



**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA**

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE POPAYÁN

**INFORME TÉCNICO DE ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES
NEVADO DEL HUILA, PURACÉ Y SOTARÁ DURANTE
EL AÑO 2013**

POPAYÁN, 2014

TABLA DE CONTENIDO

1	VOLCÁN NEVADO DEL HUILA	4
1.1	RED DE VIGILANCIA	4
1.1.1	Generalidades	5
1.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	5
1.1.1.2	Red de Estaciones de Monitoreo de Flujos de Lodo.	5
1.1.1.3	Cámaras web.	5
1.1.1.4	ScanDOAS.	5
1.1.1.5	Deformación volcánica.	6
1.1.1.6	Estación acústica.	6
1.1.2	Funcionamiento de Estaciones	6
1.2	SISMOLOGÍA	7
1.2.1	Actividad Sísmica	8
1.2.2	Energía Sísmica Liberada	8
1.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	10
1.2.3.1	Localización de eventos asociados a procesos de fractura.	10
1.3	DEFORMACIÓN	12
1.3.1	Inclinometría Electrónica	12
1.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	13
1.4.1	Cámaras para el Seguimiento a la Actividad Superficial	14
1.4.2	Imágenes satelitales del volcán Nevado del Huila	21
1.4.2.1	Mayo 1.	21
1.4.2.2	Julio.	22
1.4.2.3	Agosto.	23
1.4.2.4	Septiembre.	24
1.4.2.5	Diciembre.	26
1.5	FISICOQUÍMICA	30
1.5.1	Medidas Móviles de Flujo de SO_2 - Mobile DOAS	30
1.6	CONCLUSIÓN	33
2	VOLCÁN PURACÉ	34
2.1	RED DE VIGILANCIA	35
2.1.1	Generalidades	35
2.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	35
2.1.1.2	Red de Deformación.	35
2.1.1.3	Cámaras web.	36
2.1.1.4	Geofísica.	36
2.1.1.5	Fisicoquímica.	36
2.1.1.6	Meteorología.	36
2.1.2	Funcionamiento de Estaciones	37
2.2	SISMOLOGÍA	39
2.2.1	Actividad Sísmica	39
2.2.2	Energía Sísmica Liberada	40

2.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	42
2.2.3.1	Localización de eventos asociados a dinámica de fluidos.	42
2.2.3.2	Localización de eventos asociados con procesos de fractura.	42
2.3	DEFORMACIÓN	44
2.3.1	Inclinometría Electrónica	45
2.3.2	Estaciones GNSS Permanentes	50
2.3.3	Medición electrónica de distancias (EDM)	53
2.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	54
2.5	ELECTROMAGNETISMO	65
2.5.1	Potenciales Eléctricos Espontáneos	65
2.5.2	Magnetometría	66
2.6	FISICOQUÍMICA	67
2.6.1	Medidas de Gas Radón	68
2.6.2	Fuentes Termales	70
2.6.3	Imágenes térmicas	73
2.6.3.1	Registro termográfico de fuentes termales	73
2.6.3.2	Observaciones sobre el cráter del volcán Puracé	74
2.6.3.3	Termometría	75
2.6.3.4	Medida de flujo de CO_2	77
2.7	CONCLUSIÓN.	79
3	VOLCÁN SOTARÁ.	80
3.1	RED DE VIGILANCIA	80
3.1.1	Generalidades	81
3.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	81
3.1.1.2	Red de Deformación.	81
3.1.1.3	Red de cámaras web.	81
3.1.2	Funcionamiento de Estaciones	81
3.2	SISMOLOGÍA	82
3.2.1	Actividad Sísmica	82
3.2.2	Energía Sísmica Liberada	82
3.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	85
3.2.3.1	Localización de eventos asociados con procesos de fractura.	85
3.3	DEFORMACIÓN	86
3.3.1	Inclinometría Electrónica	86
3.3.2	Estación GNSS Permanente	87
3.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	90
3.4.1	Cámara para el seguimiento de la actividad superficial	91
3.5	FISICOQUÍMICA	92
3.5.1	Fuentes Termales	93
3.6	CONCLUSIÓN	95
4	ACTIVIDAD TECTÓNICA LOCAL.	96

TABLA DE FIGURAS

Figura 1	Volcán Nevado del Huila, visto desde el costado sur del edificio volcánico. Imagen captada durante sobrevuelo efectuado el 26 de abril de 2011.	4
Figura 2	Red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.	5
Figura 3	Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila durante el año 2013.	7
Figura 4	Red de vigilancia en sismología del volcán Nevado del Huila.	7
Figura 5	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Nevado del Huila durante el año 2013.	8
Figura 6	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila durante 2013.	9
Figura 7	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila durante 2013.	10
Figura 8	Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos en el volcán Nevado del Huila. . .	11
Figura 9	Dispersión de los valores de magnitud local para los eventos de fractura localizados en el volcán Nevado del Huila.	12
Figura 10	Red de vigilancia en deformación del volcán Nevado del Huila.	13
Figura 11	Comportamiento del inclinómetro electrónico Caloto.	13
Figura 12	Red de monitoreo de la actividad superficial del volcán Nevado del Huila.	14
Figura 13	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	15
Figura 14	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	16
Figura 15	Imágenes captadas por la cámara web Caloto.	17
Figura 16	Imágenes captadas por la cámara web Caloto.	18
Figura 17	Imágenes captadas por la cámara web Maravillas.	19
Figura 18	Imágenes captadas por la cámara web Maravillas.	20
Figura 19	Imágenes captadas por la cámara web Maravillas.	21
Figura 20	Imagen satelital del VNH tomada el 1 de mayo de 2013.	22
Figura 21	Comparación imágenes térmicas satelitales del VNH.	23
Figura 22	Imagen satelital del VNH, tomada el 24 de julio de 2013.	24
Figura 23	Imagen térmica satelital del VNH del 24 de julio de 2013.	25
Figura 24	Imágenes captadas por el sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, el 1 de agosto de 2013.	26
Figura 25	Imagen satelital del VNH tomada el 2 de septiembre de 2013.	27
Figura 26	Imagen térmica satelital del VNH tomada el 2 de septiembre de 2013.	28
Figura 27	Imagen térmica satelital del VNH tomada el 19 de diciembre de 2013.	29
Figura 28	Detalle de la columna de SO_2 medida el 16 de julio de 2013.	30
Figura 29	Flujo de SO_2 calculado, de marzo de 2012 a diciembre de 2013, mediante la técnica de DOAS móvil, para el volcán Nevado del Huila.	32
Figura 30	Velocidades del viento asumidas para el cálculo de flujo de SO_2 emitido por el volcán Nevado del Huila durante el año 2013.	32
Figura 31	Ruta y espectrograma - Medida móvil de flujo de SO_2 VNH.	33
Figura 32	Volcán Puracé. Imagen captada durante sobrevuelo del 22 de octubre de 2011.	34

Figura 33	Red de vigilancia del volcán Puracé.	35
Figura 34	Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Puracé durante el año 2013.	38
Figura 35	Red de vigilancia en sismología del volcán Puracé.	39
Figura 36	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Puracé en enero de 2014. . .	40
Figura 37	Relación de la variación presentada en el número de eventos sísmicos registrados diariamente en el volcán Puracé para el año 2013.	40
Figura 38	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Puracé durante 2013.	41
Figura 39	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Puracé durante 2013.	41
Figura 40	Mapa de localización de eventos sísmicos asociados a dinámica de fluidos en el volcán Puracé, durante el año 2013	43
Figura 41	Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos del volcán Puracé durante 2013. .	44
Figura 42	Gráfica de distribución de los valores de magnitud local diferenciados por zona de generación en el año 2013.	44
Figura 43	Red de vigilancia en deformación del volcán Puracé.	45
Figura 44	Instalación de equipos de deformación en la estación Cocuy2.	45
Figura 45	Estación GNSS Mina.	46
Figura 46	Detalle de instalación de estaciones GNSS de campaña.	47
Figura 47	Comportamiento del inclinómetro electrónico Lavas Rojas.	48
Figura 48	Comportamiento del inclinómetro electrónico Guañarita.	48
Figura 49	Comportamiento del inclinómetro electrónico Agua Blanca.	49
Figura 50	Comportamiento del inclinómetro electrónico Curiquina.	49
Figura 51	Comportamiento del inclinómetro electrónico Cocuy2.	50
Figura 52	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Lavas Rojas. . .	51
Figura 53	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Guañarita. . . .	51
Figura 54	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Blanca. Enero de 2014.	52
Figura 55	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Cocuy2.	52
Figura 56	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Mina.	53
Figura 57	Línea base de mediciones EDM en el volcán Puracé.	54
Figura 58	Mapa de localización de las cámaras web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Puracé.	55
Figura 59	Campo fumarólico lateral del volcán Puracé.	55
Figura 60	Velocidades del viento reportadas por el anemómetro de Mina.	56
Figura 61	Diagrama de Rosa de los vientos generado a partir de datos del anemómetro de Mina. .	56
Figura 62	Imágenes de la estación web Mina.	57
Figura 63	Imágenes de la estación web Mina.	58
Figura 64	Imágenes de la estación web Mina.	59
Figura 65	Imágenes de la estación web Mina.	60
Figura 66	Detalle del campo visual de la nueva cámara web Anambío.	61
Figura 67	Imágenes captadas por la cámara web Anambío.	62
Figura 68	Cambios ambientales en el volcán Puracé (nevadas súbitas - fuertes precipitaciones). .	63
Figura 69	Imágenes captadas por la cámara web Mina.	63
Figura 70	Imágenes captadas por la cámara web Lavas Rojas.	64
Figura 71	Red de vigilancia en electromagnetismo del volcán Puracé.	65
Figura 72	Valores de Precipitación diaria y Potencial Eléctrico Espontáneo registrados en el volcán Puracé.	66
Figura 73	Mediciones Magnetométricas en el volcán Puracé.	67
Figura 74	Red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Puracé. Enero de 2014.	68

Figura 75	Variación de la concentración de Radón en suelo en las estaciones isotópicas no telemétricas permanentes del volcán Puracé.	69
Figura 76	Variación de los niveles de Radón en suelo en estación Guañarita del Volcán Puracé.	70
Figura 77	Variación de la concentración de Radón y de Dióxido de Carbono en suelo, en la estación telemétrica Cráter del volcán Puracé.	70
Figura 78	Variación de la concentración de Radón y de Dióxido de Carbono en suelo, en la estación telemétrica Cocuy3.	71
Figura 79	Mosaico fuentes termales volcán Puracé, muestreos 2013.	72
Figura 80	Variación de temperatura en las fuentes termales del volcán Puracé.	72
Figura 81	Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales asociadas al volcán Puracé.	74
Figura 82	Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales asociadas al volcán Puracé.	75
Figura 83	Fotografía de Anambio y zonas térmicamente activas.	76
Figura 84	Fotografía de Anambio y zonas térmicamente activas.	76
Figura 85	Detalle de la estación termométrica telemétrica instalada en el campo fumarólico lateral del volcán Puracé.	77
Figura 86	Comportamiento de la temperatura en el campo fumarólico lateral del volcán Puracé en el año 2013.	78
Figura 87	Mosaico de instalación estación multiparámetrica Radón-Cocuy.	78
Figura 88	Mapa de puntos de muestreo de desgasificación difusa de CO_2 del Volcán Puracé.	79
Figura 89	Imagen panorámica del volcán Sotará, visto desde su costado noroccidental, a aproximadamente 2 <i>km</i> de la cima.	80
Figura 90	Red de vigilancia del volcán Sotará. Enero de 2014.	81
Figura 91	Porcentaje de funcionamiento de las estaciones de la red de vigilancia del volcán Sotará durante el año 2013.	82
Figura 92	Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará.	83
Figura 93	Número de eventos VT clasificados en el volcán Sotará durante el año de 2013.	84
Figura 94	Relación mensual de número de eventos VT, con bajo aporte energético en el volcán Sotará durante el año 2013.	84
Figura 95	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT en el volcán Sotará, año 2013.	85
Figura 96	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT en el volcán Sotará, año 2013.	85
Figura 97	Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos del volcán Sotará durante el 2013.	86
Figura 98	Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará. Enero de 2014.	87
Figura 99	Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará. Enero de 2014.	88
Figura 100	Comportamiento del inclinómetro electrónico Oso. Enero de 2014.	88
Figura 101	Comportamiento del inclinómetro electrónico Triángulo. Enero de 2014.	89
Figura 102	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Oso.	89
Figura 103	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Estumo.	90
Figura 104	Mapa de localización de la cámara web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Sotará.	90
Figura 105	Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará.	91
Figura 106	Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará.	92
Figura 107	Fuentes termales y campo fumarólico del volcán Sotará.	93
Figura 108	Fuentes termales y campo fumarólico del volcán Sotará.	94
Figura 109	Variación de temperatura en las fuentes termales en el volcán Sotará.	94
Figura 110	Variación del potencial de hidrógeno en las fuentes termales en el volcán Sotará.	95
Figura 111	Localización de la sismicidad tectónica local registrada durante el año 2013.	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.	6
Tabla 2	Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Nevado del Huila durante el año 2013.	8
Tabla 3	Aspectos de las columnas de SO_2 medidas durante el año 2013.	31
Tabla 4	Detalles de las mediciones de SO_2 realizadas durante el año 2013.	31
Tabla 5	Características de la red de vigilancia no telemétrica del volcán Puracé.	37
Tabla 6	Características de la red de vigilancia telemétrica del volcán Puracé.	38
Tabla 7	Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Puracé durante 2013.	40
Tabla 8	Variaciones más relevantes en la estación Cóndor PEE durante el año 2013.	66
Tabla 9	Valores de la temperatura para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	71
Tabla 10	Potencial de hidrógeno y conductividad térmica para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	73
Tabla 11	Potencial de hidrógeno y potencial de oxido-reducción para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	73
Tabla 12	Registro termográfico de las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	74
Tabla 13	Registro termográfico de las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	74
Tabla 14	Características de la red de vigilancia del volcán Sotará.	82
Tabla 15	Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Sotará durante el año 2013.	83
Tabla 16	Eventos volcano-tectónicos destacados con $M_L \leq 2$ en el volcán Sotará 2013.	86

INTRODUCCIÓN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), a través de la Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, cuenta con una red de Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos en el sector occidental del territorio colombiano; éstos se encargan del monitoreo continuo y en tiempo real de los volcanes activos de esta sección del país. Es por ello que el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVS-Popayán), creado en 1993, realiza las labores de vigilancia a los volcanes Puracé y Sotará, los cuales se encuentran localizados en el departamento del Cauca, y al volcán Nevado del Huila, ubicado en límites de los departamentos del Cauca, Huila y Tolima.

En el presente informe de actividad, se compila la información obtenida mediante las diferentes técnicas de monitoreo implementadas en los centros volcánicos mencionados anteriormente, durante el período comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del año 2013.

El grupo de trabajo del OVS-Popayán está conformado por:

Nombre	Área
Adriana del Pilar Agudelo Restrepo	Coordinación Técnica
Cristian Camilo Santacoloma Salguero	Sismología
Andrés Hernando Narváez Zúñiga	Sismología
Carlos Alberto Ospina Caicedo	Sismología
Diana Marcela Quintero García	Sismología
Iván Darío Corchuelo Castro	Sismología
Julián Sánchez Vargas	Sismología
Rosa Liliana Alpala Aguilar	Sismología
Alma Jimena Casas Buesaquillo	Electrónica
David Santiago Corchuelo Castro	Electrónica
Nicolas Antonio Oliveras Mercado	Electrónica
Luisa Fernanda Meza Maldonado	Geoquímica
Jorge Armando Alpala Aguilar	Deformación
Bernardo Alonso Pulgarín Alzate	Geología
Carlos Andrés Laverde Castaño	Geología
John Jainer Galarza Zambrano	Geología
Luis Gerónimo Valencia Ramírez	Geología
Adrian Sotelo Zuñiga	Sistemas de Información
José Eduardo Gómez Daza	Sistemas de Información
Oscar Hernán Manzo Ortíz	Sistemas de Información
Luis Eduardo Vélez Jiménez	Técnico Operativo
Wilson Alexander Torres Tonguino	Técnico Operativo
Ana Cecilia Rincón Bonilla	Servicios Administrativos
Sara Raquel Aguilar Bermeo	Gestión Documental
Derly Andrea Zúñiga Muñoz	Servicio al cliente
Jonier Fabian Díaz Bolaños	Servicios Generales
María Marlene Mera Maca	Servicios Generales

RESUMEN

En el año 2013 el volcán Nevado del Huila presentó en general una tendencia estable en sismicidad, con niveles que se consideran como bajos. Durante el primer semestre del año la actividad de fluidos tuvo un incremento en la ocurrencia de eventos con respecto al semestre inmediatamente anterior. Con respecto a la actividad de fractura, a excepción del día 28 de noviembre, cuando se dio un aumento considerable en este tipo de actividad sísmica, los niveles permanecieron bajos durante todo el año. Se destaca la ocurrencia de cuatro eventos de fractura con magnitudes mayores a $3.0 M_L$ en la escala de Richter: dos se localizaron cerca del Pico Central los días 15 de enero y 15 de noviembre y los dos restantes sobre el costado Este del edificio volcánico los días 7 y 8 de Septiembre; en todos los casos las profundidades calculadas fueron menores a 4 km. El inclinómetro electrónico Caloto registró un comportamiento estable en sus componentes Este y Norte, con ligeras variaciones debidas a efectos externos causados por la temperatura, que no se correlacionaron con cambios en las demás técnicas de vigilancia volcánica. Durante el año 2013, las emisiones de Dióxido de Azufre (SO_2) a la atmósfera presentaron bajos valores en sus medidas, el máximo obtenido se presentó el día 16 de julio, con un flujo total estimado de 995 toneladas diarias. A través de las cámaras web que siguen la actividad superficial del volcán, no se registraron cambios morfológicos del edificio volcánico. Por lo anterior, y de acuerdo al análisis de la información obtenida a partir de las diferentes redes de vigilancia durante el año 2013, el OVS-Popayán mantiene para el volcán Nevado del Huila el nivel de actividad volcánica en *NIVEL III: CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCANICA*.

El volcán Puracé durante el año 2013 mantuvo el predominio de la actividad sísmica asociada a la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos sobre aquella relacionada con procesos de fracturamiento de roca. Mediante los registros de la red de inclinómetros electrónicos y de estaciones GNSS no se evidenciaron procesos deformativos en el volcán. Por otro lado, a partir del monitoreo de los diferentes parámetros geoquímicos, así como del análisis de la información obtenida con sensores de autopotencial y magnetómetros, se determina una tendencia estable en el comportamiento del volcán, con pequeñas variaciones que no tienen relación con su actividad. Buscando ampliar y mejorar la cobertura de las redes de monitoreo, el día 27 de marzo se llevó a cabo la instalación de un inclinómetro, un sensor de autopotencial y un GNSS, todos ubicados en el flanco noreste del edificio volcánico de Puracé. Así mismo, el día 17 de abril se instaló un GNSS en el sector denominado La Mina, y el 27 de junio un magnetómetro cerca al cráter actual. Los días 31 de julio y 13 de septiembre se instalaron sensores telemétricos para gas Radón y Dióxido de Carbono (CO_2) en la zona del Cráter y el costado noreste respectivamente; los últimos equipos instalados en el año fueron un sensor de CO_2 telemétrico y una cámara web, el día 27 de septiembre en el sector llamado Anambío, en inmediaciones del flanco oeste del edificio volcánico, a la altura del cráter actual. A partir del análisis de la información de los diferentes parámetros monitoreados durante el 2013, el OVS Popayán mantiene el nivel de actividad del volcán Puracé en *NIVEL IV: VOLCAN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE*.

En el año 2013 el volcán Sotará presentó una disminución considerable en la actividad sísmica con respecto a lo ocurrido en el segundo semestre de 2012, la red de estaciones sismológicas de este volcán registró 437 eventos sísmicos, los cuales estuvieron relacionados exclusivamente con procesos de fracturamiento de roca, todos considerados como de bajo nivel energético. Se destaca el registro de 4 sismos con magnitudes entre 2.0 y $2.7 M_L$ en la escala de Richter, todos localizados al noreste del edificio volcánico en el sector conocido como Valle de Paletará. Los datos registrados por la red de inclinómetros y GNSS mostraron un comportamiento estable, infiriéndose que en el edificio volcánico no se están presentando procesos deformativos considerables. En el mes de mayo se llevó a cabo la instalación de una estación GNSS para reforzar el monitoreo en deformación de la parte alta de este volcán, mientras que en julio se instaló la estación sismológica Peñón Bajo, ubicada al noreste del volcán. Con base en el análisis de la información obtenida a partir de toda la red de monitoreo, el OVS Popayán declara que el volcán Sotará continúa en *NIVEL III: CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA*.

Por último, con respecto a la actividad sísmica asociada con la dinámica tectónica (fracturas y fallas) en la región suroccidental de Colombia, durante el año 2013 la red sísmica instalada por el OVS-Popayán registró un total de 1418 eventos tectónicos locales, de ellos se destacan cinco los cuales superan el valor de 4.0

M_L en la escala de Richter, estos fueron reportados por la Red Sismológica Nacional de Colombia, como se aprecia a continuación: Tesalia (Huila) el 14 de abril con 4.3 M_L en la escala de Richter, Buenaventura (Valle del Cauca) el 23 de mayo con 4.2 M_L en la escala de Richter, Algeciras (Huila) el 10 de junio con 4.6 M_L en la escala de Richter, Gigante (Huila) el 8 de septiembre con 4.1 M_L en la escala de Richter y Calima (Valle del Cauca) el 14 de noviembre con 4.3 M_L en la escala de Richter.

1 VOLCÁN NEVADO DEL HUILA



Figura 1: Volcán Nevado del Huila, visto desde el costado sur del edificio volcánico. Imagen captada durante sobrevuelo efectuado el 26 de abril de 2011.

El volcán Nevado del Huila (ver figura 1) se localiza en límites de los departamentos del Cauca, Huila y Tolima, en las coordenadas geográficas $2^{\circ} 55' N$ y $76^{\circ} 03' W$, a una distancia aproximada de 90 km al NE de la ciudad de Popayán.

Este complejo volcánico presenta una forma elongada en dirección N-S, con ejes basales de 16 y 11 km , respectivamente; su cima está cubierta por un casquete glaciar de 10 km^2 , en la que sobresalen los Picos Norte, La Cresta, Pico Central y Pico Sur, alineados en dirección N-S; igualmente, en el sector sur de esta estructura volcánica se localizan los domos Cerro Negro y Morrillo, los cuales fueron descubiertos a partir del retroceso glaciar de los últimos años. Durante los procesos eruptivos ocurridos en noviembre de 2008 y octubre de 2009 se presentó la extrusión de un nuevo domo lávico, el cual se encuentra emplazado en la parte alta del edificio volcánico entre los Picos Central y Sur.

El Pico Central es la máxima altura del complejo volcánico con 5364 msnm , siendo también la máxima altura de la cadena montañosa de los Andes Colombianos; así mismo, éste representa el eje central de la actividad volcánica actual, dado que en él se concentran los principales focos de actividad fumarólica, además de representar una fuente generadora recurrente de actividad sísmica.

1.1. RED DE VIGILANCIA

La red de vigilancia del volcán Nevado del Huila está compuesta por diversos instrumentos, que se emplean para medir diferentes parámetros, mediante técnicas tales como: geofísica, geoquímica y geodesia. Durante todo el año se hace un seguimiento al desempeño y operatividad de toda la red de vigilancia, los cuales se evalúan en términos porcentuales. La tabla 1 describe las características de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila. El mapa de la red de vigilancia se muestra en la figura 2.

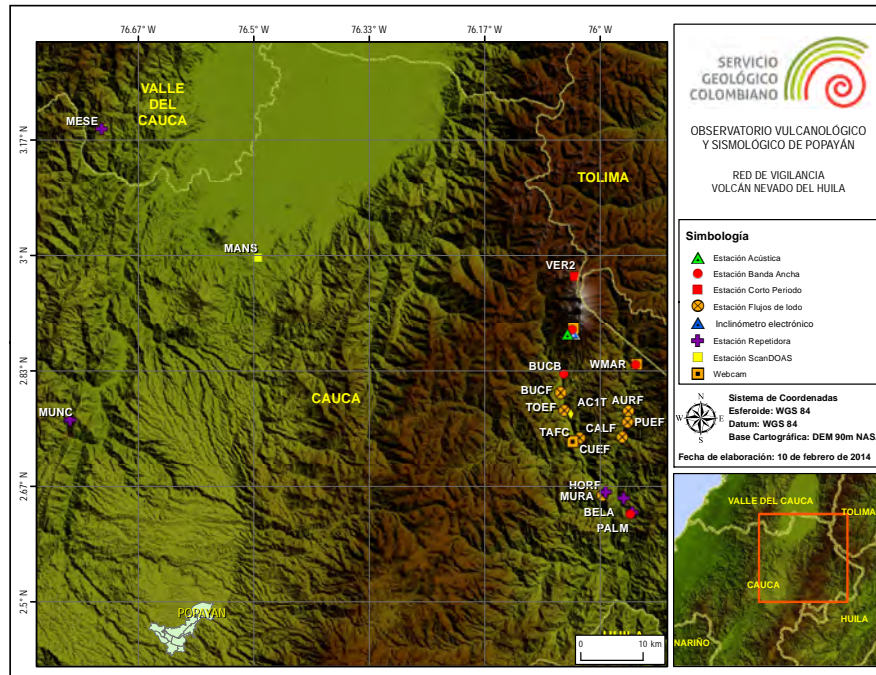


Figura 2: Red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.

1.1.1. Generalidades

1.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. El OVS-Popayán cuenta con una red operativa de cinco estaciones sísmicas. La estación triaxial de corto período Verdún2 (VER2), instalada en el extremo norte del edificio volcánico, a 5.5 km del Pico Central; y cuatro estaciones triaxiales de banda ancha ubicadas en los siguientes sectores: Buco (BUCB), a 11.2 km al sur del Pico Central; Maravillas (MARB), a 12.8 km al sureste del Pico Central; Caloto (CALB), a 3.7 km al sur-suroccidente del Pico Central; y La Palma, a 34.2 km al sur-suroccidente del Pico Central.

1.1.1.2. Red de Estaciones de Monitoreo de Flujos de Lodo. La red de estaciones para monitoreo de flujos de lodo fue instalada en octubre de 2006, bajo el convenio interinstitucional suscrito entre Ingeominas (OVS-Popayán), la Corporación NASA KIWE, la DGPAD y la alcaldía de Páez. El objetivo de esta red, la cual se compone en la actualidad de siete estaciones instaladas a lo largo de las cuencas de los ríos Páez y Símbola, es monitorear y detectar posibles cambios volumétricos en los caudales de los ríos mencionados.

1.1.1.3. Cámaras web. El volcán Nevado del Huila cuenta con tres cámaras con conexión IP para el monitoreo de la actividad superficial; estos equipos se encuentran ubicados en el extremo sur del edificio volcánico, en los sectores denominados Tafxnú (Resguardo de Taravira, 21.8 km al sur del Pico Central), Maravillas (12.8 km al suroriente del Pico Central) y Caloto (3.7 km del domo extruído en noviembre de 2008).

1.1.1.4. ScanDOAS. Con el fin de monitorear las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) del volcán Nevado del Huila, se cuenta con una estación de ScanDOAS, la cual se encuentra instalada a 52 km al NW del Pico Central, en el sitio denominado Manantial (municipio de Santander de Quilichao, departamento del Cauca).

1.1.1.5. Deformación volcánica. Para la vigilancia de la deformación del edificio volcánico, se dispone de un inclinómetro electrónico denominado Caloto, el cual se encuentra ubicado a 3.7 *km* al S-SW del Pico Central y a una altura de 4188 *msnm*.

1.1.1.6. Estación acústica. Esta estación se encuentra equipada con un micrófono mediante el cual se obtienen registros acústicos relacionados con la actividad volcánica. Este equipo se encuentra instalado a 3.7 *km* al SW del Pico Central.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (<i>msnm</i>)	Distancia al Pico Central (<i>km</i>)	Operativa
Verdún 2	Corto Período Triaxial	2.9723	76.0353	4544	4.8	SI
La Palma	Banda Ancha	2.6237	75.9586	2230	34.2	SI
Bucu	Banda Ancha	2.8265	76.0548	2310	11.13	SI
	Flujos de lodo	2.8015	76.0578	2100	14.14	SI
Maravillas	Banda Ancha	2.8397	75.9511	2207	12.8	SI
	Cámara web	2.838340	75.9515	2194	13.29	SI
Caloto	Banda Ancha	2.8902	76.0427	4184	4.04	SI
	Cámara web					SI
	Inclinómetro Electrónico					SI
	Acústica					SI
Tafxnú	Cámara web					SI
Aurora	Flujos de lodo	2.7755	75.9598	1904	18.16	SI
Calderitas	Flujos de lodo	2.7385	75.9691	1757	22.01	SI
Cohetandiyó	Flujos de lodo	2.7371	76.0305	1842	21.00	SI
Muralla	Flujos de lodo	2.6526	75.9977	2420	30.63	SI
Pueblo Nuevo	Flujos de lodo	2.7596	75.9614	1872	20.13	SI
Tóez	Flujos de lodo	2.7765	76.0523	1987	16.77	SI
Manantial	ScanDOAS	2.9969	76.4938	1159	51.78	SI
La Palma	Banda Ancha	2.6237	76.9586	2230	34.23	SI

Tabla 1: Características de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.

1.1.2. Funcionamiento de Estaciones

Los valores del porcentaje de funcionamiento, para todas las estaciones, se calculan en función del funcionamiento de su sistema telemétrico y de adquisición de datos (50 %) y de la calidad de la señal (50 %), es decir, que los datos adquiridos sean válidos para procesar. Se aclara que dentro del informe no están consideradas en el cálculo las estaciones repetidoras, ya que, aunque son importantes en la telemetría, no poseen un instrumento de monitoreo. La telemetría del volcán Nevado Huila está soportada por enlace redundante (un enlace satelital y otro de radio).

Durante el año 2013 la red de vigilancia del Volcán Nevado del Huila presentó un porcentaje de funcionamiento del 87 %, sobre el 87 % correspondiente al total de toda la red de monitoreo del segmento central del país. La gráfica de funcionamiento de estaciones se muestra en la figura 3.

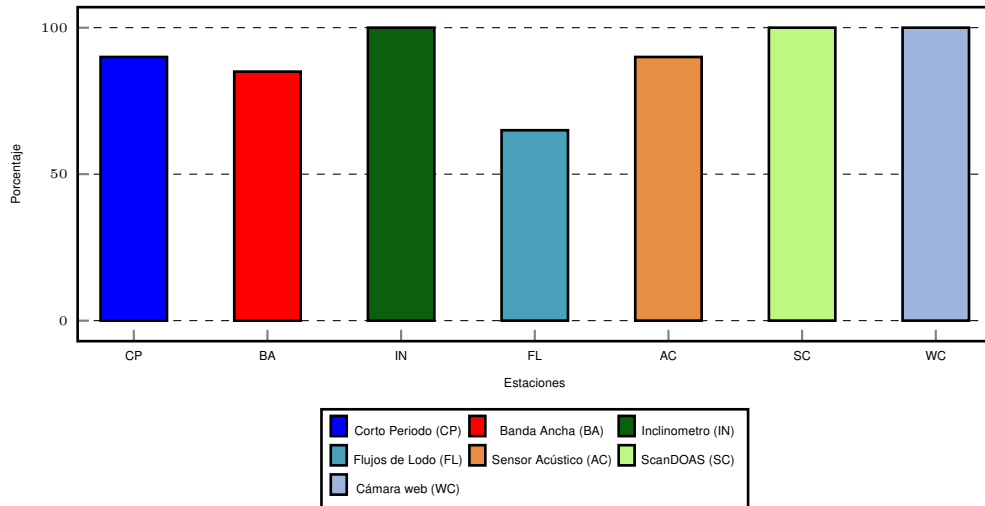


Figura 3: Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila durante el año 2013.

1.2. SISMOLOGÍA

La red de monitoreo sísmico del volcán Nevado del Huila cuenta en la actualidad con cinco estaciones sísmológicas, cuatro de ellas equipadas con sensores de banda ancha y una con un sensor de corto periodo, las cuales se encuentran distribuidas en los sectores norte (Verdún) y sur (Bucu, Maravillas, Caloto y La Palma) del edificio volcánico. En la figura 4 se aprecia la distribución geográfica de las estaciones que componen esta red de monitoreo.

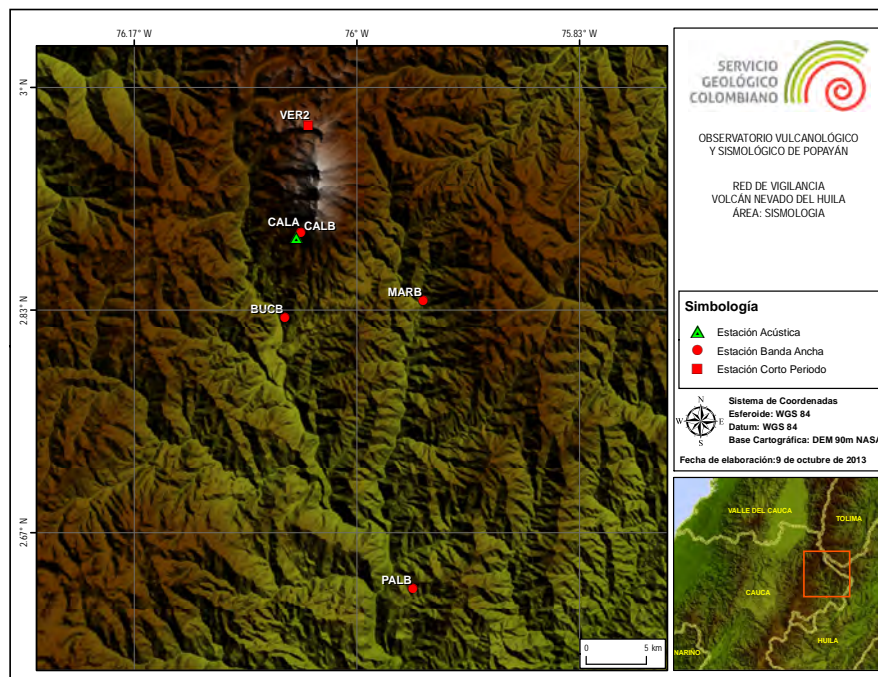


Figura 4: Red de vigilancia en sismología del volcán Nevado del Huila.

1.2.1. Actividad Sísmica

Durante el año 2013 la actividad sísmica del volcán Nevado del Huila se caracterizó por mantenerse en niveles considerados como bajos, así como presentar actividad predominantemente relacionada con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos. El total de eventos sísmicos registrados por la red de estaciones sismológicas del VNH durante el Período evaluado fue de 4579, de los cuales 1696 estuvieron asociados a fracturamiento de roca (tipo VT) y 2883 a tránsito y movimiento de fluidos en los conductos volcánicos; de estos últimos, 2692 se catalogaron como eventos de Largo Período (tipo LP), 73 estuvieron relacionados a procesos combinados de fractura y dinámica de fluidos y fueron clasificados como Híbridos (tipo HB), 5 eventos como Tornillo (tipo TO), y 113 pulsos de tremor de baja magnitud (TR).

La figura 5 muestra la tendencia mostrada por la actividad sísmica del VNH en cuanto al número de eventos sísmicos registrados diariamente durante todo el año, en ella se puede apreciar que la sismicidad relacionada con la dinámica de fluidos durante el primer semestre mostró un leve incremento en el número de sismos registrados diariamente, mientras que en los siguientes meses no se presentaron variaciones a destacar. Con respecto a la sismicidad de fractura, a excepción del 28 de septiembre donde se vio un aumento importante en la ocurrencia de eventos de este tipo, no se observaron fluctuaciones por fuera del promedio en el número de eventos registrados diariamente.

Fecha	Tipos de eventos				
Número de eventos registrados en el volcán Nevado del Huila en el año 2013.	VT	LP	HB	TR	TO
	1696	2692	73	113	5

Tabla 2: Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Nevado del Huila durante el año 2013.

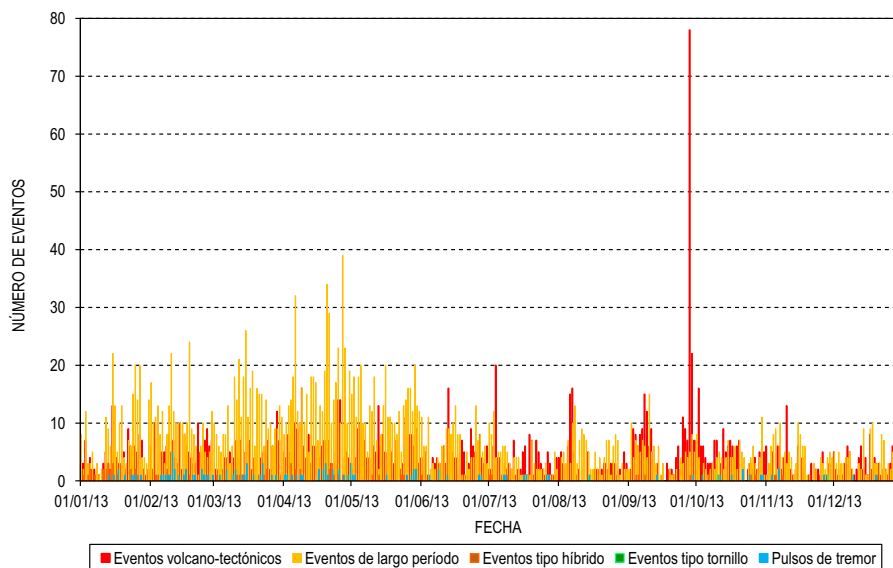


Figura 5: Número de eventos registrados diariamente en el volcán Nevado del Huila durante el año 2013.

1.2.2. Energía Sísmica Liberada

La tendencia de las curvas de energía sísmica liberada diariamente por eventos VT durante el año 2013 presentó algunas variaciones, relacionadas con las duraciones más destacadas del año; mientras que la energía sísmica liberada diariamente por eventos LP, mostró un comportamiento estable con algunas variaciones mínimas debidas a la duración y al número de eventos registrados por día.

Aunque la actividad sísmica relacionada con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos predominó sobre la sismicidad de fractura a lo largo del Período evaluado, la ocurrencia de sismos VT con duracio-

nes superiores a los promedios alcanzados durante el año permitió que este tipo de procesos alcanzaran incrementos puntuales, que se evidencian en la figura 7 para los días 15 de enero, 7 de septiembre y 15 de noviembre de 2013, en los cuales se alcanzaron valores de $6.50E+16$, $6.34E+16$ y $7.38E+16$ *ergios*, respectivamente. El primer incremento se presentó debido al registro de un sismo con una duración de 188 *s*, así mismo un segundo aumento relacionado con la ocurrencia de un evento de 187 *s* de coda y el último fue consecuencia de un evento sísmico con una duración de 215 *s*.

Por otra parte los aportes energéticos realizados de manera diaria por la actividad sísmica asociada con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos, fueron en su mayoría superiores a los de la sismicidad de fractura, exceptuando los días mencionados anteriormente. El máximo valor de energía sísmica liberada por eventos de fluidos se presentó el día 2 de septiembre con un valor de $1.69E+14$ *ergios*, asociado a la ocurrencia de diez eventos LP con duraciones entre 13 y 69 *s*.

En cuanto al comportamiento de la energía sísmica liberada de forma acumulada, se destaca que los aportes energéticos de la actividad de fractura estuvieron por encima de los aportes realizados por la sismicidad de fluidos, principalmente debido a la ocurrencia de tres eventos de magnitudes importantes. Las variaciones descritas anteriormente se ilustran en las gráficas de las figuras 6 y 7.

La figura 7 ilustra el comportamiento de las curvas de energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP.

Nota: La energía es graficada en razón de su raíz cuadrada para facilitar su análisis y visualización.

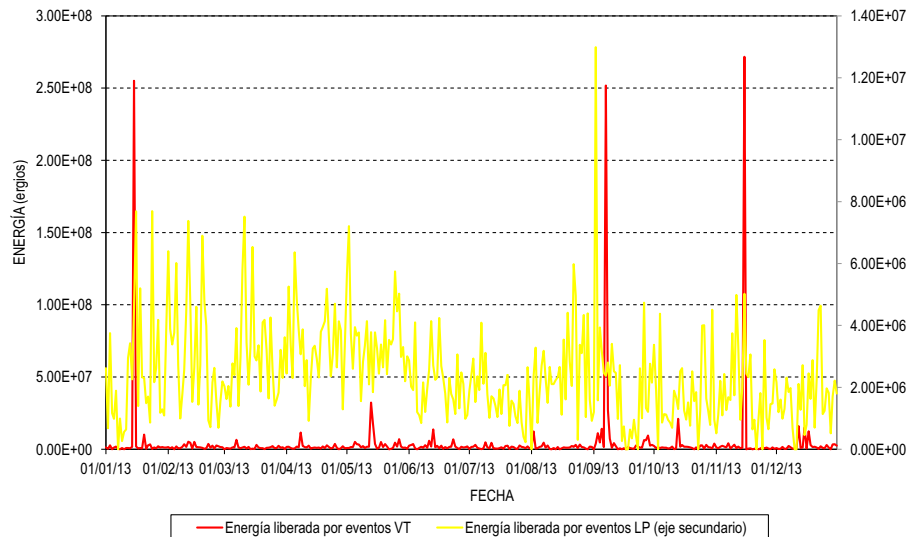


Figura 6: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT (eje vertical derecho) y LP (eje vertical izquierdo) en el volcán Nevado del Huila, durante 2013.

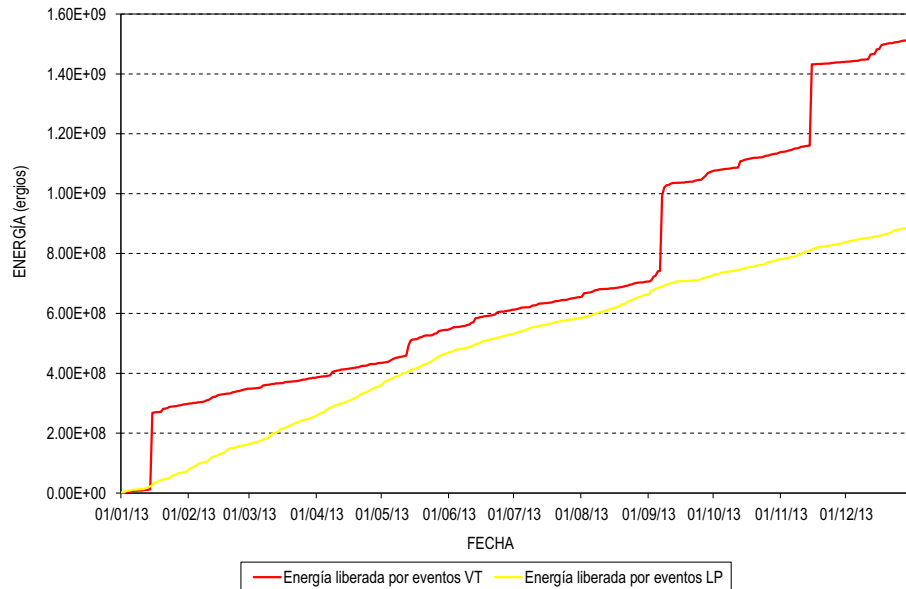


Figura 7: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila durante 2013.

1.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

1.2.3.1. Localización de eventos asociados a procesos de fractura. Durante el año de 2013 fueron localizados 975 sismos asociados a procesos de fracturamiento de roca al interior de la estructura volcánica del Nevado del Huila. Para este período la sismicidad continuó concentrándose principalmente en tres sectores: el primero de ellos está ubicado al costado suroccidental del edificio volcánico, en un rango epicentral que oscila entre 7 y 15 *km* del Pico Central, el cual se caracterizó por registrar actividad sísmica en un amplio rango de profundidad, que varía entre 3 y 12 *km*. Los eventos de esta fuente sismogénica mantuvieron en términos generales bajos valores de magnitud M_L , entre 0.1 y 2.5 *grados* en la escala de Richter.

El siguiente sector está localizado al Oriente y Suroriente del edificio volcánico, en esta zona se presentaron dos fuentes sismogénicas particulares, la primera, más cercana al edificio volcánico, se localizó en un rango epicentral entre 3 y 7 *km* al oriente del Pico Central, sus hipocentros fueron en su mayoría de carácter superficial, oscilando entre 2 y 4 *km*; sin embargo, se registraron algunos eventos de hasta 10 *km* de profundidad. Así mismo se registraron algunas de las magnitudes más importantes del período evaluado, alcanzando valores de M_L de hasta de 3.7 *grados* en la escala de Richter, siendo esta última una de las de mayor aporte energético del año 2013; se presentó el día 7 de septiembre a una profundidad de 2 *km* y a una distancia de 6 *km* del Pico Central. La segunda fuente de esta zona se encuentra a una distancia promedio de 9 *km* al Suroriente del Pico Central, la sismicidad que ocurrió ahí se caracterizó por tener un rango hipocentral más alto, entre 6 y 13 *km*; al mismo tiempo las magnitudes alcanzadas en este sector fueron bajas, siendo la más representativa una magnitud M_L de 3.0 *grados* en la escala de Richter. Por otra parte, se presentaron de manera dispersa algunos eventos al nororiente como suroriente del edificio volcánico, estos eventos no alcanzaron magnitudes significativas y sus hipocentros estuvieron en un promedio de 12 *km*.

El último sector corresponde a la parte alta del edificio volcánico, especialmente el área comprendida entre los Picos Norte y Central, la sismicidad de esta zona se distinguió por ser de carácter superficial, dado que sus hipocentros oscilaron entre 1.0 y 5.0 *km*, se destaca que los eventos de esta zona alcanzaron magnitudes importantes, así entonces, las magnitudes M_L más altas fueron de 3.7 y 3.8 *grados* en la escala de Richter; la primera se presentó el 15 de enero y la segunda el 15 de noviembre, los dos eventos se localizaron sobre el pico la cresta a profundidades de 1.5 y 3.2 *km*, respectivamente.

De manera dispersa y con menor recurrencia también se presentaron sismos hacia el costado Norte del Pico Central, los eventos se localizaron en un rango hipocentral entre 6 y 13 *km*, así mismo sus hipocentros presentan grandes variaciones entre 2 y 9 *km*. Las magnitudes M_L por su parte fueron bajas y presentaron valores desde 0.1 hasta 1.7 *grados* en la escala de Richter.

En la figura 8 se puede apreciar el mapa de localización que muestra la distribución hipocentral y epicentral de la sismicidad localizada durante el año 2013, en él se puede observar la distribución de las fuentes sismogénicas descritas anteriormente, al igual que los sectores en los que ocurrieron eventos sísmicos de manera aislada. En la figura 9 se grafican las magnitudes locales de los eventos sísmicos localizados, observándose que la mayoría de ellos alcanzaron valores de magnitud M_L entre 0.5 y 2.0 *grados* en la escala de Richter; únicamente 4 eventos tuvieron magnitudes M_L iguales o superiores a 3.0 *grados* en la escala de Richter. Igualmente se evidencia que la ocurrencia de eventos sísmicos con valores destacados de magnitud se presentaron de manera aleatoria a lo largo del período evaluado, sin presentar patrones de comportamiento.

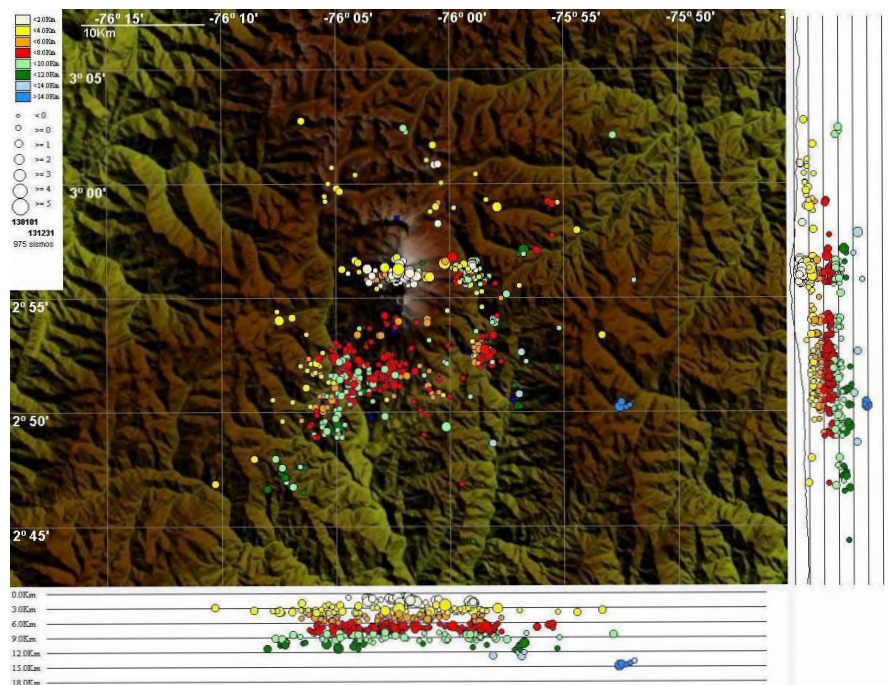


Figura 8: Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos en el volcán Nevado del Huila, entre el 1 de enero y 31 de diciembre de 2013. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud Local (M_L). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

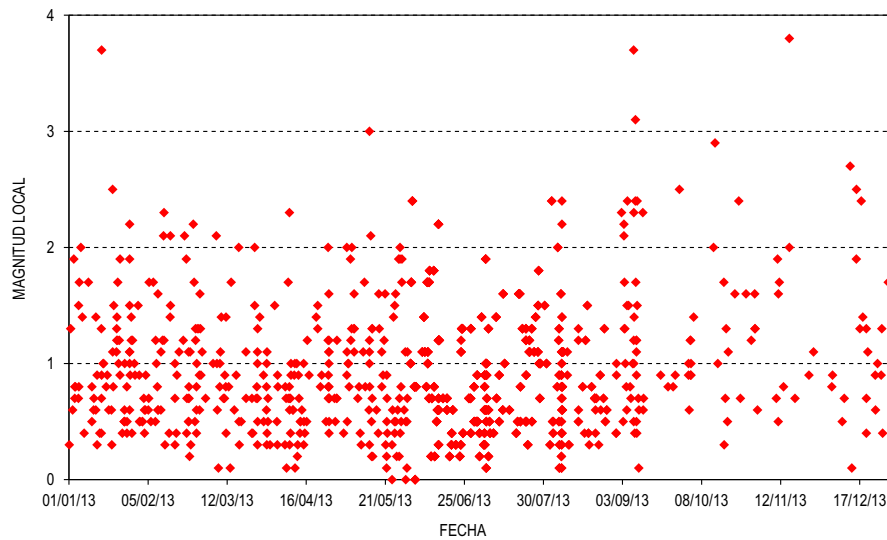


Figura 9: Dispersión de los valores de magnitud local para los eventos de fractura localizados en el volcán Nevado del Huila entre el 1 de enero y 31 de diciembre de 2013.

1.3. DEFORMACIÓN

El monitoreo en deformación volcánica permite cuantificar y cualificar las deformaciones volcánicas, mediante el procesamiento, sistematización, análisis e interpretación de los datos tomados en campo y adquiridos teleméricamente, para llevar un control comparativo que, ligado estrechamente al comportamiento sísmico, geofísico, químico y geológico de un volcán, permita determinar el grado y la cantidad de deformación sufrida por el edificio volcánico, en un período determinado.

Para medir los procesos deformativos que ocurren en un volcán (inflación o deflación), se emplean métodos geodésicos y topográficos de alta precisión (estaciones GNSS permanentes, medición electrónica de distancias, estaciones GNSS de campaña) y métodos electrónicos de alta sensibilidad (inclinómetros electrónicos); esto debido a que las deformaciones volcánicas son muy pequeñas, del orden de milímetros, décimas y centésimas de milímetros y de microradianes.

En la actualidad, el volcán Nevado del Huila cuenta con un inclinómetro electrónico ubicado en el sector denominado Caloto. El mapa de la figura 10 muestra la localización geográfica de este equipo de monitoreo.

1.3.1. Inclinometría Electrónica

Un inclinómetro electrónico es un instrumento que mide las inclinaciones de la superficie del volcán por medio de una plataforma de nivelación triangular, sobre la cual tiene dos sensores de inclinación (de niveles electrolíticos) orientados ortogonalmente (*norte-sur* y *este-oeste*) y un sensor de temperatura para control de cambios térmicos.

1. *Inclinómetro Caloto*: Durante el año 2013 este equipo registró un comportamiento estable, en sus componentes de inclinación norte y este. La componente norte evidencia una ligera influencia por cambios térmicos externos que se asocian con recargas y descargas de la masa glaciar del edificio volcánico. En la figura 11 se puede apreciar la tendencia que han mostrado los registros del inclinómetro durante el período evaluado.

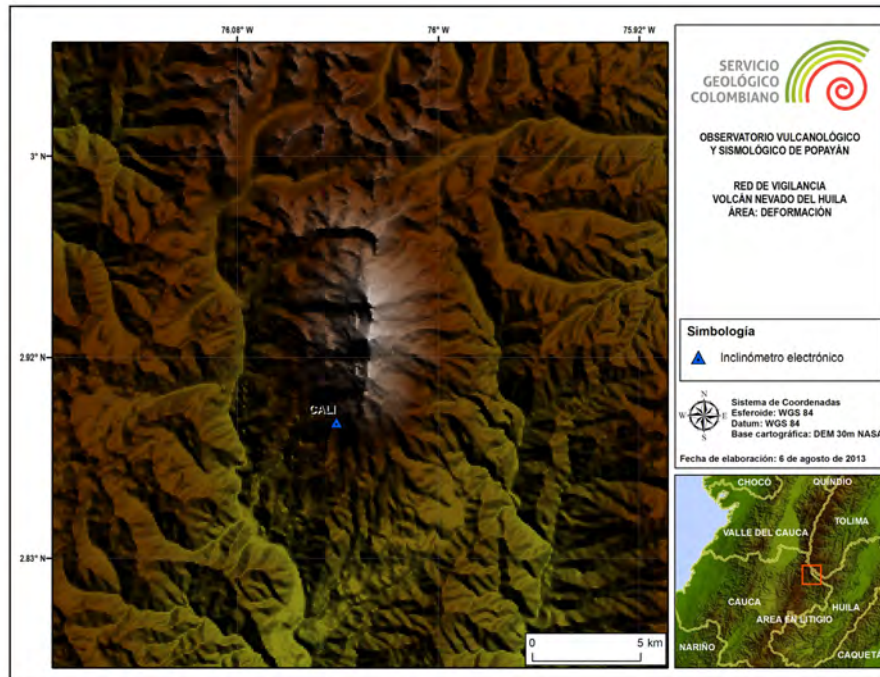


Figura 10: Red de vigilancia en deformación del volcán Nevado del Huila. Año 2013.



Figura 11: Comportamiento del inclinómetro electrónico Caloto. Año 2013.

1.4. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

Durante el año 2013 se continuó realizando el monitoreo de la actividad superficial relacionada con la dinámica interna del volcán; para tal fin, se cuenta con las cámaras web instaladas en el edificio volcánico y su área de

influencia: Tafxnú, Maravillas y Caloto. El mapa de la figura 12 permite apreciar la distribución geográfica de dichas cámaras.

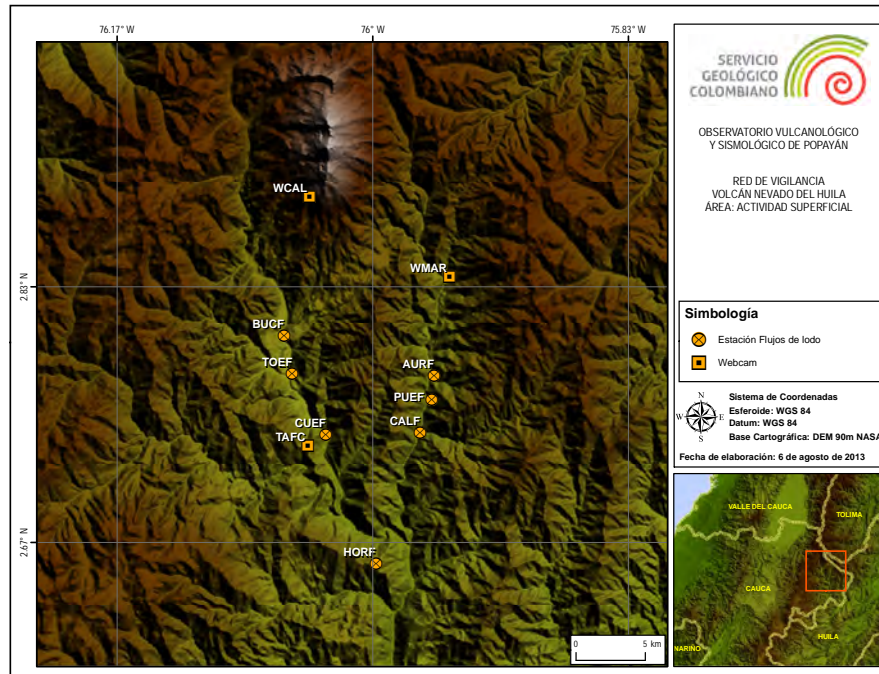


Figura 12: Red de monitoreo de la actividad superficial del volcán Nevado del Huila.

1.4.1. Cámaras para el Seguimiento a la Actividad Superficial

En imágenes captadas a través de las cámaras web Tafxnú, Maravillas y Caloto en el 2013, cuando las condiciones climáticas (precipitación, viento, nubosidad) lo permitieron, se observó que el complejo volcánico continuó su proceso de desgasificación.

Se observaron procesos de desgasificación en columnas fumarólicas con alturas máximas aproximadas de 1.5 *km*, las cuales son emitidas principalmente desde la parte alta del domo y desde algunas grietas sobre el Pico Central; la dirección de las mismas está dada de acuerdo al régimen de vientos imperante en la zona, presentando una tendencia preferencial hacia el costado noroccidental y en algunos episodios hacia el sector nororiental del edificio volcánico durante el año 2013 (ver figuras 13 a 19).

Estas emisiones se caracterizaron generalmente por contener vapor de agua y liberar gases como el dióxido de azufre (SO_2); se destaca el registro del día 16 de octubre cuando fue posible captar desgasificación continua del sistema en columnas emitidas desde la parte norte del Pico Central hasta el sector sur del domo extruido en 2008, este proceso fue visto en detalle desde la cámara web Maravillas

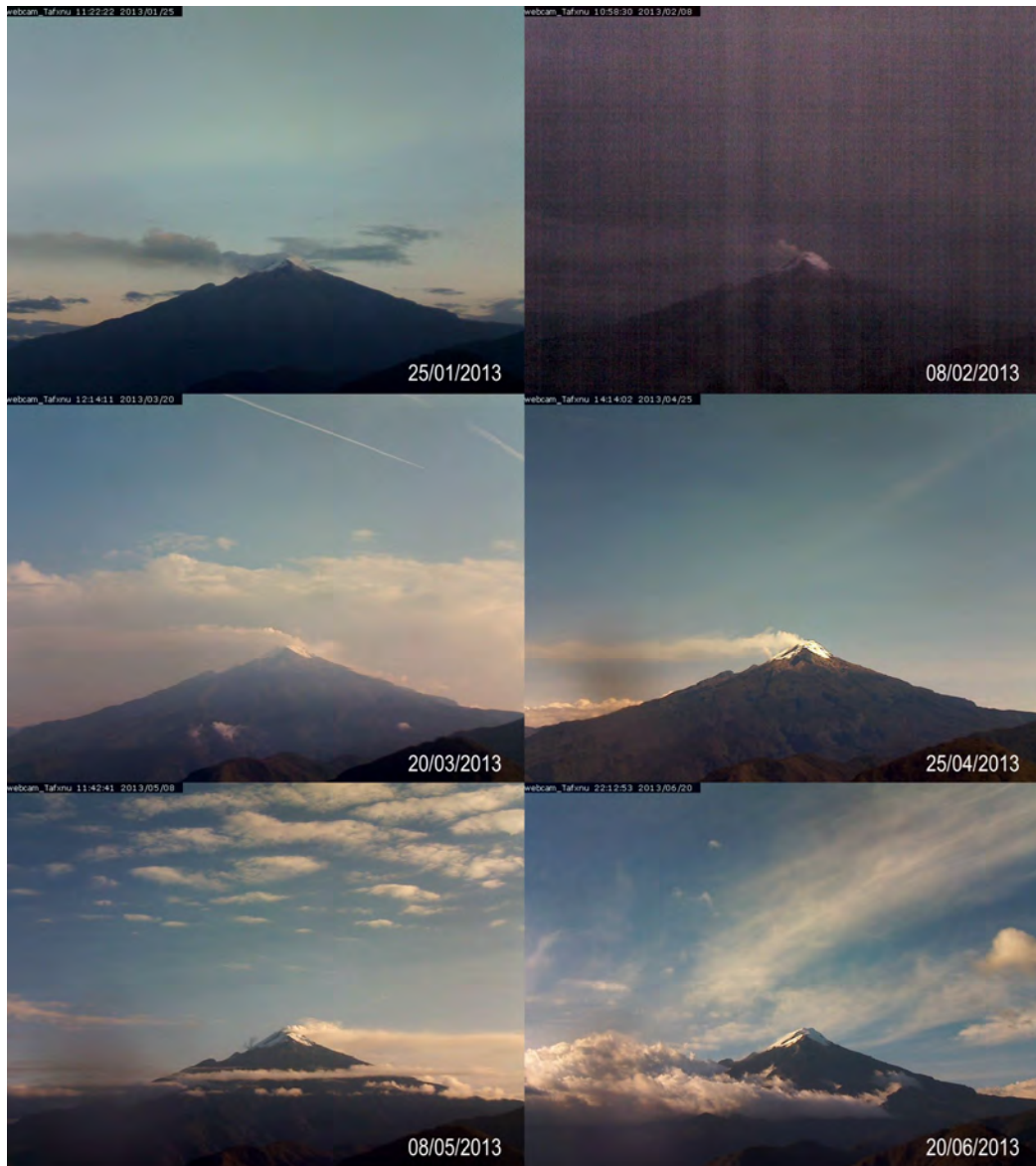


Figura 13: Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú primer semestre de 2013.

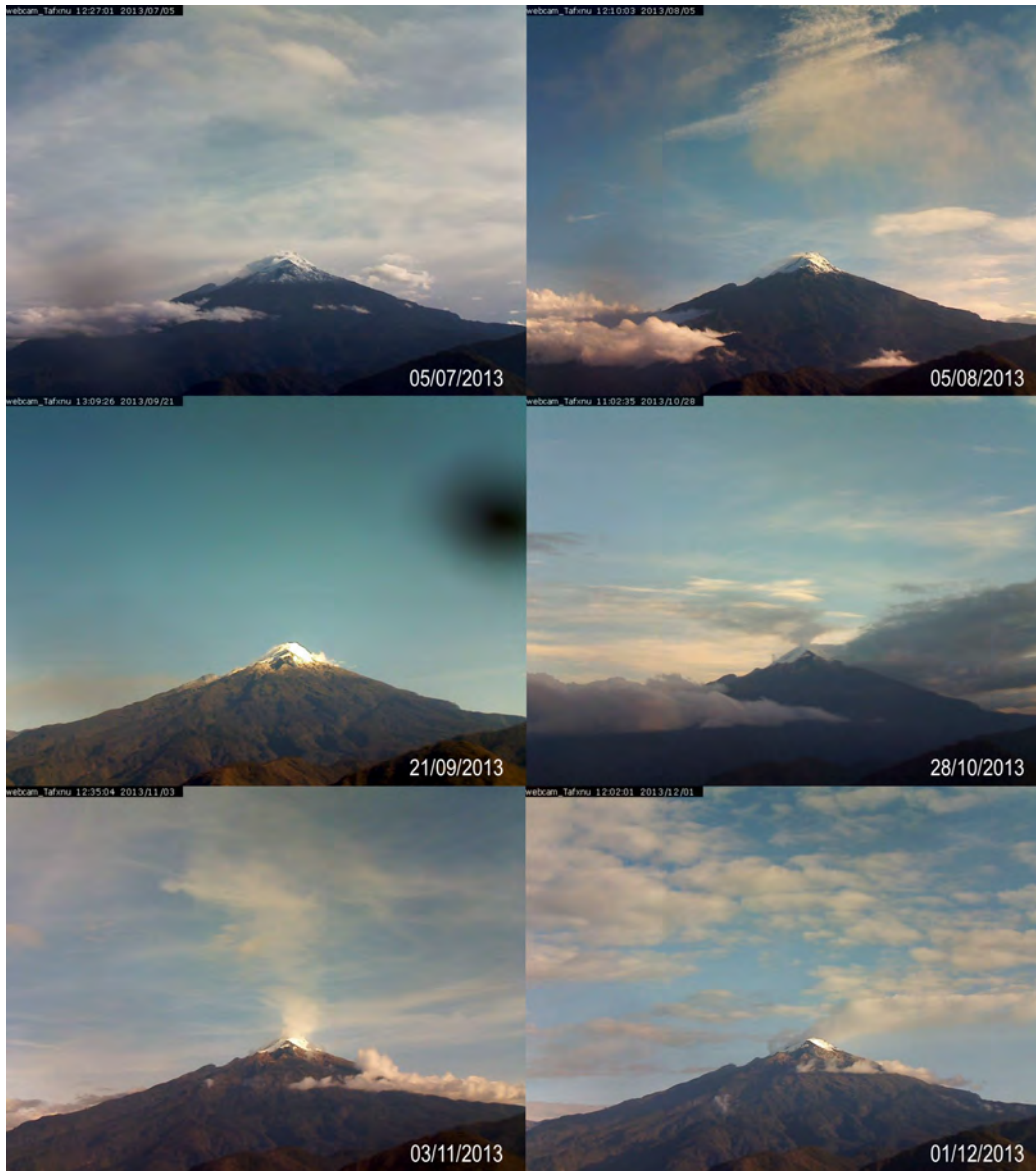


Figura 14: Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú primer semestre de 2013.



Figura 15: Imágenes captadas por la cámara web Caloto durante el segundo semestre de 2013.

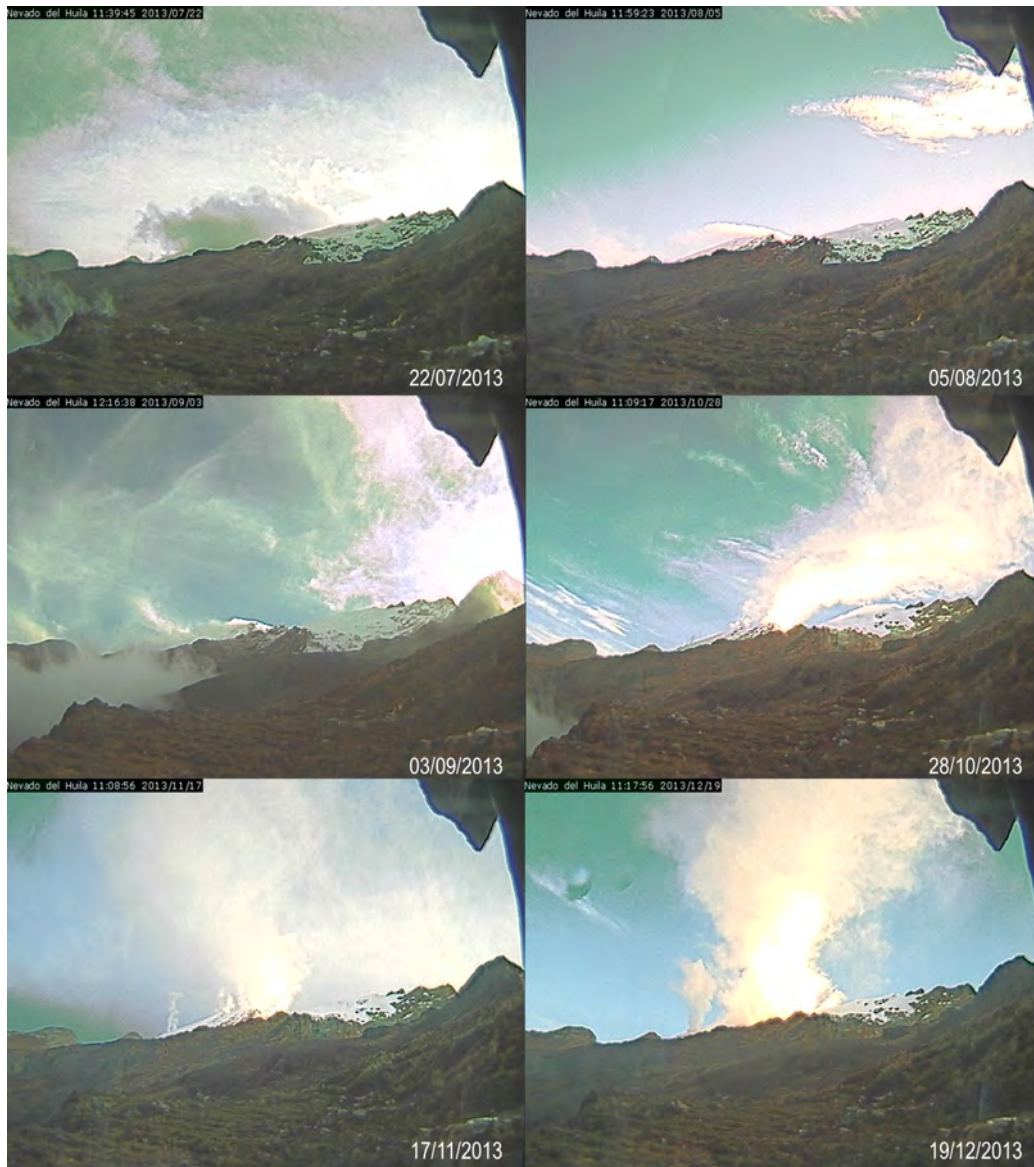


Figura 16: Imágenes captadas por la cámara web Caloto durante el segundo semestre de 2013.

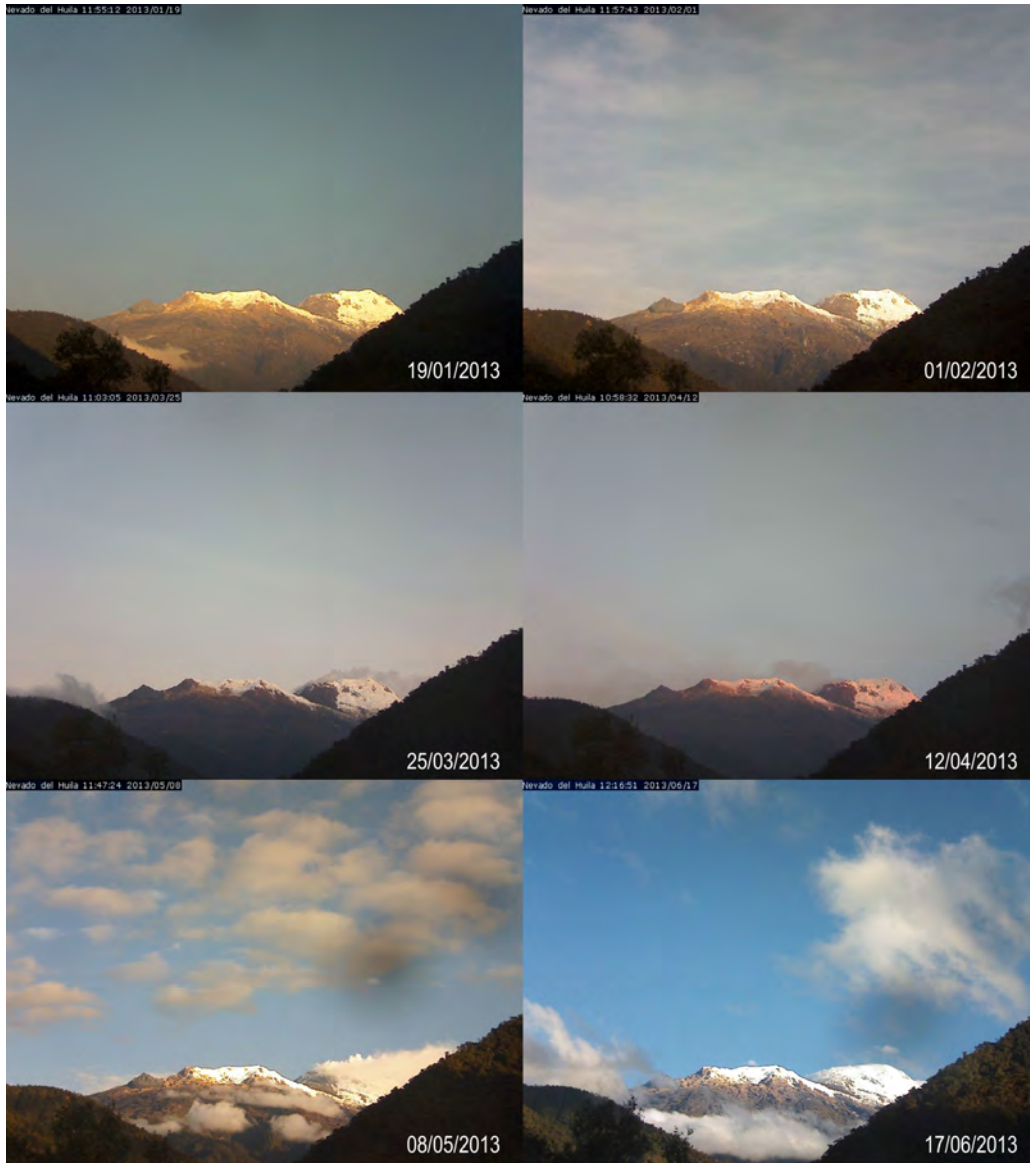


Figura 17: Imágenes captadas por la cámara web Maravillas durante el segundo semestre de 2013.



Figura 18: Imágenes captadas por la cámara web Maravillas durante el segundo semestre de 2013.



Figura 19: Imágenes captadas por la cámara web Maravillas el 16 de octubre de 2013.

1.4.2. Imágenes satelitales del volcán Nevado del Huila

Durante el 2013, cuando las condiciones climáticas lo permitieron, fue posible acceder a imágenes de sensores remotos que cubren el edificio del volcán Nevado del Huila. Algunas imágenes fueron tomadas con el sensor OLI/TIRS (*Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS)*), acoplado al satélite Landsat y el sensor TIR de ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Estas imágenes se pueden obtener de manera gratuita del servidor de imágenes GLOVIS del USGS (<http://glovis.usgs.gov>).

Teniendo en cuenta la disposición de estas imágenes satelitales recientes para el volcán Nevado del Huila, se trabajó en su procesamiento digital, el cual permitió reconocer cambios geomorfológicos del domo emplazado en el Pico Central, anomalías térmicas y comportamiento de los campos fumarólicos.

1.4.2.1. Mayo 1. Se obtuvo una imagen satelital tomada por el sensor OLI/TIRS (acoplado al satélite Landsat 8), en la cual se registra presencia de nieve en la parte alta del domo de lava (emplazado entre 2008 y 2010 en la zona del Pico Central), lo cual es un indicativo de descenso en su temperatura y tampoco se observan procesos de emisión de gases o cenizas (ver figura 20).

La figura 21 muestra una comparación de las bandas térmicas de la imagen del 1 de mayo, con una imagen tomada por el sensor ETM+ de Landsat 7 (el 21 de septiembre de 2011). Se resalta que las anomalías térmicas registradas en la parte alta del domo de lava, asociadas inicialmente a zonas de extrusión de material en el proceso de formación del domo (entre 2008 y 2010) y luego a focos de emisión de gases y ceniza (desde 2011) muestran un descenso importante en su temperatura, lo cual es coherente con la ausencia de emisiones resaltables y la presencia de nieve. No se puede hablar de recarga glaciar sobre la superficie del domo, por cuanto la temperatura del cuerpo dómico es similar a la de la roca expuesta circundante del edificio volcánico.

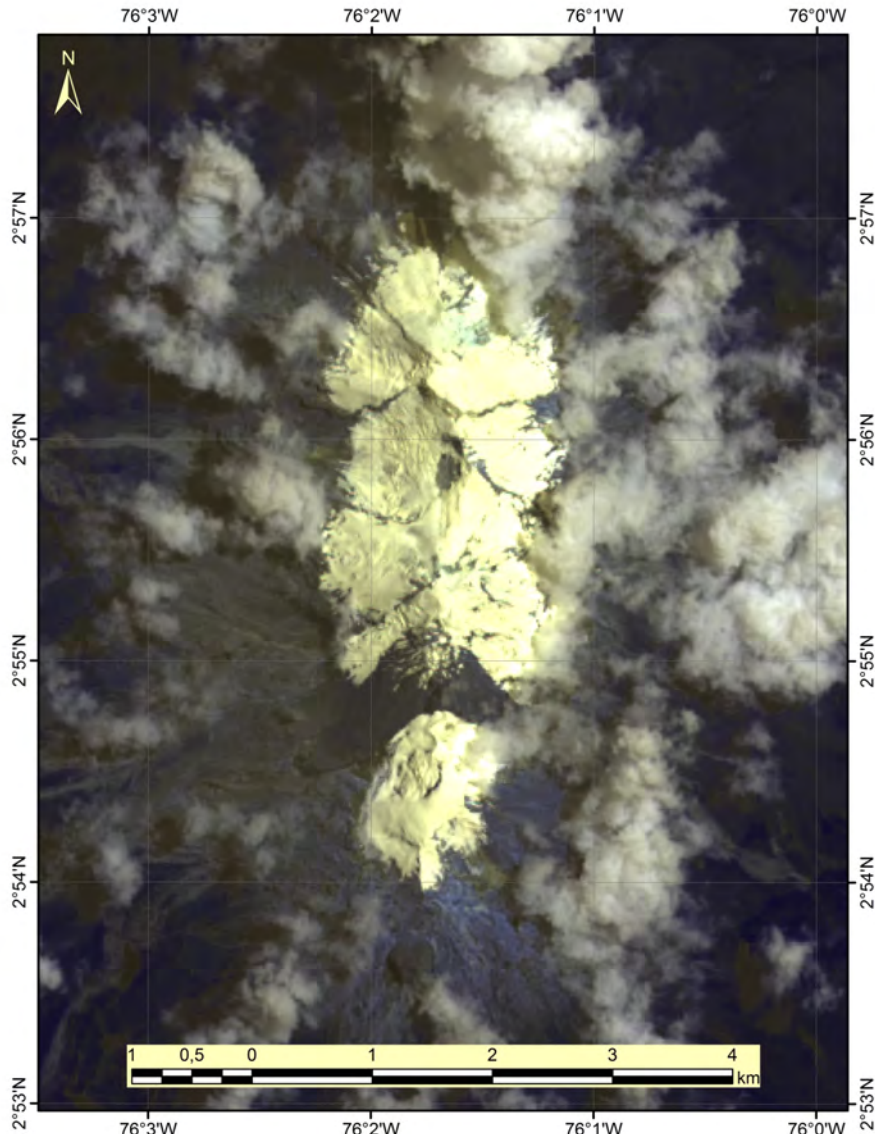


Figura 20: Imagen satelital del VNH tomada el 1 de mayo de 2013.

1.4.2.2. Julio. En la Figura 22 se observa una imagen satelital (combinación de bandas de espectro visible) del VNH, tomada por el sensor ETM+ (acoplado al satélite Landsat-7), el 24 de julio de 2013, a las 10:14 a.m.

Aquí se registra presencia de nieve (recarga glaciaria) en la superficie del domo de lava (emplazado entre 2008 y 2010 en la zona del Pico Central), lo cual es un indicativo de que continúa el descenso en su temperatura en superficie. Tampoco se observan procesos importantes de emisión de gases o cenizas. A nivel morfológico, no se observan cambios substanciales.

La figura 23 muestra la banda infrarroja principal del sensor ETM+ (banda 7). Las anomalías térmicas registradas en la parte alta del domo de lava, asociadas inicialmente a zonas de extrusión de material en el proceso de formación del domo (entre 2008 y 2010) y luego a focos de emisión de gases y ceniza (desde 2011), no pueden observarse debido a que quedaron en la zona de ruido de la imagen (color negro). Se resalta las

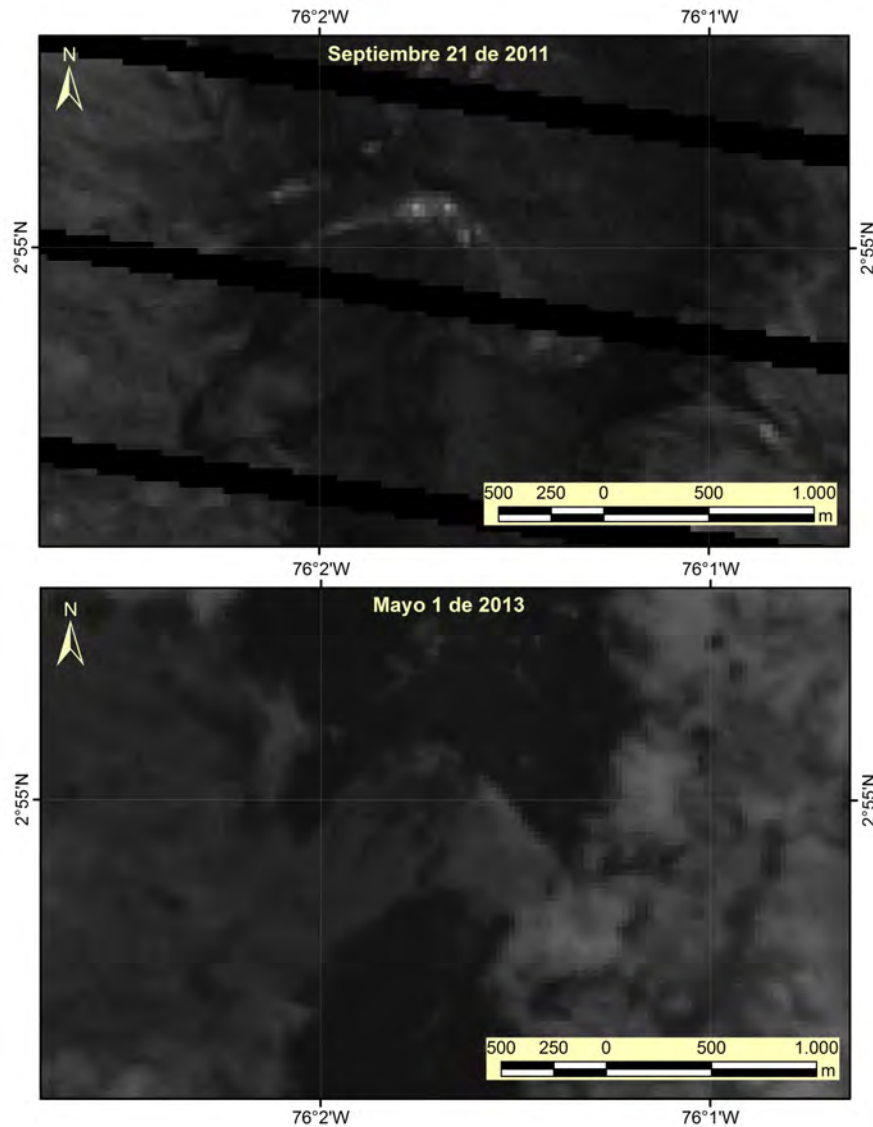


Figura 21: Comparación imágenes térmicas satelitales del VNH del 21 de septiembre de 2011 (arriba) y del 1 de mayo de 2013 (abajo).

anomalías térmicas en una pequeña zona 500 m al norte de la cima del Pico Central, donde habitualmente se registran procesos de desgasificación.

La superficie del domo muestra un descenso importante en su temperatura, lo cual es coherente con la ausencia de emisiones resaltables y la presencia de nieve. Adicionalmente, se puede hablar de recarga glaciaria sobre la superficie del domo, por cuanto la temperatura del cuerpo cóncavo es similar a la de la masa glaciaria circundante.

1.4.2.3. Agosto. En la Figura 13 se observa una composición de imágenes captadas por el sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, el día 1 de agosto de 2013, a las 10:20 a.m. Pese a la nubosidad, se alcanza a observar en la imagen de la izquierda (combinación de bandas 4-3-2, color "verdadero", con banda 8, pancromática) la zona del domo, con evidencias de recarga glaciaria en su superficie. En la imagen de la

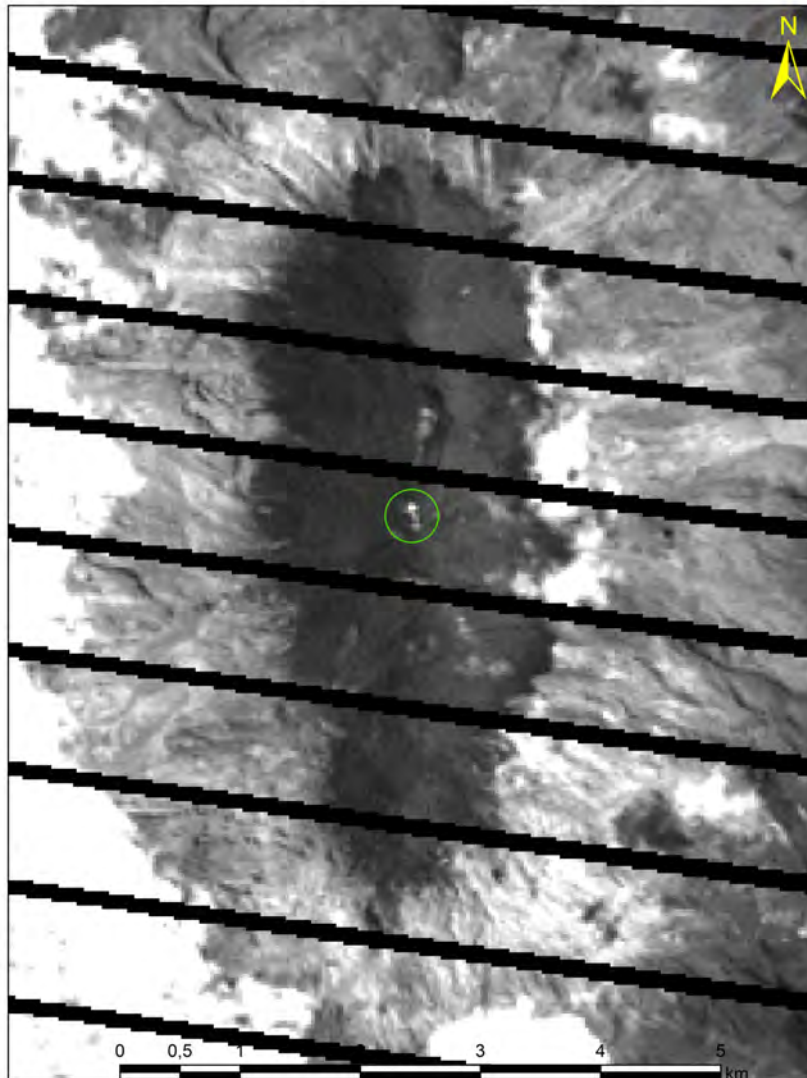


Figura 22: Imagen satelital del VNH, tomada el 24 de julio de 2013.

derecha, se registran las principales zonas de anomalías térmicas en la región del Pico Central, al norte y al occidente de su cota máxima. Al centro de la imagen se observan fotografías tomadas durante sobrevuelos en el 2011, donde se pueden reconocer las zonas de anomalías térmicas identificadas en la imagen de satélite (banda 6, infrarrojo de onda corta).

1.4.2.4. Septiembre. En la Figura 14 se observa una imagen satelital (combinación de bandas de espectro visible) del VNH, tomada por el sensor OLI-TIRS (acoplado al satélite Landsat-8), para el 2 de septiembre de 2013, a las 10:21 a.m.

En esta imagen se evidencia recarga de nieve en la superficie del domo de lava (emplazado entre 2008 y 2010 en la zona del Pico Central), lo cual es un indicativo del descenso en su temperatura en superficie. Se observa emisión de gases en la zona somital del domo, formando una columna poco densa, tendida a baja



Figura 23: Imagen térmica satelital del VNH del 24 de julio de 2013. El círculo verde resalta la zona de anomalía térmica más resaltante (500 m al norte de la cima del Pico Central).

altura respecto a la cima, hacia el occidente por acción de los vientos (que para esta hora, de acuerdo a los datos suministrados por IDEAM, se estimó con una velocidad cercana a los 10 m/s). A nivel morfológico no se observan cambios substanciales.

La figura 26 muestra la banda infrarroja principal del sensor OLI-TIRS (banda 6, infrarrojo de onda corta). Las anomalías térmicas con mayor temperatura se registran en una zona 500 m al norte y otra a 700 m al occidente de la cima del Pico Central, y en la parte alta del Pico Norte, sectores donde habitualmente se registran procesos de desgasificación. También se resaltan las anomalías térmicas en la región somital del domo (zona de extrusión de material en el proceso de formación del domo, entre 2008 y 2010, y luego foco de emisión de gases y ceniza, desde 2011), formando una franja o "estructura" en forma de arco de 370 m de perímetro, que corresponde a la región de contacto del domo con el glaciar; es en esta franja donde se registran los procesos de desgasificación principales del Pico Central.

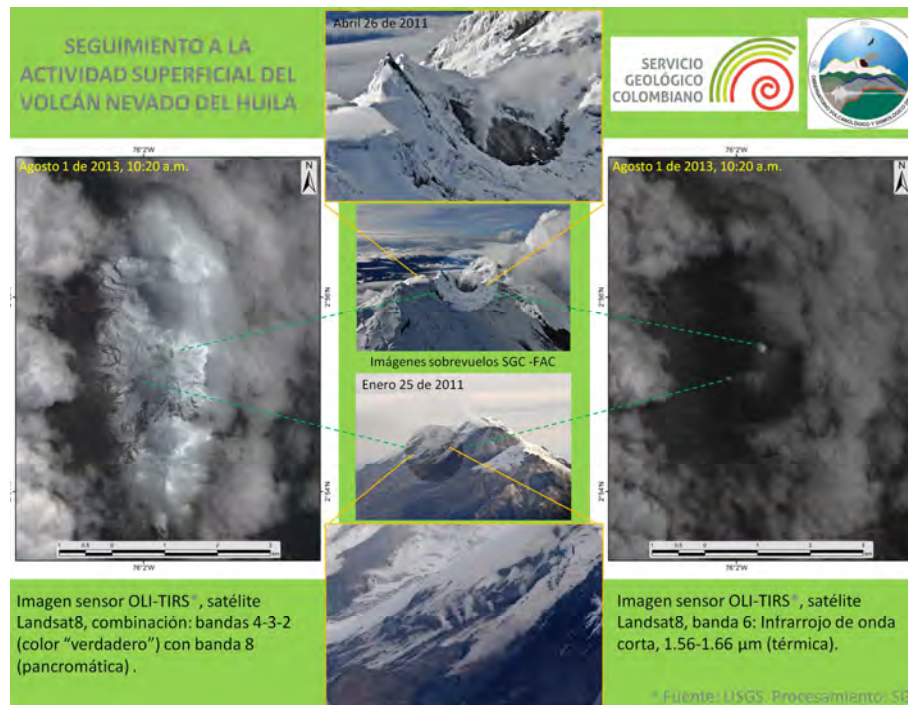


Figura 24: Imágenes captadas por el sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, el 1 de agosto de 2013.

1.4.2.5. Diciembre. Imagen térmica satelital del sensor TIR de ASTER del volcán Nevado del Huila, captada el 19 de diciembre de 2013, a las 10:35 p.m. Se nota la diferencia térmica entre la masa glaciar y el domo, sin ninguna anomalía resaltante, este simplemente es el contraste entre dos "cuerpos" de diferente temperatura. Lo más resaltante es la anomalía térmica 1.3 *km* al norte (o nor-nororiente) del Pico Central (ver figura 16).

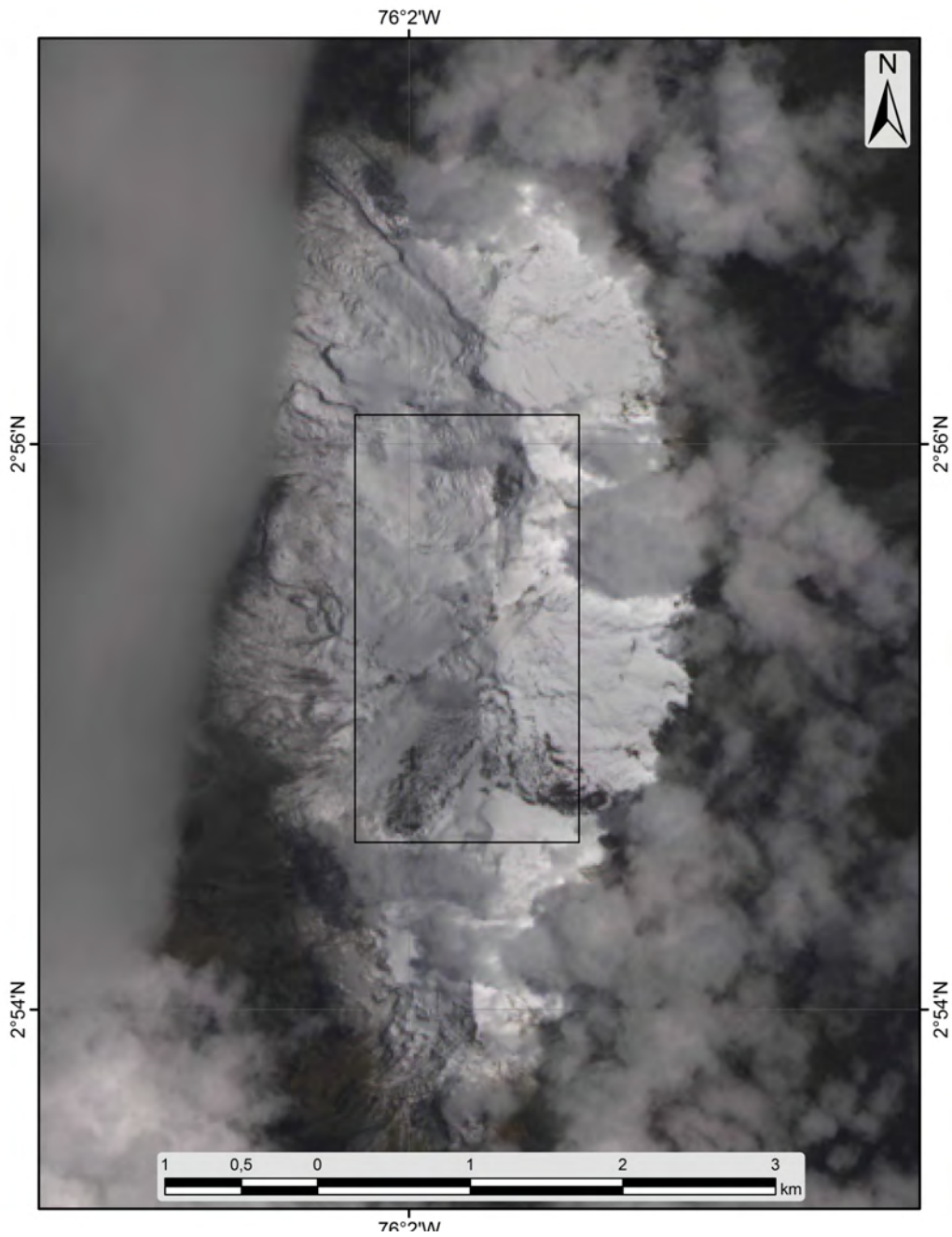


Figura 25: Imagen satelital del VNH tomada el 2 de septiembre de 2013.

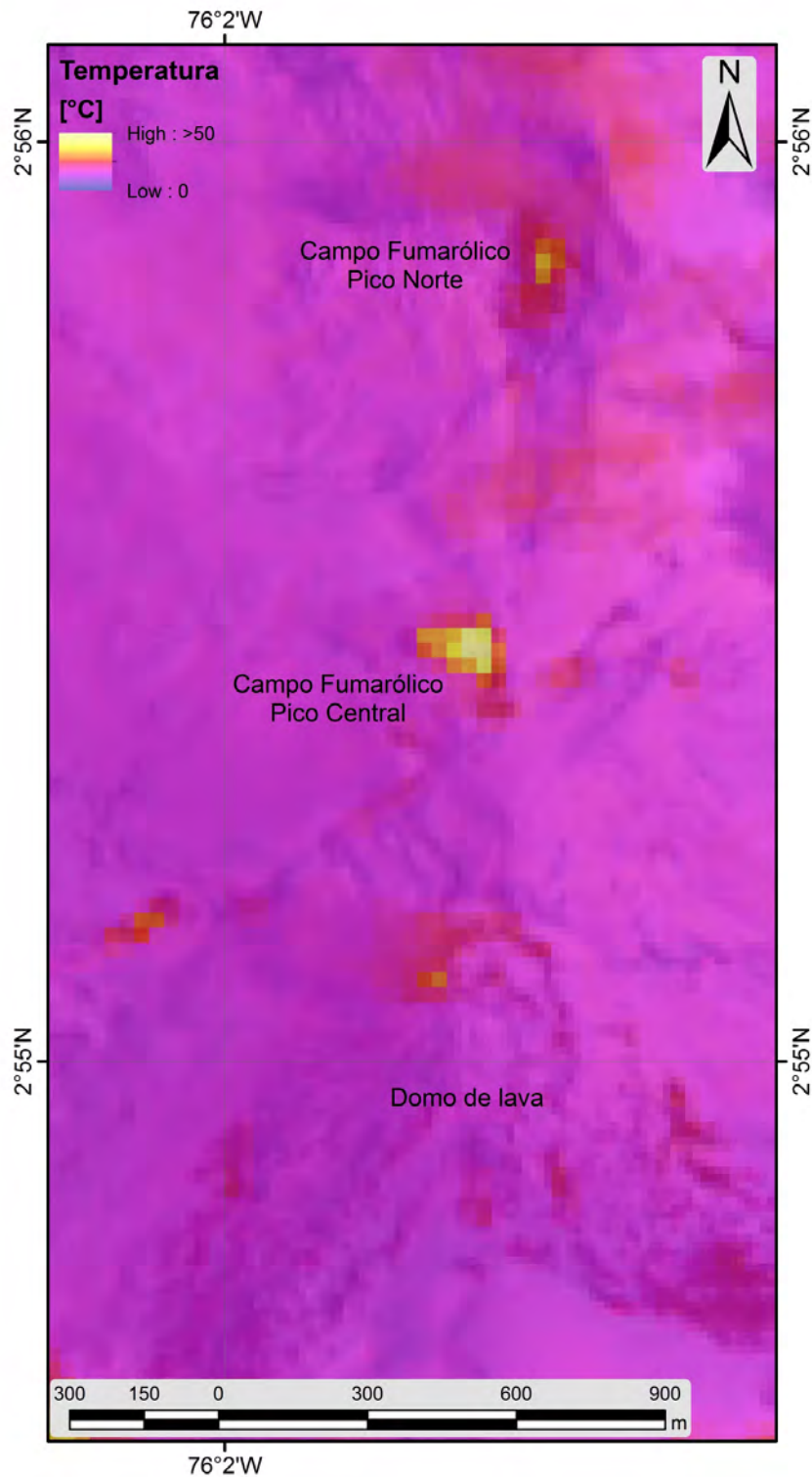


Figura 26: Imagen térmica satelital del VNH tomada el 2 de septiembre de 2013. Los colores más claros indican temperaturas más altas de acuerdo con la escala cromática de la esquina superior izquierda de la imagen.

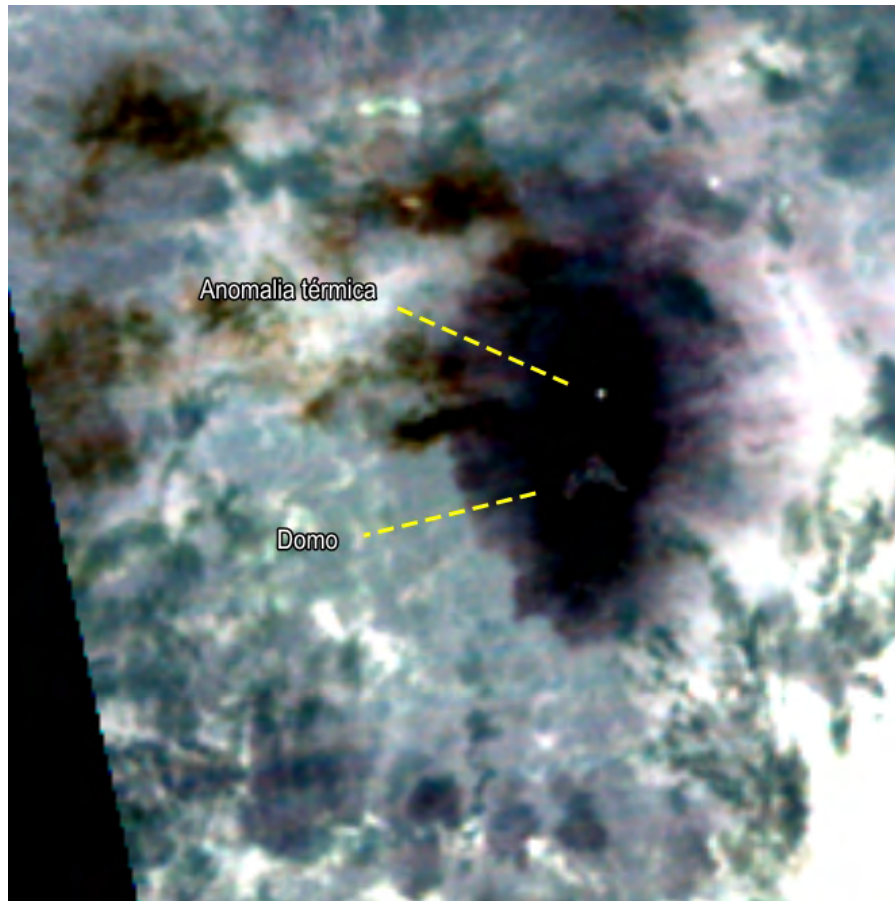


Figura 27: Imagen térmica satelital del VNH tomada el 19 de diciembre de 2013.

Del seguimiento en la actividad superficial realizado durante el año 2013, a través de las cámaras web instaladas en el área de influencia del volcán Nevado del Huila, y del tratamiento de imágenes satelitales, se concluye que:

- A finales del II semestre, especialmente entre los meses de octubre y diciembre fue posible evidenciar cambios importantes relacionados principalmente con el proceso de desgasificación del sistema volcánico, donde se resalta un aumento en la emisión de gases a la atmosfera en forma de columnas localizadas en tres zonas o puntos de emisión, hacia los sectores del Pico Central, parte superior del domo y en el sentido de la grieta generada en el 2007.
- Otro aspecto relevante o cambios a nivel superficial para destacar durante el año fueron los periodos de recarga en el glaciar, estos estuvieron asociados con las condiciones climáticas especiales (fuertes precipitaciones, fuertes vientos, bajas temperaturas) para esta zona del sur occidente del país.
- Las anomalías térmicas identificadas a través del procesamiento de imágenes satelitales en el volcán Nevado del Huila, no han conllevado a ningún proceso que involucre o comprometa la estabilidad del mismo.

1.5. FISICOQUÍMICA

Las medidas de concentración de Dióxido de Azufre (SO_2) constituyen una importante herramienta para el proceso de vigilancia y monitoreo de un complejo volcánico, toda vez que este compuesto químico en estado gaseoso se halla presente en las columnas de gases emitidas por los volcanes activos y algunas veces se relacionan con incrementos en la actividad sísmica interna y/o superficial del mismo, o con procesos eruptivos en evolución. Este método complementario en el proceso de vigilancia y monitoreo del volcán Nevado del Huila, se viene realizando a través mediciones programadas mediante la técnica DOAS (*Differential Optical Absorption Spectroscopy*), empleando los instrumentos MobileDOAS (del proyecto internacional NOVAC) y FlySPEC (implementado por el USGS).

1.5.1. Medidas Móviles de Flujo de SO_2 - Mobile DOAS

Durante el año de 2013 se realizaron 27 campañas para la medición de flujo de SO_2 emitido por el volcán Nevado del Huila. Dentro de las mediciones se destaca la realizada el día 16 de julio, con un valor de flujo calculado de 995 $t/día$, equivalentes a 11.5 kg/s , la columna se detectó entre los municipios de Santander de Quilichao (departamento del Cauca) y de Florida (Valle del Cauca), y se dispersó en la fuente hacia el costado noroccidental del edificio volcánico a 298 grados azimutales (ver figura 28).

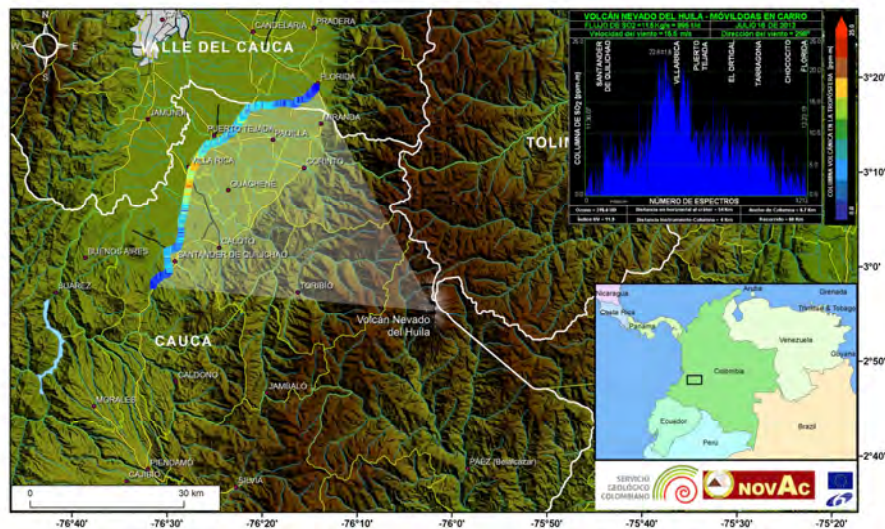


Figura 28: Detalle de la columna de SO_2 medida el 16 de julio de 2013.

En las tablas 3 y 4 se observan los detalles más sobresalientes de las mediciones realizadas, destacando que en los meses de julio y octubre los flujos de SO_2 calculados presentaron un incremento (ver figura 30).

De acuerdo al comportamiento y tendencia observada en las mediciones semanales de dióxido de azufre (SO_2) en el 2013, se obtuvo un promedio de 416 $t/día$, con un valor mínimo de 108 $t/día$ y un máximo de 995 $t/día$, y un acumulado total de 10.830 t en el año, apreciándose un comportamiento fluctuante en el proceso de desgasificación en lo corrido del año.

En la figura 30 se muestran los valores de los flujos de SO_2 calculados y reportados por el SGC-OVSPPOP en boletines y comunicados en el 2013. En ella es posible apreciar las fluctuaciones de las emisiones de SO_2 durante lo corrido del año, las cuales se han mantenido en valores que pueden ser considerados como bajos ($\leq 1000 t/día$), de acuerdo a los valores históricos registrados.

Fecha	Ruta	Dispersión de la Columna	Recorrido (km)	Ancho de la columna (km)
29/ene/2013	Villarica (Cauca) - Pradera (Valle)	NW	36.3	7.2
5/feb/2013	Santander de Quilichao - La Cabaña	NW	50	4.5
11/feb/2013	Villarica (Cauca) - Florida (Valle)	NW	46.4	10.4
19/feb/2013	Villarica (Cauca) - Florida (Valle)	NW	62.3	6.2
22/abr/2013	Florida (valle del Cauca) Mandiva (Cauca)	NW	63.3	2.5
30/abr/2013	Santander de Quilichao ? Pto Tejada (Cauca)	NW	53.5	7.9
7/may/2013	Florida (valle) - Santander de Quilichao (Cauca)	NW	42.3	7.1
14/may/2013	Jamundí (valle del Cauca) ? Agustina (Cauca)	NW	41.9	6.3
21/may/2013	Pescador ? Villarica (Cauca)	W	57	4.6
28/may/2013	Puerto Tejada ? Santander de Quilichao (Cauca)	NW	50	5.1
12/jun/2013	Quinamayo - Incauca (Cauca)	NW	45	0.7
18/jun/2013	Hacienda Cachimbalito (Cauca) ? Florida (Valle)	NW	39	4.6
25/jun/2013	Mondomo ? La Ortiga (Cauca)	NW	68	6.4
2/jul/2013	Mondomo - Florida (Valle)	NW	70	3.4
9/jul/2013	Quinamayo - Florida	NW	60	7.7
16/jul/2013	Santander de Quilichao - Florida	NW	60	6.7
24/jul/2013	Mondomo - Villarica	NW	70	3.5
5/ago/2013	Villarica - Cali	NW	47	7.9
17/sep/2013	Pescador (Cauca) - Florida (valle del Cauca)	NW	81	24.6
24/sep/2013	Mandiva (Cauca) - Florida (Valle)	NW	52	15.5
8/oct/2013	Santiago de Cali - Quinamayo	NW	62	8.7
16/oct/2013	Santander de Quilichao - Florida (Valle)	NW	46	3.5
23/oct/2013	Jamundi (Valle del Cauca) y Mandiva (Cauca)	NW	44	3.9
5/nov/2013	Santander de Quilichao - Florida Valle del Cauca	NW	51	6
19/nov/2013	Quinamayó - Chocosito	NW	49	7.1
10/dic/2013	Mandiva - La Ortiga	NW	39	6.4

Tabla 3: Aspectos de las columnas de SO_2 medidas durante el año 2013.

Fecha	Concentración Máxima de SO_2 (ppm - m)	Dirección del viento (grados azimut)	Velocidad del viento (m/s)	Flujo ($t SO_2/día$)	Flujo ($kg SO_2/día$)
29/ene/2013	14.6	317	6.4	216	2.5
5/feb/2013	15.3	314	4.3	146	1.7
11/feb/2013	20.6	304	2.7	200	2.3
19/feb/2013	26.1	304	5.2	201	2.3
22/abr/2013	80.4	271	2.5	311	3.6
30/abr/2013	27.5	272	5.6	191	2.2
7/may/2013	29.7	320	3.6	296	3.4
14/may/2013	17.4	283	5.0	226	2.6
21/may/2013	34	269	5.4	364	4.2
28/may/2013	21.9	301	5.0	321	3.7
12/jun/2013	26.1	278	11.6	485	5.6
18/jun/2013	12.7	319	4.8	108	1.2
25/jun/2013	30.2	306	5	546	6.3
2/jul/2013	35.1	321	5.2	587	6.8
9/jul/2013	32.2	297	11	589	6.8
16/jul/2013	22.6	298	15.5	995	11.5
24/jul/2013	12.4	272	7	346	4
5/ago/2013	26.2	311	9.8	642	7.4
17/sep/2013	50.5	309	3.6	928	10.7
24/sep/2013	13.5	291	9.5	544	6.3
8/oct/2013	32.5	287	7.5	930	10.8
16/oct/2013	18.8	294	7.5	542	6.3
23/oct/2013	18.8	292	5.5	246	2.8
5/nov/2013	21.6	298	3	160	1.9
19/nov/2013	19.2	320	3.2	108	1.3
10/dic/2013	24.3	294	6.3	434	5

Tabla 4: Detalles de las mediciones de SO_2 realizadas durante el año 2013.

Los flujos de SO_2 fueron calculados con valores de velocidad del viento obtenidos por el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*), pronósticos horarios suministrados por el IDEAM, modelados para el volcán Nevado del Huila. Teniendo en cuenta la altura del edificio volcánico (5365 *msnm*) se emplean las velocidades del modelo a 18.000 *pies* (5486 *msnm*). Para estas medidas se utilizaron valores pronóstico entre los 2.5 y 15.5 *m/s* (ver figura 29).

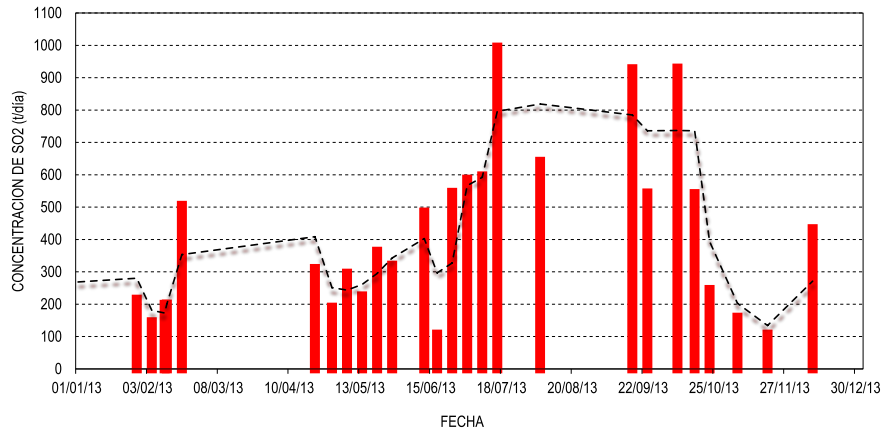


Figura 29: Flujo de SO_2 calculado, de marzo de 2012 a diciembre de 2013, mediante la técnica de DOAS móvil, para el volcán Nevado del Huila.

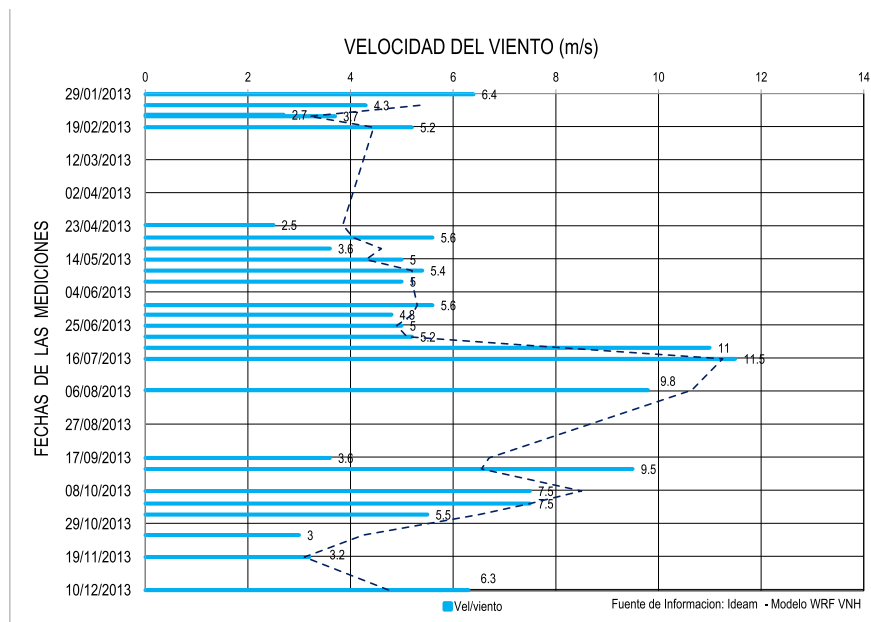


Figura 30: Velocidades del viento asumidas para el cálculo de flujo de SO_2 emitido por el volcán Nevado del Huila durante el año 2013.

En la figura 31 se presentan los modelamientos de dispersión del SO_2 , con los trayectos y espectros de medición de las columnas de SO_2 detectadas en las mediciones realizadas en el año 2013. Aquí es importante mencionar que las columnas presentaron en algunas ocasiones bifurcación, posiblemente asociado al tránsito de la pluma volcánica a través de estratos atmosféricos diferentes, con valores de velocidad y dirección del viento que fluctúan entre los 10.000 y 18.000 *pies*, equivalentes a 3.048 y 5.486 *msnm*.

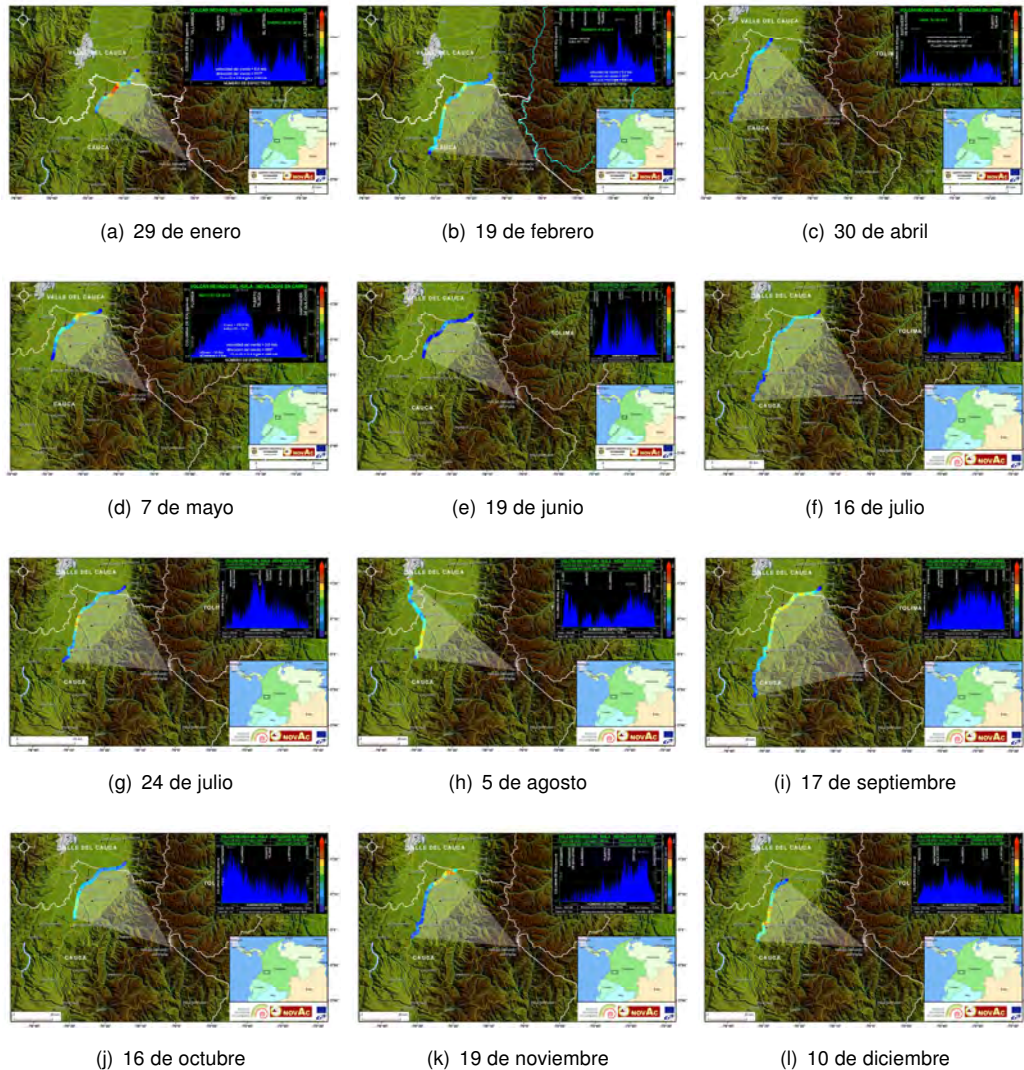


Figura 31: Ruta y espectrograma - Medida móvil de flujo de SO_2 VNH

Se concluye que el sistema volcánico continúa su proceso fluctuante de emisión de gases, en donde el aporte de SO_2 a la atmósfera se mantiene en niveles considerados bajos para los parámetros de la línea base de este volcán.

1.6. CONCLUSIÓN

De acuerdo con el análisis de la información derivada de las diferentes técnicas de vigilancia utilizadas en el monitoreo del volcán Nevado del Huila, se concluye que durante el año 2013 los niveles de actividad sísmica se mantuvieron en niveles considerados bajos, la sismicidad se caracterizó por presentar predominio de la actividad asociada al tránsito de fluidos dentro de los conductos volcánicos. Del seguimiento realizado a la actividad superficial, así como de los valores de flujo de SO_2 emitidos a la atmósfera, no fueron detectadas variaciones a destacar. Por lo tanto, el OVS-Popayán mantiene el nivel de actividad volcánica en *NIVEL III: CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA*.

2 VOLCÁN PURACÉ



Figura 32: Volcán Puracé. Imagen captada durante sobrevuelo del 22 de octubre de 2011.

El volcán Puracé se encuentra ubicado en el departamento del Cauca, en las coordenadas geográficas $2^{\circ}, 22'$ N y $76^{\circ}, 23'$ W, a una distancia de 26 *km* al suroriente de la ciudad de Popayán; hace parte de la cadena volcánica de los Coconucos, la cual está compuesta por 15 centros eruptivos alineados con una orientación 40° noroccidente - suroriente, siendo el Puracé el más joven y septentrional de la cadena (ver figura 32).

El Puracé es un estrato-volcán activo, cuyo registro más reciente muestra actividad predominantemente explosiva; su edificio tiene forma de cono truncado con laderas de 30° de inclinación, y presenta un cráter interno y otro externo, ambos concéntricos de 500 y 900 *m* de diámetro, respectivamente.

La actividad fumarólica está concentrada en una grieta que atraviesa el fondo del cráter, y en un importante campo fumarólico ubicado en el flanco noroccidental externo del volcán (denominada Fumarola Lateral). Su actividad volcánica ha sido reportada desde el siglo XVIII, con la ocurrencia de al menos 15 erupciones históricas bien documentadas, las cuales han causado daños materiales y pérdidas de vidas humanas; la última erupción ocurrió en marzo de 1977.

Existen al menos 15 fuentes termales ubicadas alrededor del edificio volcánico, las cuales presentan temperaturas comprendidas entre 20°C y 90°C , siendo las más destacadas por sus características térmicas las fuentes termales de Pozo Azul, Hornos y La Mina, mientras que las fuentes termales de San Juan se destacan por su emisividad de H_2S .

2.1. RED DE VIGILANCIA

El volcán Puracé cuenta en la actualidad con una red de vigilancia compuesta por un total de 80 estaciones, de las cuales 37 cuentan con un sistema de telemetría de datos (telemétricas); en las 43 restantes, los datos son adquiridos directamente en los puntos de muestreo (no telemétricas). Éstas se emplean para medir diferentes parámetros, mediante técnicas tales como sismología, deformación, electromagnetismo, fisicoquímica y actividad superficial. La figura 33 muestra la red de vigilancia del volcán Puracé. En las tablas 6 y 5 se detallan las principales características de las estaciones que conforman esta red de monitoreo.

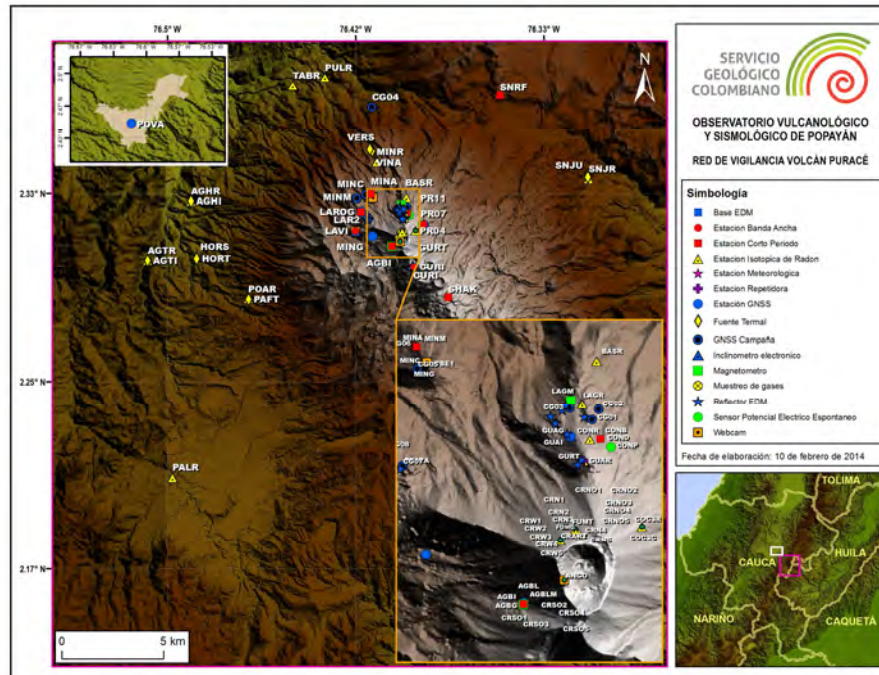


Figura 33: Red de vigilancia del volcán Puracé.

2.1.1. Generalidades

2.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. El volcán Puracé contó con una red operativa de diez estaciones sismológicas, las cuales se localizan en los siguientes sectores: San Rafael, localizada a 8.4 km al NE del cráter del volcán Puracé, La Mina, Lavas Rojas, Lavas Rojas 2, Curiquinga y Shaka, distribuidas hacia los sectores NE y SW del edificio volcánico, respectivamente, y a distancias de entre 2 y 4 km del mismo, y las estaciones Cóndor, Cocuy2 y Agua Blanca, instaladas hacia los sectores NE y SW del cráter del volcán Puracé, en un rango de distancia que oscila entre 0.6 y 1.5 km de la cima del volcán. La estación sismológica Agua Bonita localizada a 10.3 km al SW del cráter del volcán, registra además la sismicidad que se presenta tanto en la parte suroriental de la cadena de Los Coconucos, como aquella que proviene del valle de Paletará.

2.1.1.2. Red de Deformación. Para el monitoreo de los procesos de deformación asociados con la actividad volcánica, el volcán Puracé tiene un total de 11 estaciones telemétricas, de las cuales cinco son inclinómetros electrónicos: Lavas Rojas, localizado a 2.4 km al W-NW del cráter del volcán Puracé; Guañarita, ubicado a 1.4 km al NE del cráter; Curiquinga, localizado a 1.4 km al SE del cráter; Agua Blanca, localizado a 0.7 km al W del cráter; y Cocuy2, instalado en el flanco nororiental del edificio volcánico. De igual forma, esta red cuenta con seis estaciones GNSS permanentes: Mina y Guañarita, ubicadas a 1 km del cráter; Agua Blanca, localizada a 0.7 km de la cima del volcán; Lavas Rojas, localizada a 2 km de la parte alta del volcán; Cocuy2 localizada a 1.4 km del cráter; y la estación de referencia denominada Popayán (ubicada dentro de

los terrenos del aeropuerto Guillermo León Valencia), la cual se localiza a 27 *km* del edificio volcánico. Finalmente, esta red de monitoreo se complementa con dos bases y tres reflectores EDM, mediante los cuales se realizan medidas periódicas de control topográfico, así como con cuatro puntos de control para ocupaciones con GNSS de campaña.

2.1.1.3. Cámaras web. El monitoreo de la actividad superficial del volcán Puracé se realiza a través de tres cámaras con conexión IP: La Mina, Lavas Rojas y Anambio, las dos primeras localizadas a 2 *km* en dirección NW y W del cráter del volcán, respectivamente, mientras que la última está ubicada del cráter activo, permitiendo visualizar los cambios morfológicos al interior del mismo.

2.1.1.4. Geofísica. Para el monitoreo de las variaciones del campo natural del potencial eléctrico y del campo magnético local, el volcán Puracé cuenta con dos sensores de potencial eléctrico espontáneo, Cónдор y Cocuy, localizados a una distancia de 1 *km* al norte del cráter y 1.34 *km* al NE del cráter, respectivamente; igualmente con dos magnetómetros: Laguna y Agua Blanca, el primero localizado a 1.3 *km* al norte de la cima volcánica, y el segundo instalado a 0.7 *km* al oeste del volcán.

2.1.1.5. Fisisicoquímica. Con el fin de monitorear las variaciones de los diferentes parámetros geoquímicos de las emisiones de gases en suelo, fuentes termales y fumarolas, el volcán Puracé cuenta en la actualidad con una red de 15 estaciones isotópicas permanentes para el monitoreo de las emisiones del gas radón en suelo, 12 de ellas no telemétricas, las cuales se encuentran distribuidas tanto en el edificio volcánico como en el área de influencia del mismo, así como con tres telemétricas: Cráter, Cocuy3 y Guañarita, destacándose que las dos primeras miden también la concentración de CO_2 . Estas estaciones se localizan a distancias de 0.17 *km*, 0.49 *km* y 0.31 *km* del cráter del volcán. Adicionalmente para el monitoreo de los cambios de temperatura que se presentan en el campo fumarólico lateral, se cuenta con una termocupla instalada en uno de los orificios que componen dicho campo, el cual se localiza en el flanco norte del edificio volcánico, a una distancia de 0.31 *km* del cráter. El monitoreo geoquímico del volcán Puracé, se complementa con diferentes muestreos periódicos *in situ* en siete fuentes termales y el campo fumarólico lateral.

2.1.1.6. Meteorología. El volcán Puracé cuenta con una estación meteorológica denominada Mina, la cual se localiza a 2.2 *km* del cráter. Los datos de dirección y velocidad del viento, así como los niveles de precipitación que se presentan en la zona de influencia del volcán, son correlacionados con cambios en los diferentes parámetros de monitoreo volcánico, con el fin de establecer cuando se presentan asociados a variaciones climáticas locales.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Distancia al Cráter (km)	Operativa
Agua Hirviendo	Estación Isotópica de Radón	2.3301	76.4896	2649	10.21	SI
	Fuente Termal					SI
Agua Tibia	Estación Isotópica de Radón	2.3041	76.5088	2683	12.31	SI
	Fuente Termal					SI
Base	Estación Isotópica de Radón	2.3318	76.3941	4056	1.77	SI
EDM-A	Base EDM	2.3316	76.4089	4075	2.03	SI
EDM-B	Base EDM	2.3310	76.4097	3959	2.03	SI
CG01	GNSS Campaña	2.3266	76.3945	4258	1.21	SI
CG02	GNSS Campaña	2.3275	76.3939	4222	1.33	SI
CG03	GNSS Campaña	2.3276	76.3964	4207	6.26	SI
CG04	GNSS Campaña	2.3720	76.4093	3279	6.28	SI
CG05	GNSS Campaña	2.3310	76.4097	3956	2.03	SI
CG06	GNSS Campaña	2.3329	76.4121	3956	2.36	SI
CG07	GNSS Campaña	2.3225	76.4110	4059	1.53	SI
CG08	GNSS Campaña	2.3239	76.4123	4077	1.72	SI
CG09	GNSS Campaña	2.3313	76.4160	3951	2.53	SI
Cóndor	Estación Isotópica de Radón	2.3248	76.3947	4317	1.03	SI
Fumarola Lateral	Muestreo de gases	2.3167	76.3959	4545	0.31	SI
Guañarita	Estación Isotópica de Radón	2.3229	76.3953	4393	0.81	SI
Hornos Siete	Fuente Termal	2.3049	76.4873	2743	9.92	SI
Hornos Tres	Fuente Termal	2.3049	76.4872	2747	9.92	SI
Laguna	Estación Isotópica de Radón	2.3279	76.3954	4196	1.33	SI
Mina	Estación Isotópica de Radón	2.3473	76.4072	3671	3.56	SI
Mina El Vinagre	Fuente Termal	2.3522	76.4094	3624	4.14	SI
Paletará	Estación Isotópica de Radón	2.2074	76.4977	2986	16.37	SI
Pululó	Estación Isotópica de Radón	2.3851	76.4301	2867	8.39	SI
Pozo Azul	Estación Isotópica de Radón	2.2867	76.4642	3125	8.00	SI
	Fuente Termal					SI
Reflector 1RA	Reflector EDM	2.3223	76.4113	4087	1.53	SI
Reflector 1RB	Reflector EDM	2.3240	76.4123	4067	1.72	SI
Reflector 1RC	Reflector EDM	2.3256	76.4135	4019	1.93	SI
San Juan	Estación Isotópica de Radón	2.3398	76.3133	3237	9.83	SI
	Fuente Termal					SI
Tabio	Estación Isotópica de Radón	2.3816	76.4445	2861	8.84	SI
Versalles	Fuente Termal	2.3529	76.4103	2761	4.25	SI

Tabla 5: Características de la red de vigilancia no telemétrica del volcán Puracé.

2.1.2. Funcionamiento de Estaciones

Durante el año 2013 la red de vigilancia del volcán Puracé mostró un funcionamiento del 92 %, sobre 87 % del total de la red de monitoreo. La gráfica de porcentaje de funcionamiento por cada metodología empleada se muestra en la figura 34.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Distancia al Cráter (km)	Operativa
Aeropuerto	GNSS	2.4491	76.6147	1760	28.16	SI
Agua Blanca	Corto Período	2.3108	76.4005	4374	0.66	SI
	GNSS	2.3105	76.4005	4380	0.69	SI
	Magnetómetro	2.3104	76.4005	4374	0.71	SI
	Inclinómetro electrónico	2.3108	76.4005	4374	0.66	SI
Anambío	Estación isotópica de Radón	2.3125	-76.3969	4595	0.49	SI
	Estación de CO ₂					SI
Cocuy2	Banda Ancha	2.3199	76.3864	4289	1.42	SI
	Inclinómetro electrónico					SI
	Potencial Eléctrico Espontáneo	2.3199	76.3871	4312	1.34	SI
	GNSS	2.3197	76.3861	4299	1.44	SI
Cocuy3	Estación isotópica de Radón	2.3172	76.3901	4452	0.96	SI
	Estación de CO ₂					SI
Cóndor	Banda Ancha	2.3248	76.3938	4294	1.08	SI
	Corto Período					SI
	Potencial Eléctrico Espontáneo	2.3241	76.3928	4049	1.07	SI
Cráter	Estación isotópica de Radón	2.3473	76.4072	4547	0.17	SI
	Estación de CO ₂					SI
Curiqinga	Banda Ancha	2.3010	76.3908	4507	1.93	SI
	Inclinómetro electrónico	2.3018	76.3913	4482	1.83	SI
Fumarola	Termocupla	2.3170	76.3960	4500	0.31	SI
Guañarita	Inclinómetro electrónico	2.3251	76.3964	4248	0.99	SI
	GNSS					SI
	Estación Isotópica de Radón	2.3166	76.3959	4545	0.31	SI
Laguna	Magnetómetro	2.3283	76.3963	4177	1.33	SI
Lavas Rojas	Banda Ancha	2.3171	76.4166	4049	1.99	SI
	Cámara web					SI
	Inclinómetro electrónico					SI
	GNSS	2.3256	76.4141	4051	1.98	SI
Lavas Rojas2	Corto Período	2.3171	76.4165	4046	1.98	SI
Mina	Corto Período	2.3330	76.4099	4049	2.21	SI
	Cámara web	2.3317	76.4089	4082	2.03	SI
	Meteorológica	2.3330	76.4100	4049	2.22	SI
	GNSS	2.3147	76.4090	3904	1.16	SI
	Corto Período	2.3771	76.3527	3518	8.46	SI
Shaka	Corto Período	2.2873	76.3756	4445	4.14	SI

Tabla 6: Características de la red de vigilancia telemétrica del volcán Puracé.

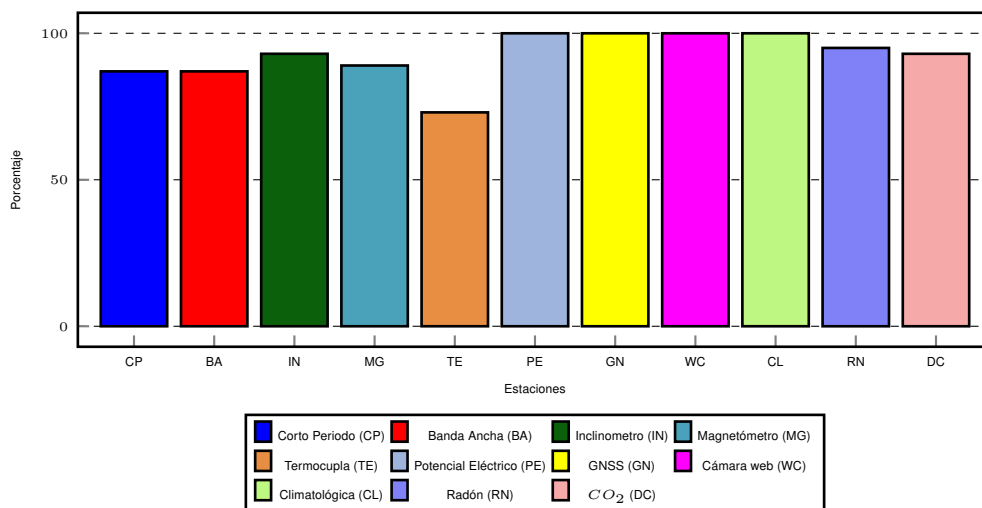


Figura 34: Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Puracé durante el año 2013.

2.2. SISMOLOGÍA

El volcán Puracé cuenta con una red operativa de diez estaciones sismológicas, de las cuales, seis están equipadas con sensores de corto periodo: Cónдор, Lavas Rojas 2, Agua Blanca, Mina, San Rafael y Shaka; y cuatro con sensores de banda ancha: Cónдор, Lavas Rojas, Cocuy 2 y Curiquinga. El mapa de la figura 35 muestra la distribución geográfica de dichas estaciones.

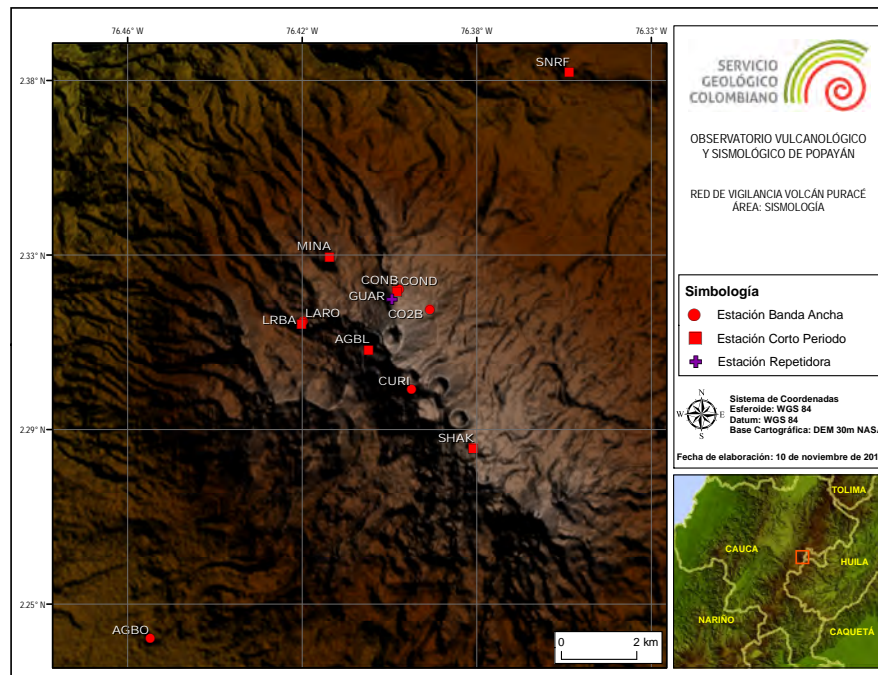


Figura 35: Red de vigilancia en sismología del volcán Puracé.

2.2.1. Actividad Sísmica

Durante el año 2013 la red de estaciones sismológicas del volcán Puracé registró un total de 7862 eventos sísmicos, de los cuales 648 estuvieron relacionados con procesos de fracturamiento de roca (tipo VT) y 7214 con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos; de estos últimos, 5622 fueron catalogados como eventos de Largo Periodo (Tipo LP), 139 como eventos Híbridos los cuales se asociaron con procesos que involucraron tanto mecanismos de fractura como de movimiento de fluidos (tipo HB), 745 eventos tipo Tornillo (tipo TO), y 108 pulsos de tremor de bajo nivel energético (tipo TR).

En lo que se refiere el número de eventos sísmicos registrados diariamente, la actividad volcánica no presentó variaciones a destacar a lo largo del periodo evaluado. Durante el segundo semestre del año 2013 la sismicidad volcano tectónica presentó una disminución, pasando de 400 eventos registrados entre los meses de enero y junio, a un total de 248 sismos para el periodo de julio a diciembre; en contraste, la sismicidad de fluidos, específicamente los eventos de Largo Periodo, permanecieron estables con 2717 eventos registrados durante el primer semestre y 2905 para el segundo semestre del año. Se destaca el predominio de la sismicidad de fluidos sobre la de fractura en la dinámica del volcán durante todo el año.

La tabla 7 y la figura 36 muestran la tendencia en cuanto al número de eventos sísmicos registrados durante el año 2013 en el volcán Puracé. La figura 37 muestra la variación en la sismicidad diaria para el primer y el segundo semestre del año 2013.

Fecha	Tipos de eventos				
	VT	LP	HB	TO	TR
Número de eventos registrados en el volcán Puracé en el año 2013.	648	5622	739	745	108

Tabla 7: Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Puracé durante 2013.

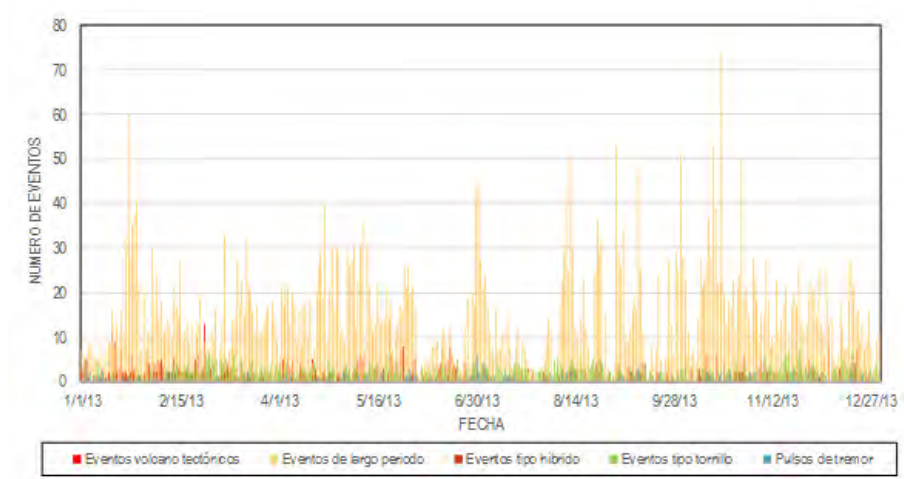


Figura 36: Número de eventos registrados diariamente en el volcán Puracé en enero de 2014.

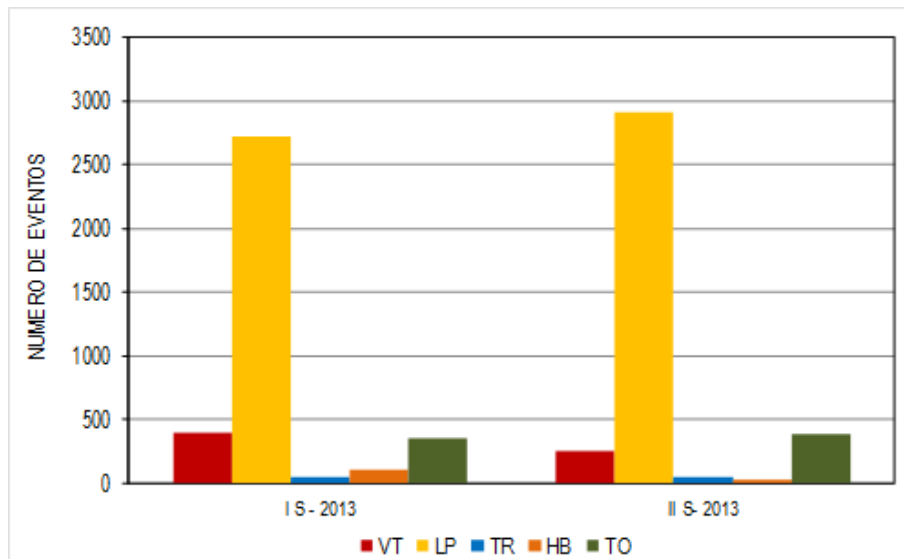


Figura 37: Relación de la variación presentada en el número de eventos sísmicos registrados diariamente en el volcán Puracé para el primer y segundo semestre del año 2013.

2.2.2. Energía Sísmica Liberada

Los valores de energía sísmica liberada por eventos VT y LP mantuvieron una tendencia estable durante el año 2013. Los eventos de fractura alcanzaron durante el año magnitudes de duración promedio de 1.0 *grados* en la escala de Richter, por tal razón, se destacan los picos energéticos de los días 4 y 20 de septiembre, en los cuales se registraron dos eventos volcano tectónicos con magnitudes de duración de, 2.3 y 1.8 y de 2.5 y 1.7 *grados* en la escala de Richter, respectivamente, con una liberación de energía asociada de $1.79E+14$ *ergios* para el día 4, y de $3.34E+14$ *ergios* para el día 20. De igual forma, la sismicidad asociada

con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos se caracterizó por ser de bajo nivel energético, con magnitudes de duración promedio de 0.8 *grados* en la escala de Richter. El máximo valor de energía sísmica liberada diariamente ocurrió el 20 de octubre de 2013, día en el que se registraron 74 eventos de Largo Periodo con magnitudes de duración entre 0.2 y 2.6 *grados* en la escala de Richter.

Cabe mencionar que aunque la energía sísmica liberada por eventos VT fue superior a la de los eventos LP durante el primer semestre del año, esta situación cambio durante el segundo semestre, de manera que entre los meses de julio a diciembre los mayores aportes energéticos se asociaron con la actividad relacionada con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos, la cual alcanzó para el final del periodo evaluado un valor de $3.35 \text{ E}+15$ *ergios* de energía sísmica evaluada de forma acumulada, mientras que los eventos de fractura liberaron $2.64\text{E}+15$ *ergios* de energía acumulada.

La figura 38 muestra la tendencia de la energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP, mientras que en la figura 39 se ilustra el comportamiento de la energía sísmica liberada de forma acumulada.

Nota: La energía es graficada en razón de su raíz cuadrada para facilitar su análisis y visualización.

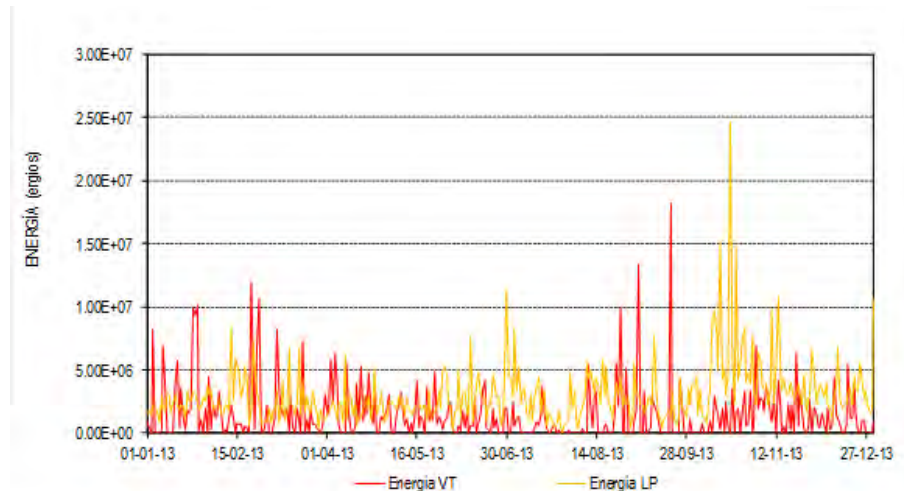


Figura 38: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Puracé durante 2013.

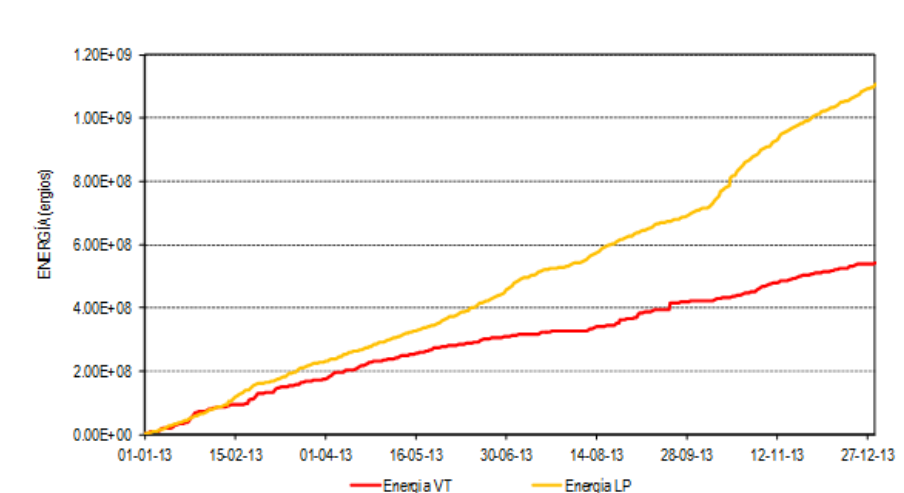


Figura 39: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Puracé durante 2013.

2.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

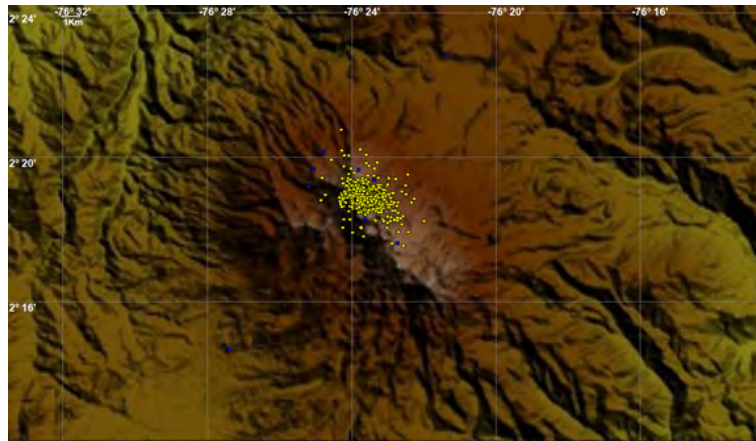
2.2.3.1. Localización de eventos asociados a dinámica de fluidos. Durante el año 2013 se llevó a cabo la atenuación de 1986 sismos relacionados con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos, utilizando el método de localización por atenuación de las amplitudes relativas. De este total de eventos sísmicos localizados, 1364 fueron eventos de Largo Periodo, los cuales se concentraron en su mayoría en un área de aproximadamente 2 km^2 alrededor del cráter del Puracé, y en menor proporción hacía el sector SE de la cadena volcánica de los Coconucos, a una distancia de 4 km de la cima del volcán. Igualmente fueron localizados 606 eventos tipo Tornillo alrededor del cráter, y 16 pulsos de tremor que se localizaron en el sector E del cráter del volcán en un área de menos de 1 km^2 .

Los mapas obtenidos muestran que la principal fuente para la sismicidad de fluidos continuó estando concentrada alrededor del cráter, sobre el cono actual del volcán, y en menor proporción hacia el sector SE del cráter, a una distancia aproximada de 2 km del mismo

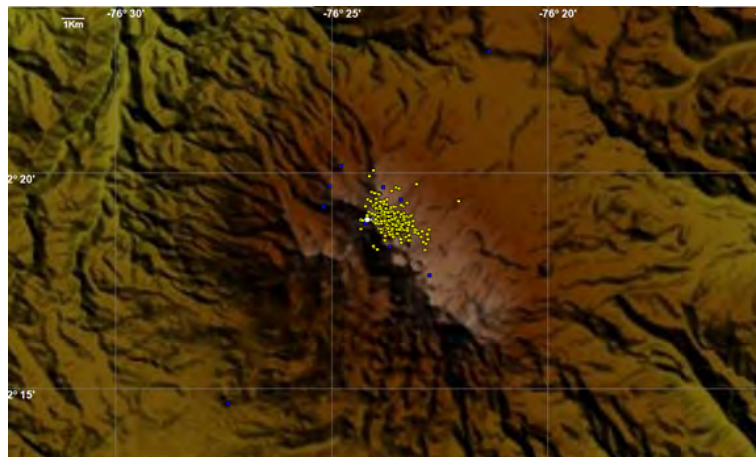
En la figura 40 se pueden apreciar los mapas de localización de los eventos anteriormente mencionados.

2.2.3.2. Localización de eventos asociados con procesos de fractura. De los 648 sismos volcano tectónicos que se registraron durante el año 2013, fue posible realizar la localización epicentral e hipocentral de 456. Las zonas en las que se concentró la mayor actividad asociada a procesos de fractura a lo largo del periodo evaluado, corresponden al área del edificio volcánico en la cual se concentró el 41 % de la sismicidad localizada; así como al sector del valle de San Rafael ubicado al NE del edificio volcánico, en donde se generó un 35 % de los sismos VT ocurridos durante el año. Por otro lado, en el sector del Valle de Paletará (SO del volcán) se concentró el 5 % de la actividad total localizada, y finalmente el 19 % restante correspondió a la sismicidad ubicada de manera dispersa en la zona de influencia del volcán. La figura 41 muestra el mapa de localización epicentral e hipocentral de los eventos de fractura localizados entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2013.

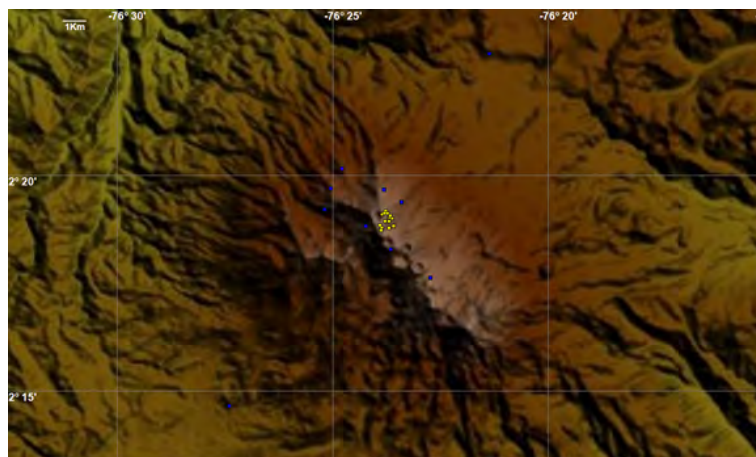
La figura 9 muestra la distribución de magnitudes asociadas a eventos tipo VT durante el año 2013, y separados por fuente de generación de acuerdo a lo observado en el mapa de la figura 41



(a) Mapa de localizaciones de eventos LP



(b) Mapa de localizaciones de eventos TO



(c) Mapa de localizaciones de eventos TR

Figura 40: Mapa de localización de eventos sísmicos asociados a dinámica de fluidos en el volcán Puracé, durante el año 2013. Los cuadros amarillos indican los epicentros de eventos; y los cuadros azules, la posición geográfica de las estaciones sísmológicas.

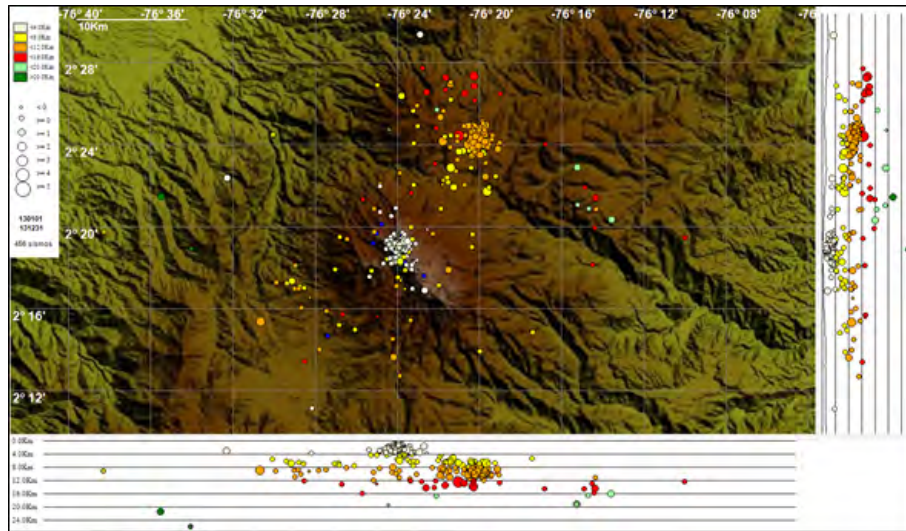


Figura 41: Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos del volcán Puracé durante 2013. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud Local (M_L). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

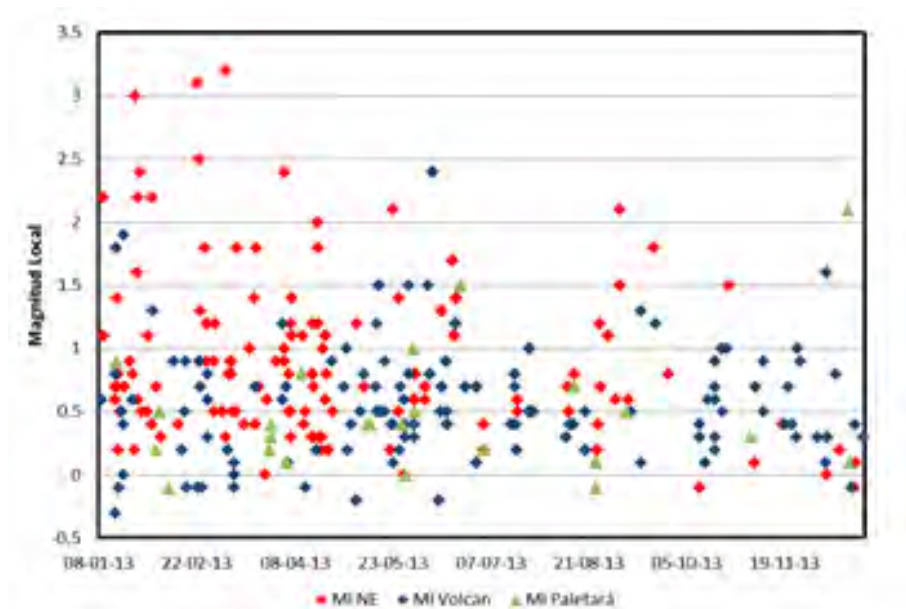


Figura 42: Gráfica de distribución de los valores de magnitud local diferenciados por zona de generación en el año 2013.

2.3. DEFORMACIÓN

Durante el año 2013 se continuó con el fortalecimiento de la red de monitoreo en deformación para el volcán Puracé; en el transcurso del año se instalaron dos estaciones GNSS permanentes telemétricas, un inclinómetro electrónico telemétrico y cinco estaciones GNSS para campaña. Además se realizó tres campañas de campo para ocupación de la red de EDM (Medición Electrónica de Distancias), para un conteo final de cinco inclinómetros electrónicos y el funcionamiento continuo de cinco estaciones GNSS permanentes. En las figuras 43, 44, 45 y 46 se detallan los equipos instalados en el año 2013 y se muestra la distribución geográfica de las diferentes estaciones que conforman la red de vigilancia en deformación para el volcán Puracé.

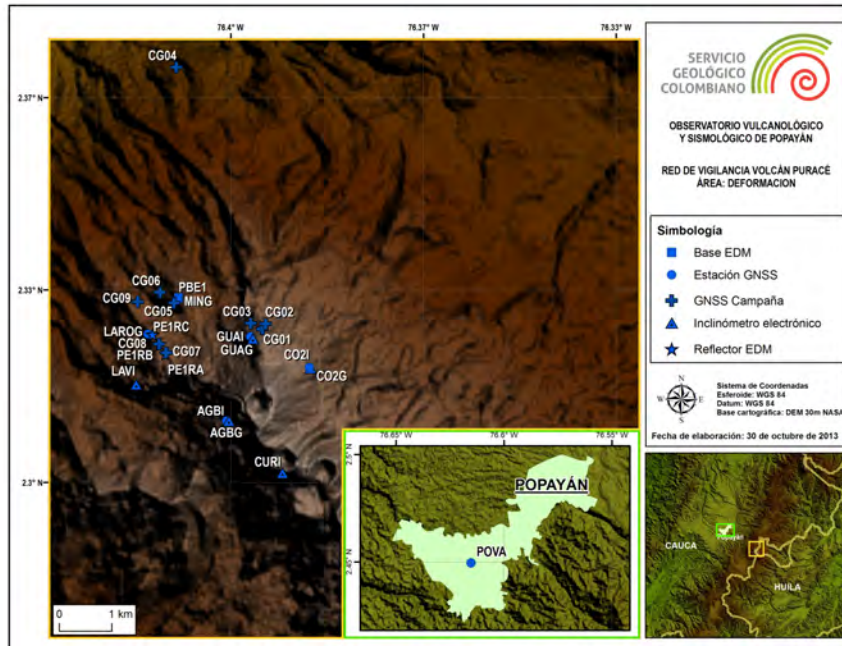


Figura 43: Red de vigilancia en deformación del volcán Puracé. Año 2013.

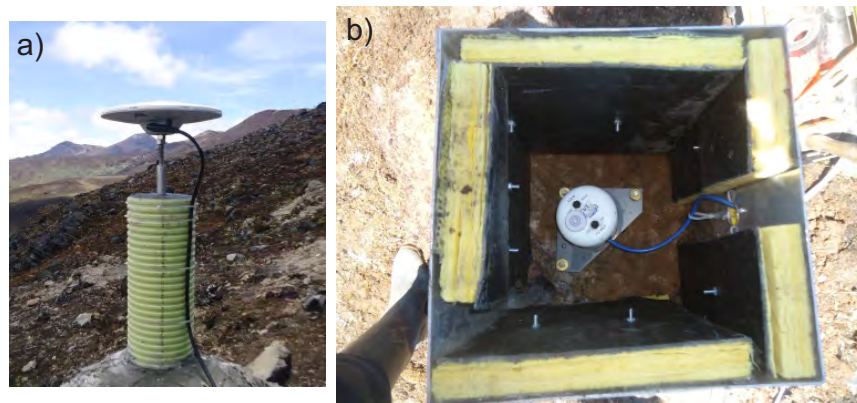


Figura 44: a) Estación GNSS permanente y b) Inclinómetro electrónico, instalados durante el mes de marzo de 2013 en el sector Cocuy2.

2.3.1. Inclinometría Electrónica

En general los inclinómetros de la red de vigilancia del volcán Puracé se han caracterizado por presentar ligeras fluctuaciones en sus dos componentes (este y norte); esto es debido a que su instalación física es a nivel superficial y por ello están propensos a efectos ambientales que pueden generar variaciones en magnitudes de decenas de microradianes. Comúnmente se presentan deformaciones de la superficie de la roca expuesta causada por tensiones térmicas, cuando el sol incide directamente sobre la misma. A la presente fecha se han generado líneas base de comportamiento en cada sensor y al respecto se informa lo siguiente:

1. Inclinómetro Lavas Rojas:

Durante el año 2013 las componentes este y norte del inclinómetro evidenciaron dos comportamientos;



Figura 45: Estación GNSS Mina instalada en el mes de abril de 2013.

entre el primero de enero hasta mediados del mes de septiembre, período en el cual ambas componentes continuaron evidenciando el comportamiento descendente que venía presentándose desde mediados del año 2012, a partir de la mitad del mes de septiembre hasta finalizado el mes de diciembre se empezó a registrar un cambio ascendente en las dos componentes del equipo. Por el momento este comportamiento no ha tenido repercusión en la actividad volcánica, y al analizar las posibles fuentes generadoras de estos cambios, se pueden asociar a la dinámica de la tectónica local. Cabe resaltar que los cambios deformativos son procesos lentos y pueden tardar varios meses para notarse en otras estaciones. En la figura 47 se puede apreciar la tendencia mostrada por las componentes *este* y *norte*, durante el año 2013.

2. *Inclinómetro Guañarita:*

Durante el año 2013 las dos componentes del inclinómetro mostraron un comportamiento estable. En la figura 48 se aprecia la tendencia mostrada por las componentes *este* y *norte*, durante el año 2013.

3. *Inclinómetro Agua Blanca:*

Durante el año 2013 el inclinómetro presentó problemas técnicos con los sensores electrolíticos de



Figura 46: Detalle de instalación de estaciones GNSS de campaña durante el mes de octubre de 2013.

los canales de inclinación, por ello se hizo necesario el cambio del sensor en el sitio. Posterior al período de reinstalación, las dos componentes del inclinómetro mostraron un comportamiento estable, con ligeras variaciones alrededor de su línea base. En la figura 49 se aprecia la tendencia mostrada por las componentes *este* y *norte* durante el año 2013.

4. *Inclinómetro Curiqinga:*

Durante el año 2013 las dos componentes de este inclinómetro mostraron un comportamiento estable, con ligeras variaciones alrededor de su línea base. En la figura 50 se aprecia la tendencia mostrada por las componentes *este* y *norte* durante el año 2013.

5. *Inclinómetro Cocuy2:*

Durante el año 2013 las dos componentes del inclinómetro mostraron un comportamiento estable, con ligeras variaciones en su línea base. En la figura 51 se aprecia la tendencia mostrada por las componentes *este* y *norte* durante el año 2013.



Figura 47: Comportamiento del inclinómetro electrónico Lavas Rojas. Año 2013.

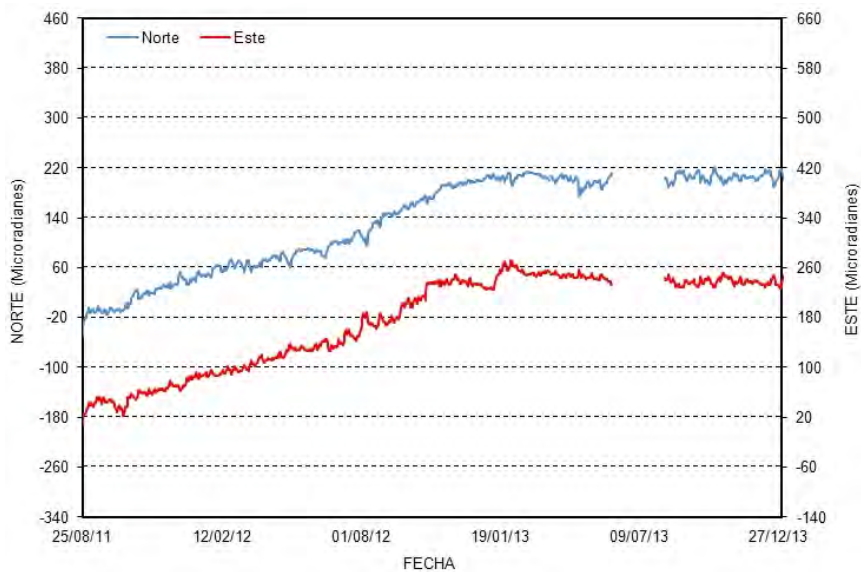


Figura 48: Comportamiento del inclinómetro electrónico Guañarita. Año 2013.

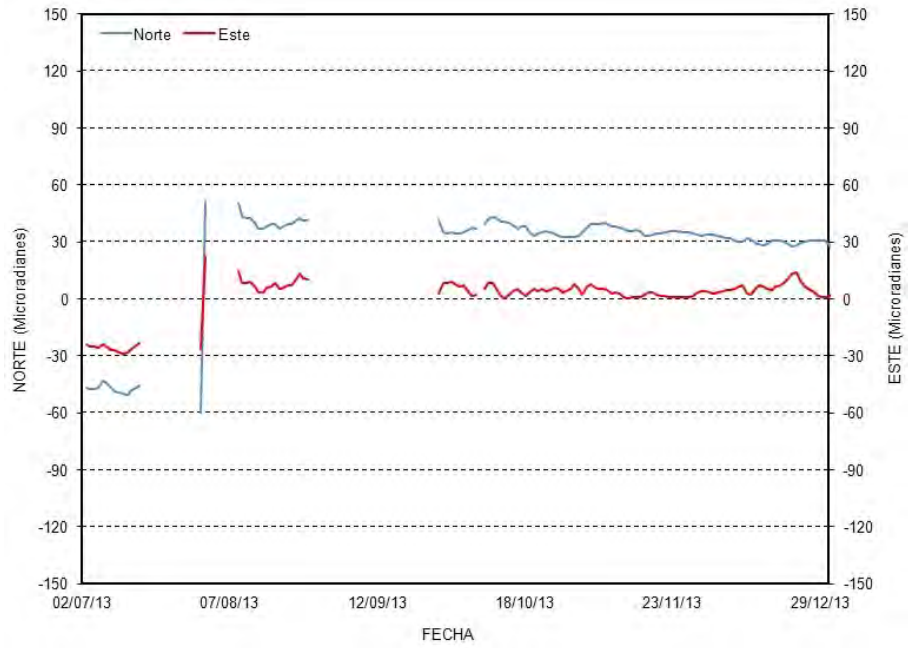


Figura 49: Comportamiento del inclinómetro electrónico Agua Blanca. Año 2013.

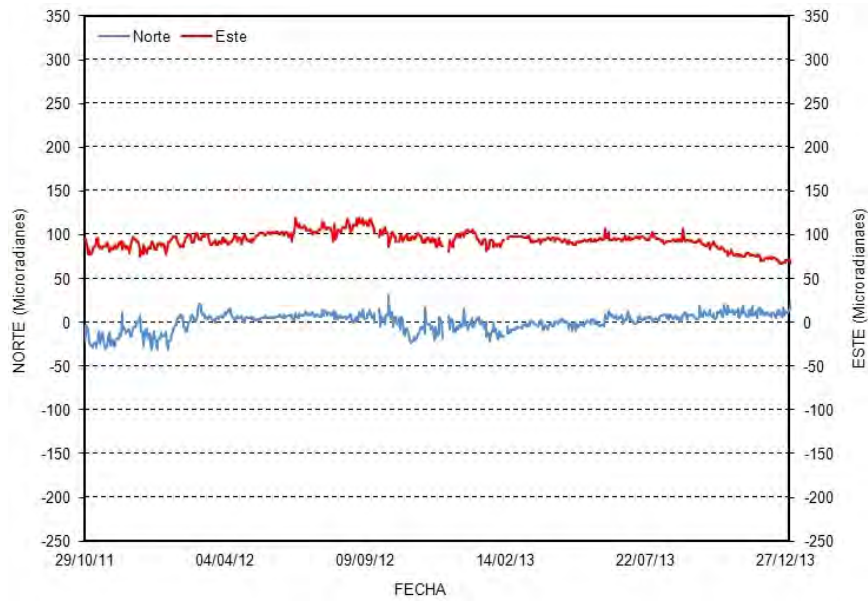


Figura 50: Comportamiento del inclinómetro electrónico Curiqinga. Año 2013.

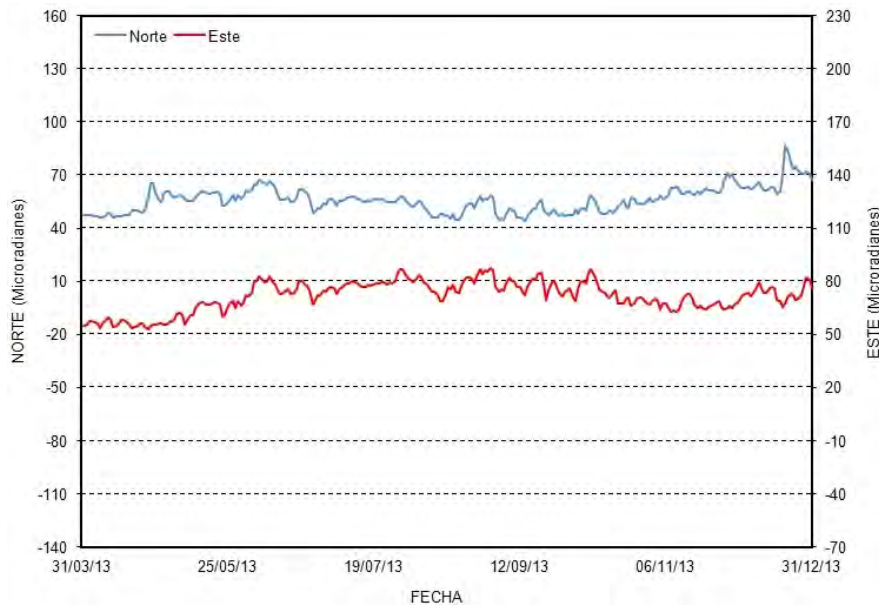


Figura 51: Comportamiento del inclinómetro electrónico Cocuy2. Año 2013.

Durante el año 2013 la red de inclinómetros para monitoreo de la deformación en el volcán Puracé, mostró un comportamiento general estable, por consiguiente se puede decir que por el momento no se están presentando procesos deformativos considerables en el volcán que se puedan asociar con la actividad volcánica.

2.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

En la actualidad, la aplicación de la tecnología GNSS (Sistema Satelital de Navegación Global), basada en el posicionamiento global por satélite se constituye como la herramienta más versátil, eficaz y exacta para medir la deformación de la superficie de un volcán activo. La gran ventaja sobre las técnicas topográficas y geodésicas tradicionales que se ejecutan directamente sobre el volcán es que no necesita visibilidad entre estaciones, es independiente de las condiciones climáticas y atmosféricas, es posible detectar deformaciones de la superficie volcánica tanto en el plano horizontal como vertical, permite una comprensión mejor del movimiento tectónico local, y las mediciones y resultados se dan en tiempo real.

Durante el año 2013 operaron continuamente cinco estaciones GNSS permanentes en el volcán Puracé y una estación GNSS de referencia ubicada en el aeropuerto de Popayán; el procesamiento diferencial de los datos se hace mediante el uso del software comercial Trimble 4D Control. Los resultados que se tienen hasta el momento para las cinco estaciones GNSS permanentes, en sus componentes norte, este y altura, muestran estabilidad en sus datos, es decir, no se están presentando procesos deformativos en el volcán. Se observan algunas perturbaciones en algunos días para algunas estaciones, ocasionado posiblemente por la acción de efectos climatológicos por la temporada de lluvias en la zona y algunas tormentas solares.

En las figuras 52, 53, 54, 55 y 56 se puede observar los registros de las estaciones Lavas Rojas, Guañarita, Agua Blanca, Cocuy2 y Mina durante el año 2013.

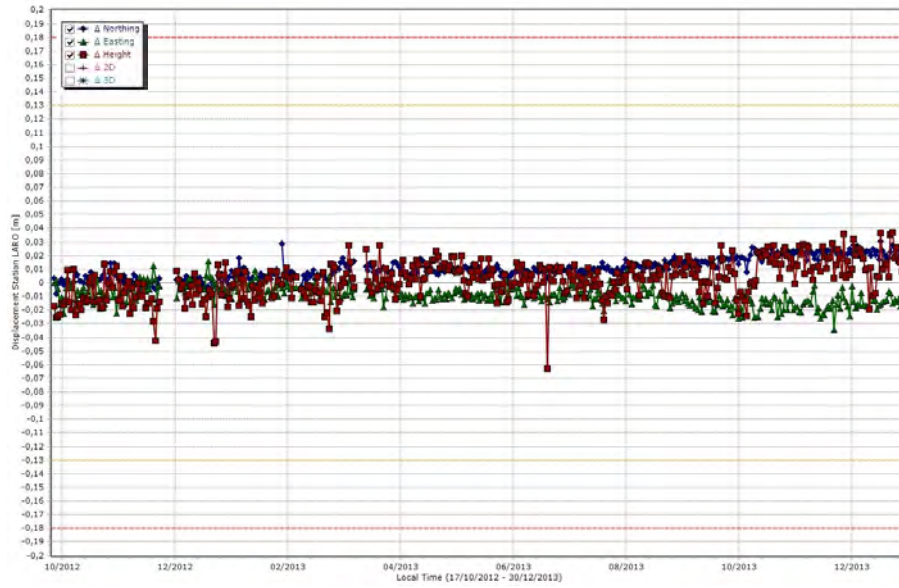


Figura 52: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Lavas Rojas. Año 2013.

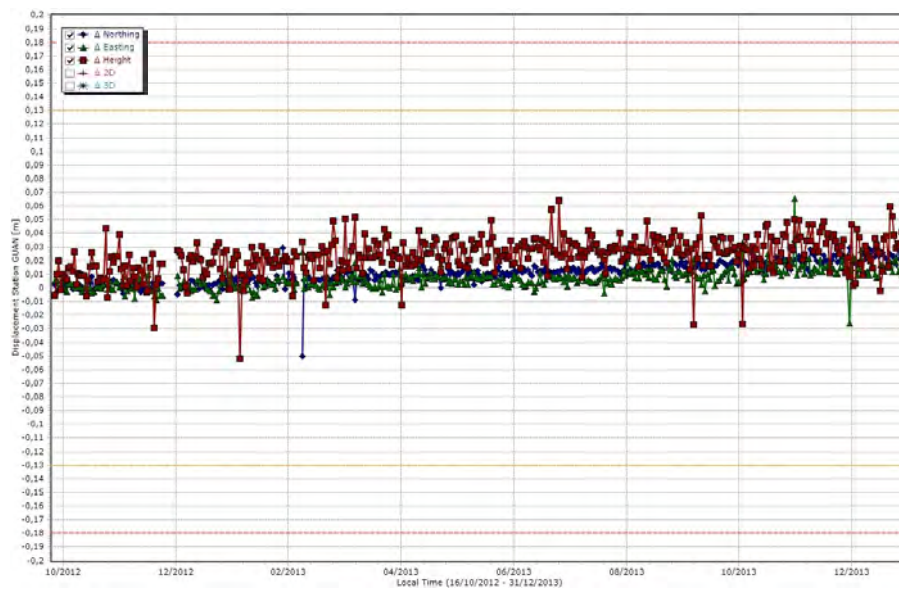


Figura 53: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Guañarita. Año 2013.

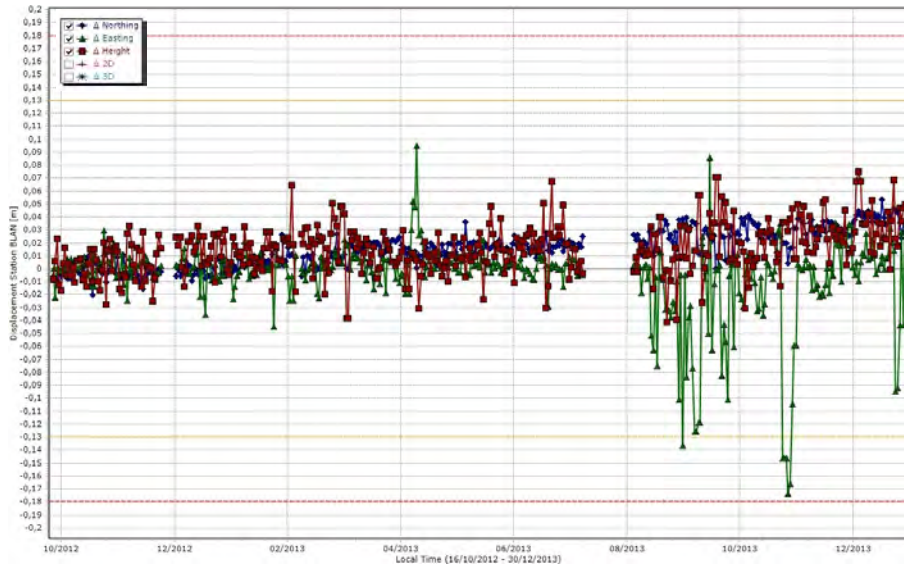


Figura 54: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Blanca. Enero de 2014.

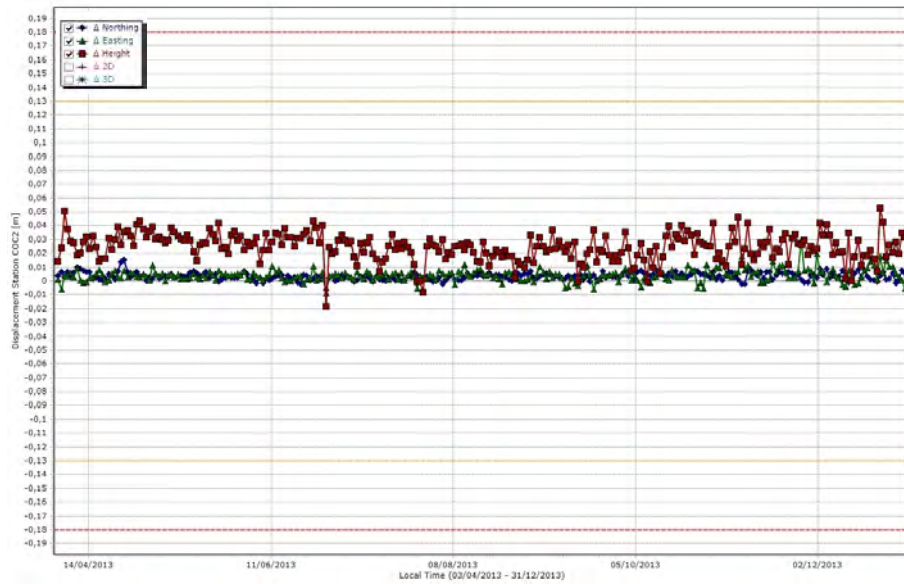


Figura 55: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Cocuy2. Año 2013.

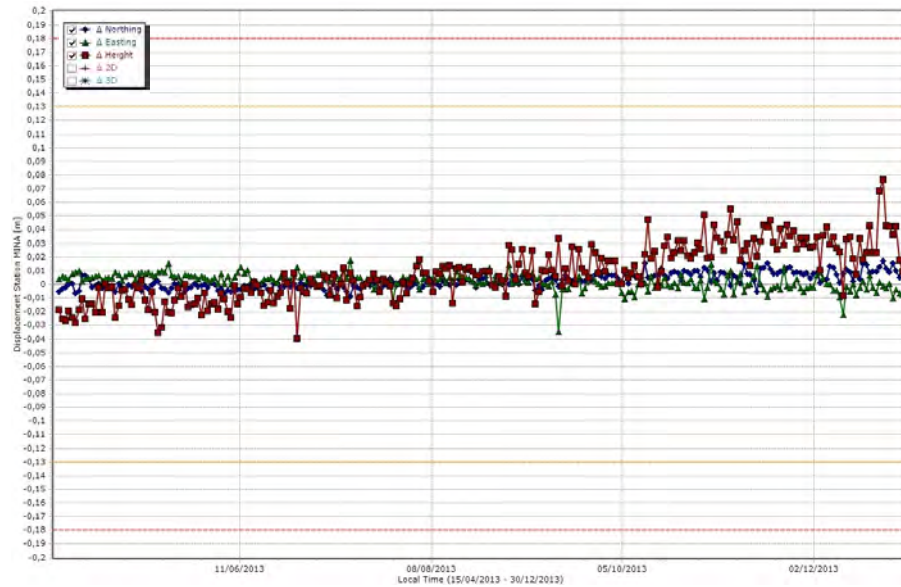


Figura 56: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Mina. Año 2013.

2.3.3. Medición electrónica de distancias (EDM)

La técnica EDM (*Electronic Distance Measurement*) permite determinar las variaciones horizontales que ocurren en la superficie del edificio volcánico, por medio de la lectura directa y electrónica de distancias inclinadas, a partir de puntos alejados del volcán denominados bases EDM, hacia prismas o reflectores EDM instalados en los flancos del volcán. En el volcán Puracé se tienen dos bases y tres reflectores EDM los cuales se ocupan periódicamente.

Durante el año 2013 se realizaron tres campañas de campo para ocupación de las líneas EDM, con respecto a los resultados obtenidos, se observan variaciones dentro del margen de precisión del equipo, por consiguiente se puede inferir a través de esta técnica que no se están presentando procesos deformativos considerables en el volcán Puracé.

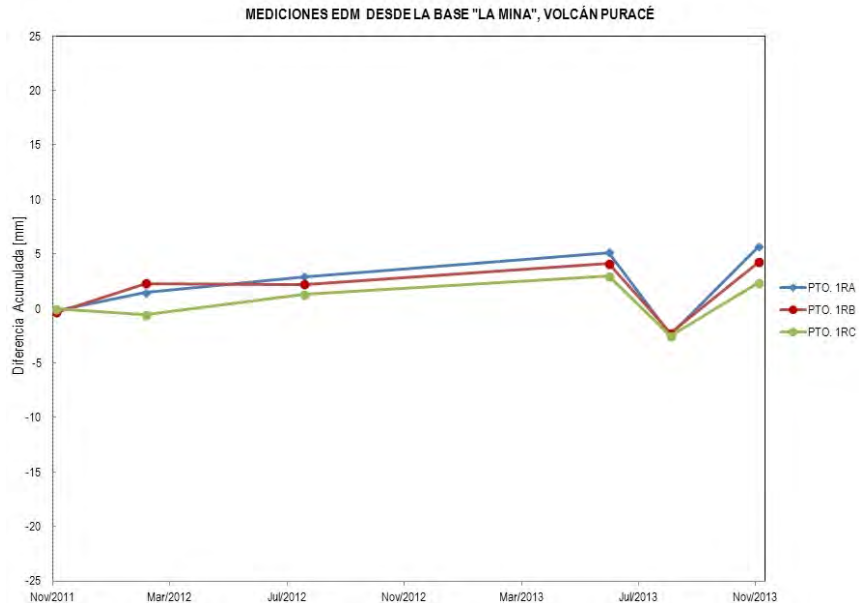


Figura 57: Línea base de mediciones EDM en el volcán Puracé.

2.4. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

El monitoreo continuo de la actividad superficial del volcán Puracé se efectúa a través de las cámaras web Mina, Lavas Rojas y Anambío, esta última es una nueva cámara ubicada dentro del cráter del volcán Puracé (4595 *msnm*). El objetivo principal de estas cámaras es monitorear el comportamiento de los campos fumarólicos ubicados en el flanco noroccidental de la cima y dentro del cráter. Durante el año 2013, no se observaron cambios destacables en la actividad superficial; la emisión de gases desde los campos fumarólicos fue constante y la dirección de dispersión se vio condicionada por la incidencia del viento. La figura 58 muestra la localización de estos equipos.

- Cámara web Mina. Está ubicada a 2.5 *km* al noroccidente del cráter Puracé. En las imágenes captadas durante el año 2013, fue posible observar desgasificación normal del sistema volcánico en pequeñas columnas de color blanco, emitidas desde el campo fumarólico lateral (ver figura 59). Las plumas que emite este campo se dispersaron por influencia de las corrientes de viento que se generan a esa altura (4600 *msnm*). La tendencia de los vientos mantiene una dirección preferencial hacia el costado Noroccidental del edificio, en donde se alcanzaron velocidades hasta de 9.6 *m/s*, equivalentes a 35 *km/h* (ver figuras 59 y 60).

No se evidenciaron cambios a resaltar respecto a sus emisiones habituales. Dentro de la actividad superficial se registraron nevadas esporádicas que cubren de escarcha la parte alta del volcán, asociadas a los cambios ambientales como las bajas temperaturas y períodos de lluvia en la zona.

Algunas de las imágenes más representativas capturadas por esta cámara durante el año 2013 se muestran en las figuras 6 y 5.

- Cámara web Lavas Rojas. Esta cámara está localizada a 2.5 *km* en dirección occidental respecto al cráter, permite tener una panorámica del flanco occidental del volcán Puracé y parte de la cadena volcánica de Los Coconucos. En las imágenes captadas entre los meses de enero y diciembre de 2013 se observa la actividad característica de la fumarola lateral, y ocasionalmente escarcha depositada

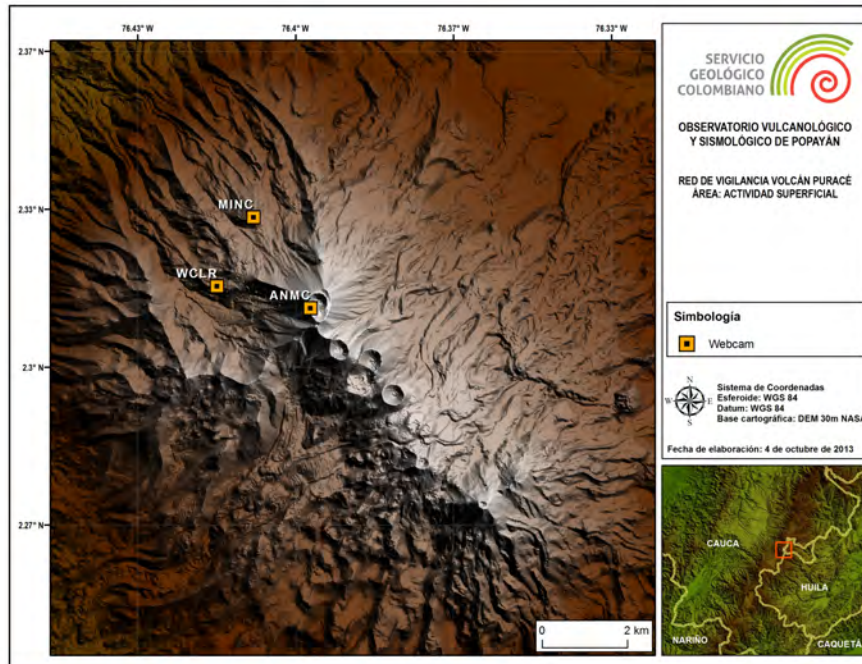


Figura 58: Mapa de localización de las cámaras web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Puracé.



Figura 59: Campo fumarólico lateral del volcán Puracé.

sobre la superficie del volcán Puracé y el volcán Curiquinga. Las imágenes más representativas de este período se aprecian en las figuras 7 y 8

- Cámara web Anambío. A partir del 27 de septiembre el volcán Puracé cuenta con una nueva cámara web para el seguimiento de la actividad superficial. Esta cámara se localiza a 0.5 *km* en dirección sur-occidental respecto al cráter, permitiendo tener una panorámica que cubre todo el cráter del volcán Puracé, donde se puede apreciar puntos de emisión de gases como la grieta localizada en dirección NE dentro del cráter entre otros rasgos característicos (ver figura 66).

En las imágenes captadas entre los meses de septiembre y diciembre de 2013, fue posible evidenciar la continua desgasificación desde el campo fumarólico interno, generalmente en columnas de color blanco (gases y vapor de agua).

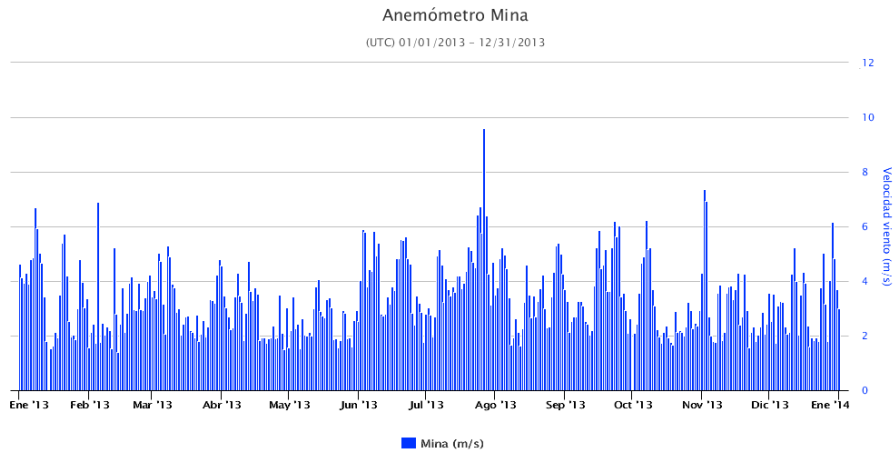


Figura 60: Velocidades del viento reportadas por el anemómetro de Mina – 2013.

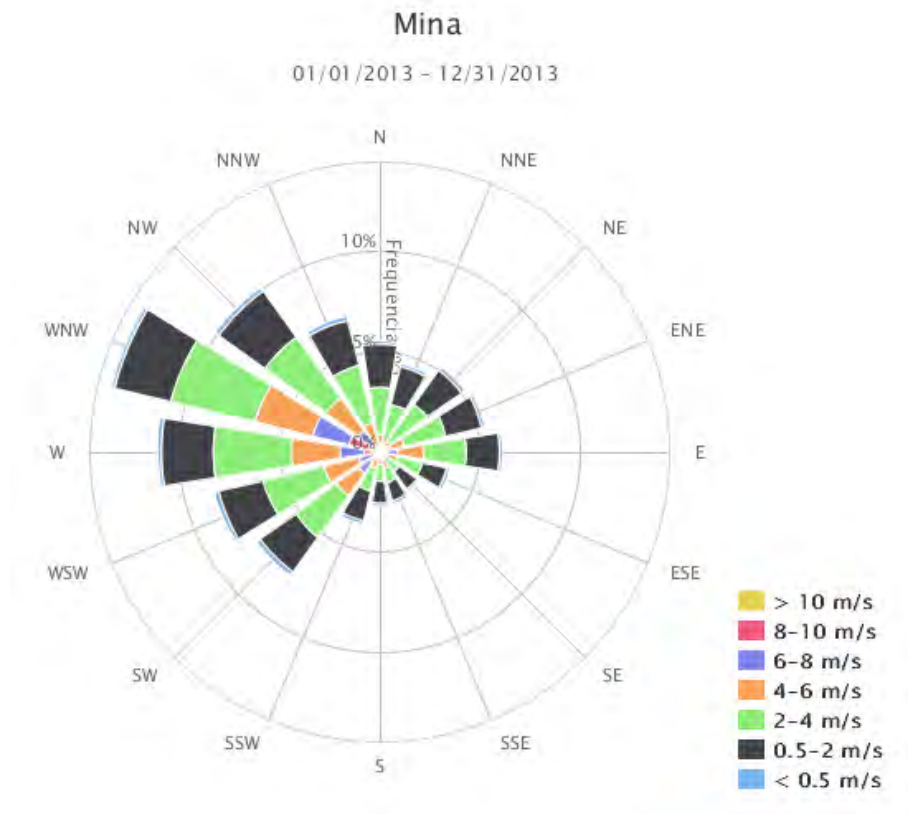


Figura 61: Diagrama de Rosa de los vientos generado a partir de datos del anemómetro de Mina – volcán Puracé, 2013.

Durante el mes de octubre fue notable un aumento en las emisiones habituales, lo cual podría verse asociado a una respuesta del sistema superficial del volcán a los procesos de lluvias en la zona (fuertes precipitaciones, escarcha, nevadas).

En la figura 67 se pueden apreciar algunas de las imágenes más representativas registradas por la cámara Anambío durante los últimos meses del 2013.

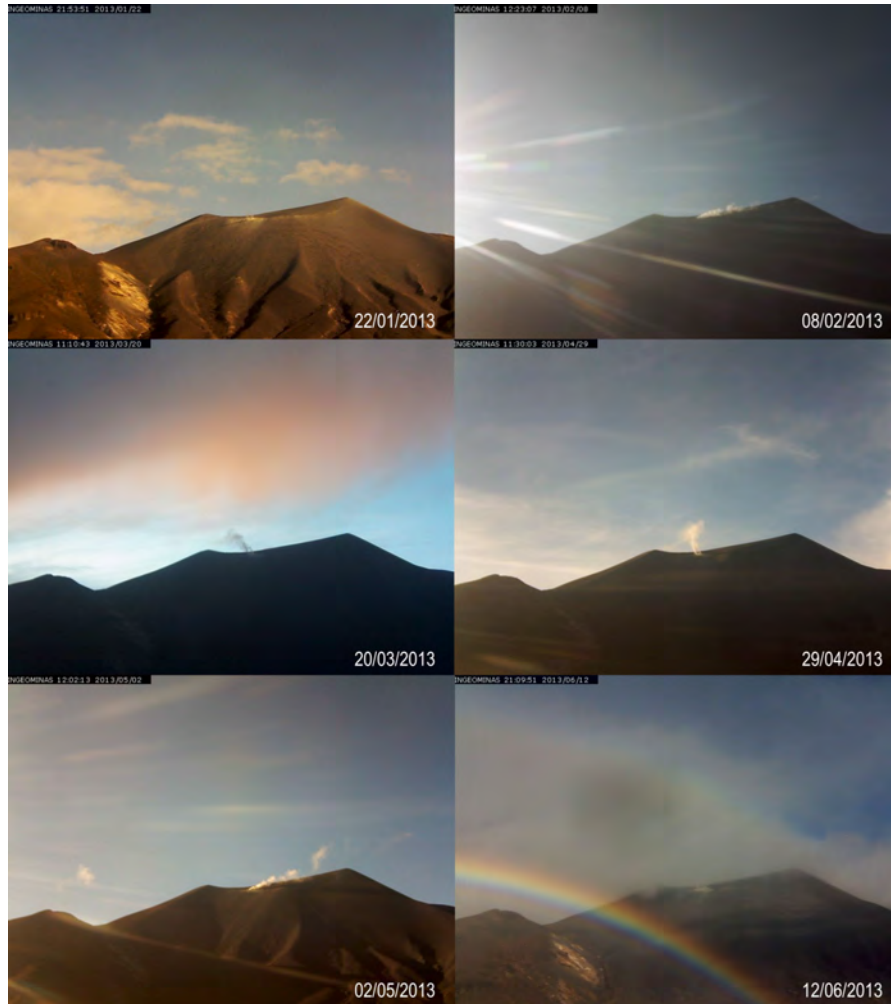


Figura 62: Imágenes de la estación web Mina en el primer semestre de 2013.

En las imágenes captadas desde las cámaras web, cuando las condiciones climáticas así lo permitieron, fue posible evidenciar un aumento en las emisiones habituales desde el campo fumarólico lateral como el interno. Generalmente, la continua desgasificación en forma de columnas de color blanco responden a procesos de recarga del sistema durante periodos de lluvias en la zona (fuertes precipitaciones, escarcha, nevadas) (ver figura 68).

Durante el mes, las plumas de gas que emite el campo fumarolico lateral se dispersaron por influencia de las corrientes de viento que se generan a esa altura (4600 *m.snm*). En cuanto a la emisión de gases desde la grieta dentro del cráter, presentó un comportamiento continuo, generalmente durante horas de la mañana (figura 67). En la figuras 69 y 70, se pueden apreciar diferentes ángulos de visión hacia los diferentes flancos que cubren las cámaras.

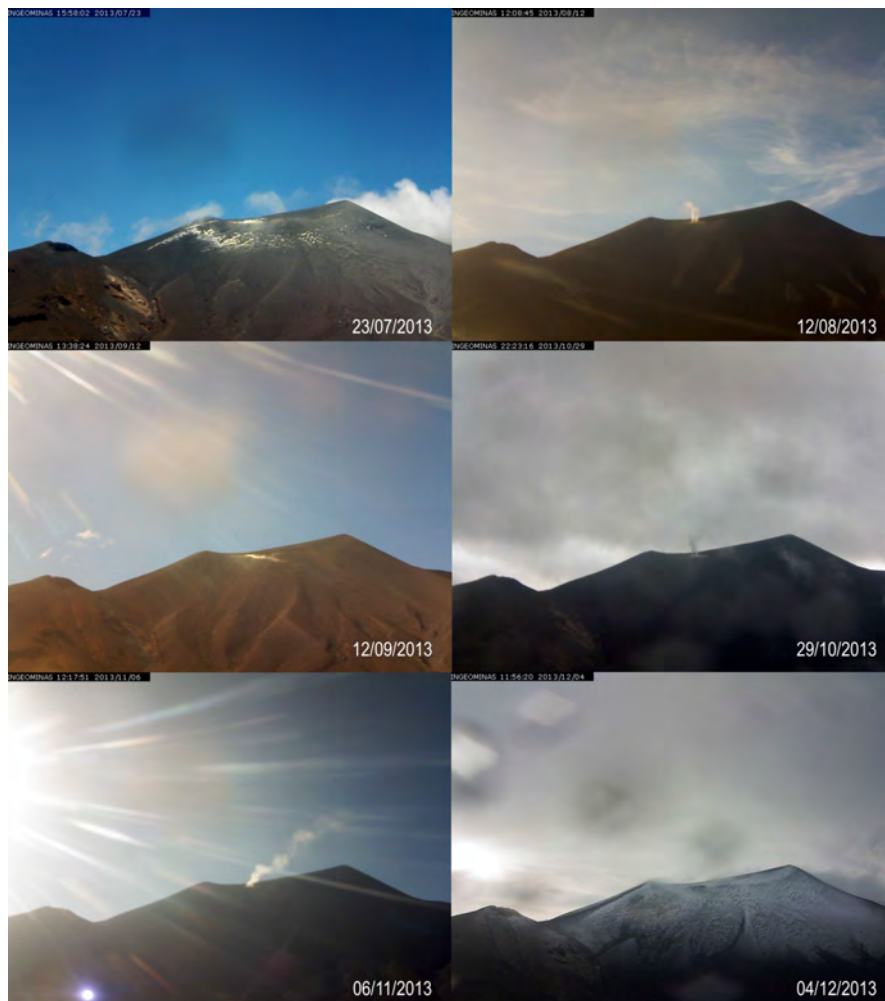


Figura 63: Imágenes de la estación web Mina en el primer semestre de 2013.



Figura 64: Imágenes de la estación web Mina en el primer semestre de 2013.



Figura 65: Imágenes de la estación web Mina en el primer semestre de 2013.

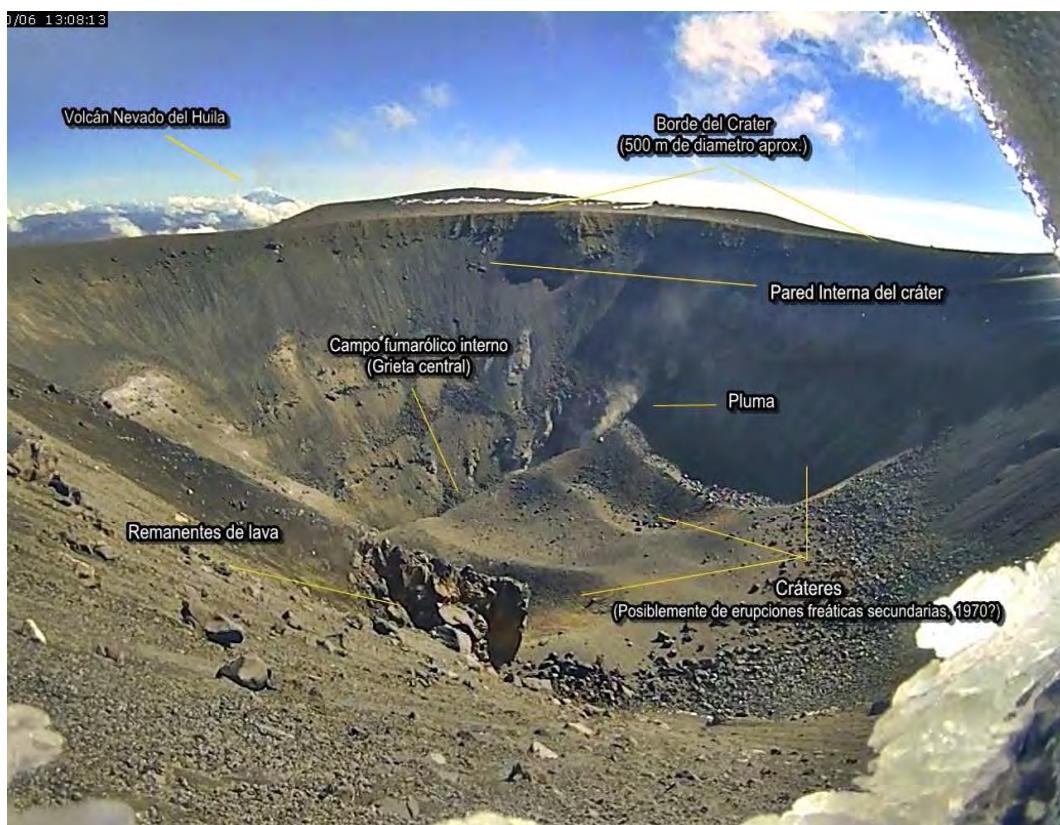


Figura 66: Detalle del campo visual de la nueva cámara web Anambío instalada en septiembre de 2013 en el cráter del volcán Puracé.

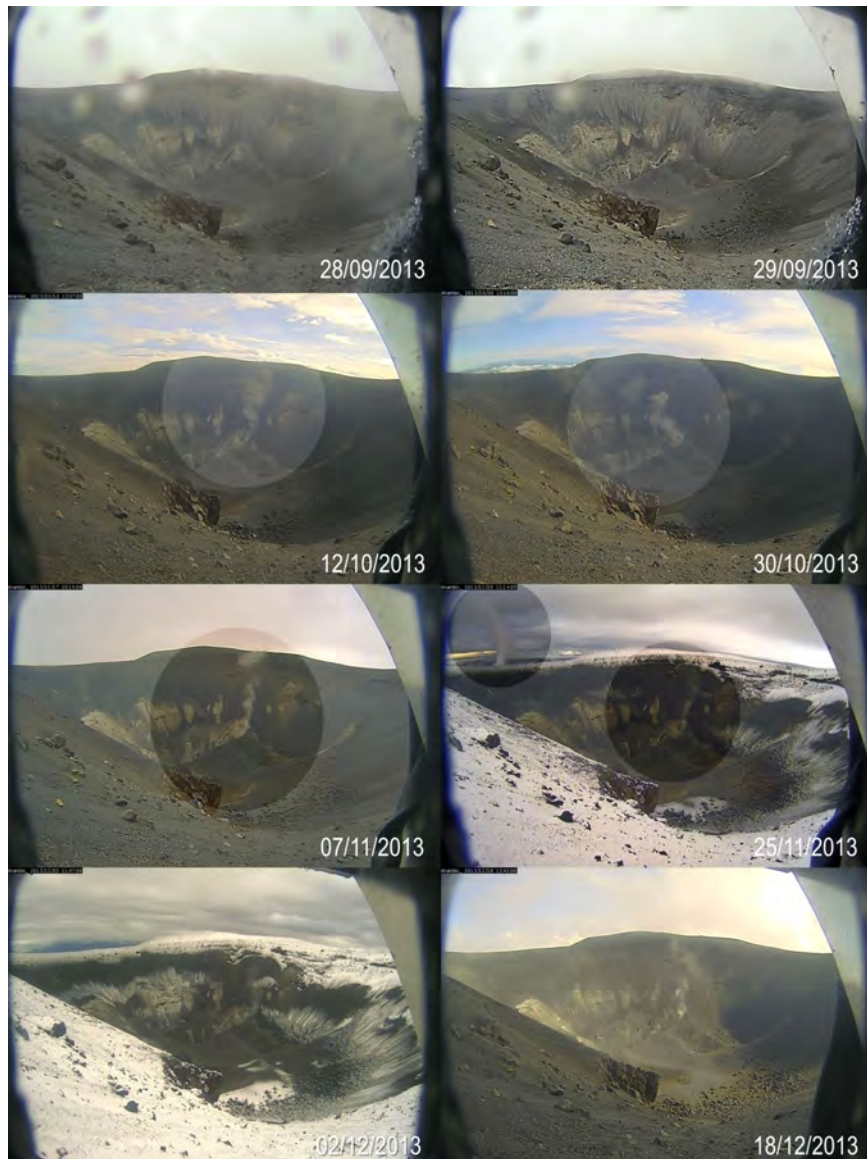


Figura 67: Cámara Anambío ubicada en el cráter del volcán Puracé. 2013.



Figura 68: Cambios ambientales en el volcán Puracé (nevadas súbitas - fuertes precipitaciones).



Figura 69: Imágenes captadas por la cámara web Mina (volcán Puracé), enero de 2014.



Figura 70: Imágenes captadas por la cámara web Lavas Rojas (volcán Puracé), enero de 2014.

2.5. ELECTROMAGNETISMO

El volcán Puracé contó durante el año 2013 con dos estaciones para la detección de potenciales eléctricos espontáneos: Cónдор y Cocuy2 (instalada el primero de abril de 2013), así como con dos magnetómetros, utilizados para el monitoreo del campo magnético local: Laguna y Agua Blanca (instalado el 27 de junio de 2013). La figura 71 muestra la ubicación geográfica de dichos sensores.

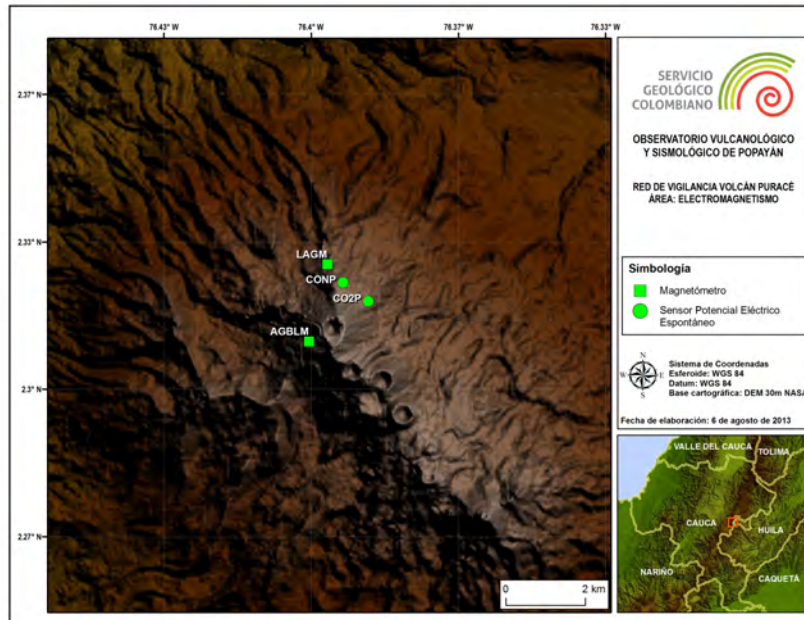


Figura 71: Red de vigilancia en electromagnetismo del volcán Puracé.

2.5.1. Potenciales Eléctricos Espontáneos

El método geofísico que mide el campo natural de Potencial Eléctrico Espontáneo (PEE) se ha implementado como una metodología dentro de la vigilancia volcánica ya que los volcanes tienen dos fuentes de generación de señales de PEE, ya sea por la actividad del sistema hidrotermal (para volcanes activos) o bien por la dinámica del sistema hidrogeológico. En la estación Cocuy2 se han instalado cuatro sensores de PEE, un par orientado radialmente y otro tangencialmente respecto al cráter del volcán Puracé; por su parte, la estación Cónдор posee un par de sensores orientados tangencialmente al cráter del volcán Puracé. Además, la información obtenida de PEE se correlaciona con mediciones de pluviosidad, tomadas por la estación climática Mina, ubicada a una distancia de 2.1 km al noroeste de la estación Cónдор.

A lo largo del año, la estación Cónдор mostró una tendencia predominantemente descendiente, con un potencial medio de -0.4 mV para el mes de enero y llegando a un potencial medio de -6.5 mV para el mes de diciembre. El valor máximo logrado fue de 12.6 mV el 18 de julio y el valor mínimo fue de -11 mV el 21 de diciembre. Las variaciones observadas en los datos estuvieron relacionadas con la pluviosidad, tal y como se muestra en la figura 72 por medio de las líneas verticales rojas. Los cambios más representativos en lapsos cortos de tiempo y relacionados con días alta pluviosidad se resumen en la tabla 8.

Respecto del registro de la estación Cocuy2, los primeros 4 meses son considerados de estabilización de los electrodos no polarizados con el suelo. Seguido a ese período, desde mediados de julio, el registro de las dos componentes demuestran comportamientos relativamente estables, con pequeñas variaciones día noche (relacionados a cambios de la temperatura) y algunas variaciones relacionadas con la pluviosidad, siendo la más representativa entre el 6 y el 11 de julio, variando el potencial desde -15.8 a -11.2 mV , para un valor de 4.6, con un valor de pluviosidad acumulada para estos días de 83.6 mm , según la estación climática Mina.

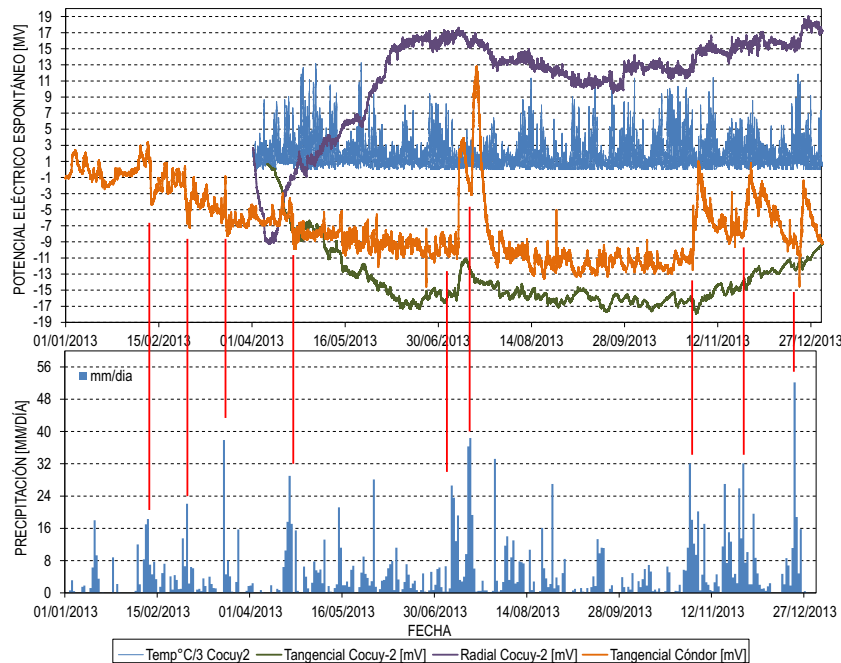


Figura 72: *Arriba*: Potencial eléctrico espontáneo registrado por las estaciones Cónдор y Cocuy2, para el periodo entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2013. *Abajo*: Valores de precipitación diaria registrados por la estación climática Mina para el mismo periodo. Las líneas rojas indican fluctuaciones del potencial eléctrico asociables a periodos diarios de alta pluviosidad.

Fecha	Variación en PEE Estación Cónдор	Pluviosidad acumulada para el periodo (mm)
8 a 12 de julio	Desde -10.35 a 3.4 $mV = 13.75$	85.4
16 a 18 de julio	Desde -2.8 a 12.6 $mV = 15.4$	94
30 de octubre al 3 de noviembre	Desde -11.6 a 1.1 $mV = 12.7$	79.1
24 a 28 de noviembre	Desde -8.1 a 0.4 $mV = 8.5$	81.4
21 a 24 de diciembre	Desde -11 a 1.6 $mV = 12.6$	86.9

Tabla 8: Variaciones más relevantes en la estación Cónдор PEE durante el año 2013.

Cabe aclarar que la distancia entre la estación Cocuy2 y la estación climática Mina (3.4 km) no siempre permite observar las precipitaciones locales en la zona de Cocuy2, por ello pueden darse variaciones en las precipitaciones registradas sin respuesta en Cocuy2.

Se resalta que por el momento, estos equipos se mantienen en un período de registro que busca establecer una línea base de comportamiento, la cual sea adecuada –en combinación con los demás parámetros de monitoreo volcánico empleados–, y permita identificar cambios posiblemente asociados a la actividad volcánica.

2.5.2. Magnetometría

El magnetómetro Laguna mostró durante el año 2013 un comportamiento estable; su campo magnético residual local registró valores promedio en su línea base cercanos a los 41.7 nano-Teslas [nT] (ver figura 73). Se observaron ciclos de oscilaciones día-noche debidos a las variaciones de radiación solar, a lo largo del año se presentaron una gran cantidad de fluctuaciones asociables a perturbaciones temporales en la magnetosfera terrestre (causadas por eyecciones de masa coronal del Sol), de acuerdo con los datos de la estación magnetométrica de referencia Kourou (como ya se dijo, instalada en Guyana Francesa y administrada por el Instituto Central del Magnetismo Terrestre, con sede en Paris-Francia) y los datos de Campo Magnético Interplanetario (IMF, por sus siglas en inglés: Interplanetary Magnetic Field) registrados por el magnetómetro AceRt, acoplado al satélite GOES, los cuales se observan como picos en la gráfica del Viento Solar ACE

(NASA) en la figura 73. Así mismo, se resalta que algunos de los valores más altos durante el año están directamente relacionados a la radiación solar local, como los registrados en enero 23, cuando la temperatura alcanzó su máximo con $35^{\circ}C$ y el campo magnético local registrado por la estación Laguna mostró un valor de $170.7 nT$.

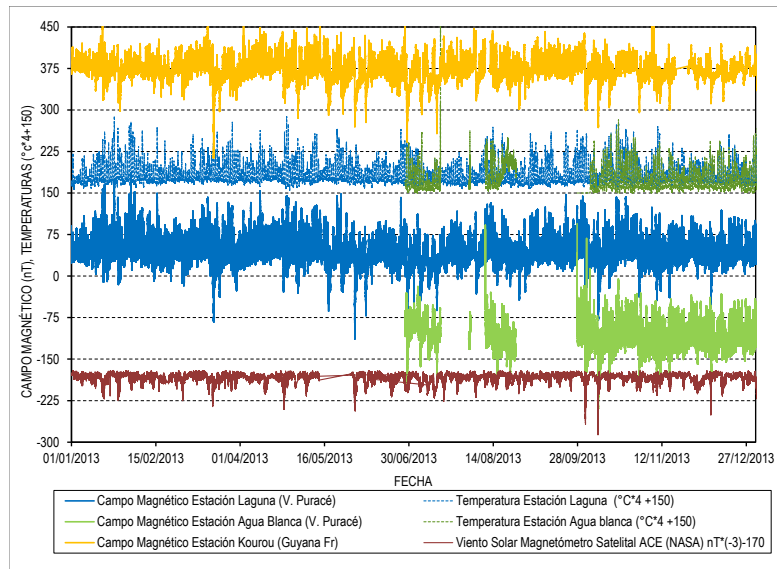


Figura 73: Arriba: Mediciones magnetométricas en el volcán Puracé (incluyendo estaciones de referencia), desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de 2013.

Por otro lado, el magnetómetro Agua Blanca presenta un valor promedio de $-112 [nT]$, en sus registros muestra variaciones debidas a las fluctuaciones día-noche asociadas a la temperatura y a la radiación solar así como fluctuaciones asociables a perturbaciones temporales en la magnetosfera terrestre.

Se resalta que, por el momento, estos equipos se encuentran en una etapa de registro que busca establecer una línea base de comportamiento, la cual sea adecuada –en combinación con los demás parámetros de monitoreo volcánico empleados–, y permita identificar cambios posiblemente asociados a la actividad volcánica.

2.6. FISICOQUÍMICA

La red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Puracé se encuentra conformada actualmente por 19 estaciones isotópicas, seis de ellas telemétricas, para el monitoreo del gas radón y CO_2 en suelos, las cuales se encuentran ubicadas sobre zonas de alta probabilidad de movimiento de fluidos y generación de fracturas, o en zonas de fallas geológicas activas dentro del complejo volcánico. Igualmente, el monitoreo fisicoquímico para este volcán involucra la realización de muestreos periódicos *in situ*, con el fin de obtener datos que permitan establecer líneas base de comportamiento, así como detectar variaciones de los diferentes parámetros fisicoquímicos en las fuentes termales muestreadas (A. Tibia, A. Hirviendo, P. Azul, Mina, San Juan, Hornos, Versailles), y del campo fumarólico ubicado en su costado noroccidental (fumarola lateral). La figura 74 muestra la localización geográfica de los puntos que actualmente son monitoreados fisicoquímicamente en el volcán Puracé.

Durante el año 2013 el monitoreo geoquímico en el Volcán Puracé consistió en la realización de muestreos de gas Radón, toma de muestras y medidas de parámetros fisicoquímicos en fuentes termales (10 puntos de

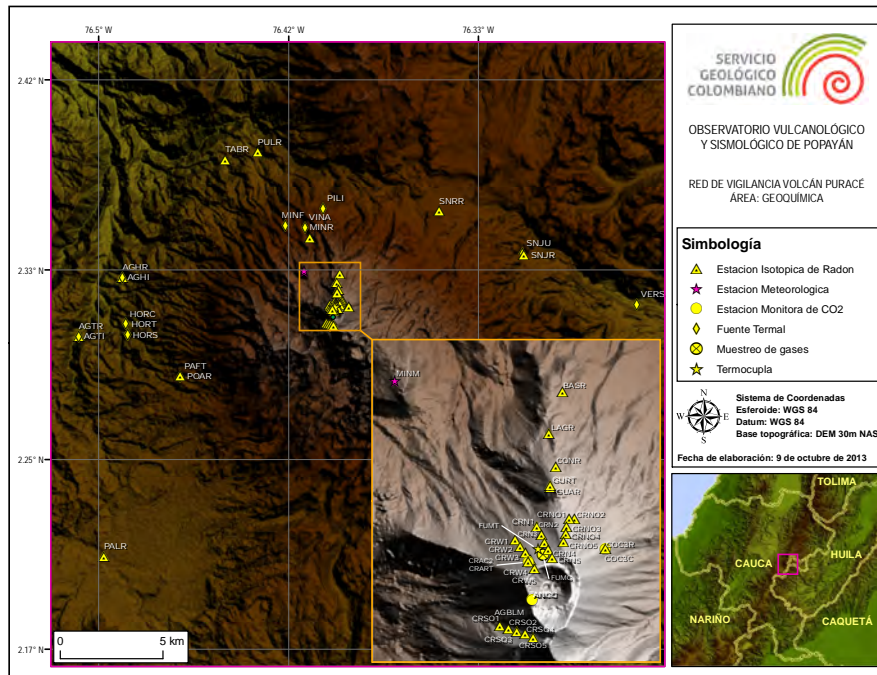


Figura 74: Red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Puracé. Enero de 2014.

muestreo) y gases en campo fumarólico con registros termográficos en el mes de octubre. Por otro lado, en los meses de septiembre y noviembre se instalaron las estaciones multiparamétricas de gases ($^{222}\text{Rn}-\text{CO}_2$ y T°) denominadas Radón-Cráter y Radón-Cocuy 3, además de la adecuación para la recepción telemétrica de datos de las estaciones Guañarita y la estación telemétrica de temperatura ubicada en la fumarola lateral. Se realizó además dos campañas de medidas de flujo de CO_2 con cámara de acumulación de flujo, y medidas de gases secos en la fumarola lateral y recorrido de cráter central.

2.6.1. Medidas de Gas Radón

El gas radón (^{222}Rn) es un elemento radioactivo, cuya producción es continua en el interior de la corteza terrestre; al ser un gas inerte, no reacciona con otros elementos y compuestos y, de acuerdo con su mecanismo de difusión, tiende a escapar de las rocas donde se genera, liberándose frecuentemente por las fallas u otras estructuras del subsuelo. Por sus características físicas, su detección se facilita en fisuras, fallas geológicas y flujos de agua subterránea. El isótopo ^{222}Rn tiene un tiempo de vida media favorable y es abundante, por lo que se convierte en el isótopo más útil para estudios geohidrológicos, debido a que las estructuras geológicas altera la permeabilidad del suelo, aprovechándose así el comportamiento del gas para registrarlo en superficie. Por lo anterior, se puede inducir que la concentración del ^{222}Rn se encuentra asociada a zonas donde se presenta un tectonismo activo, razón por la que, los sectores en los que se realizan las mediciones continuas de las emisiones del isótopo radiactivo ^{222}Rn , están localizados principalmente sobre fallas activas dentro del complejo volcánico, así como sobre zonas en las que existe una alta probabilidad de movimiento de fluidos y generación de fracturas.

Durante el año 2013 hubo toma de datos en las estaciones no telemétricas de radón en campo lejano y cercano, en las estaciones de campo cercano se tomaron datos hasta mediados de agosto debido a que la información suministrada por estas estaciones era insumo de un proceso investigativo, dentro del cual, se hizo un análisis de los datos obtenidos, para determinar la continuidad de esta técnica en la vigilancia volcánica o una posible reubicación (figura 75).

Por otro lado, la técnica de detección en suelo de ^{222}Rn empleando telemetría consiste en enviar datos de los impulsos de desintegración de partículas contenidas en un volumen específico por minuto, de manera que al recibir los datos se determine la concentración en unidades de picoCurie por litro (PCi/L). La ventaja de esta técnica radica en la obtención de datos más precisos y constantes de las emisiones de dicho gas por hora y por día, con márgenes de error confiables.

En las figuras 76, 77 y 5 se ilustran las variaciones en el tiempo de las concentraciones de gas radón registradas por las estaciones telemétricas Guañarita y Radón-Cráter. En estas figuras es posible apreciar que no se presentan mayores variaciones de acuerdo a la línea base registrada hasta el momento; en la figura 77 y 5 también se muestra la concentración continua de CO_2 del suelo, emitida en los estos puntos de muestreo, en conjunto con la temperatura.

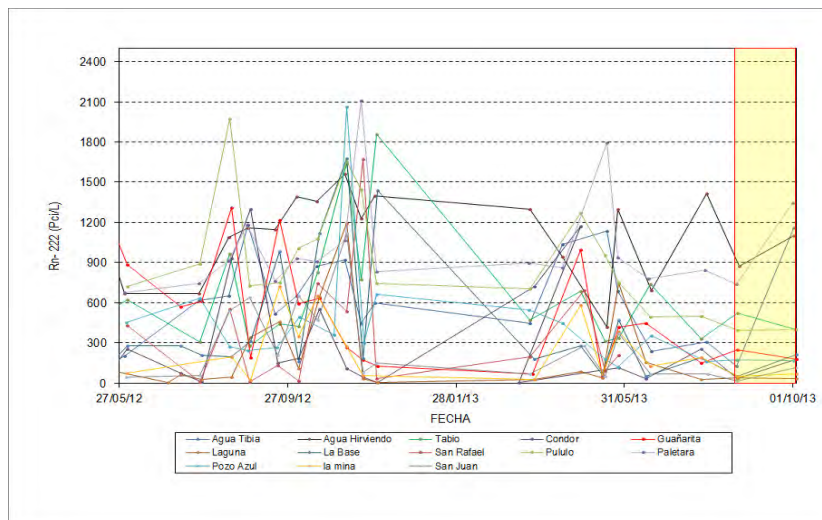


Figura 75: Variación de la concentración de Radón en suelo en las estaciones isotópicas no telemétricas permanentes del volcán Puracé, Octubre de 2013. El recuadro amarillo indica el periodo evaluado en el presente informe .

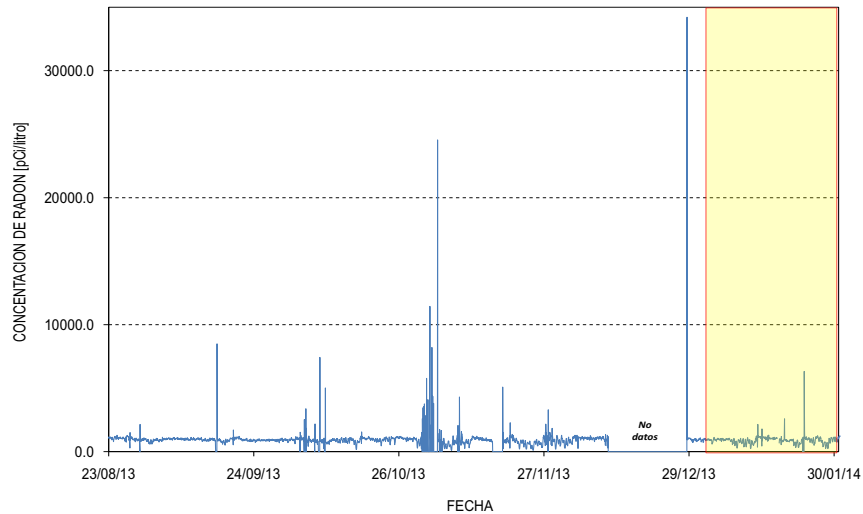


Figura 76: Variación de los niveles de Radón en suelo en estación Guañarita del Volcán Puracé. Diciembre de 2013.

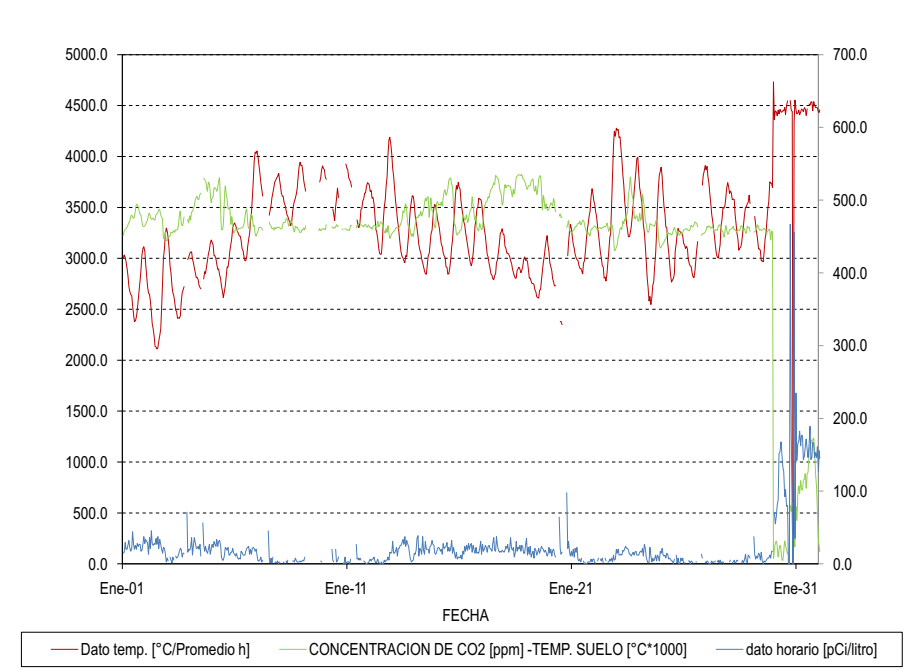


Figura 77: Variación de la concentración de Radón y de Dióxido de Carbono en suelo, en la estación telemétrica Cráter del volcán Puracé, durante diciembre de 2013.

2.6.2. Fuentes Termales

Las mediciones de los diferentes parámetros fisicoquímicos que se realizan en fuentes termales y fumarolas, tienen como objetivo obtener un registro de datos a través del tiempo, de manera que se puedan detectar variaciones que se relacionen con cambios en el sistema volcánico. Durante el mes de octubre se realiza

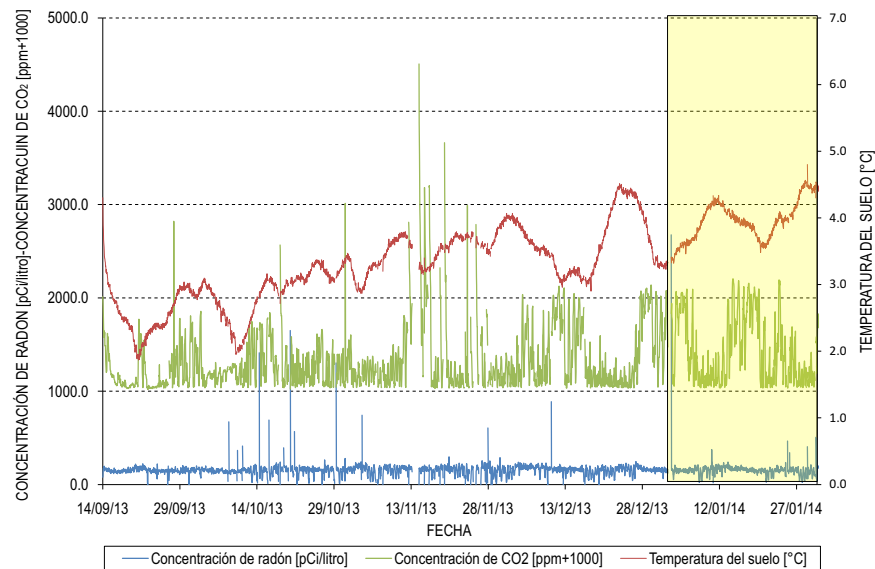


Figura 78: Variación de la concentración de Radón y de Dióxido de Carbono en suelo, en la estación telemétrica Cocuy3 del volcán Puracé, durante diciembre de 2013.

ron muestreos y mediciones de parámetros *in situ* en las fuentes termales: Agua Tibia, Agua Hirviendo, San Juan, Pozo Azul y Pozo Azul-1, La Mina (socavón), La Mina-1 (socavón), Hornos-3, Hornos-7 y Versalles. La comparación de los datos obtenidos durante el período evaluado con las líneas base que se tienen establecidas para cada una de estas fuentes termales, no presentó ninguna variación a destacar. En la figura 79 se presentan imágenes de algunas de las fuentes termales.

La figura 80 y la tabla 9 muestran los valores de la temperatura de las fuentes termales, obtenidas en las medidas realizadas durante el mes de octubre. En ellas se puede apreciar que se conservan los promedios mensuales medidos anteriormente. De igual forma, la gráfica contenida en la figura ??, así como la información contenida en las tablas 10 y 11, muestran que, tanto el potencial de hidrógeno (pH) como el potencial de óxido reducción, no presentaron variaciones significativas, conservando una tendencia estable durante el periodo observado.

Fuente Termal	Temperatura (°C)						
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Octubre
La Mina	45.7	44.3	43.1	43.7	45.2	42.2	46.0
Agua Hirviendo	72.8	73.2	72.9	73.1	72.3	72.8	72.8
Agua Tibia	53.8	54.0	55.4	53.8	55.7	55.1	53.7
San Juan	34.9	36.8	36	38.2	72.3	35.4	35.8
Pozo Azul	87.1	89.6	89.2	90.1	86.4	97.9	88.9
Hornos 3	80.6	80.6	80.5	80.5	79.3	80.7	80.8
Hornos 7	81.2	80.1	80.1	80.6	80.2	81.1	80.7
Versalles	34.6	36.1	36.1	34.3	33.2	34.9	34.7

Tabla 9: Valores de la temperatura para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé, Año 2013.



Figura 79: Mosaico fuentes termales volcán Puracé, muestreos 2013.

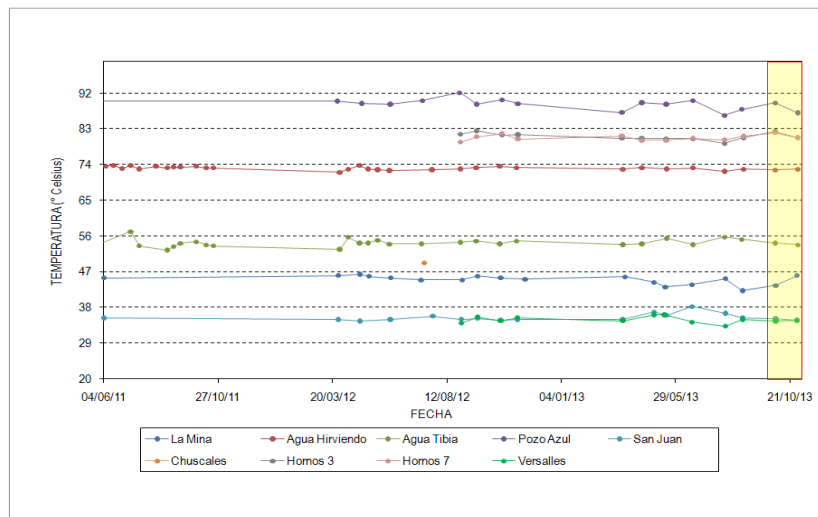


Figura 80: Variación de temperatura en las fuentes termales del volcán Puracé, Año 2013.

Fuente Termal	Marzo		Abril		Mayo		Junio	
	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)
La Mina	2.62	274.1	2.82	299.4	2.96	74.2	2.5	84.5
Agua Hirviendo	6.09	60.4	5.83	84.9	4.85	128.3	5.95	60.2
Agua Tibia	5.97	92.4	5.49	106.9	4.68	119.6	5.62	46.2
San Juan	5.29	116.5	5.48	28.9	5.69	36.8	5.46	31.9
Pozo Azul	3.78	204.9	3.27	196.9	2.87	182.4	3.15	208.2
Hornos 3	3.39	230.3	3.27	216.9	1.98	322.6	3.61	192.1
Hornos 7	3.23	237.4	3.49	22.6	1.93	301.9	4.07	145.2
Versalles	6.04	63.4	6.85	23.2	5.23	61.4	6.47	29.8

Tabla 10: Potencial de hidrógeno y conductividad térmica para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé, año 2013

Fuente Termal	Julio		Agosto		Octubre	
	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Potencial de Oxido Reducción (mV)
La Mina	2.58	307.0	2.65	253.8	1.43	9.82
Agua Hirviendo	5.13	115.9	5.62	107.9	6.54	12.17
Agua Tibia	5.25	102.3	5.54	99.13	6.37	8.20
San Juan	4.94	120.6	6.36	48.8	4.56	1.96
Pozo Azul	2.98	357.2	4.77	427.9	3.76	4.09
Hornos 3	2.61	250.1	3.73	249.1	3.52	4.30
Hornos 7	2.44	257.5	2.87	326.2	3.5	4.14
Versalles	5.83	67.7	6.14	66.4	6.02	1.72

Tabla 11: Potencial de hidrógeno y potencial de oxido-reducción para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé, año 2013. Se resaltan los potenciales de oxido-reducción para Pozo Azul, Hornos-3, Hornos-7 y La Mina, que indican la existencia de condiciones reductoras favorables para la formación de H₂S ó HS

2.6.3. Imágenes térmicas

Durante el mes de octubre se realizaron dos campañas para obtener registros fotográficos térmicos de las diferentes manifestaciones visibles del volcán Puracé (fuentes termales y fumarolas), con el fin de comparar las temperaturas medidas in situ con termómetro termopar portátil tipo K y cámaras termográficas FLIR T440 y FLUKE TI32, para así iniciar un registro base con los equipos termográficos.

Una cámara termográfica, como la FLIR T440 o la FLUKE TI32, permite obtener medidas de temperatura de objetos a distancia (sin entrar en contacto directo) a partir de la captura de la intensidad de la radiación emitida por los cuerpos en el infrarrojo lejano (7.5 a 13 μm , rango no observable por el ojo humano). Esta radiación está relacionada con la temperatura de los cuerpos (ley de Planck), logrando una matriz de puntos de temperatura, matriz a la que se le incorpora una paleta de colores dando como resultado una imagen visible. La precisión en temperatura de estas imágenes es de $\pm 2^{\circ}C$.

2.6.3.1. Registro termográfico de fuentes termales Entre los días 2 y 3 de octubre su tuvo la oportunidad de realizar el muestreo de aguas termales en el volcán Puracé, el cual es apoyado por un muestreo con imágenes térmicas, el siguiente mosaico muestra las imágenes logradas para cada fuente termal.

Los registros de temperatura se presentan resumidos en la tabla 12.

De igual forma entre los días 30 y 31 de octubre su tuvo la oportunidad de realizar el muestreo de aguas termales en el volcán Puracé, el cual es apoyado por un muestreo con imágenes térmicas, el siguiente mosaico muestra las imágenes logradas para cada fuente termal.

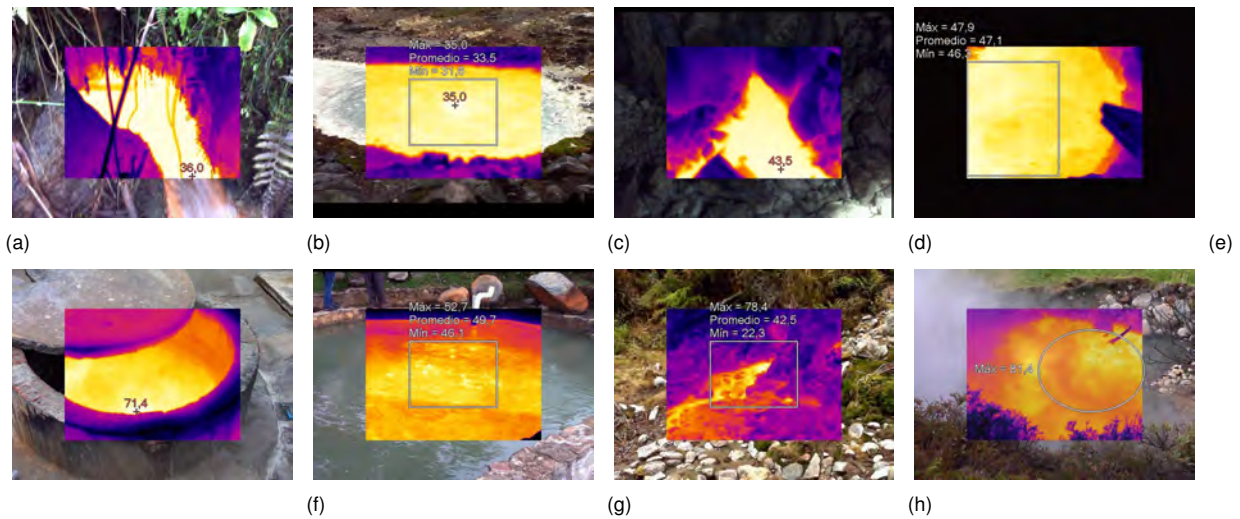


Figura 81: Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales en el volcán Puracé entre los días 2 y 3 de octubre de 2013

Fuente Termal	Temperatura termográfica medida ($^{\circ}C$)
La Mina	45
Agua Hirviendo	71.4
Agua Tibia	52.7
San Juan	35
Pozo Azul	81.4
Hornos3	78.4
Hornos7	–
Versalles	36

Tabla 12: Registro termográfico de las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.

Los registros de temperatura se presentan resumidos en la tabla 13.

Fuente Termal	Temperatura termográfica medida ($^{\circ}C$)
La Mina	–
Agua Hirviendo	70.3
Agua Tibia	51.5
San Juan	34
Pozo Azul	87.2
Hornos3	–
Hornos7	79.2
Versalles	36.5

Tabla 13: Registro termográfico de las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.

A partir de estos datos es posible concluir que el comportamiento térmico de las aguas termales del volcán Puracé hasta el día del muestreo es estable.

2.6.3.2. Observaciones sobre el cráter del volcán Puracé Con el objetivo de identificar zonas de actividad térmica en el cráter del volcán Puracé, se realizaron observaciones mediante imágenes térmicas el día

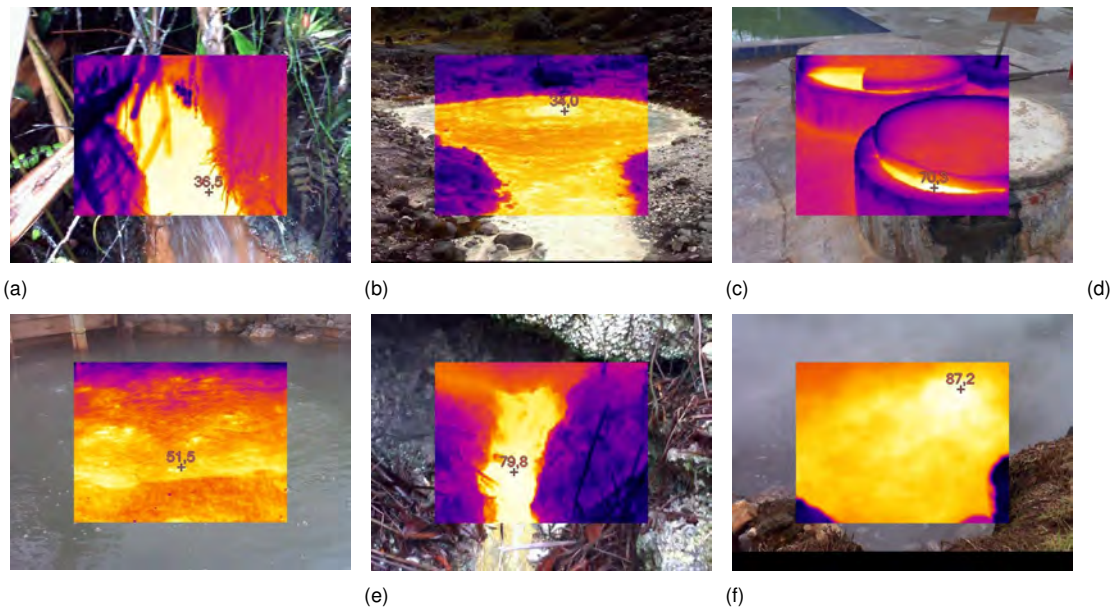


Figura 82: Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales en el volcán Puracé entre los días 30 y 31 de octubre de 2013

24 de octubre de 2013, los resultados muestran varias zonas de actividad, o zonas con actividad térmica, algunas de las cuales es posible detectar a simple vista pues poseen emisión de gases.

Las zonas encontradas se pueden agrupar en 6 zonas, que en la siguiente figura son presentadas espacialmente y a la cual se asocian las imágenes térmicas logradas. La zona 1 es la fumarola lateral, que presenta temperaturas en superficie de alrededor de los 80°C , la zona 2 es la pared suroeste del cráter, la cual presenta en su punto máximo temperaturas de 54.8°C , la zona 3 rodea un pequeño cráter con un punto de temperatura máxima de 42°C , la zona 4 es la pared noreste del cráter y muestra una temperatura máxima de 52.5°C , la zona 5 es la fumarola de la grieta, presentando temperaturas de 40.4°C y por último la zona 6 es la grieta del volcán, con temperatura máxima de 51°C .

Por otro lado es posible apreciar estas zonas desde la cámara de Anambío, para ello se presenta en la figura 84 una fotografía de la estación con estas zonas delineadas.

2.6.3.3. Termometría El monitoreo de los cambios en la temperatura de las emanaciones del volcán Puracé se lleva a cabo mediante una termocupla tipo K, introducida aproximadamente un metro dentro de uno de los orificios que componen el campo fumarólico lateral del volcán. El actual campo fumarólico se encuentra ubicado sobre el flanco norte del cono volcánico, aproximadamente a 300 metros en línea recta del centro del cráter y a una altitud aproximada de 4545 msnm. Cabe anotar que este campo fumarólico ha sido reportado como activo por personal del Servicio Geológico Colombiano (SGC) durante las últimas cuatro décadas (siendo probable que su actividad haya estado ocurriendo desde mucho antes). Así mismo, se ha venido monitoreando la temperatura en esta fumarola con medidas *in situ*.

La figura 85 muestra el orificio seleccionado para la instalación, con el sensor extremo exterior de la barra (abajo a la izquierda) y una termocupla portable tipo K (con su respectiva unidad lectora), la cual se emplea para las medidas *in situ*. La temperatura registrada, desde el inicio de este monitoreo en tiempo real, ha sido en general estable, con variaciones de hasta 26°C , en un rango que oscila entre 115 y 170°C , como se puede observar en la figura 86.

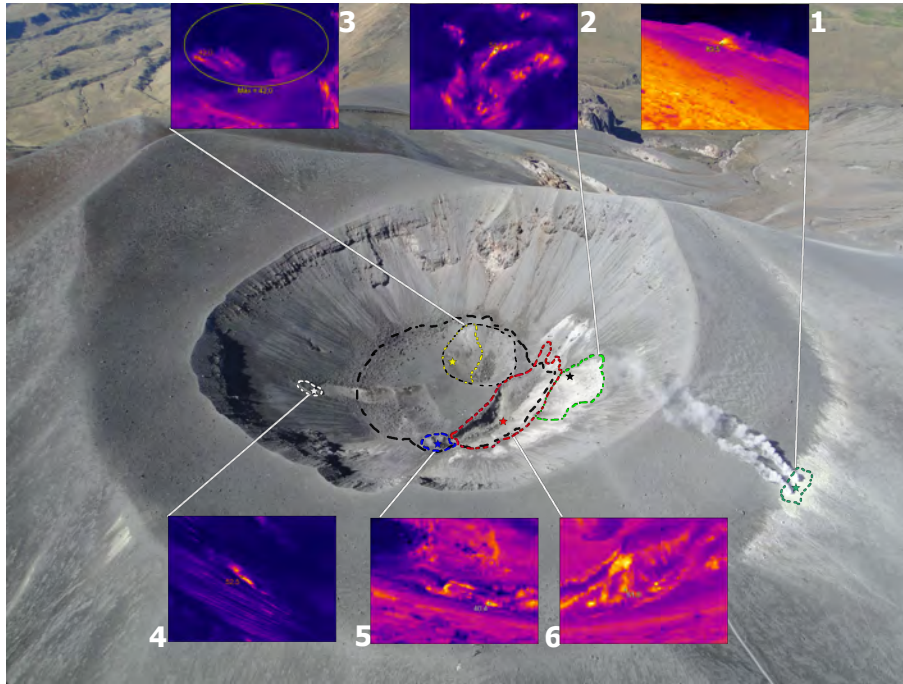


Figura 83: Fotografía de Anambio y zonas térmicamente activas. Las líneas punteadas de colores representan las zonas con actividad térmica observadas. Las estrellas representan los puntos con mayor temperatura observadas en cada zona.

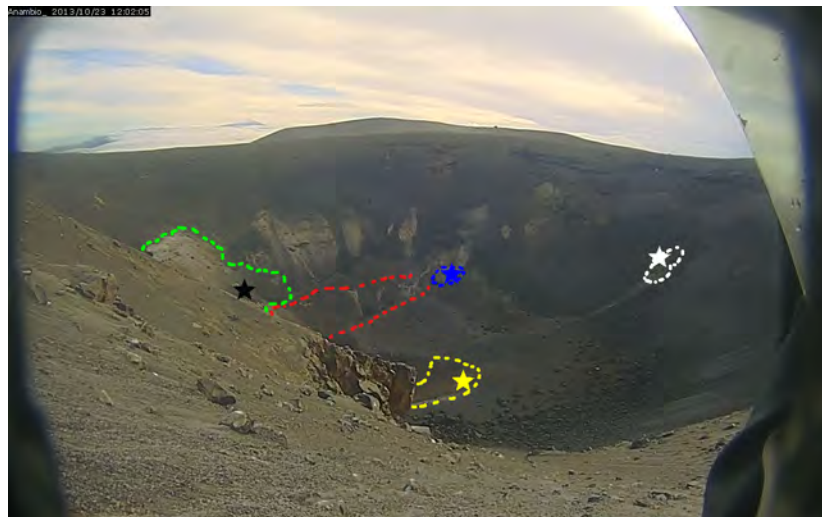


Figura 84: Fotografía de Anambio y zonas térmicamente activas. Las líneas punteadas de colores representan las zonas con actividad térmica observadas. Las estrellas representan los puntos con mayor temperatura observadas en cada zona.



Figura 85: Detalle de la estación termométrica telemétrica instalada en el campo fumarólico lateral del volcán Puracé.

Cabe anotar que las temperaturas registradas por este sistema son mayores (alrededor de 20°C más altas) a las obtenidas en las medidas *in situ* (tomadas en puntos de muestreo ubicados hacia el borde exterior del orificio), debido a que el sensor está enterrado aproximadamente a un metro dentro del conducto; esto causa variaciones muy marcadas en los valores de temperatura, por condiciones climáticas cambiantes en superficie, a medida que el sensor empleado esté más cerca de la superficie y expuesto a los cambios ambientales de la cima del volcán; así mismo los cambios morfológicos del orificio de surgencia de la fumarola ocasionan variaciones en el gradiente de temperatura medido.

Durante los primeros meses del año 2013 el sensor de temperatura cesó su registro debido a fallas técnicas de la telemetría; no obstante, el día 20 de mayo fue restablecida la señal y hasta la fecha se encuentra en un proceso de estabilización del sistema, dadas las variabilidades del mismo, lo cual puede atribuirse a procesos en la calibración del sistema técnico del equipo, pero no a un cambio en el sistema volcánico. También podemos ver que se presenta durante el período evaluado un decaimiento fuerte en la temperatura, comparado con los datos anteriores, esto es debido a que una de las variables para calcular la temperatura real en el punto de medición es la temperatura externa, y al registrarse temperaturas externas inferiores a 0°C se provocó un descenso de la temperatura real del sensor, en un orden de 85°C aproximadamente, sin embargo, esto es un factor externo que es ajeno a las variaciones del sistema volcánico.

2.6.3.4. Medida de flujo de CO_2 Durante los meses de octubre y diciembre se realizó una campaña de medición de flujo de CO_2 en suelo en el Volcán Puracé. Se realizó un recorrido desde el flanco NE bordeando el cráter y terminando en el flanco NO. Los cálculos se realizaron usando la herramienta Fluxrevision del programa desarrollado por West System para el sistema LICOR 820. Los datos muestran que en algunos sectores se presentan flujos altos, esto indica posibles anomalías de desgasificación difusa en suelo. En próximas campañas se realizará el monitoreo continuo en los sitios donde se han registrado dichas anomalías.

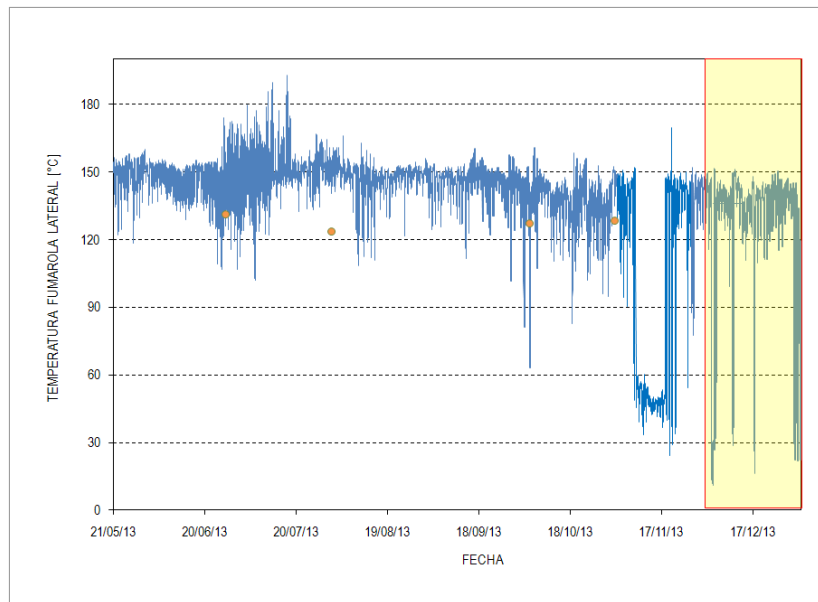


Figura 86: Comportamiento de la temperatura en el campo fumarólico lateral del volcán Puracé en el año 2013. Los círculos amarillos representan los valores de medidas de temperatura *in situ*.



Figura 87: Mosaico de instalación estación multiparámetro Radón-Cocuy, septiembre de 2013.

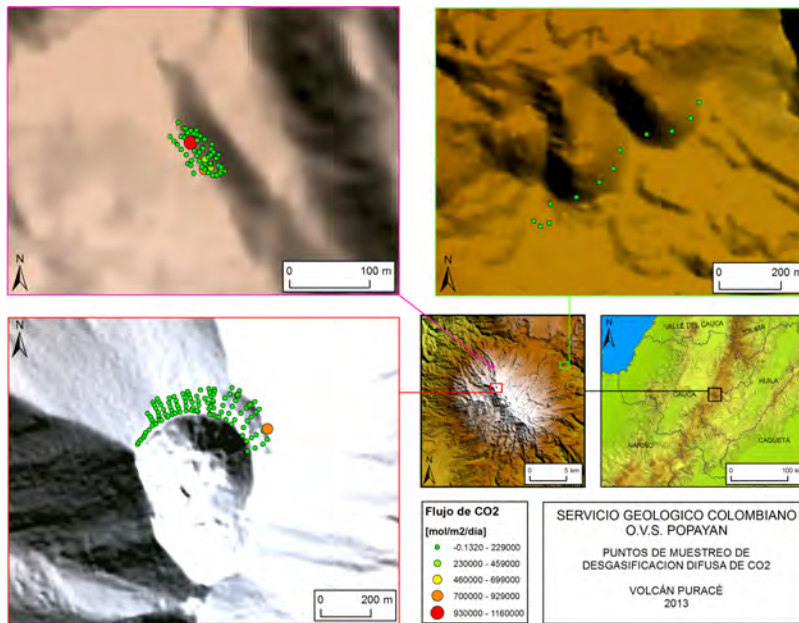


Figura 88: Mapa de puntos de muestreo de desgasificación difusa de CO_2 del Volcán Puracé. Período de diciembre de 2013.

2.7. CONCLUSIÓN.

Del análisis de la información obtenida a través de las diversas técnicas que componen la red de vigilancia instalada en el volcán Puracé y su zona de influencia, se concluye que durante el año 2013, éste continuó presentando un comportamiento estable. Los parámetros de monitoreo tales como sismología, deformación, geofísica, geoquímica y actividad superficial, no presentaron variaciones relevantes a lo largo del periodo evaluado. Por lo tanto el OVS-Popayán, mantiene el nivel de actividad en *NIVEL IV: VOLCÁN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE*.

3 VOLCÁN SOTARÁ.



Figura 89: Imagen panorámica del volcán Sotará, visto desde su costado noroccidental, a aproximadamente 2 km de la cima.

En la figura 89 se observa el volcán Sotará, el cual se encuentra ubicado en la Cordillera Central, en las coordenadas 2°,12' N y 76°,31' W, con una elevación máxima de 4420 *msnm*, a una distancia de 25 km al sureste de Popayán.

El Sotará es un estrato volcán activo, rico en lavas (domina la actividad efusiva sobre la explosiva) que posee tres calderas de 4.5, 2.5 y 1 km de diámetro, las cuales le dan a la cima una forma irregular. Presenta además varios domos exógenos y conforma un complejo volcánico junto con los volcanes Cerro Gordo, Cerro Negro y Azafatudo. Sus calderas externa y media se hallan parcialmente fosilizadas por la actividad posterior a su formación; la más moderna (interna) se encuentra rota hacia el costado suroccidental, provocando con su derrumbe la formación de lahares. De este volcán no existe registro histórico eruptivo. Sin embargo, presenta fumarolas, actividad térmica y sísmica.

Las labores de monitoreo en este volcán se iniciaron en noviembre de 1993, con la instalación de la estación sismológica Sotará, en el sector nororiental del edificio volcánico. En mayo de 1994 esta estación fue robada y su reinstalación se llevó a cabo en diciembre del mismo año. En 1995 se empezaron a registrar niveles importantes en la actividad sísmica, lo que llevó a la instalación temporal de una segunda estación sismológica en cercanías del volcán Cerro Negro. Con el fin de mejorar el monitoreo del volcán Sotará, a partir del año 2007 y hasta la fecha, se ha rediseñado y ampliado la red de vigilancia permanente. Se resalta que, como respuesta al incremento en la actividad sísmica de fractura registrado entre mayo y noviembre de 2012, se fortaleció la red de monitoreo sísmico y en deformación, con la instalación de tres estaciones sísmicas, un inclinómetro electrónico y una estación permanente de GNSS.

De igual forma, desde el año 1996, se vienen realizando análisis geoquímicos en las fuentes termales Las Amarillas y Aguas Calientes (el último de ellos en julio de 2012), y desde el año 1999 en el campo fumarólico (el más reciente en mayo de 2013).

3.1. RED DE VIGILANCIA

El volcán Sotará cuenta en la actualidad con una red de vigilancia compuesta por 15 estaciones, de las cuales 10 son telemétricas y 5 no telemétricas. Estas se emplean para medir los diferentes parámetros mediante técnicas tales como sismología, deformación y cambios en la actividad superficial. La figura 90 muestra la red

de vigilancia del volcán Sotará, mientras que en la tabla 14 se detallan las principales características de las estaciones que componen la red de vigilancia del volcán.

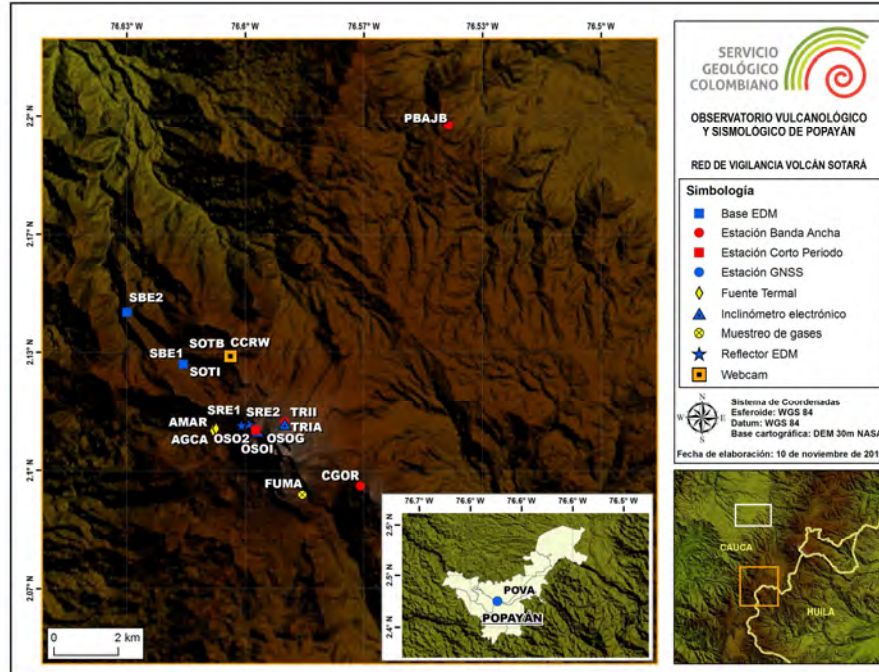


Figura 90: Red de vigilancia del volcán Sotará. Enero de 2014.

3.1.1. Generalidades

3.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. Actualmente, el volcán Sotará cuenta con cinco estaciones sísmicas, una de ellas (Oso2), está equipada con un sensor de corto periodo y se encuentra localizada a 0.8 *km* al NW de la cima del volcán; mientras que las cuatro restantes se encuentran equipadas con sensores de banda ancha. Estas últimas son Sotará y Triángulo, localizadas a distancias de 3.2 y 0.7 *km* al NW de la cima del volcán, respectivamente, así como las estaciones Cerro Gordo y Peñón Bajo, localizadas a 2.9 *km* al SE, 21.4 *km* al NE y 11.32 *km* al NE del edificio volcánico, respectivamente.

3.1.1.2. Red de Deformación. Esta red se encuentra conformada por tres inclinómetros electrónicos: Oso y Sotará, localizados a 0.7 *km* y 3.1 *km* al NW de la cima del volcán; y Triángulo, ubicado a 0.7 *km* al N del cráter. De igual forma, se cuenta con una estación GNSS permanente denominada Oso, la cual se encuentra ubicada a 0.74 *km* al NW del edificio volcánico. Adicionalmente, se tienen dos líneas EDM para la realización de medidas de control topográfico.

3.1.1.3. Red de cámaras web. Para el monitoreo de la actividad superficial del volcán Sotará, se cuenta con una cámara web con conexión IP, la cual se encuentra instalada en el sector denominado Cerro Crespo, a 3.1 *km* al NW del edificio volcánico.

3.1.2. Funcionamiento de Estaciones

Durante el año 2013 la red de vigilancia del volcán Sotará tuvo un porcentaje de funcionamiento del 81 %, sobre un 87 % del total de la red de monitoreo. La figura 91 muestra el consolidado del funcionamiento de estaciones para el volcán Sotará, durante el año 2013.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Distancia al Cráter (km)
Oso2	Corto Período	2.1116	76.5966	4106	0.76
Oso	Inclinómetro electrónico	2.1112	76.5968	4106	0.75
	GNSS	2.1111	76.5968	4189	0.74
Sotará	Banda Ancha	2.1322	76.6042	3795	3.12
	Inclinómetro electrónico				
Triángulo	Banda Ancha	2.1132	76.5892	4166	0.70
	Inclinómetro electrónico				
Cerro Gordo	Banda Ancha	2.0955	76.5679	3874	2.92
Peñón Bajo	Banda Ancha	2.1970	76.5430	3330	11.32
Cerro Crespo	Cámara web	2.1322	76.6042	3795	3.12
Base EDM1	Base EDM	2.1299	76.6173	3408	3.88
Base EDM2	Base EDM	2.1444	76.6331	3225	6.26
Reflector A	Reflector EDM	2.1129	76.5989	4050	1.10
Reflector B	Reflector EDM	2.1126	76.6010	3916	1.28
Aguas Calientes	Fuente Termal	2.1217	76.6105	3670	2.66
Amarillas	Fuente Termal	2.1099	76.6078	3611	1.86
Jelima	Muestreo de gases	2.0934	76.5839	3737	1.75

Tabla 14: Características de la red de vigilancia del volcán Sotará.

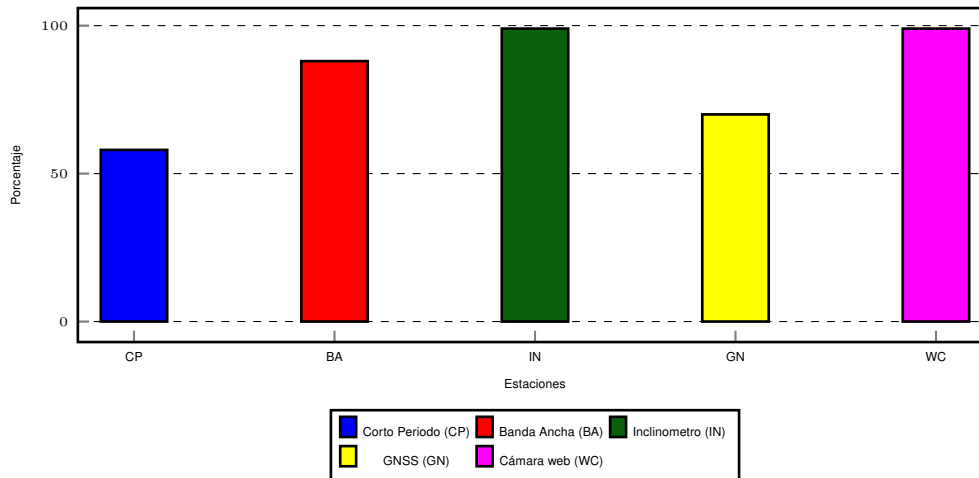


Figura 91: Porcentaje de funcionamiento de las estaciones de la red de vigilancia del volcán Sotará durante el año 2013.

3.2. SISMOLOGÍA

En el año 2013 se contó con una red de cinco estaciones sismológicas para el monitoreo sísmico del volcán Sotará. La figura 92 muestra el mapa de localización de las estaciones que conforman esta red de monitoreo.

3.2.1. Actividad Sísmica

La red de estaciones sísmicas del volcán Sotará registró durante el año un total de 437 eventos sísmicos, los cuales estuvieron relacionados exclusivamente con procesos de fracturamiento de roca, de estos, 142 fueron considerados de muy bajo nivel energético.

La tabla 15 y la figura 93 muestran la tendencia en cuanto al número de eventos registrados durante el año 2013 en el volcán Sotará.

3.2.2. Energía Sísmica Liberada

La tendencia de la energía sísmica liberada por eventos de fractura registrados durante el año 2013 se caracterizó por permanecer en niveles estables, con pequeñas variaciones en el número de eventos registrados diariamente, tal como se evidencia en la figura 6, donde se presenta para el día 10 de febrero un pico má-

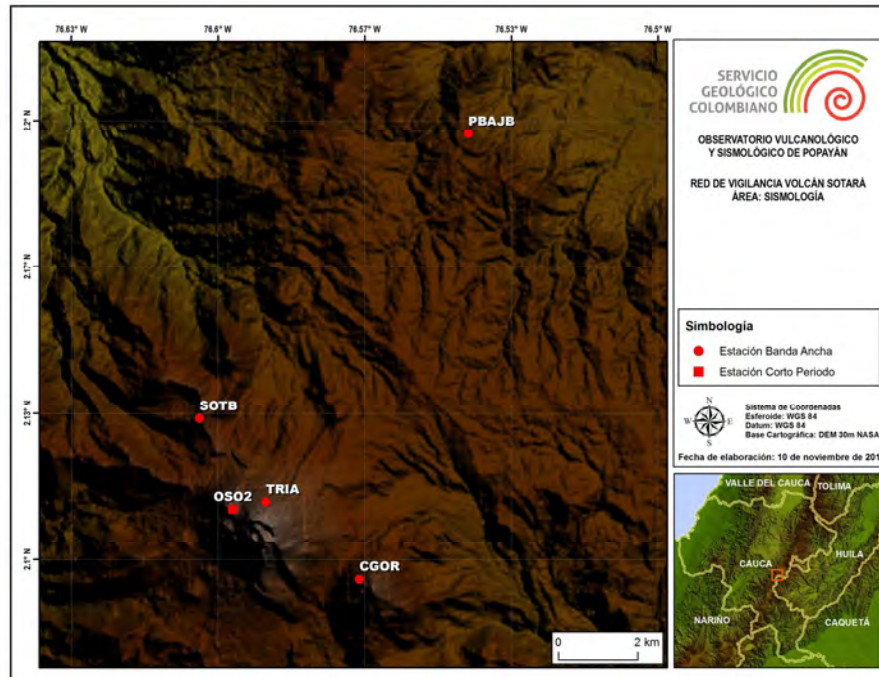


Figura 92: Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará en el año 2013.

Fecha	Tipos de eventos	
	Eventos VT	
Número de eventos registrados en el volcán Sotará en el 2013.	Eventos clasificados	De muy bajo nivel energético
	295	142

Tabla 15: Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Sotará durante el año 2013.

ximo de $5.44E+06$ *ergios*, este se asoció con la ocurrencia de 14 eventos con duraciones entre 11 y 43 s. La máxima liberación de energía diaria en el año se presentó en el segundo semestre, el día 19 de octubre, alcanzando un valor de $9.34E+06$ *ergios*, el cual estuvo asociado con la ocurrencia de cinco eventos que presentaron duraciones entre 25 y 44 s.

El comportamiento anteriormente descrito se refleja de igual forma en la tendencia de la energía sísmica al ser evaluada de forma acumulada. Las variaciones registradas a lo largo del año definen directamente los días en que se presentó mayor actividad de fractura.

Las gráficas contenidas en las figuras 95 y 96, ilustran el comportamiento de la energía sísmica liberada diaria y acumulada, respectivamente, a lo largo del periodo evaluado.

Nota: La energía sísmica es graficada en razón de su raíz cuadrada con el fin de facilitar su análisis y visualización.

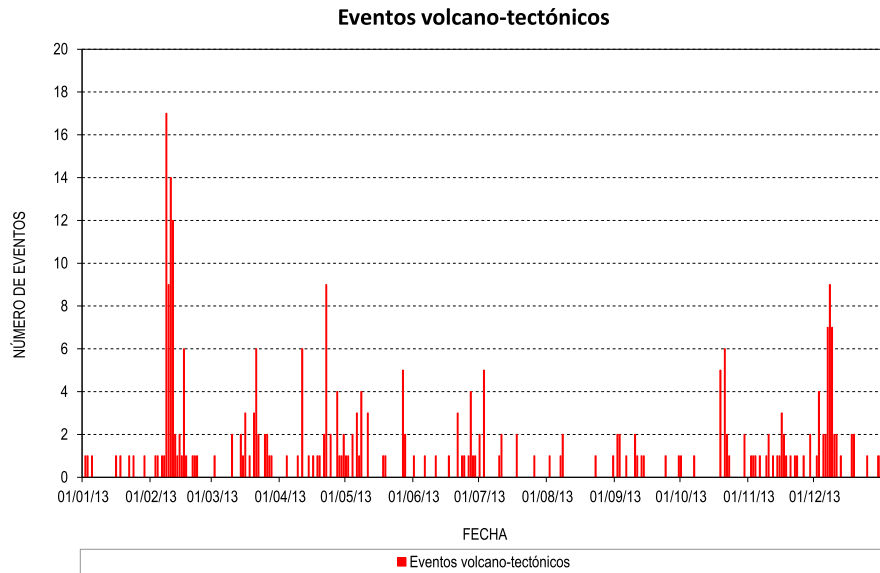


Figura 93: Número de eventos VT clasificados en el volcán Sotará durante el año de 2013.

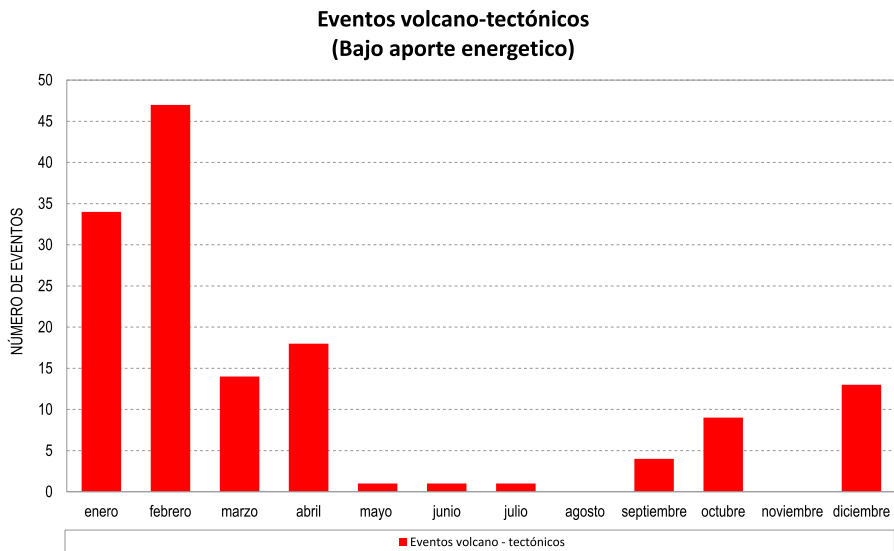


Figura 94: Relación mensual de número de eventos VT, con bajo aporte energético en el volcán Sotará durante el año 2013.

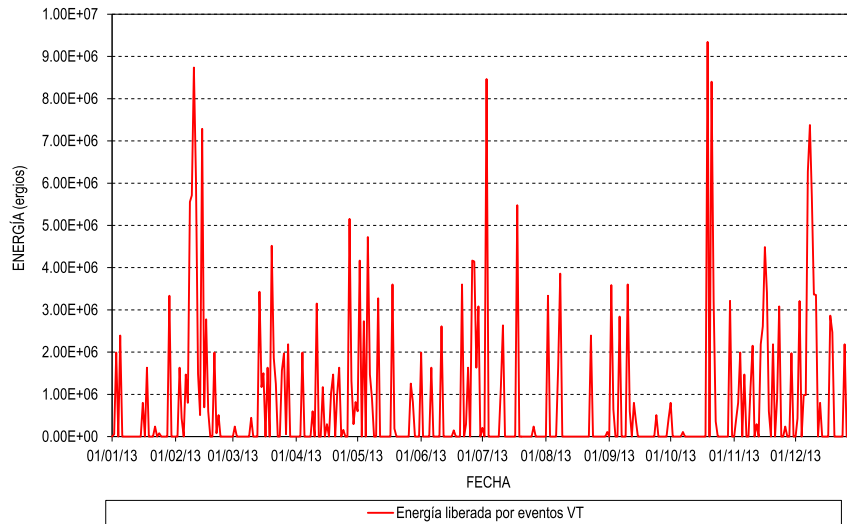


Figura 95: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT en el volcán Sotará, año 2013.

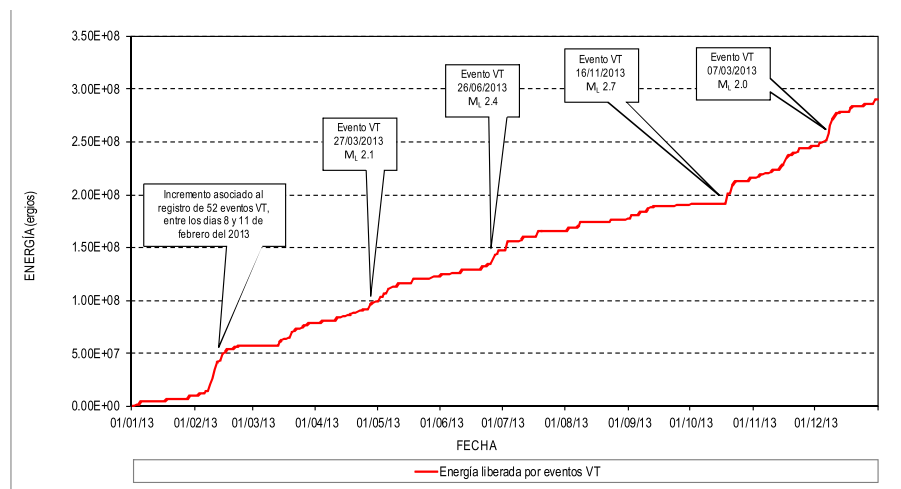


Figura 96: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT en el volcán Sotará, año 2013.

3.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

3.2.3.1. Localización de eventos asociados con procesos de fractura. De los 195 eventos de fractura registrados en el volcán Sotará durante el año de 2013 fue posible realizar la localización epicentral e hipocentral de 164, sismicidad que se concentró principalmente en el sector conocido como el valle de Paletará, a una distancia promedio de 10 *km* al nororiente del edificio volcánico. Estos eventos se caracterizaron por presentar profundidades que oscilaron entre 3 y 15 *km*, con magnitudes importantes que alcanzaron valores hasta de 2.7 M_L en la escala de Richter. En la tabla 16 se relacionan los eventos volcano-tectónicos mas destacados durante el 2013.

La figura 97 muestra el mapa de localización epicentral e hipocentral de los eventos localizados en el volcán Sotará en el 2013.

Fecha	Hora UT	Latitud	Longitud	Profundidad [km]	Magnitud local (M_L)
27/abr/2013	09:20	2° 11.75'	-76° 31.31'	10.1	2.1
26/jun/2013	16:12	2° 12.06'	-76° 32.37'	8.17	2.4
16/nov/2013	00:24	2° 11.11'	-76° 31.25'	6.53	2.7
07/jul/2013	19:41	2° 11.87'	-76° 32.08'	8.28	2.0

Tabla 16: Eventos volcano-tectónicos destacados con $M_L \leq 2$ en el volcán Sotará 2013.

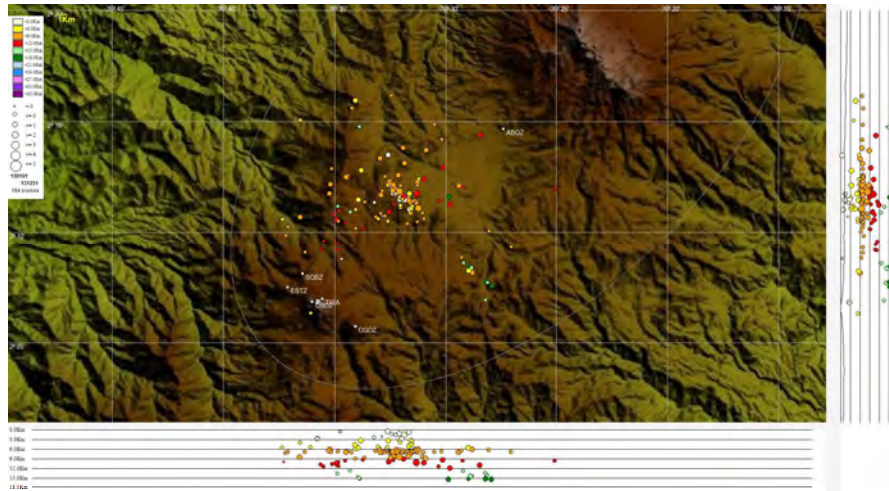


Figura 97: Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos del volcán Sotará durante el 2013. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud local (M_L). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

3.3. DEFORMACIÓN

Durante el año 2013 se realizó la instalación de una estación GNSS permanente telemétrica, se contó con el funcionamiento de tres inclinómetros electrónicos (ver 98). Se resalta que a partir del día 24 de mayo de 2013, cesó el funcionamiento de la estación GNSS permanente Estumo, la cual fue instalada en diciembre del año 2012, debido a que fue objeto de vandalismo. Durante el año se realizaron campañas para ocupación de las líneas de EDM, pero debido a las adversas condiciones climáticas en la zona no fue posible la realización de las mediciones.

3.3.1. Inclinometría Electrónica

Los inclinómetros de la red de vigilancia del volcán Sotará se han caracterizado por presentar en términos generales, ligeras fluctuaciones en sus dos componentes (norte y este), debido a que su instalación física es a nivel superficial, por ello están propensos a variaciones en magnitudes de decenas de micro radianes, debidas a cambios de temperatura. Hasta la presente fecha, se tienen líneas base de comportamiento, respecto a las mismas, en el último mes se puede tener lo siguiente:

1. *Inclinómetro Sotará:* Durante el año 2013 mostró un comportamiento estable en sus componentes este y norte. En la figura 99 se puede apreciar el comportamiento de las componentes de este inclinómetro durante 2013.
2. *Inclinómetro Oso:* Durante el año 2013 la componente norte evidenció un ligero cambio ascendente y la componente este continuó evidenciando el comportamiento descendente que se viene presentando desde el año 2012; este suceso no se ha registrado en los demás equipos y técnicas de monitoreo en deformación, por consiguiente, se debe continuar observando la evolución del mismo y su influencia y

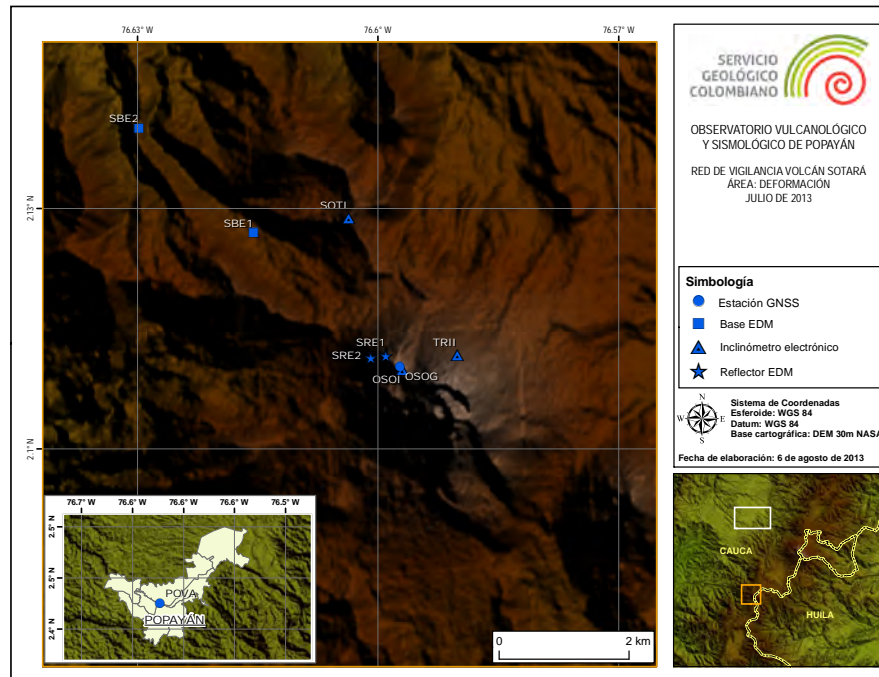


Figura 98: Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará. Enero de 2014.

correlación futura con la actividad volcánica. La figura 100 muestra la tendencia de este inclinómetro durante el año 2013.

3. *Inclinómetro Triángulo*: Durante el año 2013 las dos componentes de este inclinómetro no mostraron cambios significativos en el comportamiento de sus líneas base; por tanto, se considera un comportamiento estable. Los registros obtenidos durante el año 2013 se muestran en la figura 101.

Durante el año 2013 la red de inclinómetros del volcán Sotará mostró un comportamiento estable en términos generales. Esto sugiere que no se están presentando procesos deformativos considerables en el volcán.

3.3.2. Estación GNSS Permanente

Durante el año 2013 se contó con el funcionamiento continuo de las estaciones GNSS permanentes Oso y Estumo (esta última hasta el 24 de mayo). De acuerdo a las tendencias mostradas por sus componentes (Norte, Este y Altura), se puede decir que registran un comportamiento estable, permitiendo inferir que en el edificio volcánico no se registran procesos deformativos considerables del orden milimétrico. En las figuras 102 y 103 se aprecia la tendencia registrada por las estaciones GNSS de Oso y Estumo durante el año 2013.

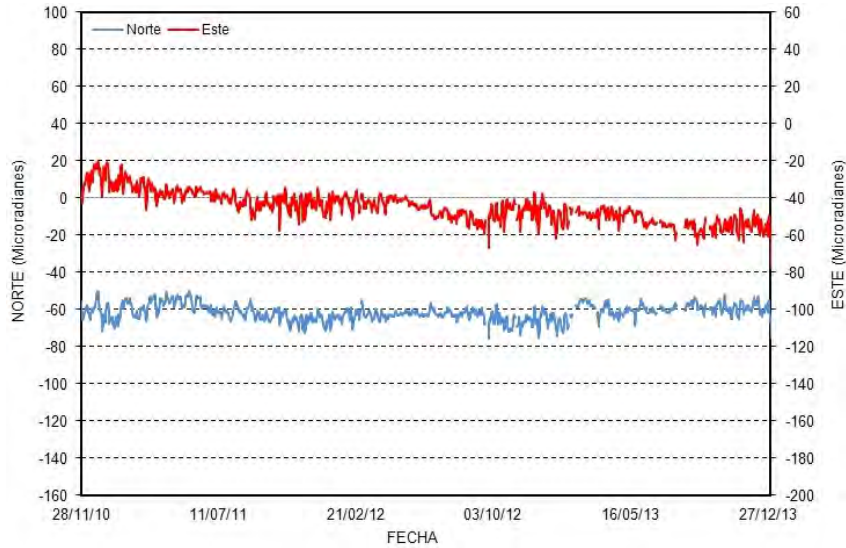


Figura 99: Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará. Enero de 2014.

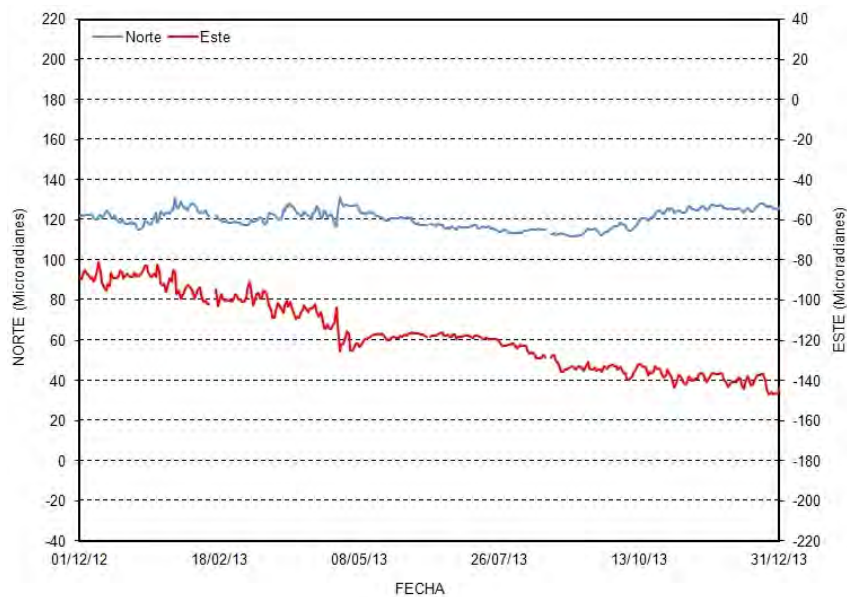


Figura 100: Comportamiento del inclinómetro electrónico Oso. Enero de 2014.

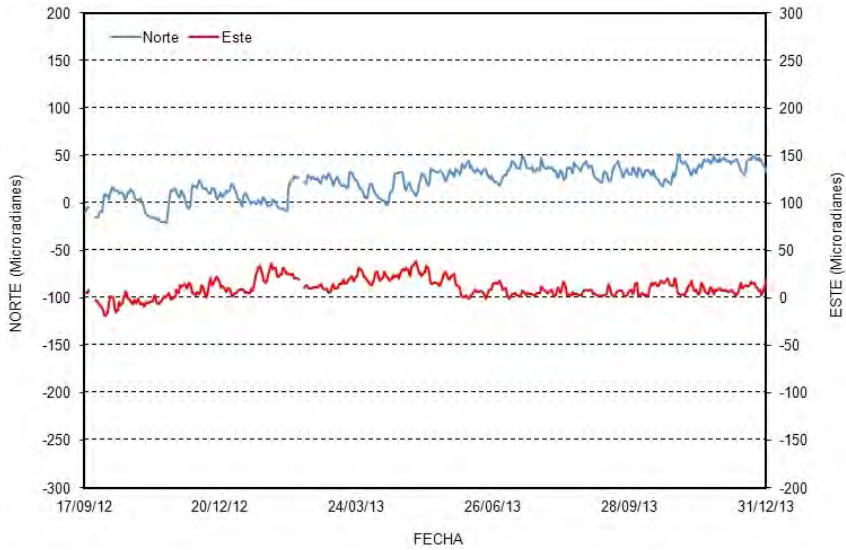


Figura 101: Comportamiento del inclinómetro electrónico Triángulo. Enero de 2014.

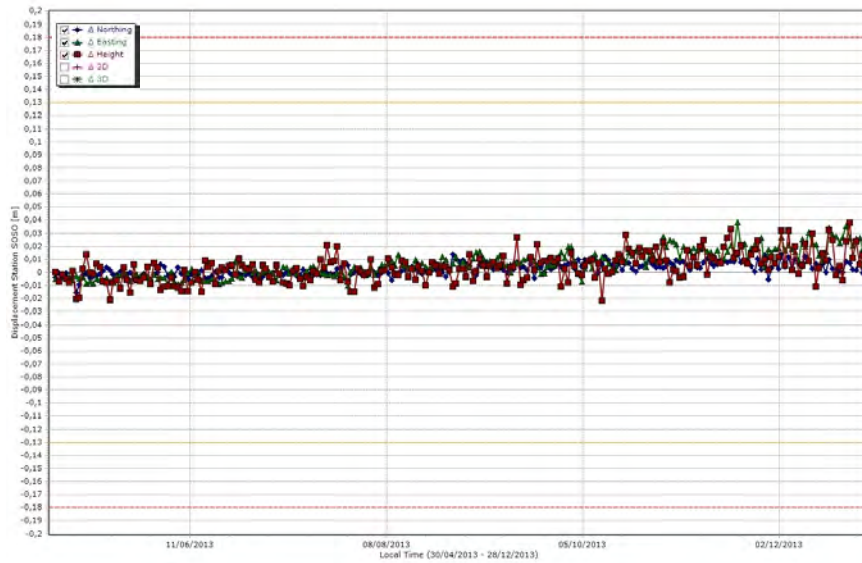


Figura 102: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Oso. Año de 2013.

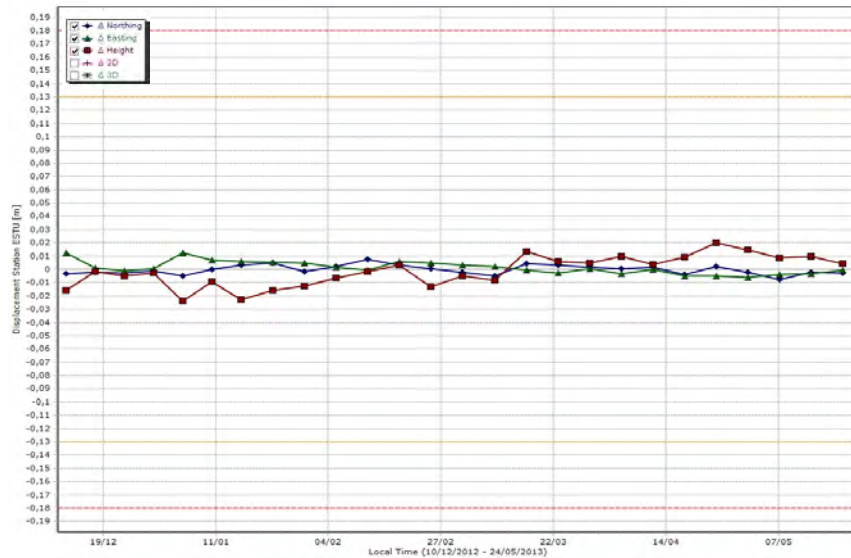


Figura 103: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Estumo. Año de 2013.

3.4. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

El monitoreo continuo de la actividad superficial del volcán Sotará se efectúa a través de una cámara web de conexión IP, la cual se encuentra ubicada en el sector denominado Cerro Crespo, a 3.5 km al noroccidente del edificio volcánico con una altura de 3848 msnm. En la figura 104 se muestra la localización geográfica de dicho equipo. Durante el año 2013, no se observaron cambios destacables en la actividad superficial.

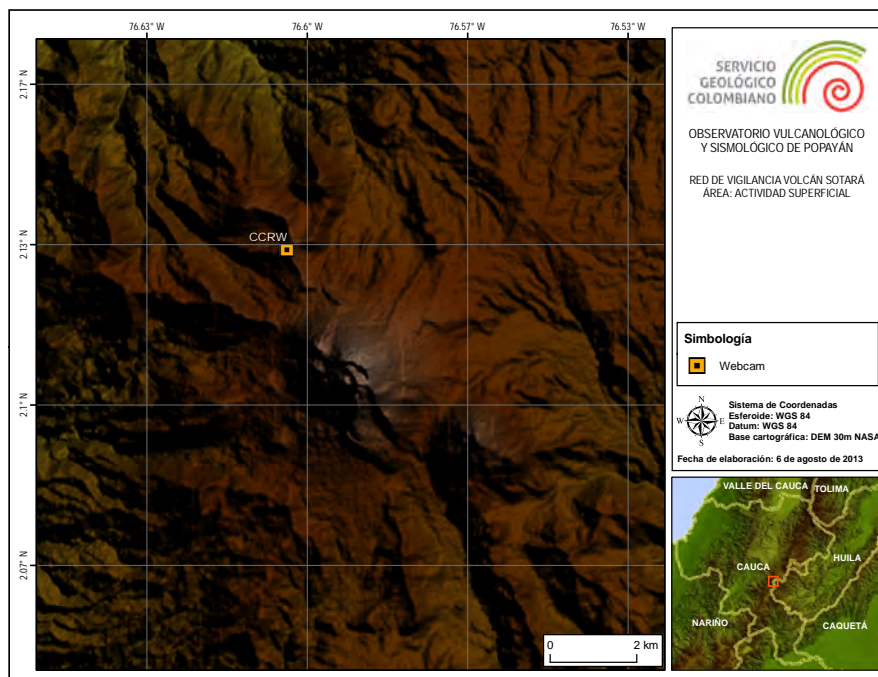


Figura 104: Mapa de localización de la cámara web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Sotará.

3.4.1. Cámara para el seguimiento de la actividad superficial

Las figuras 105 y 106 muestran algunas de las imágenes más representativas captadas durante el 2013.



Figura 105: Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará en el primer semestre de 2013.

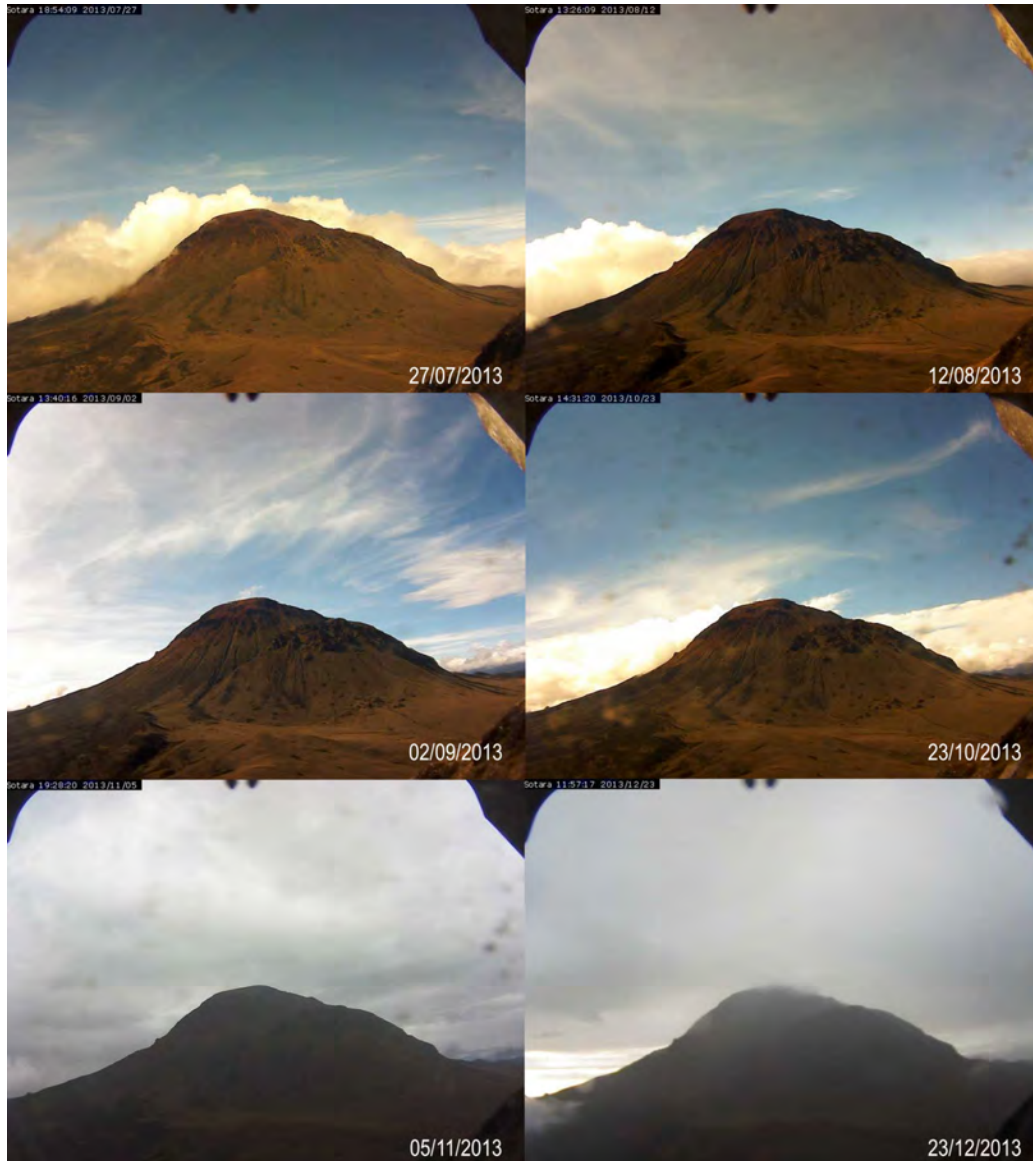


Figura 106: Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará en el segundo semestre de 2013.

3.5. FISICOQUÍMICA

La red de vigilancia en geoquímica del volcán Sotará se encuentra conformada actualmente por la medición de dos fuentes termales: Aguas Amarillas y Aguas Calientes; y el monitoreo del campo fumarólico, para lo cual se realizan muestreos periódicos *in situ*, con el fin de obtener datos que permitan establecer líneas bases de comportamiento, así como detectar variaciones de los diferentes parámetros físico-químicos de las dos fuentes termales y del campo fumarólico. La figura 107 muestra la localización geográfica de los puntos que actualmente son monitoreados geoquímicamente en el volcán Sotará.

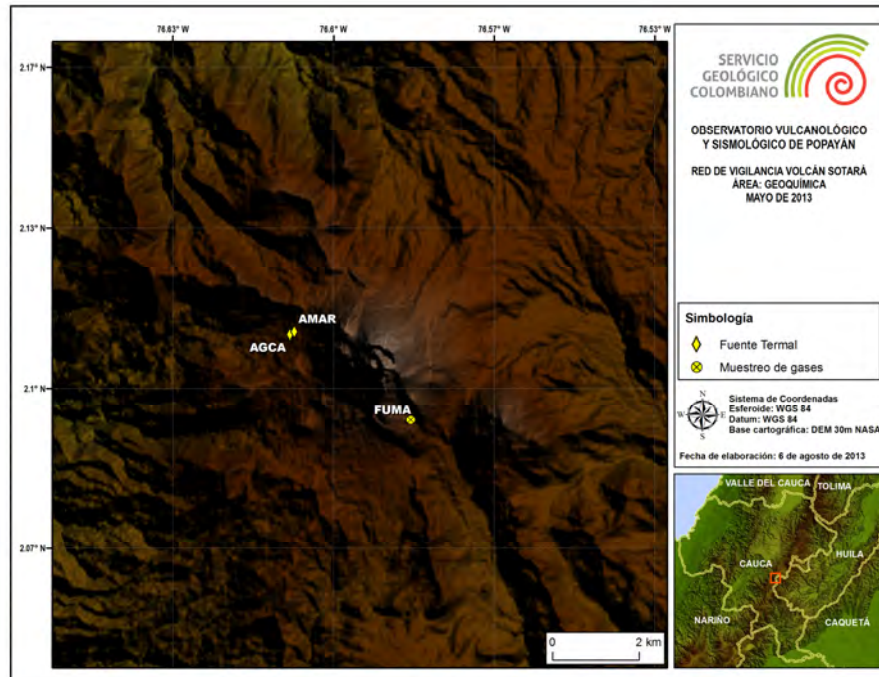


Figura 107: Fuentes termales y campo fumarólico del volcán Sotará, mayo de 2013.

3.5.1. Fuentes Termales

Las mediciones de los diferentes parámetros fisicoquímicos que se realizan en fuentes termales y fumarolas tienen como objetivo obtener un registro de datos a través del tiempo, de manera que se puedan detectar variaciones que se relacionen con cambios en el sistema volcánico. Durante el mes de mayo se realizaron muestreos y mediciones de parámetros in situ en las fuentes termales: Aguas Amarillas y Aguas Calientes; la comparación de los datos obtenidos durante el período evaluado con las líneas base que se tienen establecidas para cada una de estas fuentes termales, no presentó ninguna variación a destacar. En la figura 108 se pueden apreciar imágenes de las fuentes termales y el campo fumarólico.

La figura 109 muestra los valores de la temperatura de las fuentes termales, obtenidas en las medidas realizadas durante el mes de mayo. En ellas se puede apreciar que se conservan los promedios medidos anteriormente. De igual forma, la gráfica contenida en la figura 110, muestra que el potencial de hidrogeno (pH) no presentó variaciones significativas, conservando una tendencia estable durante el mes de mayo, comparadas con mediciones en años anteriores.



Figura 108: Fuentes termales y campo fumarólico del volcán Sotará, mayo de 2013.

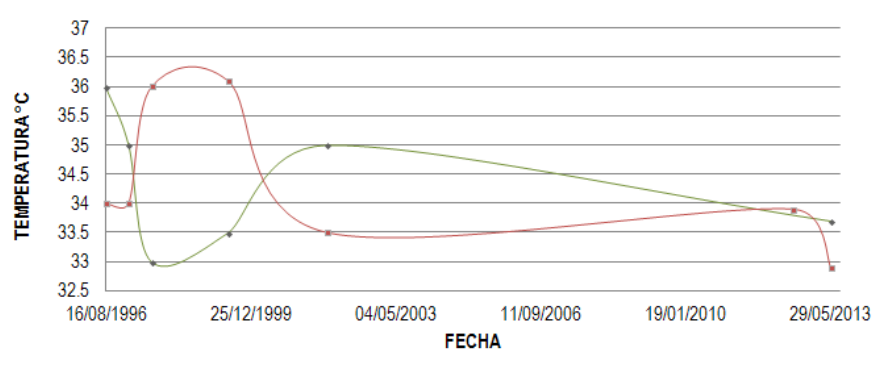


Figura 109: Variación de temperatura en las fuentes termales, durante mayo 2013, en el volcán Sotará.

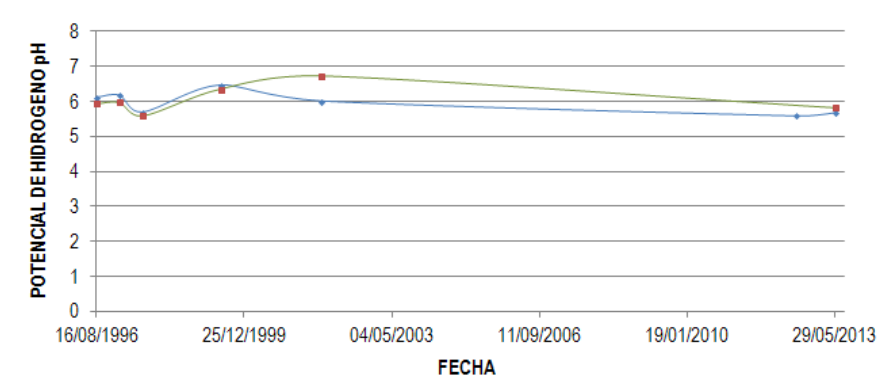


Figura 110: Variación del potencial de hidrogeno en las fuentes termales en el volcán Sotará durante mayo de 2013.

3.6. CONCLUSIÓN

De acuerdo con el análisis de la información obtenida a través de las diversas estaciones que componen la red de monitoreo del volcán Sotará, se concluye que durante el año de 2013 este continuó presentando un comportamiento estable. No obstante, se destaca que los niveles de actividad sísmica registrados durante el periodo evaluado, permanecieron por encima de los niveles básicos históricos para este volcán. Teniendo en cuenta el análisis comparativo de los diferentes parámetros para la evaluación de la actividad volcánica, el OVS-Popayán mantiene el nivel de actividad en *NIVEL III (AMARILLO): CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA*.

4 ACTIVIDAD TECTÓNICA LOCAL.

La red de monitoreo sísmico del segmento volcánico central de Colombia (Complejo Volcánico Nevado del Huila, Cadena Volcánica de Los Coconucos y Complejo Volcánico Sotará), la cual es operada por el Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, registró durante el año 2013 1331 sismos de carácter tectónico local, de los cuales fue posible localizar 368 sismos. Estos eventos se localizaron principalmente en los departamentos del Huila, Cauca y Valle del Cauca, con una magnitud máxima de 4.5 M_L en la escala de Richter para el sismo ocurrido en Algeciras (Huila) el día 10 de Junio a las 04:01 (hora local).

De lo reportado por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) para este período en el suroccidente de Colombia, en el sector analizado se reporta la ocurrencia de 811 eventos sísmicos, los cuales se encuentran distribuidos en los departamentos del Cauca, Huila, Tolima y Valle del Cauca. Por su magnitud se destacan los sismos localizados en los municipios de Trujillo y Dagua (Valle del Cauca) con magnitudes ambos de 4.4, y en Saladoblanco (Huila), con una magnitud local de 4.2 *grados* en las escala de Richter.

En la figura 111 se muestra la distribución hipocentral y epicentral de los sismos tectónicos locales ocurridos en la región sur occidente del territorio Colombiano, localizados por la red de estaciones sismológicas de los volcanes Nevado del Huila, Puracé y Sotará del OVS-Popayán durante el año 2013.

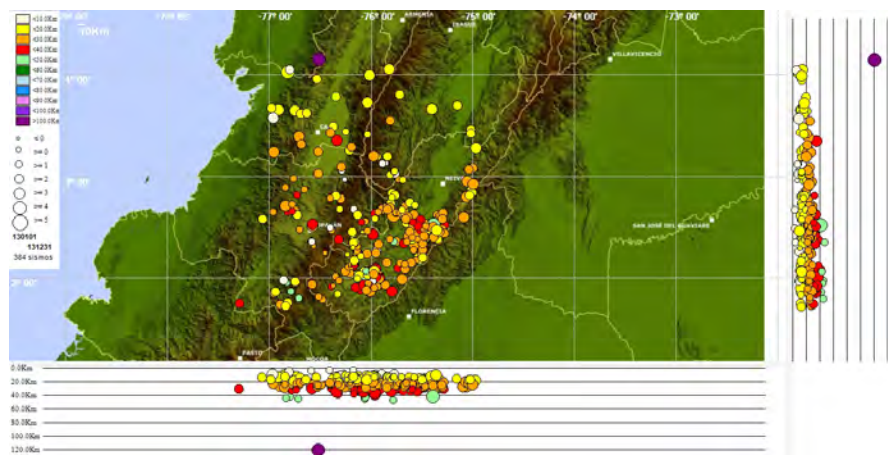


Figura 111: Localización de la sismicidad tectónica local ocurrida en una porción del suroccidente colombiano durante el 2013.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) - *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán*, continúa atento a la evolución del fenómeno volcánico e informará de manera oportuna los cambios que se puedan presentar.