76
3	4,379	-4,58	10,554	38,94	3,562	69,87	4,969	43,62	3,005	34,15
4	5,839	-4,25	14,073	30,14	4,749	72,44	6,625	77	4,007	36,56
5	7,298	-4,12	17,591	27,53	5,937	51,01	8,282	59,34	5,009	37,84
6	8,758	-3,86	21,109	25,64	7,124	45,22	9,938	30,41	6,010	35,89
7	10,217	2,92	24,627	34,32	8,312	58,99	11,594	16,69	7,012	32,21
8	11,677	19,85	28,145	48,92	9,499	66,64	13,251	14,03	8,014	29,03
9	13,137	39,86	31,663	61,75	10,686	55,19	14,907	11,62	9,016	33,1
10	14,596	40,64	35,182	40,86	11,874	39,13	16,564	8,67	10,017	43,2
11	16,056	60,14	38,700	15,17	13,061	28,22	18,220	4,23	11,019	58,5
12	17,516	58,84	42,218	1,18	14,248	24,58	19,876	3,45	12,021	64,85
13	18,975	23,04			15,436	21,72	21,533	8,6	13,023	90,99
14	20,435	11,57			16,623	18,73	23,189	22,08	14,024	106,99
15	21,895	5,88			17,811	16,05	24,845	26,69	15,026	127,08
16	23,354	10,03			18,998	16,05	26,502	21,5	16,028	179,24
17	24,814	12,17			20,185	14,39	28,158	18,56	17,030	168,77
18	26,274	12,55			21,373	13,6	29,814	17,48	18,031	179,03
19	27,733	12,38			22,560	16,05	31,471	22,36	19,033	220,95
20	29,193	21,33			23,747	15,94			20,035	241,15
21	30,652	31,54			24,935	17,52			21,037	282,88
22	32,112	13,62			26,122	21,04			22,038	237,99
23	33,572	-0,33			27,310	23,54			23,040	275,86
24	35,031	-2,75			28,497	29,79			24,042	216,8
25	36,491	-0,15			29,684	38,72			25,044	213,46

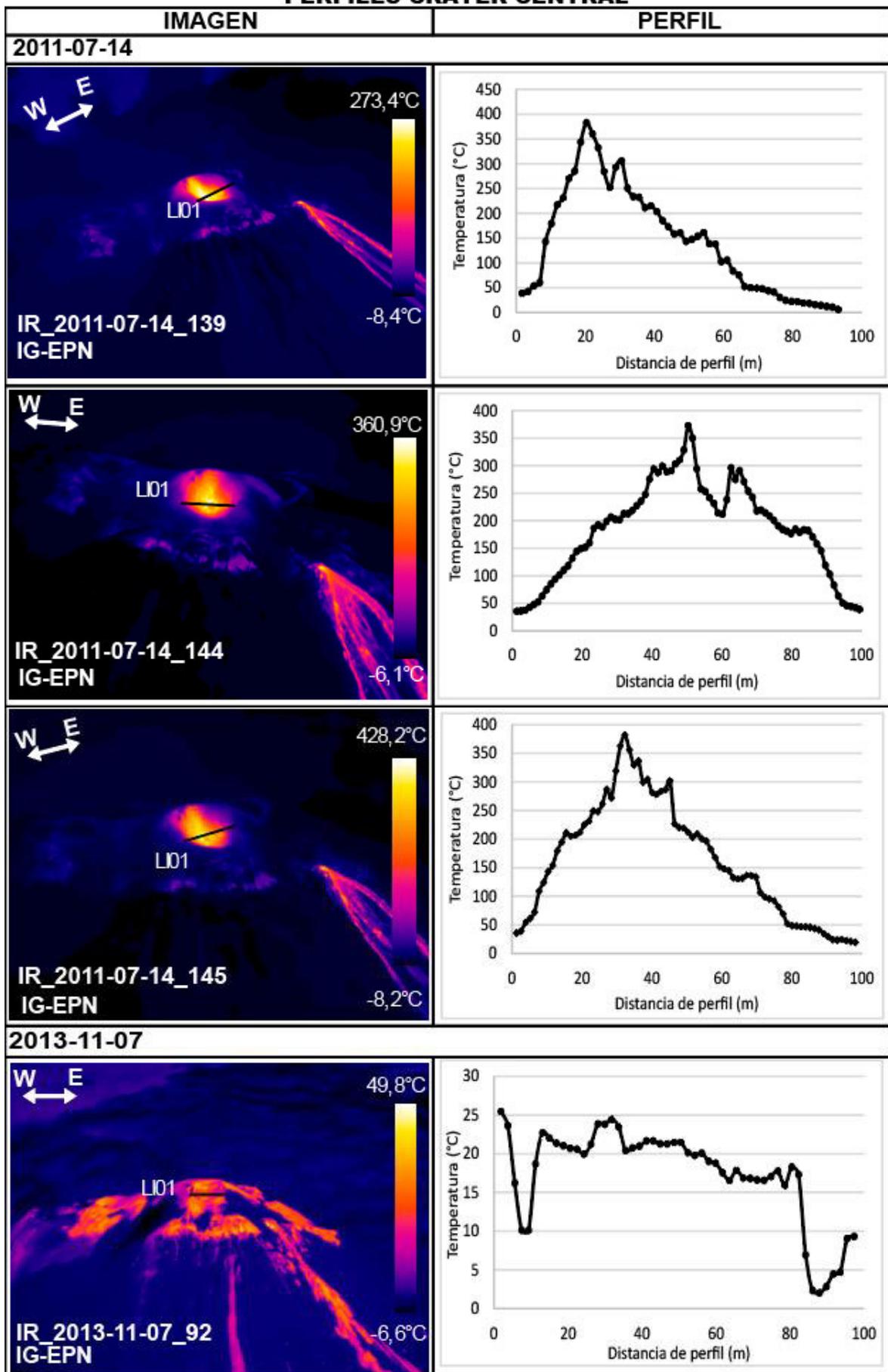
### Domo Nuñurco 3

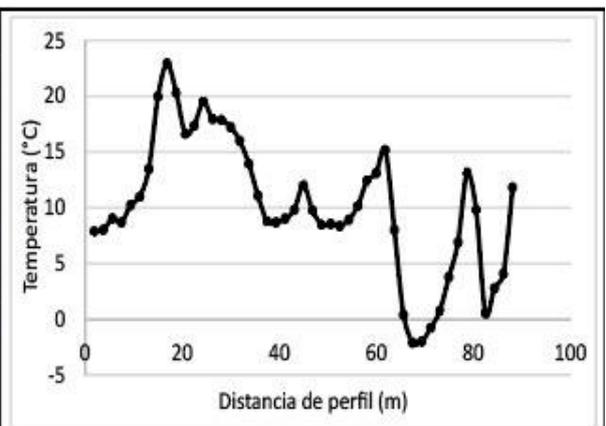
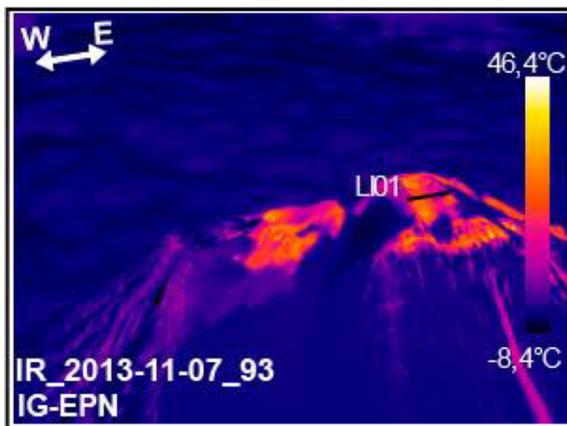
Fecha	2015-11-05		2018-04-12	
# Imagen	94		80	
X	796824,554		797651,303	
Y	9779846,614		9779351,025	
Altura (m)	6096,000		6466,200	
Distancia (m)	2133,507		2431,939	
IFOV (m)	1,391		1,586	
Pixeles	Eje x (m)	Eje y (°C)	Eje x (m)	Eje y (°C)
1	1,391	2,35	1,586	2,11
2	2,783	3,68	3,172	8,09
3	4,174	4,21	4,758	13,69
4	5,566	4,87	6,344	19,2
5	6,957	4,75	7,930	22,72
6	8,349	7,19	9,516	23,73
7	9,740	9,23	11,102	23,68
8	11,131	8,84	12,688	23,73
9	12,523	9,63	14,274	20,94
10	13,914	10,62	15,861	21,58
11	15,306	12,16	17,447	20,01
12	16,697	8,33	19,033	19,37
13	18,088	7,36	20,619	17,42
14			22,205	16,93
15			23,791	12,24
16			25,377	5,66
17			26,963	5,87
18			28,549	5,8
19			30,135	5,19
20				35,972

26	37,951	0,04			30,872	41,56			26,045	223,07
27	39,410	-0,71			32,059	37,86			27,047	212,48
28	40,870	-0,71			33,246	35,01			28,049	216,24
29	42,330	-3,66			34,434	34,54			29,050	217,13
30	43,789	-3,73			35,621	32,65			30,052	235,12
31									31,054	211,58
32									32,056	277,85
33									33,057	326,79
34									34,059	275,78
35									35,061	242,29
36									36,063	209,58
37									37,064	202,53
38									38,066	150,38
39									39,068	124,13
40									40,070	93,23
41									41,071	78,23
42									42,073	79,21
43									43,075	83,33
44									44,077	76,64
45									45,078	75,78
46									46,080	70,73
47									47,082	59,8
48									48,084	59,8
49									49,085	94,35
50									50,087	100,08
51									51,089	73,03
52									52,090	68,49
53									53,092	55,38
54									54,094	48,39

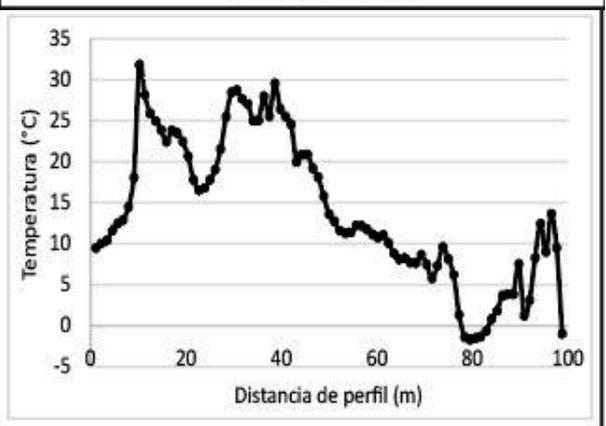
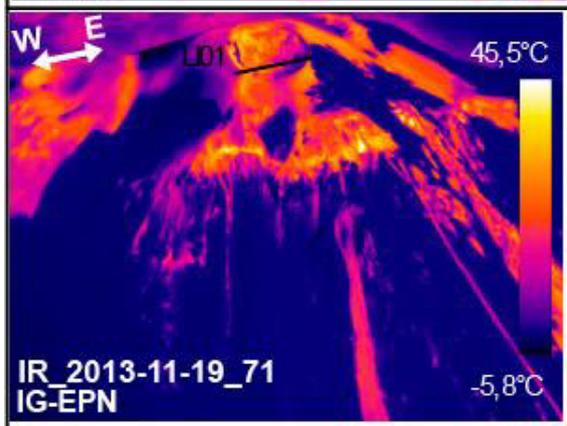
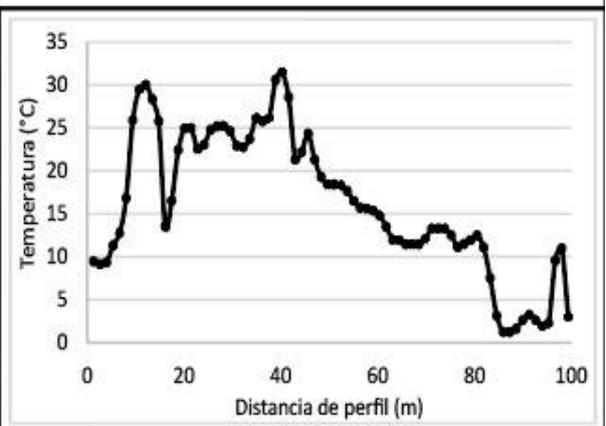
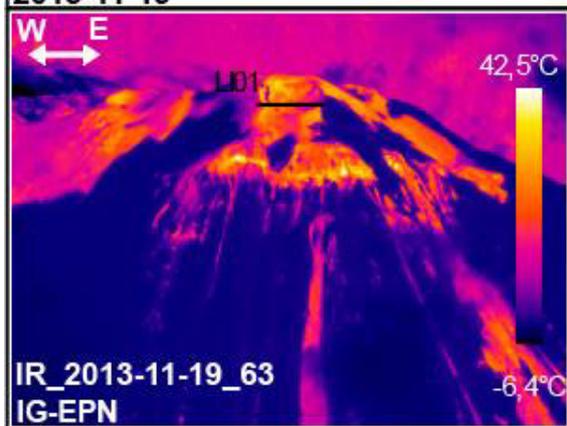
ANEXO 7. Imágenes térmicas y perfiles térmicos del Cráter Central y Domos Ñuñurco

PERFILES CRÁTER CENTRAL

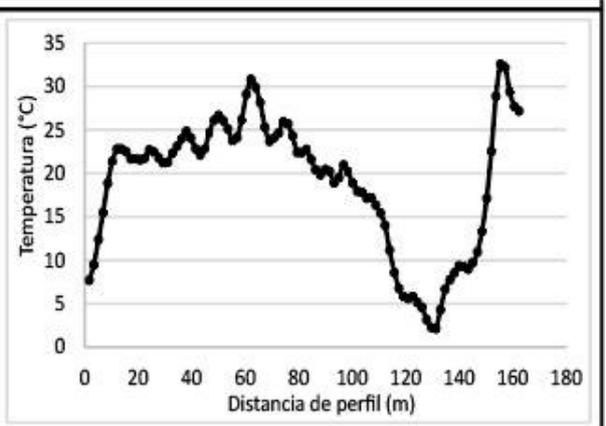
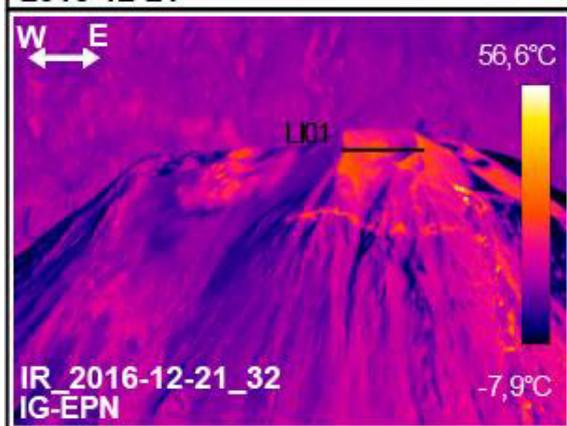


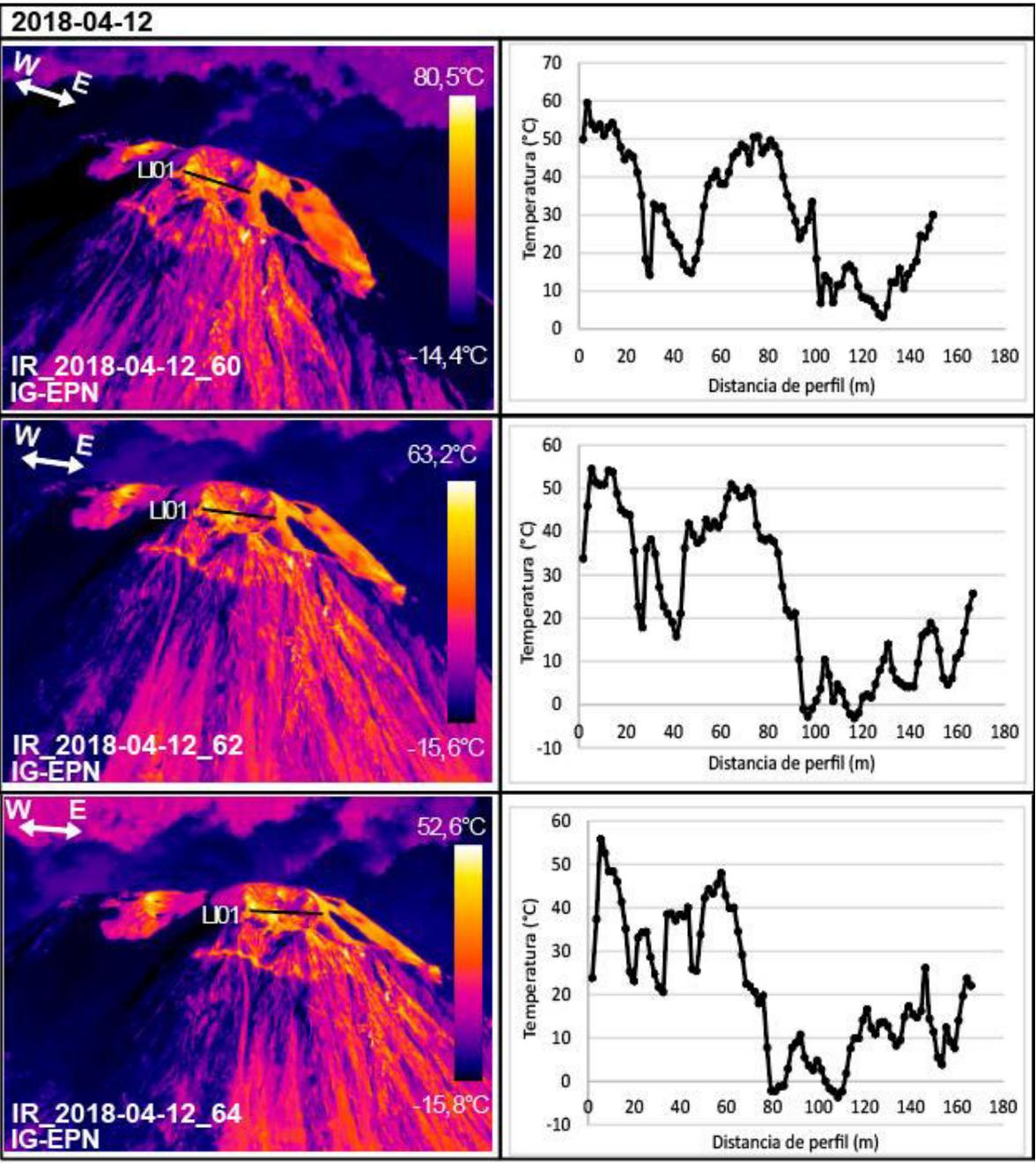


2013-11-19

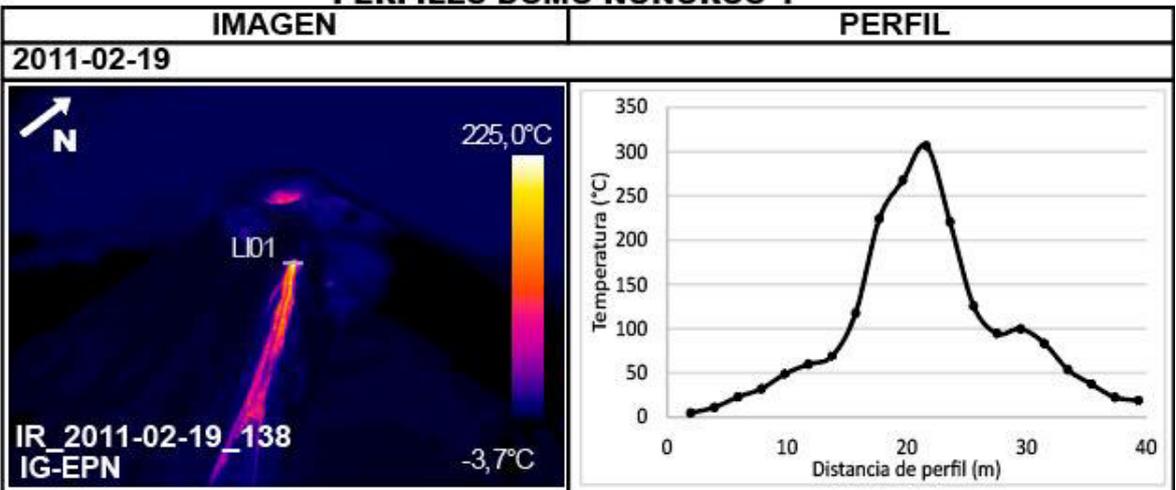


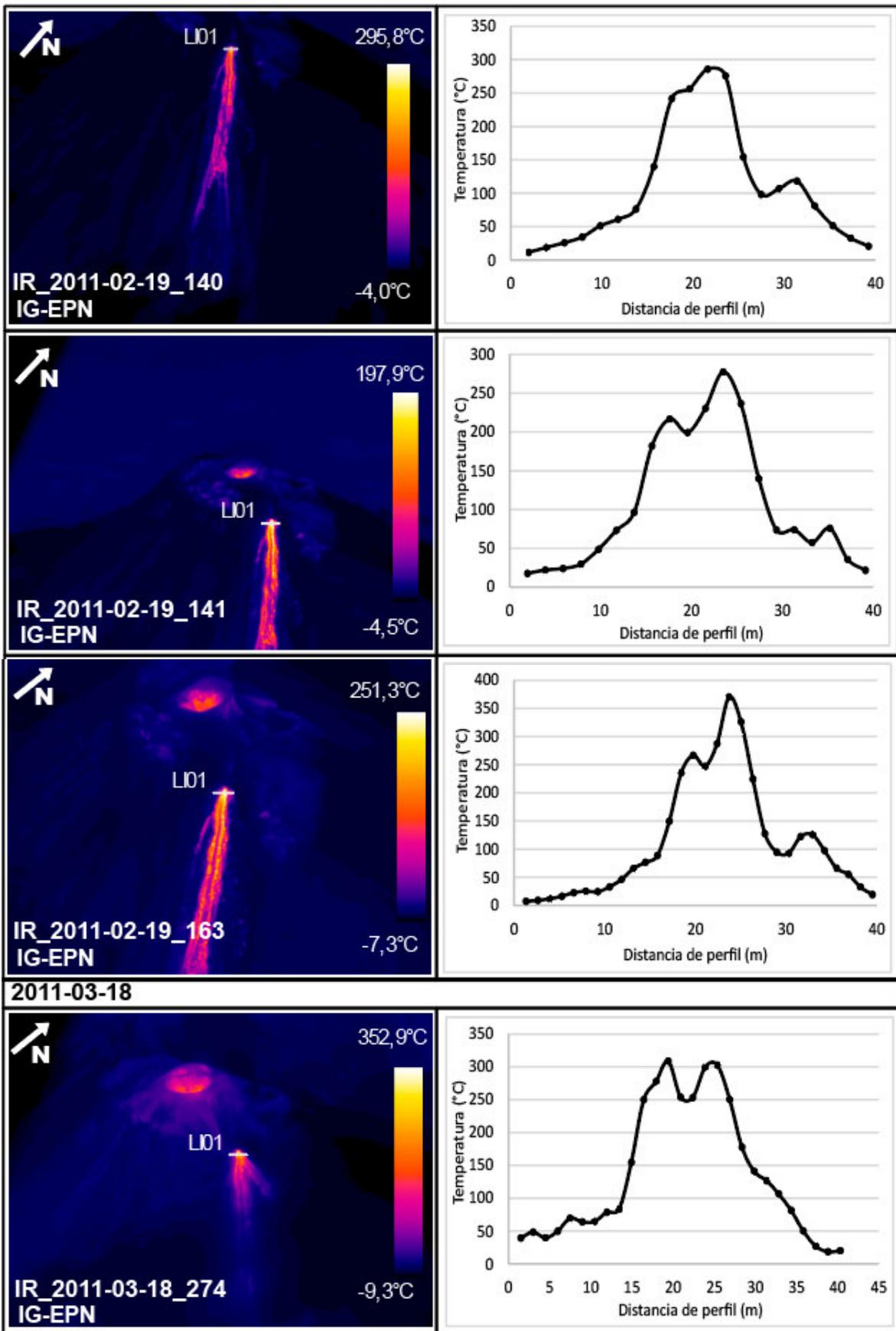
2016-12-21



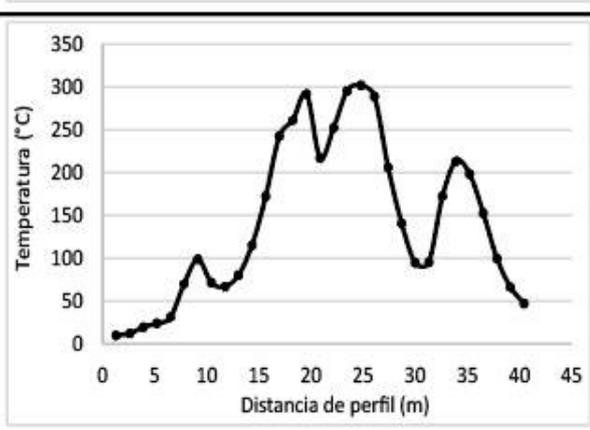
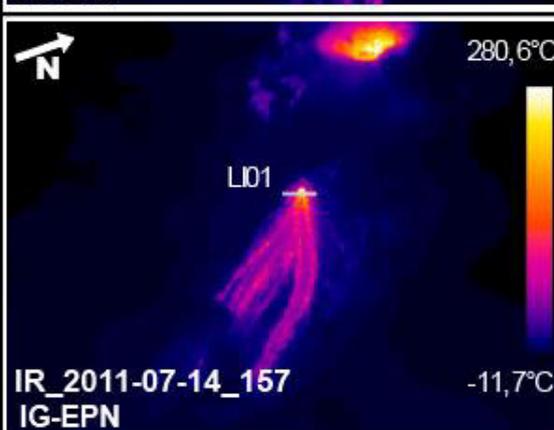
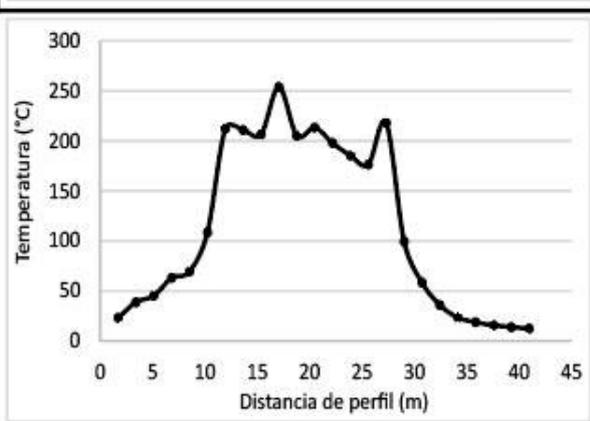
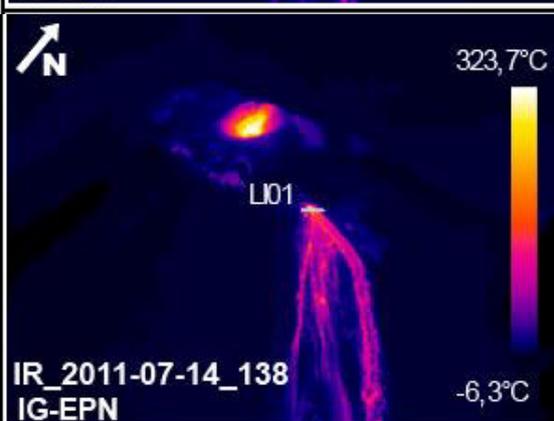
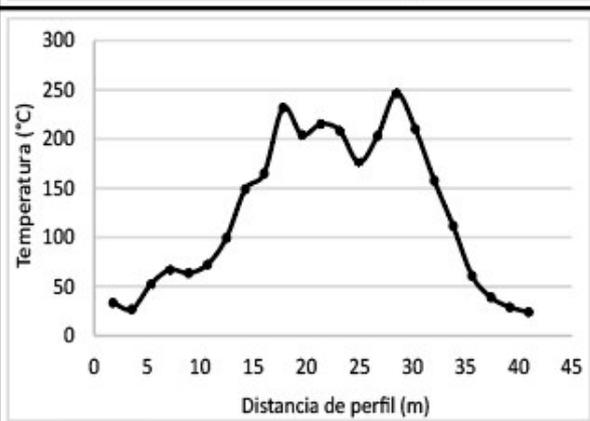
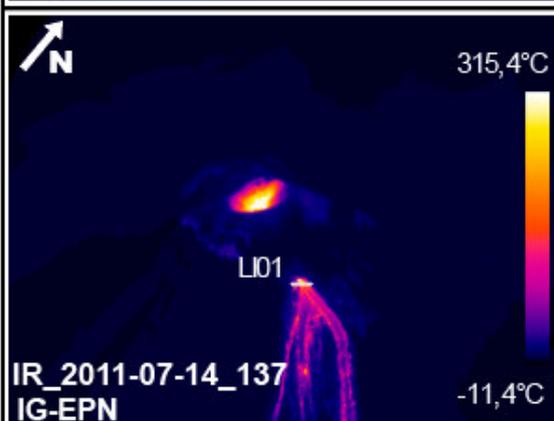
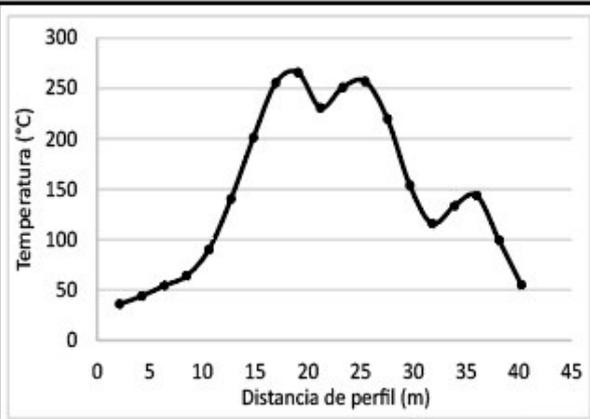
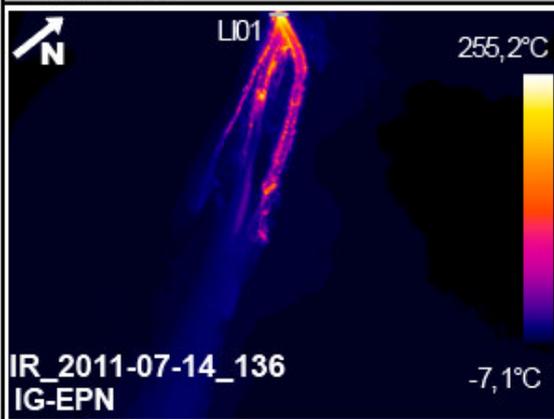


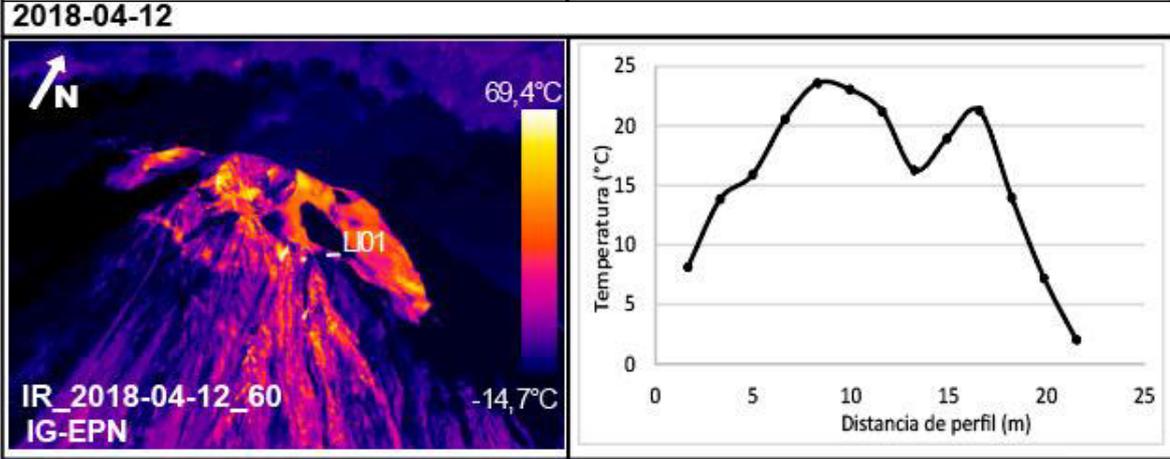
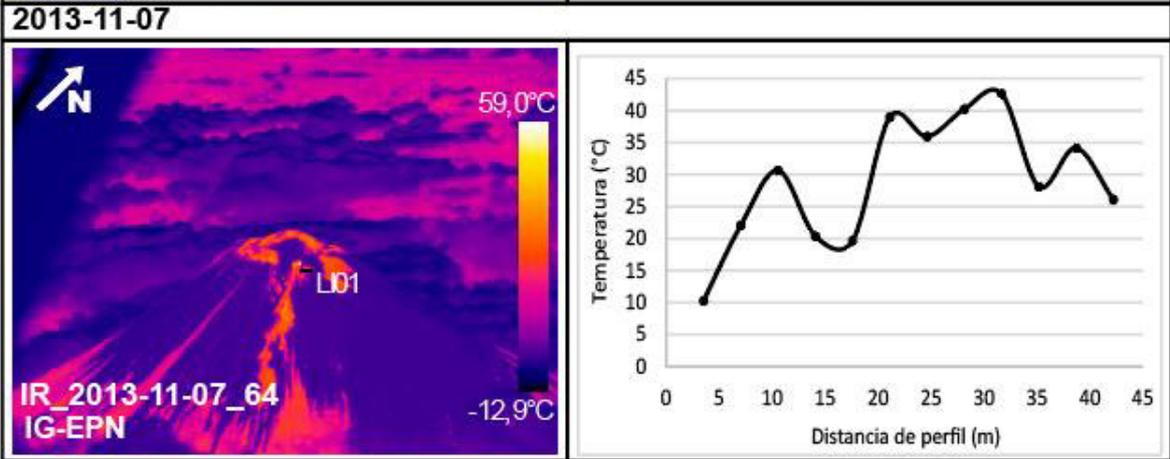
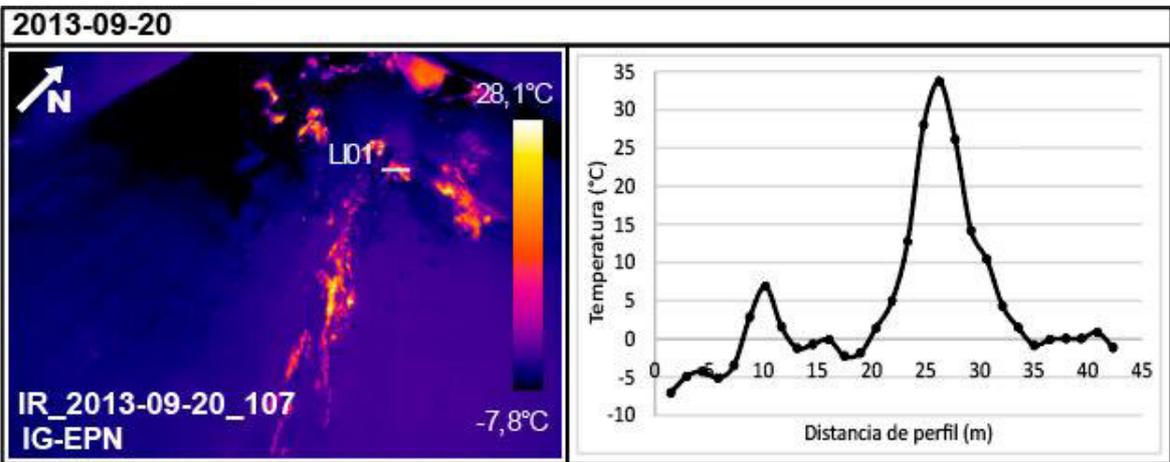
**PERFILES DOMO ÑUÑURCO 1**



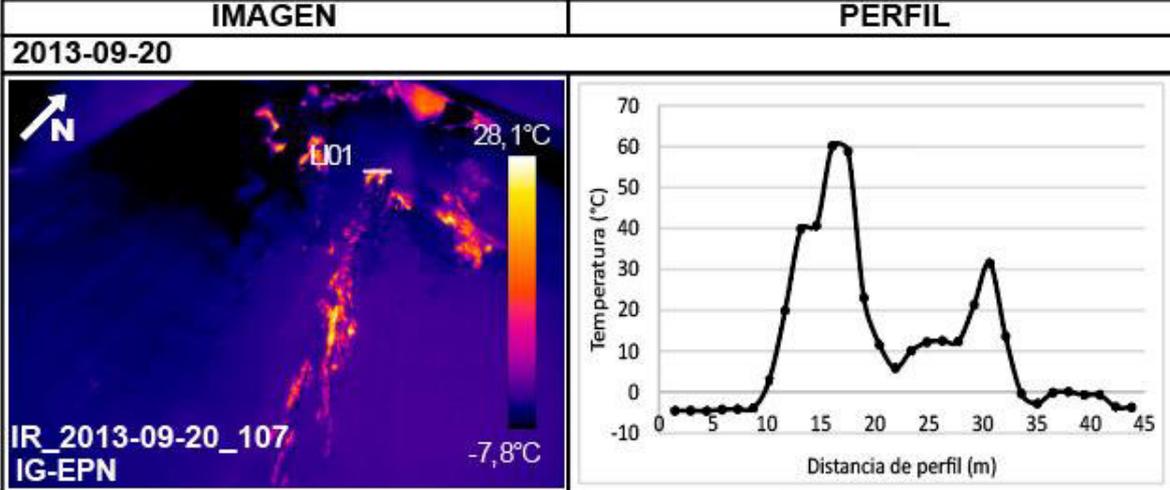


2011-07-14

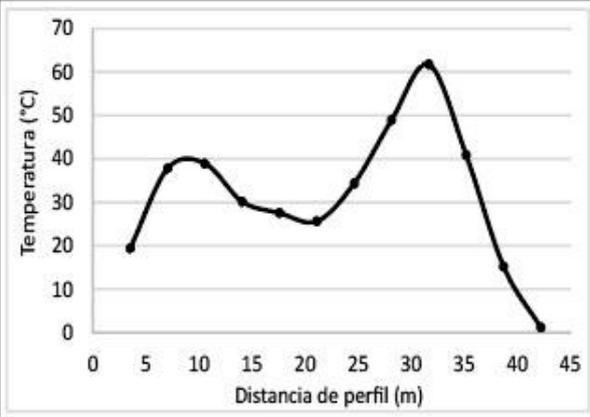
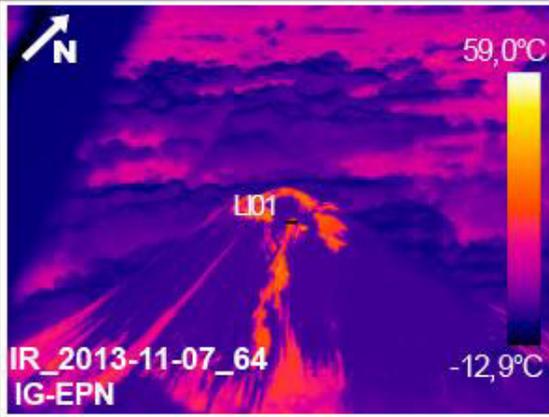




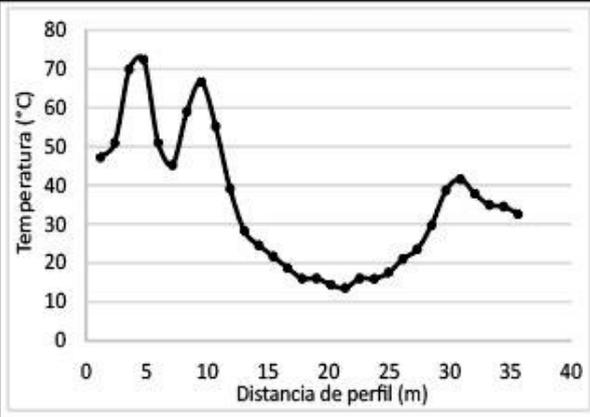
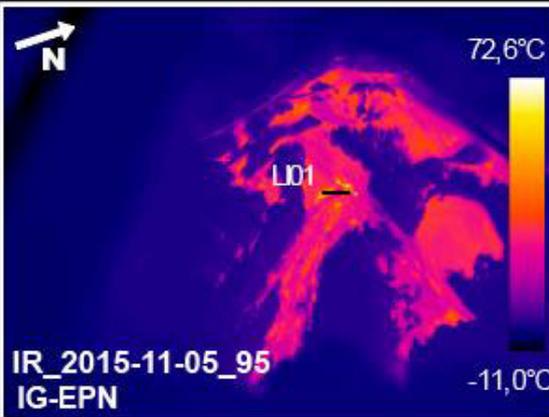
**PERFILES DOMOS ÑUÑURCO 2**



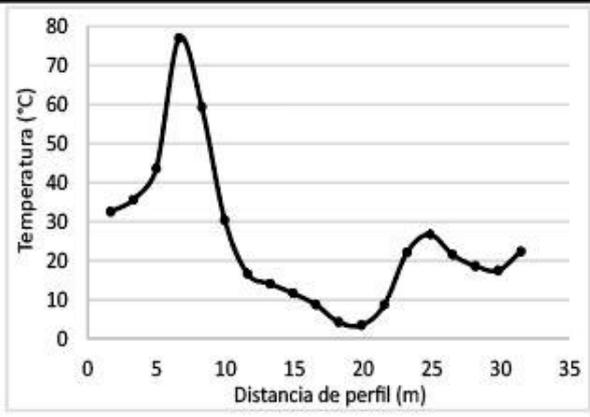
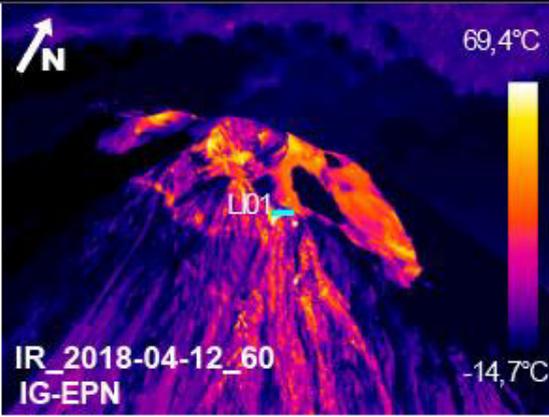
2013-11-07



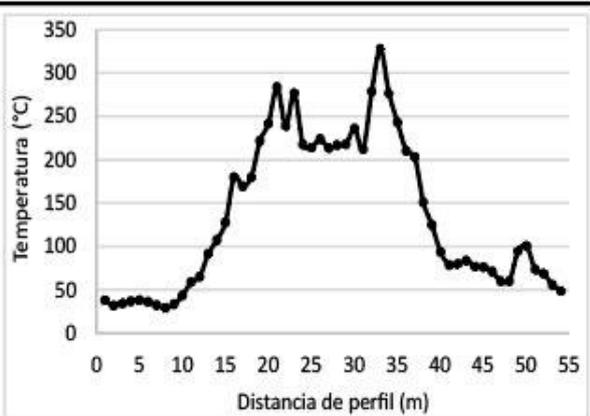
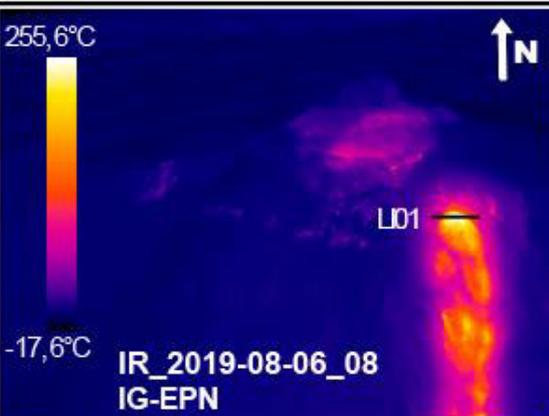
2015-11-05



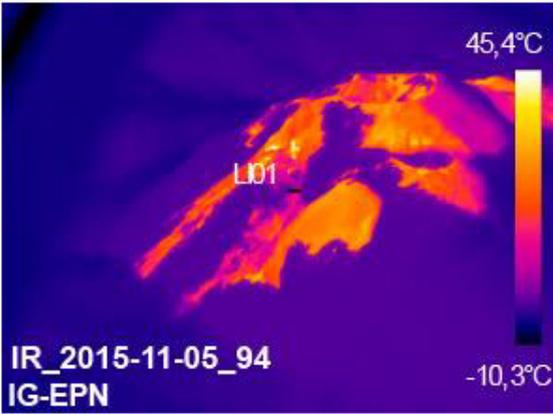
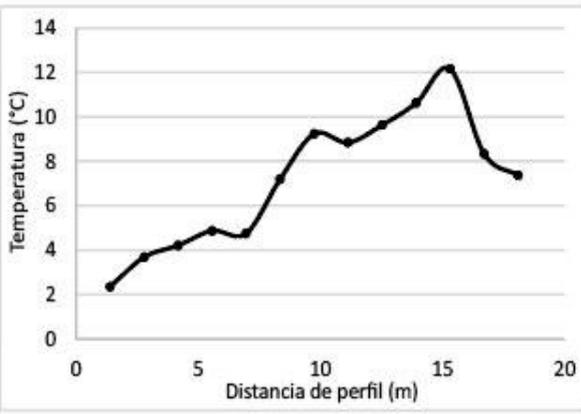
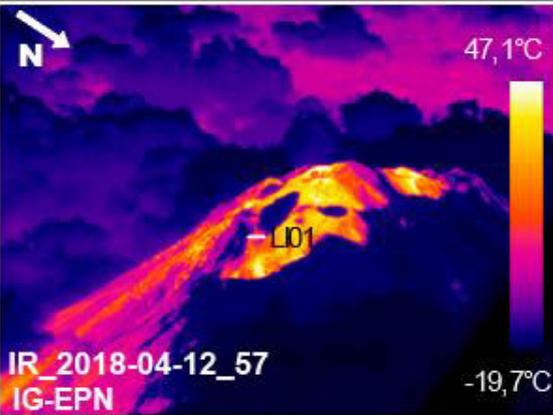
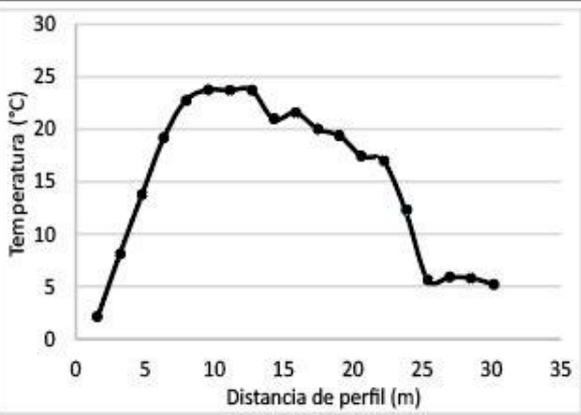
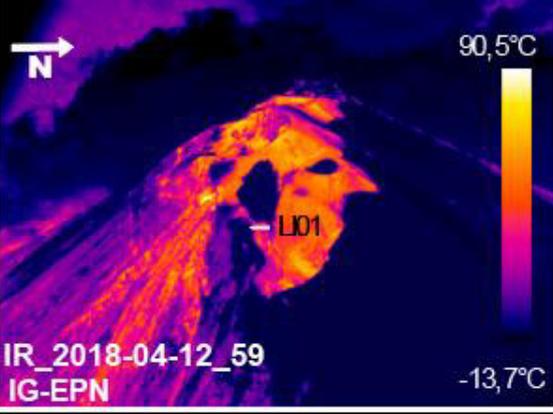
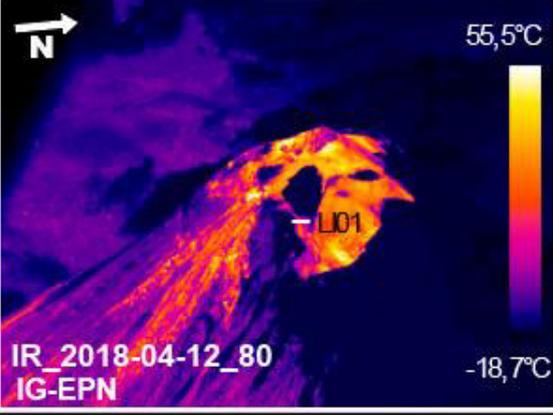
2018-04-12



2019-08-06



### PERFILES DOMOS ÑUÑURCO 3

IMAGEN	PERFIL
<b>2015-11-05</b>	
 <p>IR_2015-11-05_94 IG-EPN</p>	
<b>2018-04-12</b>	
 <p>IR_2018-04-12_57 IG-EPN</p>	
 <p>IR_2018-04-12_59 IG-EPN</p>	
 <p>IR_2018-04-12_80 IG-EPN</p>	