



**INFORME TÉCNICO DE ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES
NEVADO DEL HUILA, PURACÉ Y SOTARÁ DURANTE
EL AÑO 2014**

Popayán, 2015



TABLA DE CONTENIDO

1	VOLCÁN NEVADO DEL HUILA	4
1.1	RED DE VIGILANCIA	4
1.1.1	Generalidades	6
1.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	6
1.1.1.2	Red de Estaciones de Monitoreo de Flujos de Lodo.	6
1.1.1.3	Cámaras Web.	6
1.1.1.4	Deformación Volcánica.	6
1.1.1.5	Electromagnetismo.	6
1.1.1.6	Sensor Acústico.	6
1.1.2	Funcionamiento de Estaciones	7
1.2	SISMOLOGÍA	8
1.2.1	Actividad Sísmica	8
1.2.2	Energía Sísmica Liberada	9
1.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	12
1.2.3.1	Localización de eventos asociados a procesos de fractura.	12
1.3	DEFORMACIÓN	14
1.3.1	Inclinometría Electrónica	14
1.3.2	Estación GNSS Permanente	15
1.3.3	Interferometría con radar	16
1.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	18
1.4.1	Registro de la Actividad Superficial	18
1.5	CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	23
1.6	CONCLUSIÓN.	25
2	VOLCÁN PURACÉ	26
2.1	RED DE VIGILANCIA	27
2.1.1	Generalidades	27
2.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	27
2.1.1.2	Red de Deformación.	27
2.1.1.3	Cámaras web.	30
2.1.1.4	Electromagnetismo.	30
2.1.1.5	Geoquímica.	30
2.1.1.6	Meteorología.	31
2.1.2	Funcionamiento de Estaciones	31
2.2	SISMOLOGÍA	31
2.2.1	Actividad Sísmica	31
2.2.2	Energía Sísmica Liberada	32
2.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	34
2.2.3.1	Localización de eventos asociados a dinámica de fluidos.	34
2.2.3.2	Localización de eventos asociados con procesos de fractura.	35
2.3	DEFORMACIÓN	38
2.3.1	Inclinometría Electrónica	38

2.3.2	Estaciones GNSS Permanentes	40
2.3.3	Medición Electrónica de Distancias (EDM)	47
2.3.4	Interferometría con radar	47
2.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	48
2.4.1	Cámara web Mina	48
2.4.2	Cámara web Lavas Rojas	53
2.4.3	Cámara web Anambío	55
2.4.4	Cámara web Cerro Sombrero	57
2.5	CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	58
2.5.1	Potenciales Eléctricos Espontáneos	58
2.5.2	Magnetometría	60
2.6	FISICOQUÍMICA	62
2.6.1	Medidas de Gas Radón	62
2.6.2	Medidas de Dióxido de carbono	65
2.6.3	Fuentes Termales	66
2.6.4	Termometría	66
2.6.4.1	Captura de imágenes térmicas	68
2.6.4.2	Medidas con termocupla portátil	70
2.7	CONCLUSIÓN.	76
3	VOLCÁN SOTARÁ.	77
3.1	RED DE VIGILANCIA	78
3.1.1	Generalidades	78
3.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	78
3.1.1.2	Red de Deformación.	78
3.1.1.3	Red de Actividad Superficial.	78
3.1.2	Funcionamiento de Estaciones	80
3.2	SISMOLOGÍA	80
3.2.1	Actividad Sísmica	80
3.2.2	Energía Sísmica Liberada	80
3.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	81
3.2.3.1	Localización de eventos asociados con procesos de fractura.	81
3.3	DEFORMACIÓN	84
3.3.1	Inclinometría Electrónica	84
3.3.2	Estaciones GNSS Permanentes	84
3.3.3	Interferometría con radar	86
3.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	87
3.5	FISICOQUÍMICA	89
3.5.1	Fuentes Termales	89
3.5.2	Campo Fumarólico	93
3.6	CONCLUSIÓN	96
4	ACTIVIDAD TECTÓNICA LOCAL.	97

TABLA DE FIGURAS

Figura 1	Volcán Nevado del Huila.	4
Figura 2	Mapa de localización del Volcán Nevado del Huila.	5
Figura 3	Mapa de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.	5
Figura 4	Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.	7
Figura 5	Red de vigilancia en sismología del volcán Nevado del Huila.	8
Figura 6	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Nevado del Huila.	9
Figura 7	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila.	11
Figura 8	Acumulado de la energía sísmica liberada por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila.	12
Figura 9	Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos en el volcán Nevado del Huila.	13
Figura 10	Magnitud local (M_L) presentada por los sismos localizados en el volcán Nevado del Huila.	14
Figura 11	Red de vigilancia en deformación del volcán Nevado del Huila.	15
Figura 12	Comportamiento del inclinómetro electrónico Caloto.	16
Figura 13	Series de tiempo para la componente Norte y canal de Temperatura del inclinómetro de Caloto.	16
Figura 14	Estación GNSS permanente Caloto a diciembre de 2014.	17
Figura 15	Interferograma para el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014 para el volcán Nevado del Huila.	17
Figura 16	Red de monitoreo de la actividad superficial del volcán Nevado del Huila.	18
Figura 17	Diagrama de Rosa de los vientos generado a partir del pronóstico WRF.	19
Figura 18	Histograma de velocidades promedio día. Modelo pronóstico IDEAM WRF – VNH.	19
Figura 19	Imágenes captadas por la cámara web Caloto.	20
Figura 20	Imágenes captadas por la cámara web Caloto.	20
Figura 21	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	21
Figura 22	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	21
Figura 23	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	22
Figura 24	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	22
Figura 25	Imagen panorámica captada por la cámara web de la Palma.	23
Figura 26	Red de monitoreo de campos electromagnéticos del volcán Nevado del Huila.	23
Figura 27	Mediciones magnetométricas en el volcán Nevado del Huila.	24
Figura 28	Volcán Puracé.	26
Figura 29	Mapa de localización del volcán Puracé y la cadena volcánica de Los Coconucos.	27
Figura 30	Mapa de la red de vigilancia del volcán Puracé.	30
Figura 31	Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Puracé.	31
Figura 32	Red de vigilancia en sismología del volcán Puracé.	32
Figura 33	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Puracé.	33
Figura 34	Relación de la variación presentada en el número de eventos sísmicos registrados mensualmente en el volcán Puracé para el año 2014.	33
Figura 35	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Puracé, durante el año 2014.	34
Figura 36	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Puracé, durante el año 2014.	34

Figura 37	Mapa de localización de eventos sísmicos asociados con la dinámica de fluidos en el volcán Puracé.	36
Figura 38	Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos del volcán Puracé.	37
Figura 39	Relación entre los valores de magnitud y las zonas sismogénicas del volcán Puracé.	37
Figura 40	Red de vigilancia en deformación del volcán Puracé.	38
Figura 41	Comportamiento del inclinómetro electrónico Lavas Rojas.	39
Figura 42	Comportamiento del inclinómetro electrónico Guañarita.	39
Figura 43	Comportamiento del inclinómetro electrónico Agua Blanca.	39
Figura 44	Comportamiento del inclinómetro electrónico Cocuy2.	40
Figura 45	Comportamiento del inclinómetro electrónico Curiqinga.	40
Figura 46	Vectores resultantes reales y sintéticos para una fuente esférica.	41
Figura 47	Vectores resultantes reales y sintéticos para una fuente tipo Dique.	42
Figura 48	Localización de los dos tipos de fuentes en conjunto con la sismicidad tipo VT registrada en la zona del cráter activo.	43
Figura 49	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Lavas Rojas.	44
Figura 50	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Guañarita.	44
Figura 51	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Blanca.	45
Figura 52	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Cocuy2.	45
Figura 53	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Mina.	46
Figura 54	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Bonita.	46
Figura 55	Línea base de mediciones EDM en el volcán Puracé.	47
Figura 56	Interferograma para el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014 para el volcán Puracé.	48
Figura 57	Mapa de localización de las cámaras web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Puracé.	49
Figura 58	Detalle del campo fumarólico lateral del volcán Puracé.	49
Figura 59	Histograma de velocidades del viento reportadas por el anemómetro de Mina y Modelo pronostico WRF.	50
Figura 60	Diagrama de Rosa de los vientos, anemómetro de Mina y Modelo pronóstico WRF.	50
Figura 61	Imágenes de la estación web Mina en el primer semestre de 2014.	51
Figura 62	Imágenes de la estación web Mina en el segundo semestre de 2014.	52
Figura 63	Imágenes obtenidas en la cámara web Lavas Rojas durante el primer semestre de 2014.	53
Figura 64	Imágenes obtenidas en la cámara web Lavas Rojas durante el segundo semestre de 2014.	54
Figura 65	Detalle del campo visual cámara web Anambío.	55
Figura 66	Cámara Anambío ubicada en el cráter del volcán Puracé. 2014.	56
Figura 67	Campo visual de la cámara web Cerro Sombrero.	57
Figura 68	Red de monitoreo de campos electromagnéticos del volcán Puracé.	58
Figura 69	Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Cóndor.	59
Figura 70	Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Cóndor durante el primer semestre del año 2014.	59
Figura 71	Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Cocuy2 durante el año 2014.	60
Figura 72	Mediciones magnetométricas del volcán Puracé durante el año 2014.	61
Figura 73	Red de vigilancia en fisicoquímica del Volcán Puracé	62
Figura 74	Variación de la concentración de Radón en suelo en las estaciones isotópicas no telemétricas permanentes del volcán Puracé, Año 2014.	63
Figura 75	Variación de la concentración de Radón en suelo de la estación Guañarita.	64
Figura 76	Variación de la concentración de Radón en suelo de la estación Cráter.	64
Figura 77	Variación de la concentración de Radón en suelo de la estación Cocuy3.	64
Figura 78	Variación de la concentración de CO_2 en suelo de la estación Cráter.	65
Figura 79	Detalle de la variación de la concentración de CO_2 en suelo de la estación Cráter.	65
Figura 80	Variación de la concentración de CO_2 en suelo de la estación Cocuy3.	66

Figura 81	Imágenes de las fuentes termales muestreadas en el volcán Puracé.	67
Figura 82	Variación del pH en fuentes termales del Volcán Puracé, año 2014.	68
Figura 83	Variación de la conductividad eléctrica en las fuentes termales del Volcán Puracé, año 2014.	69
Figura 84	Variación de temperatura en las fuentes termales del volcán Puracé, Año 2014.	70
Figura 85	Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales en el volcán Puracé.	71
Figura 86	Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales asociadas al volcán Puracé.	74
Figura 87	Imágenes térmicas tomadas a la fumarola lateral y al cráter del volcán Puracé.	75
Figura 88	Variación de la temperatura en la fumarola lateral.	76
Figura 89	Imagen panorámica del volcán Sotará.	77
Figura 90	Mapa de localización del volcán Sotará.	78
Figura 91	Red de vigilancia del volcán Sotará.	79
Figura 92	Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Sotará.	80
Figura 93	Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará.	81
Figura 94	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Sotará.	81
Figura 95	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Sotará.	82
Figura 96	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT en el volcán Sotará.	82
Figura 97	Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos del volcán Sotará durante el año 2014.	83
Figura 98	Dispersión de los valores de M_L para los eventos de fractura localizados en el volcán Sotará, año 2014.	83
Figura 99	Red de vigilancia en deformación del volcán Sotará.	84
Figura 100	Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará.	85
Figura 101	Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará.	85
Figura 102	Comportamiento del inclinómetro electrónico Triángulo.	85
Figura 103	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Oso.	86
Figura 104	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Pirámide.	86
Figura 105	Interferograma para el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014 para el volcán Sotará.	87
Figura 106	Mapa de localización de la cámara web Cerro Crespo.	87
Figura 107	Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará en el primer semestre de 2014.	88
Figura 108	Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará en el segundo semestre de 2014.	89
Figura 109	Red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Sotará	90
Figura 110	Fuentes termales muestreadas en el volcán Sotará.	91
Figura 111	Variación de temperatura en las fuentes termales del volcán Sotará.	91
Figura 112	Variación del potencial de hidrógeno en las fuentes termales del volcán Sotará.	92
Figura 113	Imágenes térmicas de las fuentes termales del volcán Sotará.	92
Figura 114	Imágenes térmicas del campo fumarólico Jelima.	95
Figura 115	Imágenes térmicas de los flancos este y oeste del campo fumarólico Jelima en el volcán Sotará.	96
Figura 116	Localización de la sismicidad tectónica local registrada durante el año 2014.	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.	7
Tabla 2	Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Nevado del Huila durante el año 2014.	8
Tabla 3	Eventos sísmicos con magnitudes mayores a 3.0 M_L grados en la escala de Richter.	10
Tabla 4	Características de la red de vigilancia no telemétrica del volcán Puracé.	29
Tabla 5	Características de la red de vigilancia telemétrica del volcán Puracé.	29
Tabla 6	Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Puracé.	32
Tabla 7	Variaciones más relevantes, registradas en la estación de PEE Cóndor.	59
Tabla 8	Variaciones más relevantes, registradas en la estación de PEE Cocuy2.	60
Tabla 9	Potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	67
Tabla 10	Potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	68
Tabla 11	Valores de la temperatura para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé.	69
Tabla 12	Listado de temperaturas de fuentes termales.	75
Tabla 13	Características de la red de vigilancia del volcán Sotará.	79
Tabla 14	Valores de conductividad ($\mu S/cm$) de las fuentes termales del volcán Sotará.	90
Tabla 15	Temperatura de las fuentes termales del volcán Sotará.	93
Tabla 16	Eventos tectónicos destacados registrados por la RSNC en el 2014.	97

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS

Símbolo - Abreviatura	Significado
μrad	Microradianes
^{222}Rn	Gas Radón
cm	Centímetros
CO_2	Dióxido de Carbono
dB	Decibeles
E	Este, oriente
g/L	Gramos/Litro
HB	Evento sísmico de tipo híbrido
LP	Evento sísmico de largo periodo
M_L	Magnitud Local
m	Metros
$\mu S/m$	Microsiemens/metro
mm	Milímetros
mS/m	Milisiemens/metro
mV	Milivoltios
N	Norte
nT	Nanotesla
NE	Noreste, nororiente
NO	Noroeste, noroccidente
O	Oeste, occidente
pCi/L	Picocurios/Litro
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
s	Segundos
TR	Evento sísmico de tipo tremor volcánico
UT, UTC	Hora Universal Coordinada (Coordinated Universal Time)
VT	Evento sísmico volcano-tectónico

INTRODUCCIÓN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), a través de la Dirección de Geoamenazas, 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 de 2014.

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
Jaime Raigosa Arango	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
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 Ortiz	Sistemas de Información
Andrés Mauricio Pérez	Técnico Operativo
Luis Eduardo Vélez Jiménez	Técnico Operativo
Wilson Alexander Torres Tonguino	Técnico Operativo
Wilson Andrés Cobo Pinto	Técnico Operativo
Ana Cecilia Rincón Bonilla	Servicios Administrativos
Sara Raquel Aguilar Bermeo	Gestión Documental
Derly Andrea Zúñiga Muñoz	Servicio al cliente

RESUMEN

El volcán Nevado del Huila tuvo un comportamiento general estable en el 2014. No obstante, mostró un incremento respecto a la ocurrencia de eventos tipo VT en comparación con el año 2013, esto se dio principalmente por el registro de 650 eventos entre el 9 y el 10 de enero, localizados en su totalidad al NE del Pico Central, en un rango de distancia entre 12 y 16 *km*, y profundidades entre 7 y 14 *km*; a lo largo de todo el año se destacaron 19 eventos con valores de magnitud mayores a 3.0 en la escala de Richter. 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, algunas de estas variaciones en la componente norte son cíclicas estacionales y posiblemente están asociadas con periodos de recarga y descarga de masas glaciares. Durante el año 2014 las mediciones de las emisiones de Dióxido de Azufre (SO_2) a la atmósfera presentaron bajos valores, el máximo obtenido se dio el día 17 de junio, con un flujo total estimado de 531 *t/día*. A través de las cámaras web que siguen la actividad superficial del volcán no se evidenciaron cambios morfológicos en el edificio volcánico. En cuanto a nuevas estaciones, en el mes de septiembre se instalaron el primer GNSS permanente y el primer magnetómetro del volcán. Desde ese momento y hasta finales del año ambas evidenciaron un comportamiento estable, con ligeras variaciones propias de las condiciones externas a las que están sometidas dichos instrumentos; también se hicieron las instalaciones de la cámara web Palma y de la estación sismológica Tafxnú, en los meses de septiembre y diciembre, respectivamente, y localizadas al sur 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 2014, 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*.

En el año 2014 el volcán Puracé mantuvo el predominio de ocurrencia de la actividad sísmica asociada a la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos sobre la relacionada con procesos de fracturamiento de roca, la liberación de energía de dicha actividad se comportó estable a lo largo de todo el año, en niveles que se consideran bajos. El análisis de los datos registrados por la red de inclinómetros electrónicos del volcán Puracé permitió evidenciar una deformación del edificio volcánico asociada a un posible proceso inflacionario de baja magnitud, mientras que los resultados derivados de las estaciones GNSS permanentes evidenciaron que en sus componentes norte, este y altura hubo estabilidad durante todo el año. De igual forma, mediante el monitoreo de los diferentes parámetros geoquímicos, así como del análisis de la información obtenida con los sensores de autopotencial y magnetómetros, se determina una tendencia estable en el comportamiento del volcán, con pequeñas variaciones relacionadas con actividad atmosférica. Buscando complementar integralmente la red de monitoreo del volcán Puracé, en el mes de octubre se llevó a cabo la instalación de una estación meteorológica y de un GNSS permanente en la parte norte del Valle del Paletará (dirección sur del volcán Puracé); así mismo, en el mes de noviembre se instaló una estación meteorológica en la zona del cráter. A partir del análisis de la información de los diferentes parámetros monitoreados durante el 2014, el OVS Popayán mantiene el nivel de actividad volcánica del volcán Puracé en *NIVEL IV: VOLCAN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE*.

El volcán Sotará mostró una disminución en la actividad sísmica en el 2014, en total se registraron 297 eventos sísmicos asociados exclusivamente con procesos de fracturamiento de roca y en general de bajo nivel energético, se destaca el sismo ocurrido el día 3 de enero en el sector conocido como Valle del Paletará, a una distancia de 12 *km* al noreste del volcán y a una profundidad de 7 *km*, el cual alcanzó una magnitud de 3.7 en la escala de Richter. Los datos registrados por la red de deformación, tanto inclinometría electrónica como estaciones GNSS, evidenciaron un comportamiento estable, indicativo de que por el momento no se están registrando procesos deformativos considerables en el volcán. Mediante el muestreo *in situ* de las fuentes termales y el campo fumarólico del volcán Sotará, que fue realizado en el mes de julio, se verificó que los parámetros físico-químicos continúan estables, y que las variaciones registradas se ubican dentro de las líneas base que se tienen determinadas. Con el fin de ampliar y mejorar la cobertura de las redes de monitoreo, se instaló una cámara web a aproximadamente 15 *km* al noreste del edificio volcánico, se llevó a cabo la instalación de una estación repetidora, una estación sismológica y una cámara web, que tuvieron

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

lugar durante los meses de mayo, septiembre y octubre respectivamente. Además, se complementó dicha red con la instalación de un GNSS permanente y una estación sismológica en el sector este del edificio volcánico, ambas realizadas en el mes de octubre. Con base en el análisis de la información obtenida a partir de toda la red de monitoreo durante el 2014, el OVS Popayán mantiene el nivel de actividad del volcán Sotará en *NIVEL IV: VOLCÁN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE a NIVEL III: CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA.*

Finalmente, respecto a la actividad sísmica asociada con la dinámica tectónica (fracturas y fallas) en la región suroccidental de Colombia, durante el año 2014 las estaciones sísmicas que conforman la red de monitoreo del OVS Popayán registraron 1284 eventos sísmicos de carácter local. Por su parte, la Red Sismológica Nacional de Colombia, confirmó la ocurrencia de tales eventos sísmicos en los departamentos del Huila, Cauca y Valle del Cauca, entre los cuales se destacan 2 eventos localizados en el municipio de Páez (Cauca) ocurridos el 9 de enero con magnitudes de 4.3 y 5, el sismo del 4 de junio en Padilla (Cauca) con magnitud de 4.2, y el evento ocurrido en el municipio de El Cairo (Valle del Cauca) el 31 de octubre con magnitud de 4.

1 VOLCÁN NEVADO DEL HUILA



Figura 1: Volcán Nevado del Huila, visto desde el costado norte del edificio volcánico. Imagen captada durante sobrevuelo efectuado el 14 de enero de 2012.

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 $76^{\circ} 03' O$, a una distancia aproximada de 90 km al NE de Popayán (ver figura 2).

Este complejo volcánico presenta una forma elongada en dirección N-S, con ejes basales de 16 km en sentido N-S y 11 km en sentido E-O; su cima está cubierta por un casquete glaciar de 7.5 km^2 (Pulgarín et. al, en preparación), en la que sobresalen las topografías que se conocen como picos Norte, La Cresta, Central y Sur, alineados en dirección N-S, respectivamente. De igual manera, 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 durante el año 2014, estuvo compuesta por diversos instrumentos que se emplean para medir diferentes parámetros físicos, 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, el cual se evalúa en términos porcentuales. En la tabla 1 se observan las características de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila, mientras que en la figura 3 se muestra su ubicación.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
 Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

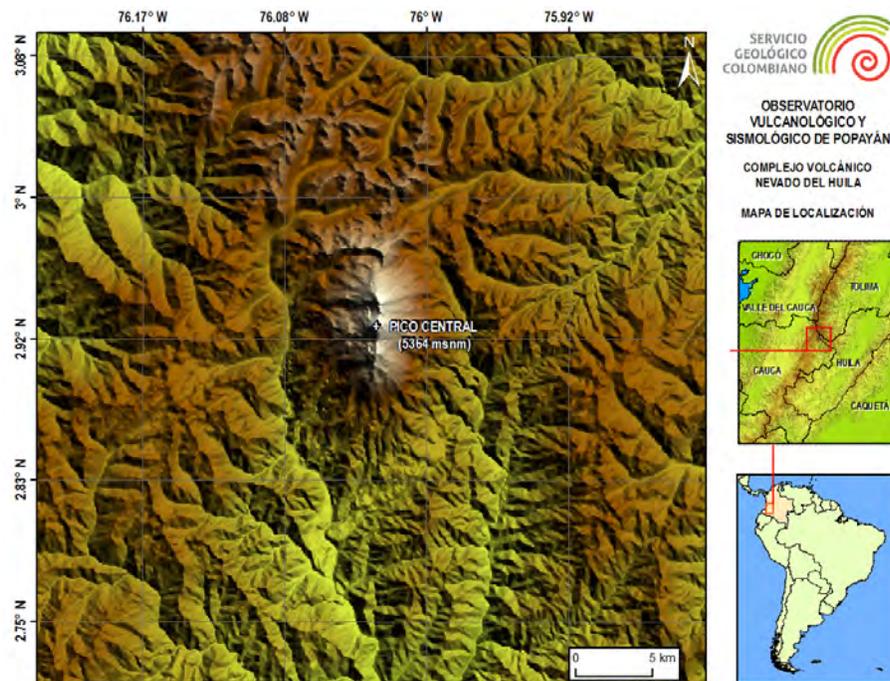


Figura 2: Mapa de localización del Volcán Nevado del Huila.

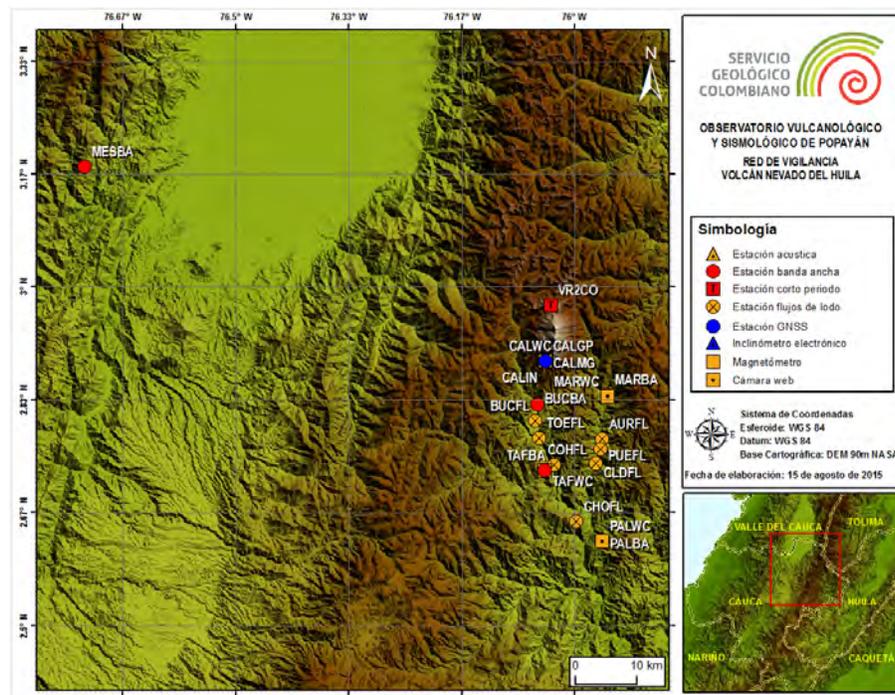


Figura 3: Mapa de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.

1.1.1. Generalidades

1.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVS-Popayán) contó durante el año 2014 con una red de cinco estaciones sísmicas, tres del tipo banda ancha triaxial y dos de corto período triaxial, en el orden mencionado, se denominan y ubican en los siguientes sectores: Buco (BUCBA) a 10.9 *km* al sur del Pico Central; Maravillas (MARBA) a 12.5 *km* al sureste del Pico Central; La Palma (PALBA) a 34.2 *km* al sur-sureste del Pico Central, Caloto (CALCO) a 3.8 *km* al suroccidente del Pico Central y Verdún2 (VR2CO) a 5.7 *km* al norte 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 el entonces denominado INGEOMINAS (OVS-Popayán), la Corporación NASA KIWE, la DGPAD (ahora UNGRD) 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 cuatro 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 a 21.8 *km* al sur del Pico Central), Maravillas (12.6 *km* al sureste del Pico Central), Caloto (4.04 *km* al suroccidente del Pico Central) y La Palma (34 *km* al sur-sureste del Pico Central).

1.1.1.4. Deformación Volcánica. Para la vigilancia de la deformación del edificio volcánico, se dispone de un inclinómetro electrónico (CALIN) y de un GNSS permanente (CALGP), ambos localizados en la estación Caloto, a una distancia de 3.8 *km* al suroccidente del Pico Central y a una altura de 4184 *msnm*.

1.1.1.5. Electromagnetismo. En cuanto a las mediciones del campo magnético local y sus variaciones a través del tiempo, el volcán Nevado del Huila cuenta con un magnetómetro instalado en la estación Caloto (CALMG) a 3.8 *km* al suroccidente del Pico Central.

1.1.1.6. Sensor Acústico. 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 3.8 *km* al suroccidente del Pico Central.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Distancia al Pico Central (km)	Operativa
Aurora	Flujos de lodo	2.7755	75.9597	1904	17.9	SI
Buco	Estación Banda Ancha	2.8265	76.0548	2310	10.9	SI
	Flujos de lodo	2.8014	76.0578	2107	13.7	SI
Calderitas	Flujos de lodo	2.7385	75.9691	1757	21.3	SI
Caloto	Estación Corto Período	2.8901	76.0426	4184	3.8	SI
	Cámara web					SI
	Estación Acústica					SI
	Estación GNSS					SI
	Inclinómetro Electrónico					SI
	Magnetómetro					SI
Cohetandiyó	Flujos de lodo	2.7371	76.0304	1842	20.5	NO
La Palma	Estación Banda Ancha	2.6237	75.9586	2230	34	SI
	Cámara web					SI
Maravillas	Estación Banda Ancha	2.8397	75.9510	2207	12.5	SI
	Cámara web	2.8383	75.9515	2194	12.6	SI
Muralla	Flujos de lodo	2.6526	75.9977	2420	30.3	SI
Pueblo Nuevo	Flujos de lodo	2.7596	75.9614	1872	19.4	SI
Tafxnú	Estación Banda Ancha	2.7281	76.0437	2410	21.5	SI
	Cámara web					SI
Tóez	Flujos de lodo	2.7765	76.0523	1987	16.3	SI
Verdún 2	Estación Corto Período	2.9723	76.0353	4544	5.7	NO

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 2014 la red de vigilancia del Volcán Nevado del Huila presentó un porcentaje de funcionamiento del 74.8 %, sobre el 91 % 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 4.

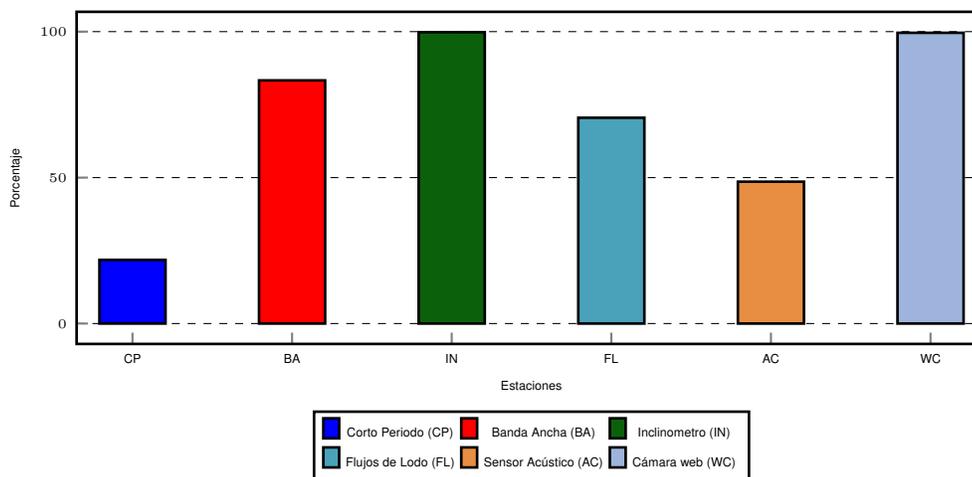


Figura 4: Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila durante el año 2014.

1.2. SISMOLOGÍA

La red de monitoreo sísmico del volcán Nevado del Huila cuenta en la actualidad con cinco estaciones sísmológicas, tres equipadas con sensores banda ancha y dos con sensores corto período. Cuatro de ellas se encuentran operativas mientras que la estación Verdún2 no está operando en el momento. En la figura 5 se aprecia la distribución geográfica de las estaciones que componen la red de monitoreo sísmico.

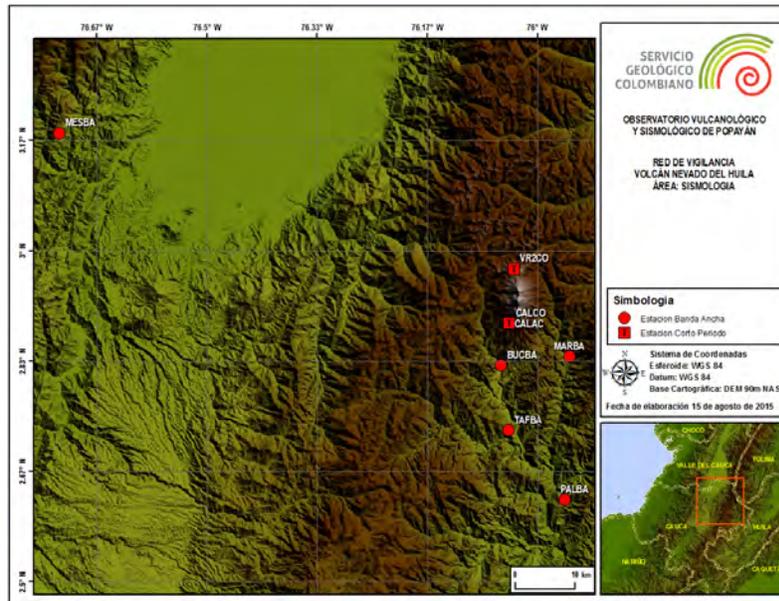


Figura 5: Red de vigilancia en sismología del volcán Nevado del Huila.

1.2.1. Actividad Sísmica

La red de estaciones sísmicas del volcán Nevado del Huila registró durante el año 2014, 3954 eventos sísmicos, de los cuales 2856 estuvieron asociados con procesos de fracturamiento de roca (Tipo VT) y 1147 con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos; entre estos últimos se definieron: 1088 eventos de Largo Período (Tipo LP), 10 eventos clasificados como híbridos (Tipo HB) y 49 eventos de tremor espasmódico (tipo TR).

La tabla 2 y la figura 6 muestran el número de eventos registrados durante el año 2014 en el volcán Nevado del Huila.

Intervalos de fechas	Tipos de eventos					
	VT	LP	BF	HB	TO	TR
Enero – febrero de 2014	1024	246	0	5	0	15
Marzo – abril de 2014	302	377	0	4	0	14
Mayo – junio de 2014	197	170	0	1	0	2
Julio – agosto de 2014	240	39	0	0	0	6
Septiembre – octubre de 2014	638	174	0	0	1	5
Noviembre – diciembre de 2014	861	255	0	1	0	19
Total eventos registrados	3262	1259	0	11	1	61

Tabla 2: Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Nevado del Huila durante el año 2014.

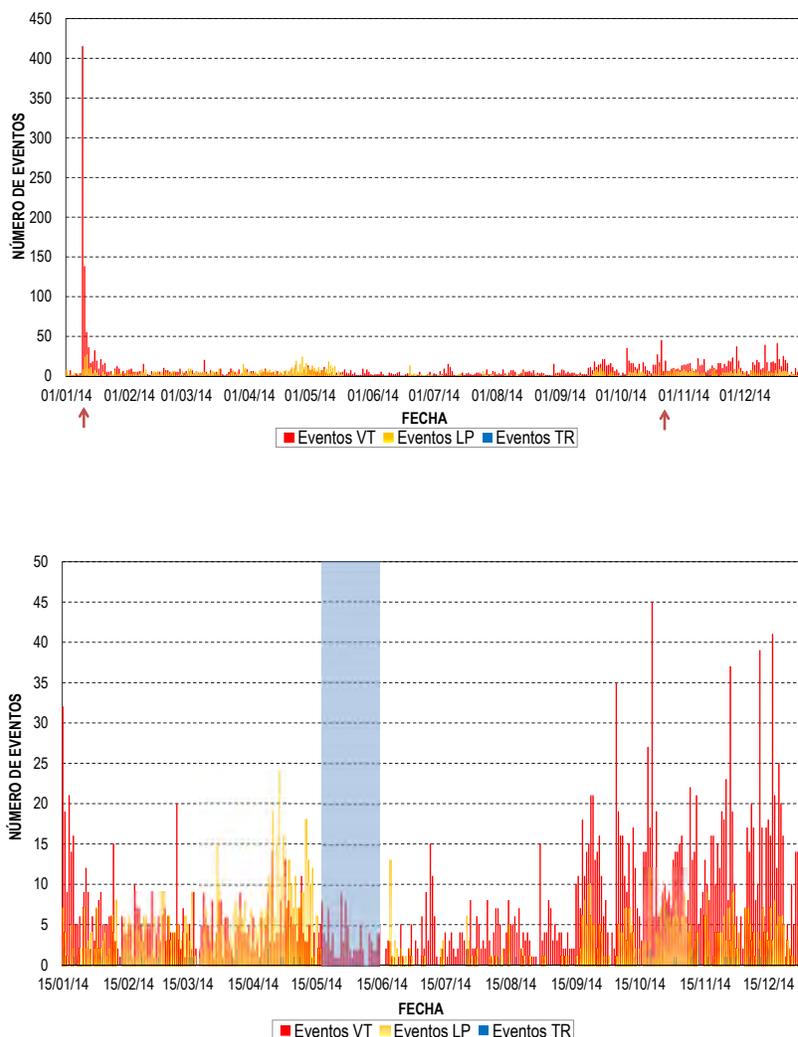


Figura 6: Número de eventos registrados diariamente en el volcán Nevado del Huila. *Arriba*: enero a diciembre, 2014. *Abajo*: Enero 15 a 31 de diciembre de 2014. El área sombreada de azul corresponde al periodo en el que no hubo registro de las estaciones Caloto y Verdún2.

De la sismicidad ocurrida se destacan 23 eventos tipo VT de magnitudes superiores a 3 ML grados en la escala de Richter, que en su momento fueron reportados a la comunidad y que se listan en la tabla 3:

Es preciso aclarar que de la estación de Caloto, instalada en el edificio volcánico a 4 *km* al SW del pico central, no se tuvo registro desde el 11 de enero hasta el 12 de junio, debido a problemas técnicos en campo. Además de ello, el 18 de mayo se dejó de tener registro de la estación Verdún2 (a 5.7 *km* a N del pico central).

1.2.2. Energía Sísmica Liberada

El comportamiento de la energía sísmica liberada diariamente está relacionado principalmente a la actividad de los eventos tipo VT y LP, este comportamiento se presenta en la Figura 5. En cuanto a la actividad VT, el máximo aporte energético se presentó entre los días 9 y 10 de enero debido a la ocurrencia de aproximada-

Fecha y hora (UT)	M_L	Profundidad (km)	Epicentro respecto del Pico Central
09/01/2014 11:07	4.5	12.37	Se presentaron alrededor de 650 eventos VT entre el 9 y el 10 de enero. Localizados entre 12 y 16 km al NE.
09/01/2014 12:50	5.2	12.88	
09/01/2014 12:50	4.5	12.65	
09/01/2014 12:51	3.5	11.17	
09/01/2014 12:52	3.6	9	
09/01/2014 13:10	3.1	10.58	
09/01/2014 14:03	3.6	12.3	
09/01/2014 14:17	3	10.86	
09/01/2014 14:22	3.1	11.9	
09/01/2014 16:42	3.6	10.78	
09/01/2014 17:55	3.5	13.5	
09/01/2014 18:58	3	10.71	
09/01/2014 20:37	3.1	10.63	
10/01/2014 16:55	3	10.03	
14/01/2014 17:51	3.4	11	13 km al NE
18/01/2014 01:16	3.1	11.74	15 km al NE
18/01/2014 03:36	3.2	10.96	14 km al NE
19/01/2014 14:59	3.4	13.96	13 km al NE
29/01/2014 07:06	3	12.56	14 km al NE
17/04/2014 21:11	3.1	13	26 km al NE
30/04/2014 20:57	3.2	6.03	10 km al SE
21/10/2014 13:15	3.5	10.08	13 km al NE
21/10/2014 13:25	3.8	10.56	13 km al NE

Tabla 3: Eventos sísmicos con magnitudes mayores a 3.0 M_L grados en la escala de Richter, registrados en el volcán Nevado del Huila durante el año 2014.

mente 650 eventos (ver tabla 3) alcanzando un nivel de aporte energético de $3.83E+18$ *ergios*, periodo en el que se presentó un sismo de magnitud de 5.2 *grados* M_L en la escala de Richter, el cual fue reportado como sentido en Popayán, Páez Belalcázar, Caloto, Toribío, Santander de Quilichao (Cauca); Colombia, Rivera, Neiva (Huila), Cajamarca (Tolima); Bogotá D.C. Además el día 21 de octubre se observa un aporte de $5.66E+16$ *ergios*, asociados a la ocurrencia de 45 eventos entre los que se cuentan dos sismos con magnitudes 3.5 y 3.8 *grados* M_L en la escala de Richter (ver tabla 3).

En cuanto a la energía sísmica liberada diariamente por eventos tipo LP, ésta presentó sus valores más importantes los días 10 de mayo y 19 de junio, en los que la liberación de energía fue de $8.12E+13$ y $8.79E+13$ *ergios* respectivamente, y los cuales estuvieron asociados a la ocurrencia de 18 y 13 señales LP. Se debe precisar que en el periodo del 18 de mayo al 12 de junio, subrayado de azul en las figuras 7 y 8, no se tuvo registro de las estaciones Caloto y Verdún2, y por tal razón, en este periodo, no se pudo hacer seguimiento de la actividad de tránsito de fluidos en el edificio volcánico, como se venía haciendo.

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

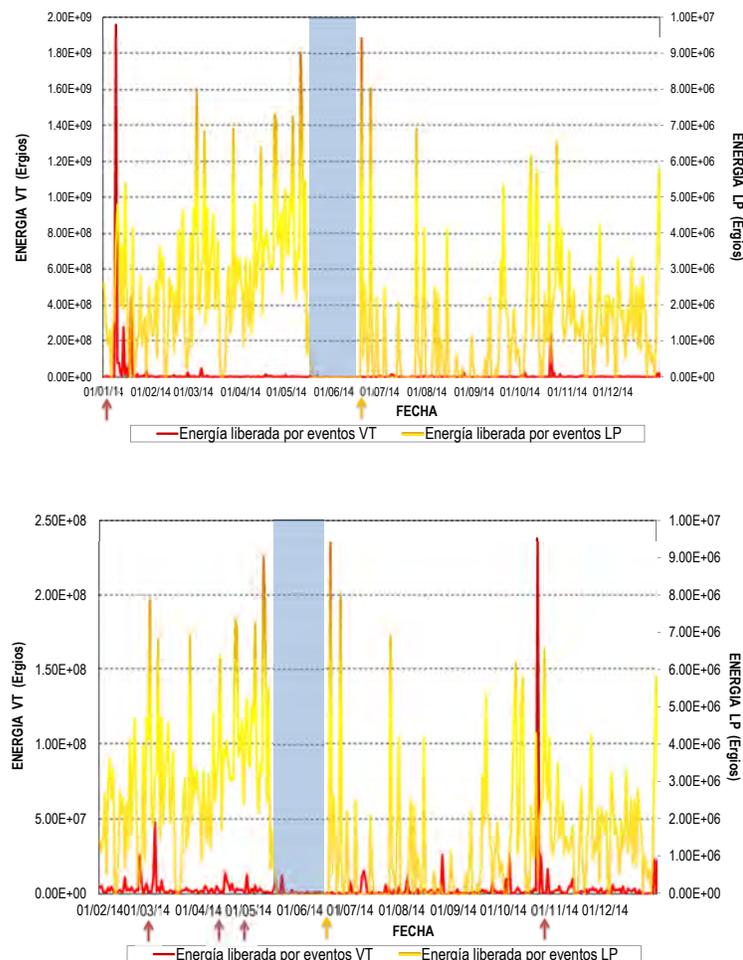


Figura 7: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila. *Arriba:* enero a diciembre, 2014. *Abajo:* febrero a diciembre de 2014. El área sombreada de azul corresponde al periodo en el que no hubo registro de las estaciones Caloto y Verdún2.

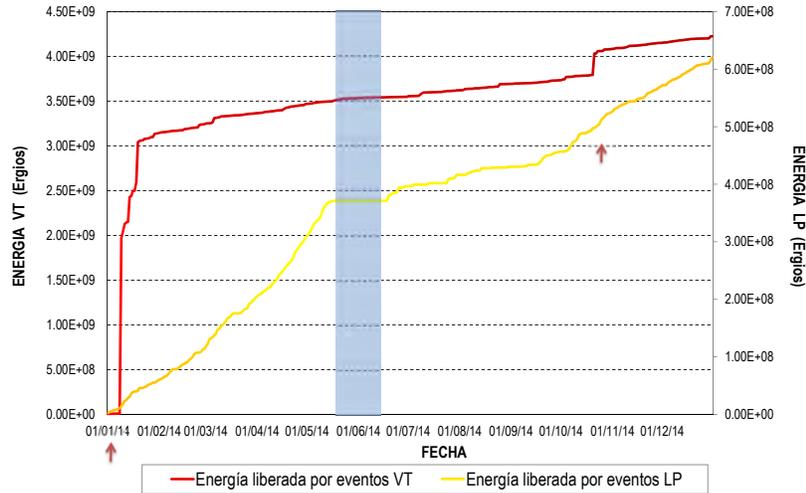


Figura 8: Acumulado de la energía sísmica liberada por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila, durante 2014.

1.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

1.2.3.1. Localización de eventos asociados a procesos de fractura. Durante el año 2014 fue posible realizar la localización epicentral e hipocentral de 862 eventos sísmicos asociados a fracturamiento de roca, de los 3262 eventos clasificados (ver figura 9). Los eventos se concentraron en cuatro zonas principalmente:

La primera zona está ubicada hacia el costado noreste, a distancias desde el Pico Central entre 9 y 19 *km*. Se presentaron alrededor de 470 eventos, con profundidades que oscilaron entre 2 y 16 *km* y magnitudes entre 0.4 y 5.2 *grados* M_L en la escala de Richter. Es en esta zona en la que se presentaron los eventos del 9 y 10 de enero, entre los que se encuentra el sismo de mayor magnitud del año 2014: 5.2 *grados* M_L en la escala de Richter (ver tabla 3).

El segundo sector corresponde a un área que va desde los 5 *km* hasta los 21 *km* al SW del Pico Central, donde se presentaron alrededor de 170 eventos en un rango de profundidades entre 2.2 y 12 *km* y magnitudes entre los 0.2 y 2.9 *grados* M_L en la escala de Richter.

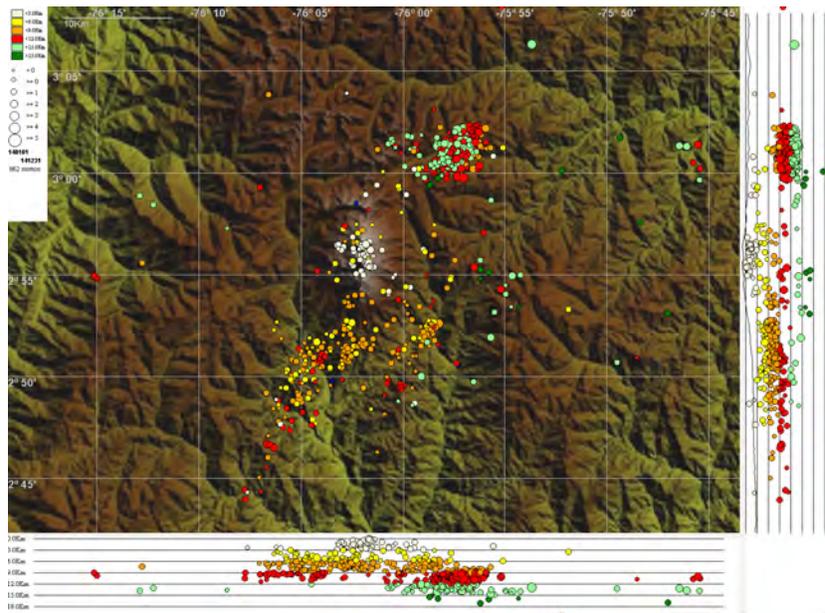


Figura 9: Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos en el volcán Nevado del Huila, durante el año 2014. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud local (M_L). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

La tercera zona, definida en un radio de 4.2 km desde el Pico Central, se lograron localizar 59 eventos sísmicos, los cuales presentaron profundidades entre los 0.1 y 10 km , además de magnitudes entre 0.4 y 2.8 $grados M_L$ en la escala de Richter.

El último sector corresponde al sureste del edificio volcánico, con distancias entre 7 y 11 km desde el Pico Central, con profundidades entre los 4 y 12 km y magnitudes entre 0.2 y 3.2 $grados M_L$ en la escala de Richter.

La figura 10 muestra la distribución de magnitudes locales (M_L) a lo largo del año 2014, se puede observar que predominaron los sismos con magnitudes inferiores a 2.0 M_L . Sin embargo, en el mes de enero, se puede observar una acumulación de puntos asociados a la cantidad de eventos ocurridos al NE del edificio volcánico y que variaron en magnitud entre los 0.5 y 5.2 $grados M_L$ en la escala de Richter.

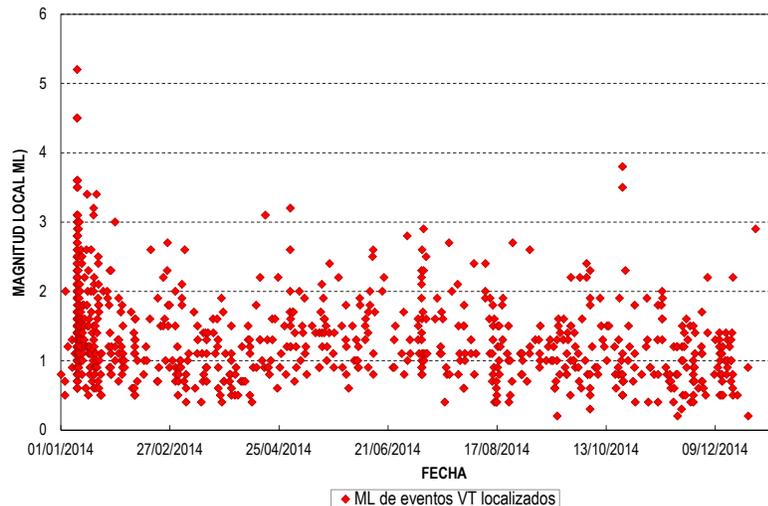


Figura 10: Magnitud local (M_L) presentada por los sismos localizados en el volcán Nevado del Huila durante año 2014.

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 periodo 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 dependiendo del tipo de volcán y el volumen de magma involucrado en una reactivación, se presentan en diferentes órdenes de magnitud como centimétrico, milimétrico, sub-milimétrico y en ángulos tan pequeños como microradianes.

En la actualidad, el volcán Nevado del Huila cuenta con un inclinómetro electrónico y una estación GNSS permanente, ambos ubicados en el sector denominado Caloto. El mapa de la figura 11 muestra la localización geográfica de estos equipos 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.

Durante el año 2014, el inclinómetro Caloto registró un comportamiento estable en sus componentes este y norte, con ligeras variaciones debidas a agentes ambientales externos. En la figura 12 se puede apreciar la tendencia que han mostrado los registros del inclinómetro durante el período evaluado. Por otro lado se aprecia que la componente norte presenta algunas variaciones cíclicas estacionales con un periodo aproximado de un año, esto se asocia posiblemente con periodos de recarga y descarga de masas glaciares. En la figura 13, se aprecia un comportamiento similar tanto para la variable temperatura que es registrada por el inclinómetro, como para la variable precipitación que es registrada por una estación meteorológica del

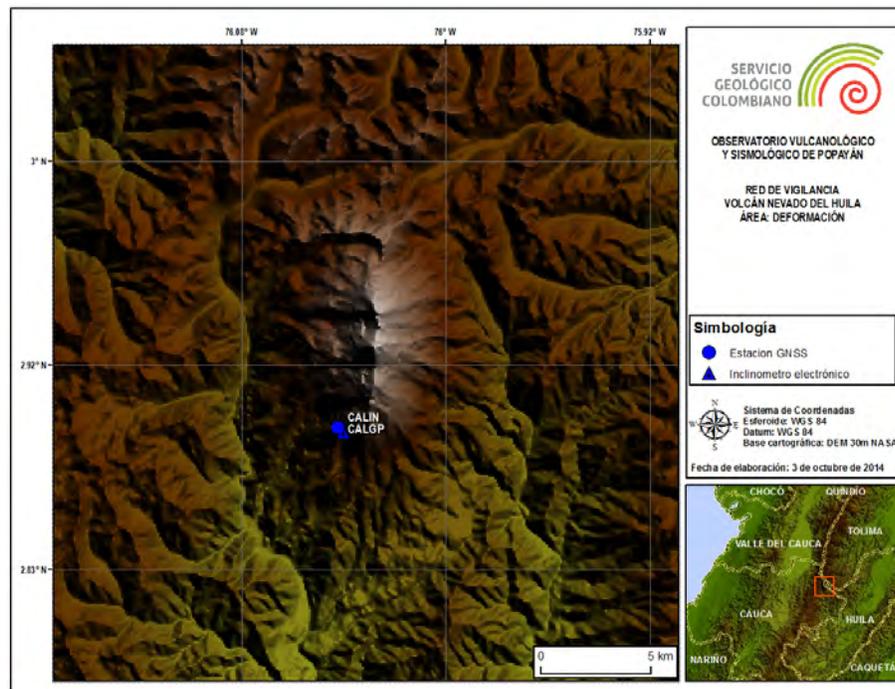


Figura 11: Red de vigilancia en deformación del volcán Nevado del Huila.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) localizada en el área de influencia del volcán Nevado del Huila. Dicho comportamiento se asocia también a los periodos de invierno y verano en la zona. Analizando la serie en los dos últimos años, se aprecia que dicho efecto es notorio solo en la componente norte, dirección coincidente con la alineación norte sur de volcán sobre la cual reposa el glaciar y que posiblemente es la más afectada con los periodos de recarga y descarga. Hasta el momento este comportamiento constituye la línea base del equipo, y cuando ocurran periodos deformativos se espera que los cambios sean mayores a los 25 microradianes que corresponden a la amplitud promedio de dichas variaciones estacionales y así poder identificar procesos deformativos asociados a la actividad volcánica.

1.3.2. Estación GNSS Permanente

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. Esta técnica consiste en calcular la ubicación tridimensional de una red de estaciones, periódica o continuamente, con el fin de comparar sus posiciones a lo largo del tiempo y detectar las deformaciones ocurridas en la superficie del volcán. La gran ventaja de esta técnica sobre las técnicas tradicionales 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 mejor comprensión del movimiento tectónico local y las mediciones y resultados se realizan en tiempo real.

Durante el año 2014 se instaló la primera estación GNSS permanente en el volcán Nevado del Huila. Desde su instalación hasta finales del año, ha evidenciado un comportamiento estable en sus tres componentes, con ligeras variaciones propias del procesamiento diferencial que se hace con dicha información. En la figura 14 se aprecia el comportamiento de las componentes de la estación GNSS permanente.

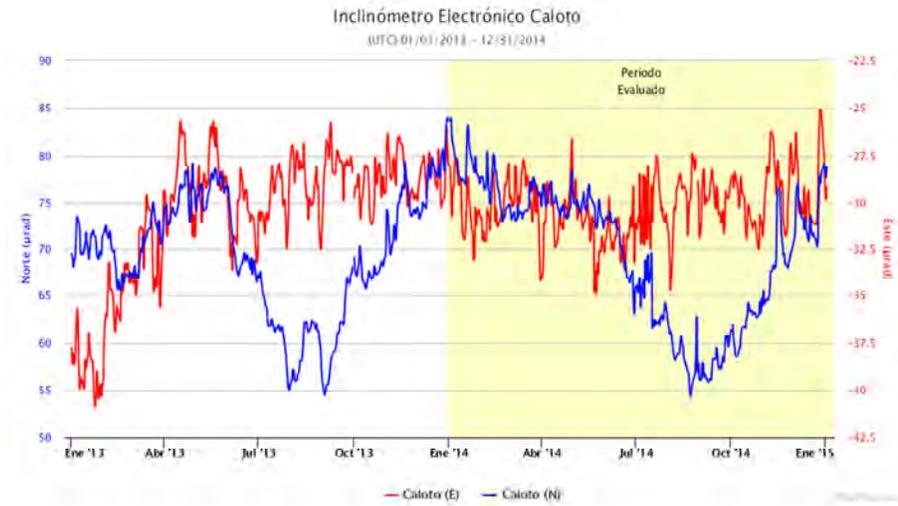


Figura 12: Comportamiento del inclinómetro electrónico Caloto a diciembre de 2014.

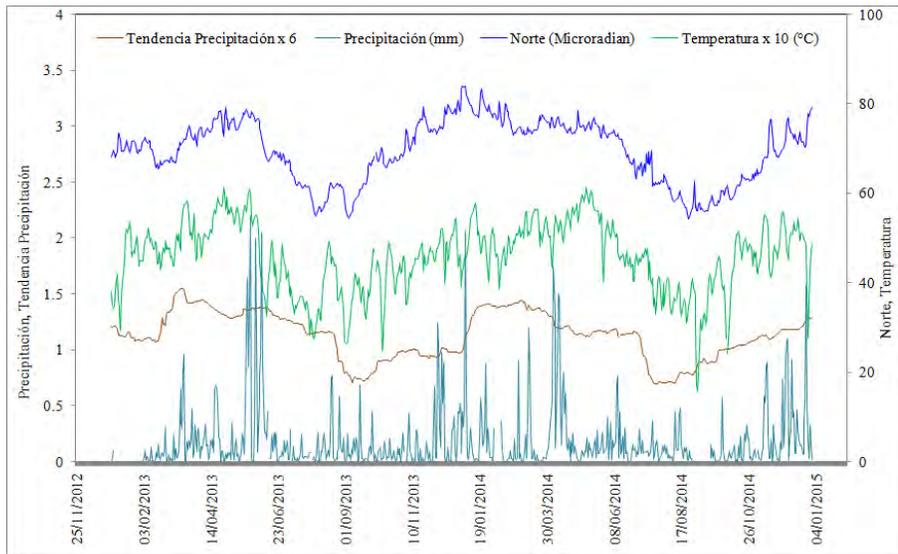


Figura 13: Series de tiempo para la componente Norte y canal de Temperatura del inclinómetro de Caloto, serie de tiempo para precipitación y tendencia de precipitación obtenida con el método promedio móvil orden 180. [2013-2014].

1.3.3. Interferometría con radar

El proyecto UAVSAR (*Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar*) del *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA, por medio de un radar de apertura sintética acoplado a un avión de la NASA, realiza anualmente campañas para la recolección de imágenes sobre determinados lugares del planeta. Entre dichos lugares, para el proyecto UAVSAR es de especial interés la deformación en los volcanes. Para el caso del volcán Nevado del Huila, hasta el momento se han realizado dos campañas: la primera en marzo de 2013 y la segunda en abril de 2014. Después de la segunda campaña, UAVSAR ha publicado el primer interferograma; los resultados evidencian que durante el periodo de marzo de 2013 a abril de 2014, no hay deformación

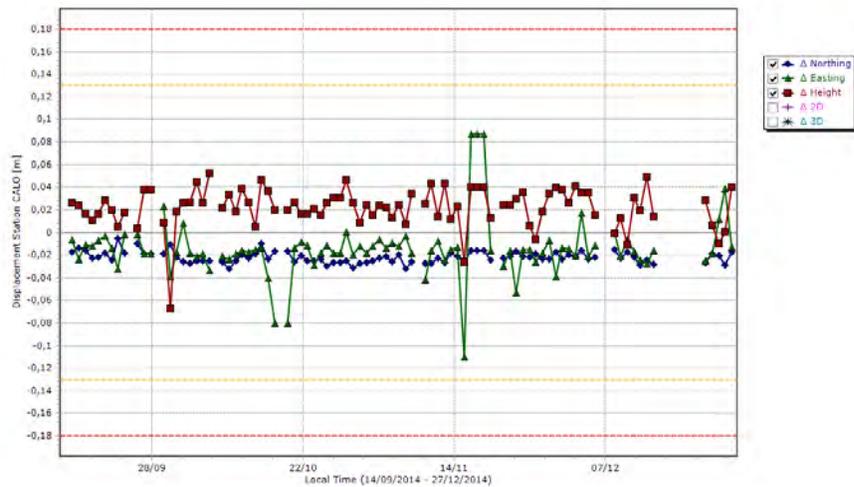


Figura 14: Estación GNSS permanente Caloto a diciembre de 2014.

asociada con la actividad volcánica. En el interferograma se puede apreciar también, que la zona del domo extruido en el Pico Central del volcán durante los años 2008 a 2010 sufrió desprendimiento de material de las partes altas a las partes más bajas, esto posiblemente causado por la pendiente del domo y sismicidad superficial en esta zona. En la figura 15 se aprecia el interferograma publicado por UAVSAR para el volcán Nevado del Huila.

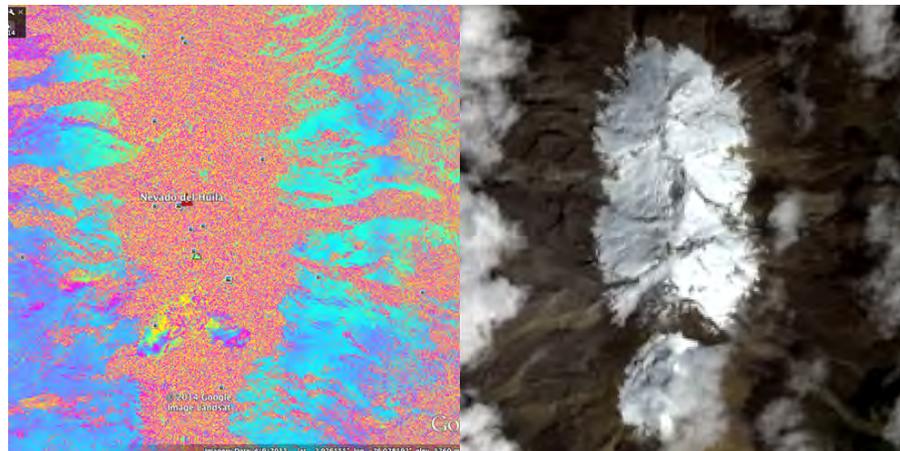


Figura 15: Interferograma para el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014, publicado por el proyecto UAVSAR (<http://uavsar.jpl.nasa.gov/>). Derecha: Imagen del satélite Landsat8, combinación de bandas 4, 3, 2 del 16 de diciembre de 2014. Volcán Nevado del Huila.

1.4. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

Durante el año 2014 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 Caloto y La Palma. El mapa de la figura 16 permite apreciar la distribución geográfica de dichas cámaras.

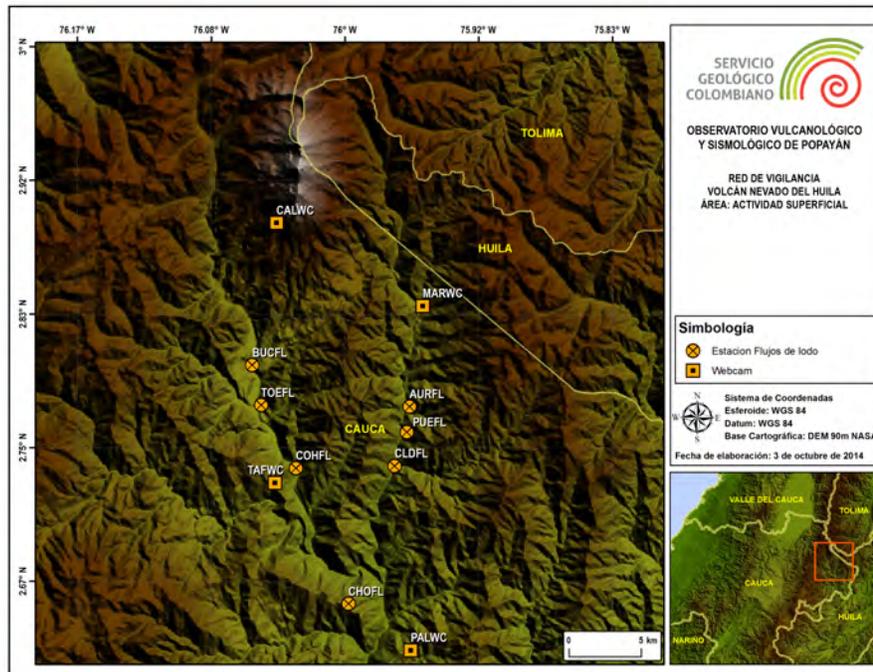


Figura 16: Red de monitoreo de la actividad superficial del volcán Nevado del Huila.

1.4.1. Registro de la Actividad Superficial

En imágenes captadas a través del 2014, con las cámaras web Caloto, Tafxnú, Maravillas y La Palma, se observó que el complejo volcánico continuó su proceso de desgasificación en forma de columnas fumarólicas de color blanco, las cuales alcanzaron alturas menores a dos kilómetros, estas fueron emitidas principalmente desde la superficie del cuerpo dómico y desde el sistema de grietas ubicado entre los Picos Central y Sur. La dirección de las mismas está dada de acuerdo al régimen de vientos imperante en la zona dada a dos estratos altitudinales, mostrando un comportamiento preferencial durante el año hacia los costados Oeste y Noroeste del edificio volcánico (ver figura 17). Esto se consistente con lo reportado por el pronóstico del IDEAM para el periodo evaluado (Modelo WRF/VNH); acompañado de velocidades diarias que alcanzaron valores máximos hasta de 16.9 m/s , equivalentes a 60.8 km/h , para un estrato de 18.000 ft (5.486 msnm) y 7.9 m/s , equivalentes a 25.2 km/h para un estrato de 10.000 ft (3.048 msnm) (ver figura 18).

A continuación se presenta una selección con las mejores imágenes durante el 2014, captadas por las cámaras web de Caloto, Tafxnú, Maravillas y La Palma, las cuales evidencian la desgasificación del sistema (columnas fumarólicas) y procesos de recarga sobre el glaciar (escarcha o nieve), especialmente sobre el Pico Sur y sobre la superficie del domo extruido en 2009.

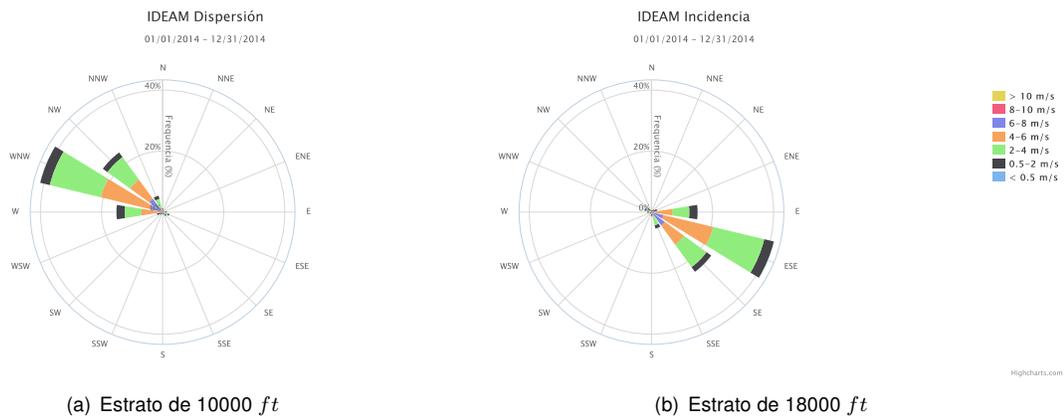


Figura 17: Diagrama de Rosa de los vientos generado a partir del pronóstico WRF VNH. Agosto de 2015.

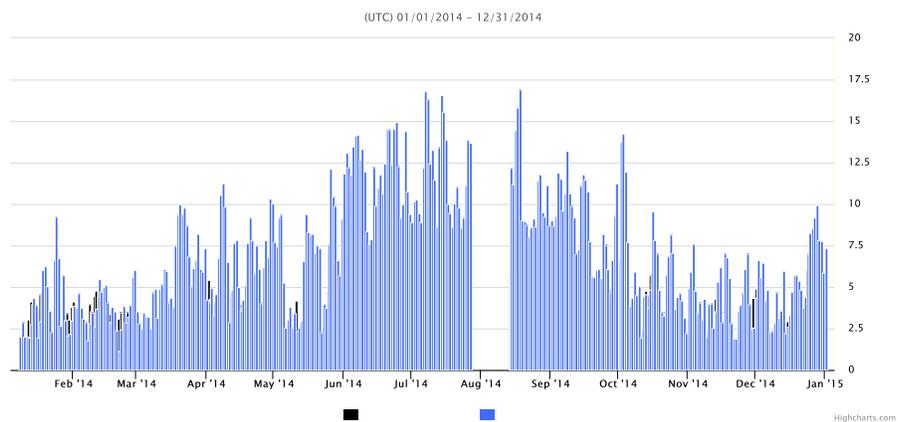


Figura 18: Histograma de velocidades promedio día – Modelo pronostico IDEAM WRF – VNH, año 2014.



Figura 19: Imágenes captadas por la cámara web Caloto, primer semestre de 2014.



Figura 20: Imágenes captadas por la cámara web Caloto, segundo semestre de 2014.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán



Figura 21: Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú, primer semestre de 2014.

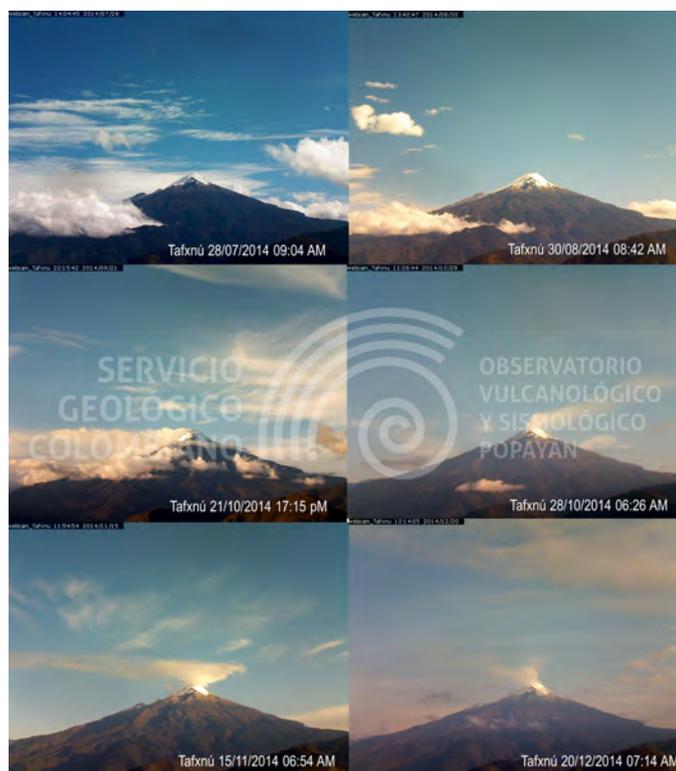


Figura 22: Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú, segundo semestre de 2014.



Figura 23: Imágenes captadas por la cámara web Maravillas, primer semestre de 2014.



Figura 24: Imágenes captadas por la cámara web Maravillas, segundo semestre de 2014.



Figura 25: Imagen panorámica captada por la cámara web de la Palma, 15 de noviembre de 2014.

1.5. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Desde el 15 de septiembre de 2014, el volcán Nevado del Huila cuenta con una estación magnetométrica en el sitio denominado Caloto, con el objetivo de realizar el monitoreo del campo magnético local. La figura 26 muestra la ubicación geográfica de dicho sensor.

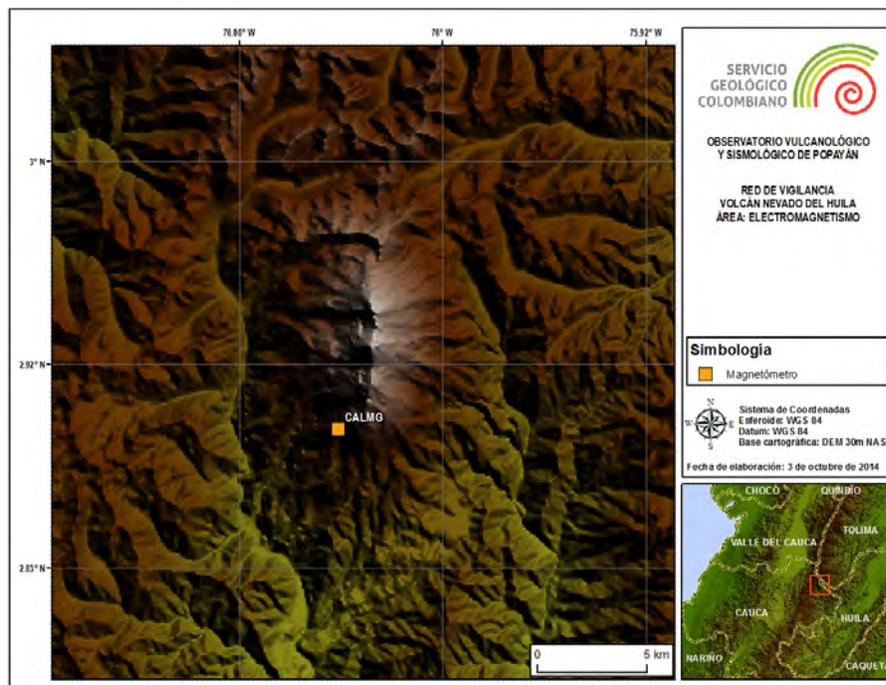


Figura 26: Red de monitoreo de campos electromagnéticos del volcán Nevado del Huila.

Durante el 2014, el magnetómetro Caloto mostró un comportamiento estable, con ciclos de oscilaciones día-noche debidos a las variaciones de radiación solar, además de respuesta frente a 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 (instalada en Guayana 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. Estas variaciones se señalan con líneas rojas en la figura 27.

Se resalta que por el momento este equipo se encuentra en una etapa de registro que busca establecer una línea base de comportamiento, la cual sea adecuada en la correlación realizada con los demás parámetros de monitoreo volcánico empleados, permitiendo así identificar cambios posiblemente asociados a la actividad volcánica.

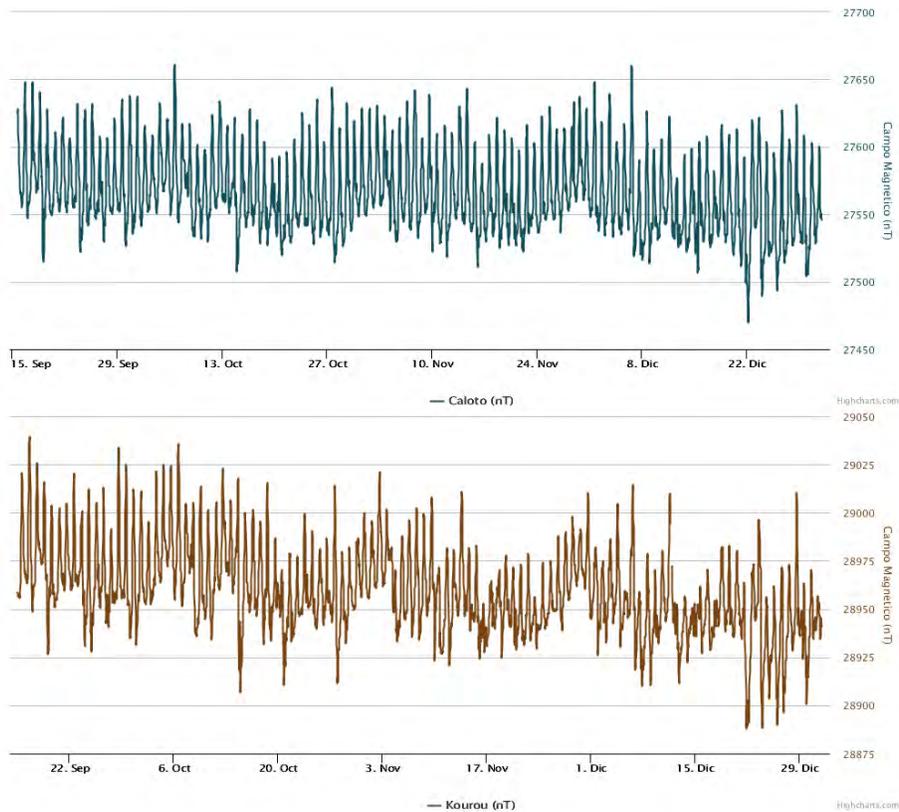


Figura 27: Mediciones magnetométricas en el volcán Nevado del Huila, desde el 15 de septiembre al 31 de diciembre de 2014: Arriba: estación Caloto del volcán Nevado del Huila. Abajo: mediciones magnetométricas en la estación Kourou en la Guyana Francesa.

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 2014 los niveles de actividad sísmica permanecieron estables, donde predomina la sismicidad relacionada con el fracturamiento de roca. Del seguimiento realizado a la actividad superficial durante el período evaluado, no se encontraron 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 28: Volcán Puracé. Imagen captada durante sobrevuelo del 22 de octubre de 2011.

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 m y 900 m de diámetro, respectivamente (ver figura 28). Se encuentra ubicado en el departamento del Cauca, en las coordenadas geográficas $2^\circ 22' N$ y $76^\circ 23' O$, a una distancia de 26 km al SE 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 $N40^\circ O$, siendo el Puracé el más septentrional de la cadena (figura 29).

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; su última erupción ocurrió el 19 de marzo de 1977.

Existen al menos 15 fuentes termales ubicadas alrededor del edificio volcánico, las cuales presentan temperaturas comprendidas entre 20 y $90^\circ C$, 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 .

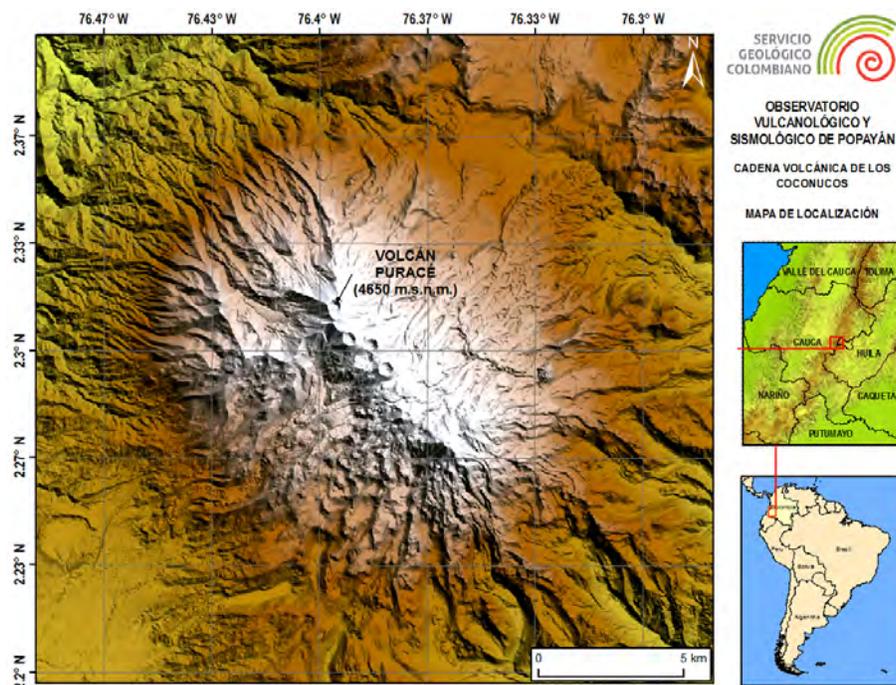


Figura 29: Mapa de localización del volcán Puracé y la cadena volcánica de Los Coconucos.

2.1. RED DE VIGILANCIA

El volcán Puracé cuenta actualmente con una red de vigilancia compuesta por 100 estaciones, de las cuales 41 poseen un sistema de telemetría de datos (telemétricas); mientras que en las 59 restantes los datos son adquiridos directamente en puntos de muestreo (no telemétricas). Estas estaciones se emplean para medir diferentes parámetros, mediante técnicas tales como sismología, deformación, geofísica, geoquímica y actividad superficial.

En las tablas 4 y 5 se detallan las principales características de las estaciones telemétricas y no telemétricas que conforman la red de monitoreo del volcán Puracé.

2.1.1. Generalidades

2.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. El volcán Puracé cuenta con una red operativa de 10 estaciones sismológicas, a las cuales se les ha asignado una denominación según su ubicación geográfica, y cuya distribución cubre todos los flancos del volcán, así: San Rafael a una distancia de 8.5 km al NE del cráter, La Mina, Lavas Rojas, Lavas Rojas 2, Curiquinga y Shaka, distribuidas hacia los sectores NO y SE del edificio volcánico, y a distancias entre 2 y 4 km del mismo, las estaciones Cóndor, Cocuy2 y Agua Blanca, instaladas hacia los sectores NE y SO del cráter del volcán, ubicadas en un rango de distancia que oscila entre 0.6 y 1.5 km de la cima del volcán, y la estación sismológica Agua Bonita, localizada a 10.3 km al SO del cráter del volcán. Esta última en ser mencionada es empleada para registrar la sismicidad que se presenta en la parte SE de la Cadena Volcánica de Los Coconucos y la proveniente 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 12 estaciones telemétricas, de las cuales cinco son inclinómetros electrónicos: Lavas Rojas localizado a 2 km al NO del cráter; Guañarita2 ubicado a 1 km al NE del cráter del volcán; Curiquinga localizado a 1.8 km al SE del cráter; Agua Blanca localizado a 0.7 km al oeste del cráter del volcán, y Cocuy2 instalado en el flanco NE del edificio volcánico. De igual forma, esta red

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)	Distancia al Cráter (km)
Agua Hirviendo	Estación Isotópica de Radón	2.3301	76.4896	2649	10.2
	Estación Monitora de CO ₂				
	Fuente Termal				
Agua Tibia	Estación Isotópica de Radón	2.3041	76.5088	2683	12.3
	Estación Monitora de CO ₂				
	Fuente Termal				
Base	Estación Isotópica de Radón	2.3317	76.3941	4056	1.8
	Estación Monitora de CO ₂				
Cóndor	Estación Isotópica de Radón	2.3248	76.3946	4317	1.0
	Estación Monitora de CO ₂				
Fumarola	Muestreo de gases	2.3166	76.3959	4545	0.3
Guañarita	Estación Isotópica de Radón	2.3229	76.3952	4393	0.8
	Estación Monitora de CO ₂				
	Reflector EDM	2.3253	76.3966	4293	1.0
Guañarita2	Reflector EDM	2.3226	76.3957	4386	0.8
Guañarita3	Reflector EDM	2.3230	76.3954	4384	0.8
Guarquelló	Fuente Termal	2.3907	76.4402	2802	9.5
Hornos Tres	Fuente Termal	2.3048	76.4872	2747	9.9
Hornos Siete	Fuente Termal	2.3049	76.4873	2743	9.9
Laguna	Estación Isotópica de Radón	2.3279	76.3953	4196	1.3
	Estación Monitora de CO ₂				
	GNSS Campaña	2.3275	76.3964	4207	1.3
	Reflector EDM	2.3262	76.3977	4233	1.1
Laguna2	Reflector EDM	2.3268	76.3981	4206	1.2
Laguna3	Reflector EDM	2.3274	76.3971	4206	1.2
Laguna4	Reflector EDM	2.3278	76.3968	4005	1.3
Lavas Rojas2	GNSS Campaña	2.3225	76.4110	4059	1.5
	Reflector EDM	2.3222	76.4112	4087	1.5
Lavas Rojas3	GNSS Campaña	2.3239	76.4123	4077	1.7
	Reflector EDM	2.3239	76.4122	4067	1.7
Lavas Rojas4	Reflector EDM	2.3256	76.4135	4019	1.9
Lavas Rojas5	GNSS Campaña	2.3313	76.4160	3951	2.5
Mina	Base EDM	2.3316	76.4089	4075	2.0
	Estación Isotópica de Radón	2.3473	76.4072	3670	3.6
	Estación monitora de CO ₂				
Mina2	GNSS Campaña	2.3310	76.4097	3959	2.0
	Base EDM				
Mina3	GNSS Campaña	2.3329	76.4121	3956	2.4
Paletará	Estación Isotópica de Radón	2.2074	76.4977	2986	16.4
	Estación monitora de CO ₂				
Pilimbala4	GNSS Campaña	2.3719	76.4093	3279	6.3
Pozo Azul	Estación Isotópica de Radón	2.2867	76.4642	3125	8.0
	Estación monitora de CO ₂				
	Fuente Termal	2.2865	76.4641	3115	8.0
Pululó	Estación Isotópica de Radón	2.3851	76.4301	2867	8.4
	Estación monitora de CO ₂				
	Fuente Termal	2.3852	76.4302	2889	8.4
San Juan	Estación Isotópica de Radón	2.3397	76.3133	3237	9.8
	Estación monitora de CO ₂				
	Fuente Termal	2.3406	76.3138	3265	9.8
San Rafael	Estación Isotópica de Radón	2.3592	76.3504	3425	7.2
	Estación monitora de CO ₂				
Tabío	Estación Isotópica de Radón	2.3815	76.4444	2861	8.8
	Estación monitora de CO ₂				

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

Versalles	Fuente Termal	2.3169	76.2611	2761	15.3
Vinagre	Fuente Termal	2.3521	76.4093	3624	4.1
	GNSS Campaña	2.3265	76.3945	4258	1.2
	Reflector EDM	2.3268	76.3951	4260	1.2
Vinagre2	GNSS Campaña	2.3275	76.3939	4222	1.3

Tabla 4: Características de la red de vigilancia no telemétrica del volcán Puracé.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Distancia al Cráter (km)
Aeropuerto	GNSS	2.4491	76.6147	1760	28.2
Agua Blanca	Estación Corto Período	2.3103	76.4005	4374	0.7
	Inclinómetro electrónico				
	Magnetómetro	2.3105	76.4004	4380	0.7
	Estación GNSS				
Agua Bonita	Estación Banda Ancha	2.2415	76.4532	3196	10.3
	Estación Meteorológica			3201	
	Estación GNSS				
Anambio	Estación de CO ₂	2.3124	76.3969	4595	0.4
	Cámara web				
Cerro Sombrero	Cámara web	2.2681	76.5683	3331	19.6
Cocuy2	Banda Ancha	2.3199	76.3864	4289	1.4
	Inclinómetro electrónico				
	Estación GNSS	2.3197	76.3861	4299	1.4
	Potencial Eléctrico Espontáneo	2.3199	76.3871	4312	1.3
Cocuy3	Estación isotópica de Radón	2.3171	76.3901	4452	1.0
	Estación monitora de CO ₂				
Cocuy4	Estación Meteorológica	2.3182	76.3910	4440	0.9
Cóndor	Estación Banda Ancha	2.3248	76.3937	4294	1.1
	Corto Período				
	Potencial Eléctrico Espontáneo	2.3241	76.3928	4049	1.1
Cráter	Estación Isotópica de Radón	2.3124	76.3969	4547	0.5
	Estación monitora de CO ₂				
Curiqinga	Estación Banda Ancha	2.3009	76.3908	4507	1.9
	Inclinómetro electrónico	2.3018	76.3912	4482	1.8
Fumarola	Termocupla	2.3170	76.3960	4500	0.3
Guañarita	Estación Isotópica de Radón	2.3166	76.3959	4545	0.3
Guañarita2	Estación GNSS	2.3250	76.3963	4248	1.0
	Inclinómetro electrónico				
Laguna	Magnetómetro	2.3282	76.3963	4177	1.3
Lavás Rojas	Estación Banda Ancha	2.3171	76.4166	4049	2.0
	Cámara web				
	Estación GNSS	2.3255	76.4140	4051	
	Inclinómetro electrónico	2.3171	76.4165	4058	
Lavás Rojas2	Estación Corto Período	2.3254	76.4141	4058	2.0
Mina	Estación Corto Período	2.3330	76.4098	4049	2.2
	Estación Meteorológica				
	Estación GNSS	2.3147	76.4090	3904	1.2
	Cámara web	2.3316	76.4089	4082	2.0
San Rafael	Corto Período	2.3771	76.3526	3518	8.5
Shaka	Corto Período	2.2873	76.3755	4445	4.1

Tabla 5: Características de la red de vigilancia telemétrica del volcán Puracé.

cuenta con 7 estaciones GNSS permanentes: Mina y Guañarita ubicadas a 1.2 y 1 km del cráter del volcán

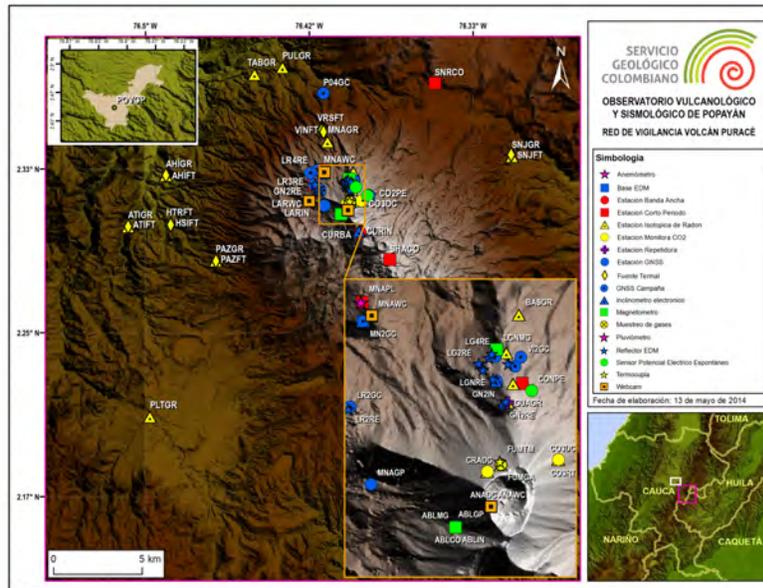


Figura 30: Mapa de la red de vigilancia del volcán Puracé.

respectivamente, 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; Agua Bonita, ubicada a 10.3 *km* al SO del cráter del volcán; por último se tiene la estación de referencia 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 2 bases y 11 reflectores EDM (haciendo tres líneas de EDM), mediante los cuales se realizan medidas periódicas de control topográfico, así como con nueve 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 cuatro cámaras con conexión IP: La Mina y Lavas Rojas, localizadas a 2 *km* en dirección NO y O del cráter del volcán respectivamente, Anambío, ubicada dentro del cráter activo, esta permite visualizar los cambios morfológicos al interior del mismo. Por último la cámara web Cerro Sombrero, que se encuentra ubicada a 18 *km* al SO del cráter del volcán y permite una visual de toda la Cadena Volcánica Los Coconucos.

2.1.1.4. Electromagnetismo. Para el monitoreo de las variaciones del campo natural del potencial eléctrico y del campo magnético local, se han instalado en el volcán Puracé dos sensores de potencial eléctrico espontáneo, Cóndor y Cocuy, ambos ubicados al NE del edificio volcánico a distancias de 1.1 y 1.3 *km* del cráter, respectivamente. Igualmente se cuenta con dos magnetómetros: Laguna y Agua Blanca; el primero de ellos localizado a 1.3 *km* al N de la cima volcánica, y el segundo instalado a 0.7 *km* al O del volcán.

2.1.1.5. Geoquímica. La red de vigilancia en geoquímica del volcán Puracé se encuentra conformada actualmente por 32 estaciones para el monitoreo de gases difusos en suelos como gas Radón (^{222}Rn) y dióxido de carbono (CO_2). De ellas, 26 son muestreadas directamente en campo (no telemétricas), mientras que las estaciones Cocuy 3 ^{222}Rn y Cocuy 3 CO_2 , ubicadas a 1 *km* al NE del cráter, Cráter ^{222}Rn y Cráter CO_2 , localizadas a 0.5 *km* al NO del cráter, Guañarita ^{222}Rn a 0.3 *km* al N del cráter y Anambío CO_2 , ubicada a 0.2 *km* al SO del mismo, cuentan con un sistema de telemetría de datos. El monitoreo fisicoquímico para este volcán también involucra muestreos periódicos, medidas de temperatura y parámetros fisicoquímicos realizados *in situ* para 10 fuentes termales (12 puntos de muestreo) y para el campo fumarólico que está ubicado en el flanco norte del cráter, a una distancia de 0.3 *km*. Adicionalmente, el campo fumarólico, localizado a 0.3 *km* al NO del cráter, cuenta con una termocupla con transmisión telemétrica de los datos de temperatura.

2.1.1.6. Meteorología. El volcán Puracé cuenta con tres estaciones meteorológicas que son: Mina, la cual se localiza a 2.2 km al NO del cráter; Cocuy 4, que está ubicada a aproximadamente 0.7 km al NE del cráter; y Agua Bonita, ubicada a 10.3 km al SO del cráter del volcán. Estas estaciones obtienen datos de dirección y velocidad del viento, así como de los niveles de precipitación que se presentan en la zona de influencia del volcán.

2.1.2. Funcionamiento de Estaciones

Durante el año 2014 la red de vigilancia del volcán Puracé mostró un funcionamiento del 88.3%, sobre 91 % del total de la red de monitoreo. La gráfica de porcentaje de funcionamiento por cada metodología empleada se muestra en la figura 31.

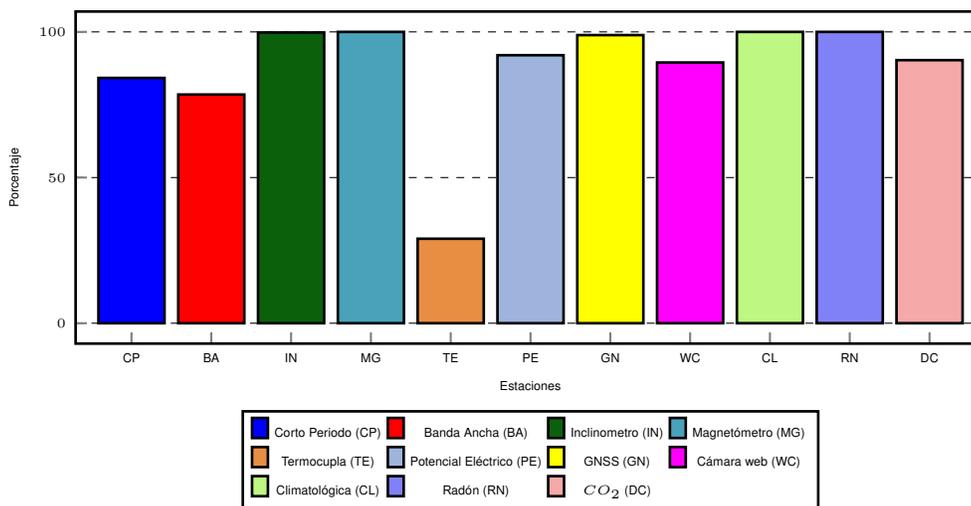


Figura 31: Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Puracé durante el año 2014.

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: Cóndor, Lavas Rojas 2, Agua Blanca, Mina, San Rafael y Shaka; y cuatro con sensores de banda ancha: Cóndor, Lavas Rojas, Cocuy 2 y Curiquinga. El mapa de la figura 32 muestra la distribución geográfica de dichas estaciones.

2.2.1. Actividad Sísmica

La red de estaciones sismológicas instalada en el área de influencia del volcán Puracé registró un total de 7623 eventos sísmicos entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del año 2014, de los cuales 1204 estuvieron relacionados con procesos de fracturamiento de roca (tipo VT) y 6419 con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos; de estos últimos, 6034 fueron catalogados como eventos de Largo Periodo (tipo LP), 23 como eventos Híbridos los cuales se asociaron con procesos que involucraron tanto mecanismos de fractura como movimiento de fluidos (tipo HB), 278 eventos tipo Tornillo (tipo TO), y 85 pulsos de tremor de bajo nivel energético (tipo TR).

A lo largo del periodo evaluado la sismicidad de fluidos tuvo un claro predominio sobre la sismicidad de fractura, con un promedio de ocurrencia de 16 eventos tipo LP/día contra 3 eventos tipo VT/día. La sismicidad tipo HB y TO, así como los pulsos de Tremor se caracterizaron por su baja tasa de ocurrencia con un promedio de registro inferior a 1 evento/día.

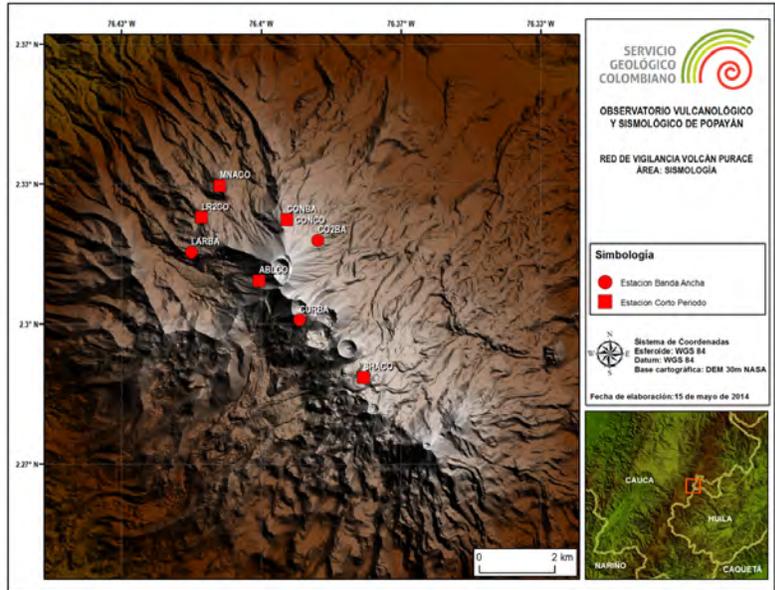


Figura 32: Red de vigilancia en sismología del volcán Puracé.

La Tabla 6 y la figura 33 muestran la tendencia en cuanto al número de eventos sísmicos registrados durante el año 2014. La figura 34 muestra la variación en la sismicidad evaluada mensualmente, en ella se puede apreciar que los meses de junio, julio y agosto fueron en los que se tuvo, en términos generales, la tasa más baja de actividad sísmica en el volcán Puracé, y que los promedios mensuales de los diferentes tipos de eventos sísmicos, no tuvieron variaciones significativas que pudieran indicar un cambio en la dinámica de la actividad volcánica.

Fecha	Tipos de eventos					Total
	VT	LP	TO	TR	HB	
1 de enero al 31 de diciembre de 2014	1204	6034	278	84	23	7623

Tabla 6: Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Puracé durante el año 2014.

2.2.2. Energía Sísmica Liberada

La tendencia en la liberación de energía sísmica asociada a la ocurrencia de eventos VT y LP se mantuvo estable durante el año 2014, con variaciones relacionadas principalmente, en el caso de la actividad sísmica asociada con procesos de fractura, al número de eventos registrados diariamente. El máximo aporte energético de los eventos volcano tectónicos ocurrió el 27 de febrero con un valor de $8.87E+14$ *ergios*, día en el que se registró el máximo número de eventos VT en todo el periodo evaluado, con un total de 42 sismos con magnitudes de duración entre 0.6 y 2.4 en la escala de Richter. Cabe mencionar que con excepción del pico energético mencionado anteriormente, el promedio de la energía sísmica liberada por la sismicidad de fractura durante el 2014 fue de $1.20E+13$ *ergios*. En cuanto a la energía sísmica liberada por la sismicidad de tipo LP, esta se caracterizó por ser de bajo nivel energético con magnitudes de duración promedio de 1.19 en la escala de Richter. El máximo aporte energético ocurrió el día 3 de mayo con un valor de $1.09E+14$ *ergios*, asociado a la ocurrencia de 20 sismos con magnitudes de duración que variaron entre 0.4 y 2.0 en la escala de Richter.

La dinámica del sistema volcánico continuó estando predominantemente relacionada con la actividad sísmica asociada al tránsito de fluidos en los conductos volcánicos a lo largo del periodo evaluado; no obstante y

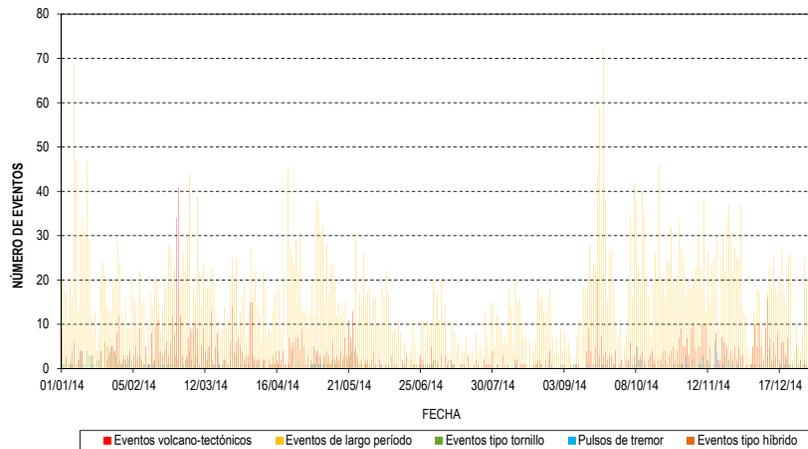


Figura 33: Número de eventos registrados diariamente en el volcán Puracé durante el año 2014.

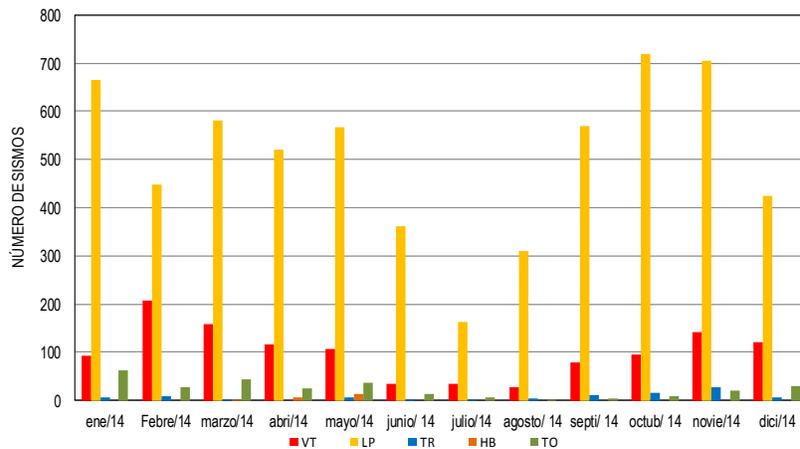


Figura 34: Relación de la variación presentada en el número de eventos sísmicos registrados mensualmente en el volcán Puracé para el año 2014.

como se mencionó anteriormente, los aportes energéticos de estos eventos son considerados como bajos, y por consiguiente no se registraron variaciones a destacar que indiquen cambios en el comportamiento del volcán. En cuanto a las variaciones presentadas en los aportes energéticos de los eventos volcano tectónicos ocurridas en el mes de febrero, estas se relacionaron principalmente con actividad sísmica generada en áreas distales del edificio volcánico, la cual tampoco incidió en la estabilidad del volcán. Al final del periodo evaluado la liberación de energía sísmica evaluada de forma acumulada para eventos LP fue de $4.68E+15$ *ergios*, mientras que para la sismicidad VT fue de $4.37E+15$ *ergios*

Las figuras 35 y 36 muestran el comportamiento de la energía sísmica liberada por los eventos VT y LP a lo largo del año de forma diaria y de forma acumulada, respectivamente.

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

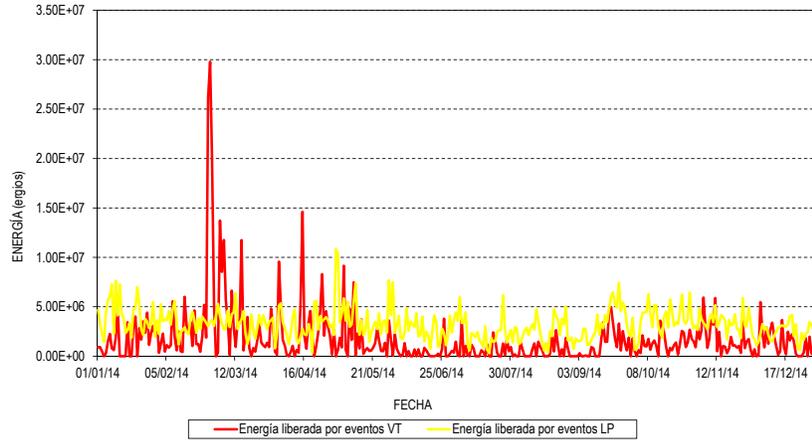


Figura 35: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Puracé, durante el año 2014.

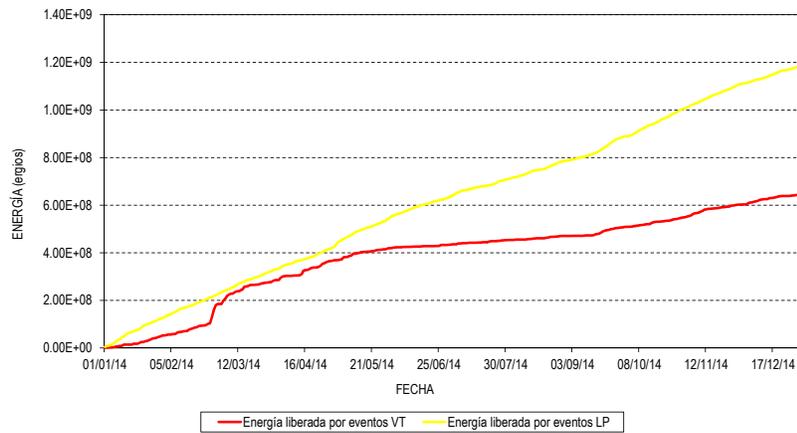


Figura 36: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Puracé, durante el año 2014.

2.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

2.2.3.1. Localización de eventos asociados a dinámica de fluidos. Entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2014 se llevó a cabo la localización de 1708 eventos sísmicos 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, 1496 fueron eventos de Largo Periodo, los cuales continuaron estando concentrados epicentralmente en un área aproximada de 2 km^2 alrededor del cráter del volcán, especialmente en el flanco NE del edificio volcánico, y en menor proporción hacía el sector SE de la cadena volcánica de los Coconucos, a una distancia epicentral de aproximadamente 3.5 km de la cima volcánica. Adicionalmente se localizaron 201 eventos tipo Tornillo los cuales se concentraron en un área de 1 km^2 en el flanco E del volcán, y de 11 pulsos de tremor que se concentraron en el cráter del volcán.

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 37 se pueden apreciar los mapas de localización para el año 2014 de los eventos anteriormente mencionados.

2.2.3.2. Localización de eventos asociados con procesos de fractura. De los 1204 sismos volcánico tectónicos que se registraron durante el año 2014, fue posible realizar la localización epicentral e hipocentral de 300. Esta sismicidad se concentró principalmente en dos sectores, el primero de ellos corresponde a un área de aproximadamente 2 *km*² alrededor del cráter del volcán Puracé, en la cual se generó el 67 % de la sismicidad relacionada con procesos de fracturamiento de roca. Los eventos sísmicos localizados en esta fuente sismogénica se caracterizaron por ser de bajo nivel energético, con un valor promedio de magnitud de 0.6 *M_L* en la escala de Richter, así como por ocurrir en un rango hipocentral que osciló entre 1 y 6 *km*. El segundo sector en el que se concentró la actividad volcánico tectónica, se ubica en un área distal del edificio volcánico, a una distancia epicentral promedio de 16 *km* al NE de la cima volcánica; cabe mencionar que del total de eventos VT localizados durante el periodo evaluado, fue en esta zona en la que se generaron los eventos más energéticos, con un valor promedio de magnitud de 1.1 *M_L* en la escala de Richter y con una magnitud máxima registrada de 2.7 *M_L* en la escala de Richter. El rango hipocentral promedió en el que se generó la actividad sísmica localizada en esta zona fue de 10 *km*.

La sismicidad restante se localizó de forma dispersa hacia los sectores N y S del volcán, en los valles de San Rafael y Paletará, respectivamente. Los eventos localizados en el primer sector se generaron a una profundidad promedio de 7 *km*, y alcanzaron una magnitud máxima de 2 *M_L* en la escala de Richter; en cuanto a la sismicidad del valle de Paletará, esta se caracterizó por ser de bajo nivel energético con valores promedio de magnitud de 0.4 *M_L* en la escala de Richter, y por ocurrir en un rango hipocentral profundo, el cual osciló entre 6 y 14 *km*.

La figura 38 muestra el mapa de localización epicentral e hipocentral de los eventos de fractura localizados durante el año 2014. Por su parte, la figura 39 muestra una relación entre los valores de magnitud y las diferentes zonas en las que se generó actividad volcánico tectónica durante el periodo evaluado. Se destaca que la fuente distal localizada al NE del volcán Puracé en la cual se generaron los eventos con mayor aporte energético, presentó su mayor estado de actividad durante el mes de febrero de 2014, sin que se registrara actividad sísmica recurrente a lo largo del año; en contraste, la sismicidad localizada en la parte alta del edificio volcánico se registró de manera permanente en el tiempo, con valores de magnitud que no presentaron variaciones importantes.

En conclusión, la actividad sísmica continuó estando relacionada principalmente con procesos asociados a la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos, siendo los eventos catalogados como LP los que mayor frecuencia de ocurrencia tuvieron a lo largo del periodo evaluado, correspondiendo al 88 % de la sismicidad total registrada. No obstante, cabe mencionar que dichos eventos se caracterizaron por sus bajos aportes energéticos. Igualmente, la actividad volcánico tectónica no mostró variaciones a destacar en cuanto a incrementos esporádicos en el número de eventos sísmicos o en valores de magnitud apreciables, destacándose únicamente la sismicidad de carácter profundo generada en áreas distales del edificio volcánico, a la cual se asociaron las máximas magnitudes alcanzadas a lo largo del año, pero que no tuvieron incidencia alguna en la estabilidad del sistema volcánico.

El comportamiento de la actividad sísmica entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del 2014, no mostró variaciones en cuanto al predominio en el tipo de eventos sísmicos registrados, energía liberada y/o localización y características de las diferentes fuentes sísmicas. Los cambios registrados durante el año y que se describieron a lo largo de este capítulo, se encuentran dentro de la dinámica que hace parte de la línea base establecida para el volcán Puracé.

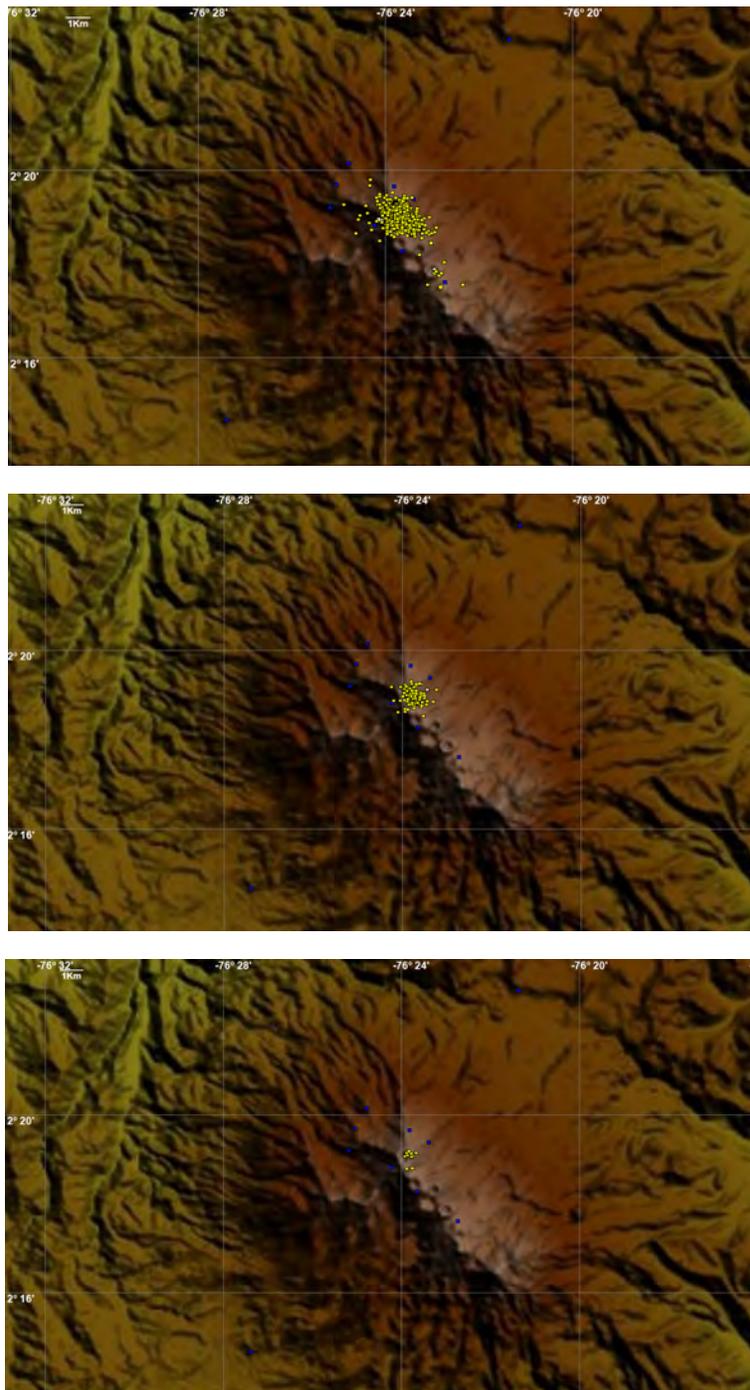


Figura 37: Mapa de localización de eventos sísmicos asociados a dinámica de fluidos en el volcán Puracé, durante el año 2014. *Arriba*: Mapa de localizaciones de eventos LP. *Centro*: Mapa de localizaciones de eventos TO. *Abajo*: Mapa de localizaciones de eventos TR. Los círculos amarillos indican los epicentros de los eventos y los cuadros azules la posición geográfica de las estaciones sísmicas.

La actividad sísmica del volcán Puracé durante el mes de septiembre estuvo caracterizada por un comportamiento estable, en el que no se presentaron incrementos destacados en la actividad sísmica, ni se registraron

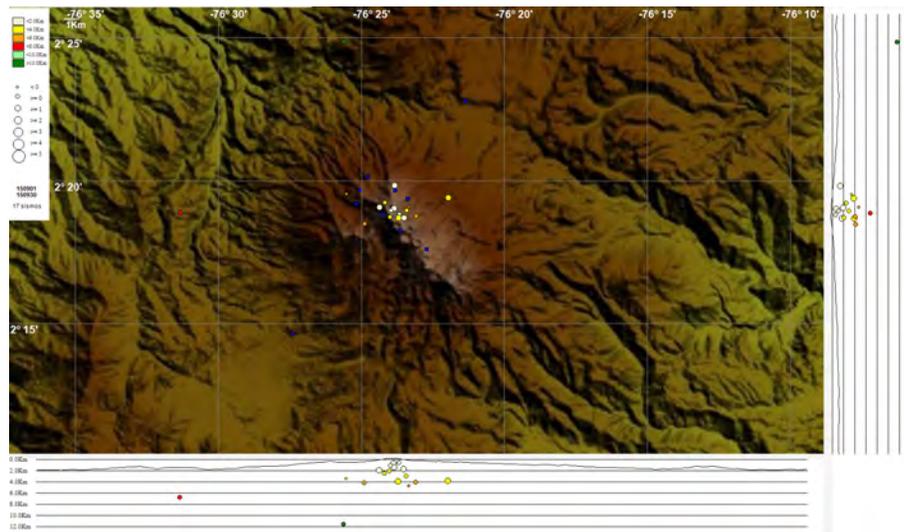


Figura 38: Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos del volcán Puracé. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud Local (M_L). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

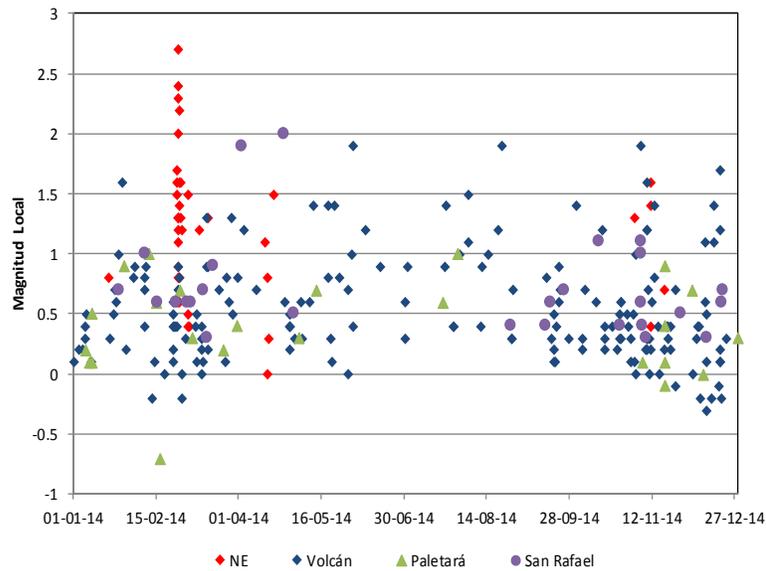


Figura 39: Relación entre los valores de magnitud y las diferentes zonas en las que se generó actividad volcano tectónica durante el periodo evaluado.

eventos con contenidos energéticos importantes. Las fluctuaciones en los acumulados mensuales de sismos según la fuente generadora que se evidencian al comparar los obtenidos para el mes de septiembre con los meses de enero a agosto de 2015, hacen parte de la dinámica volcánica y no indican variaciones a destacar en el equilibrio del sistema volcánico. Las localizaciones obtenidas para la sismicidad asociada tanto a dinámica de fluidos como a fracturamiento de roca, mostraron zonas de concentración epicentral para el periodo evaluado que se mantienen dentro de las características de las fuentes sismogénicas identificadas para el volcán Puracé.

2.3. DEFORMACIÓN

Durante el año 2014, se contó con el funcionamiento de cinco inclinómetros electrónicos, seis estaciones GNSS permanentes y se realizaron mediciones de control topográfico (EDM). La figura 40 muestra la distribución geográfica de las diferentes estaciones que conforman la red de vigilancia en deformación para el volcán Puracé.

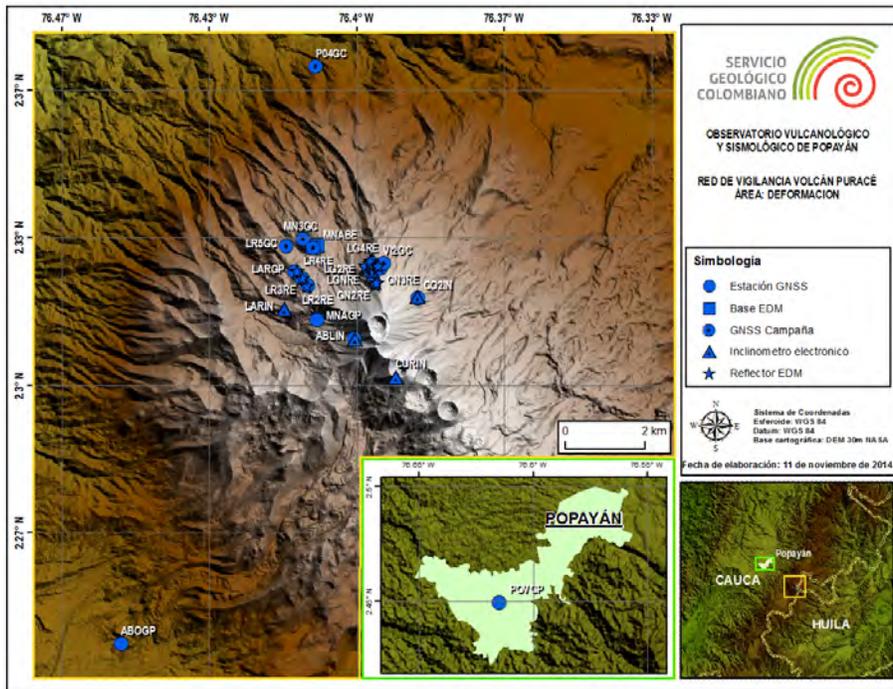


Figura 40: Red de vigilancia en deformación del volcán Puracé.

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 (norte y este); esto es debido a que su instalación física es a nivel superficial y por ello están expuestos a agentes ambientales que generan 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 generando líneas base de comportamiento en cada sensor y al respecto se informa lo siguiente:

Durante el año 2014 la red de inclinómetros del volcán Puracé registro un ligero proceso deformativo asociado a un posible proceso inflacionario del edificio volcánico. Este comportamiento fue evidenciado notoriamente hasta octubre de 2014, aunque en algunos equipos el cambio se registró en un periodo menor de tiempo. Sin embargo, en el inclinómetro Curiquina, se observa un nuevo registro desde mediados de octubre hasta el fin de año, este último comportamiento no ha presentado correlación con la actividad sísmica del volcán y tampoco se ha visto evolucionar en los demás equipos de la red. En las figuras 41, 42, 43, 44 y 45 se aprecian las tendencias de los inclinómetros anteriores registradas hasta diciembre de 2014.

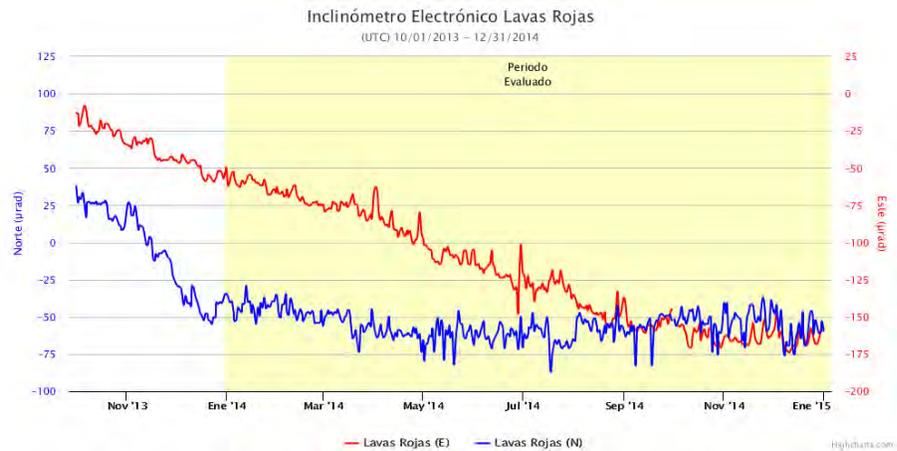


Figura 41: Comportamiento del inclinómetro electrónico Lavas Rojas a diciembre de 2014.

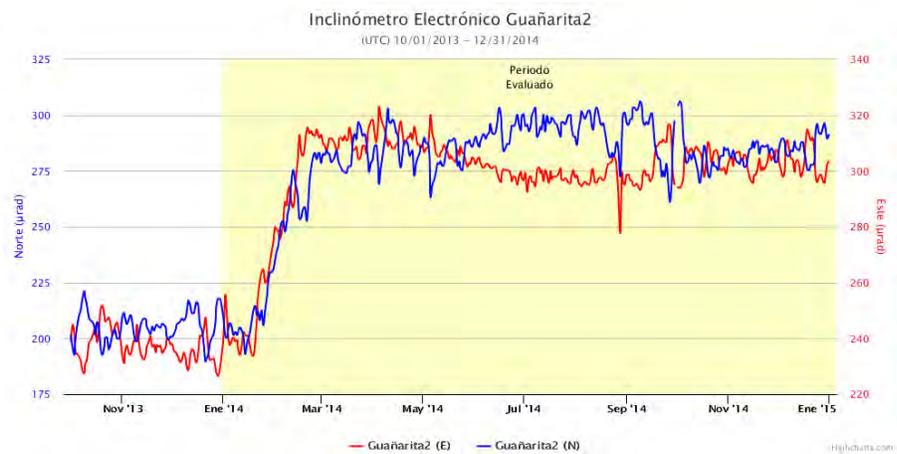


Figura 42: Comportamiento del inclinómetro electrónico Guañarita a diciembre de 2014.

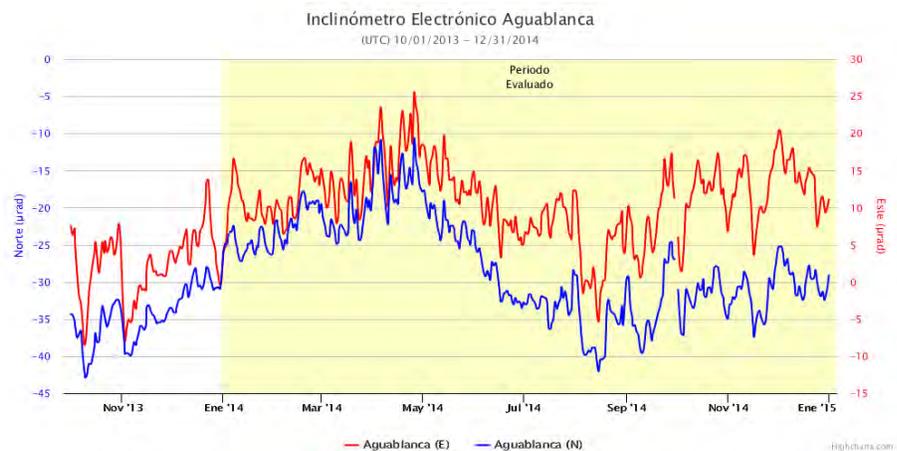


Figura 43: Comportamiento del inclinómetro electrónico Agua Blanca a diciembre de 2014.

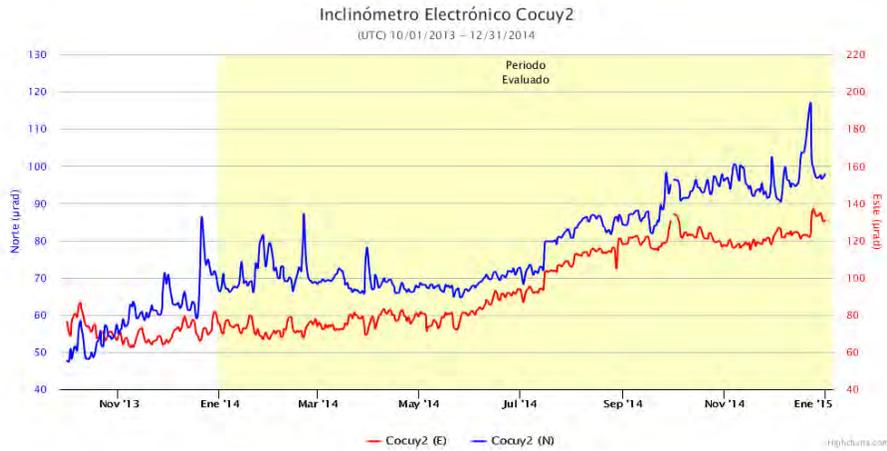


Figura 44: Comportamiento del inclinómetro electrónico Cocuy2 a diciembre de 2014.

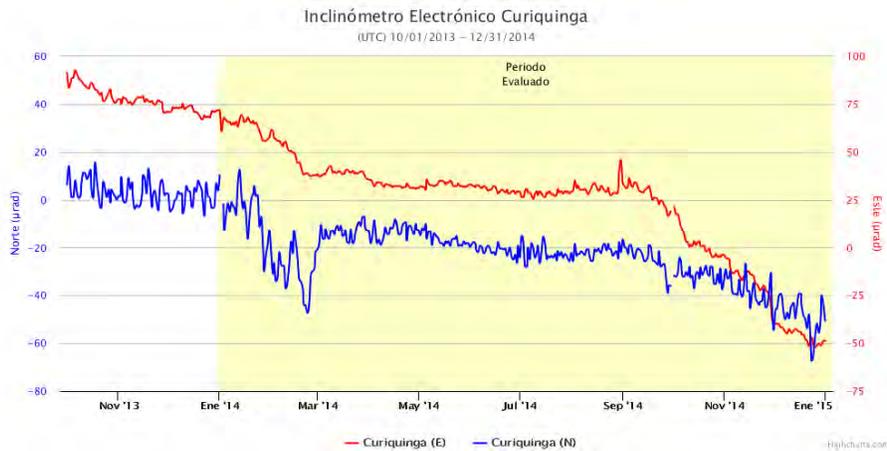


Figura 45: Comportamiento del inclinómetro electrónico Curiquinga a diciembre de 2014.

Realizando modelamiento inverso de los datos registrados por los inclinómetros del volcán Puracé, los resultados arrojan como posible fuente generadora de dichos cambios, una fuente esférica localizada a aproximadamente 1.2 km al Oeste del cráter del volcán. Por otra parte, el otro modelo que sigue en buen ajuste al anterior, es una posible fuente en forma de dique localizado en el costado Oeste del cráter y en dirección sur noroeste. Este proceso deformativo no generó mayores cambios en la actividad volcánica, esto debido a la pequeña magnitud de los cambios registrados por los inclinómetros y a la discontinuidad del proceso. Durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, se observó un ligero incremento en la sismicidad tipo VT y LP, la cual se caracterizó por ser de muy bajo aporte energético y que puede estar asociada como respuesta al cambio de esfuerzos que ha experimentado el volcán con el proceso deformativo registrado. El resultado del modelamiento de la información se puede ver en las figuras 46, 47 y 48.

2.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

Los resultados para las seis estaciones GNSS permanentes, derivados del procesamiento diferencial de los datos, evidencian que en sus componentes norte, este y altura, muestran estabilidad para todas las estaciones GNSS del edificio volcánico. Se resalta que este tipo de equipos detectan procesos deformativos mayores a ± 5 mm, esto evidencia también, que el proceso deformativo registrado por los inclinómetros durante el año 2014 fue pequeño y quedó inmerso dentro del ruido de los mismos. Sin embargo, en el momento que las

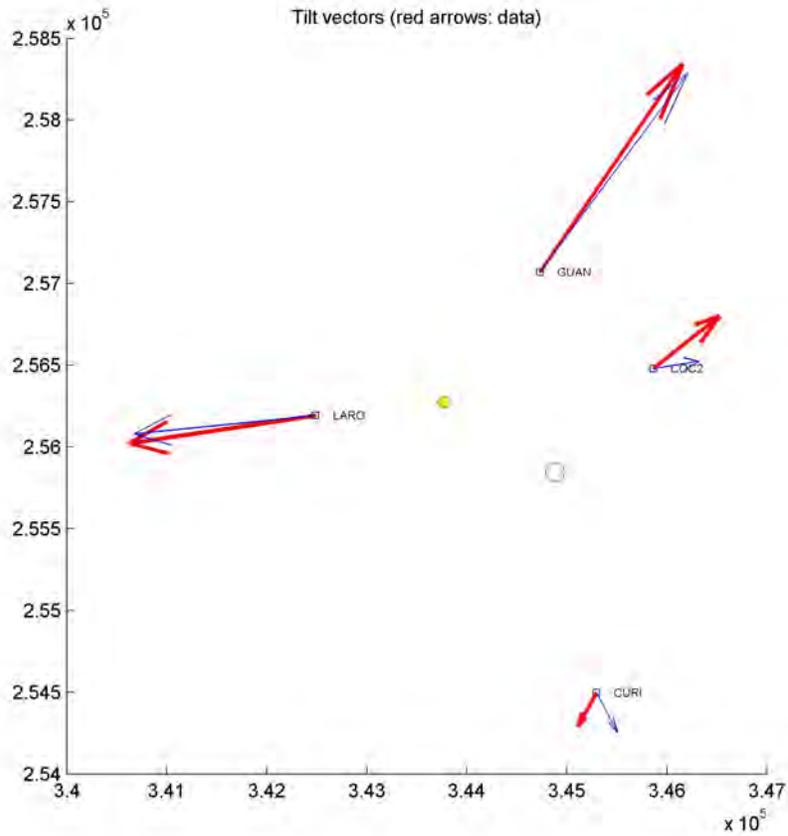


Figura 46: Vectores resultantes reales y sintéticos para una fuente esférica. El círculo amarillo indica la mejor posición para la fuente, los vectores rojos son los datos reales y los vectores azules son los datos sintéticos.

deformaciones sean más grandes, se espera que con estos instrumentos se puedan hacer modelamientos más precisos porque la información que brindan es en tres componentes.

Durante el mes de septiembre se tiene la operatividad de seis estaciones GNSS permanentes. Los resultados para dichas estaciones derivados del procesamiento diferencial evidencian estabilidad para las componentes norte, este y altura. En las figuras 49, 50, 51, 52, 53 y 54 se puede observar los registros de las estaciones, Lavas Rojas, Guañarita, Agua Blanca, Cocuy2 y Agua Bonita, hasta diciembre de 2014.

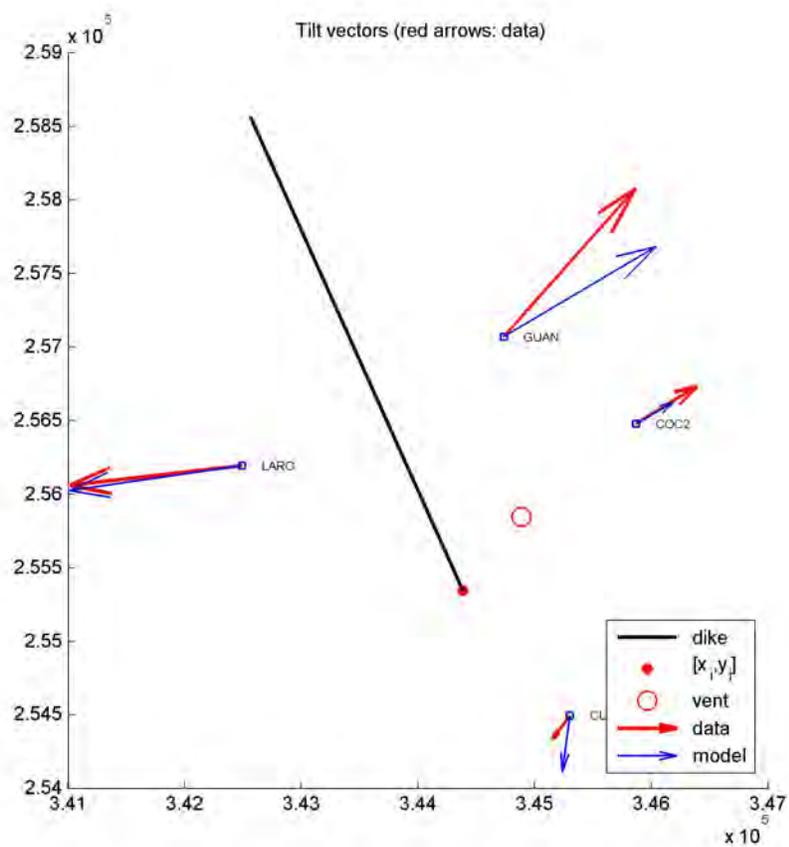


Figura 47: Vectores resultantes reales y sintéticos para una fuente tipo Dique. La línea negra, indica la localización de la fuente, los vectores rojos son los datos reales y los vectores azules son los datos sintéticos.

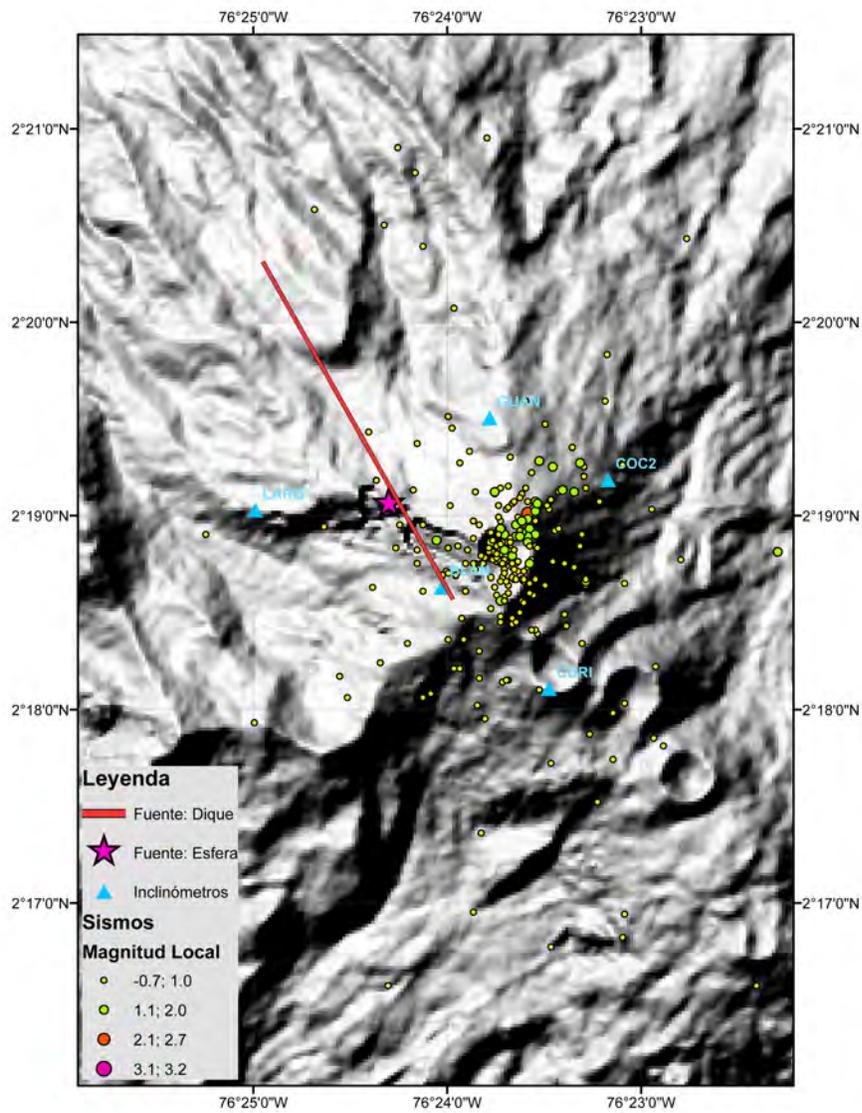


Figura 48: Localización de los dos tipos de fuentes en conjunto con la sismicidad tipo VT registrada en la zona del cráter activo.

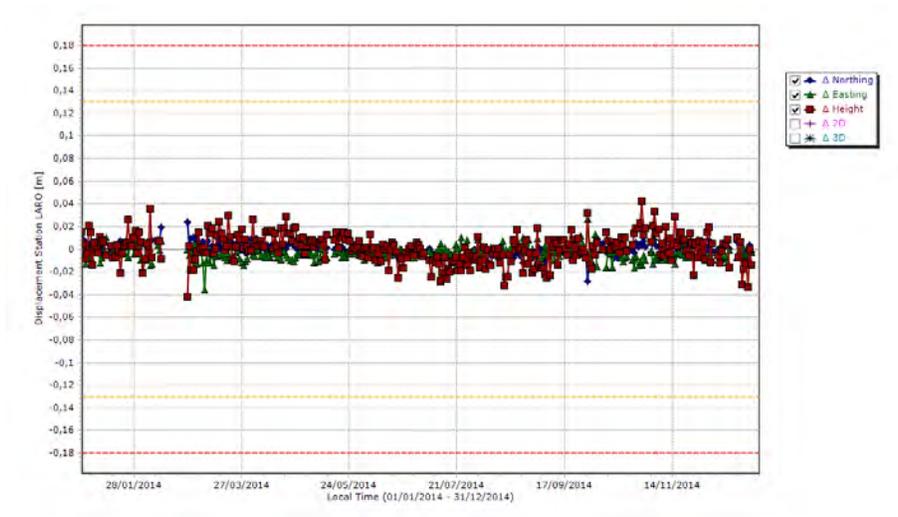


Figura 49: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Lavas Rojas a diciembre de 2014.

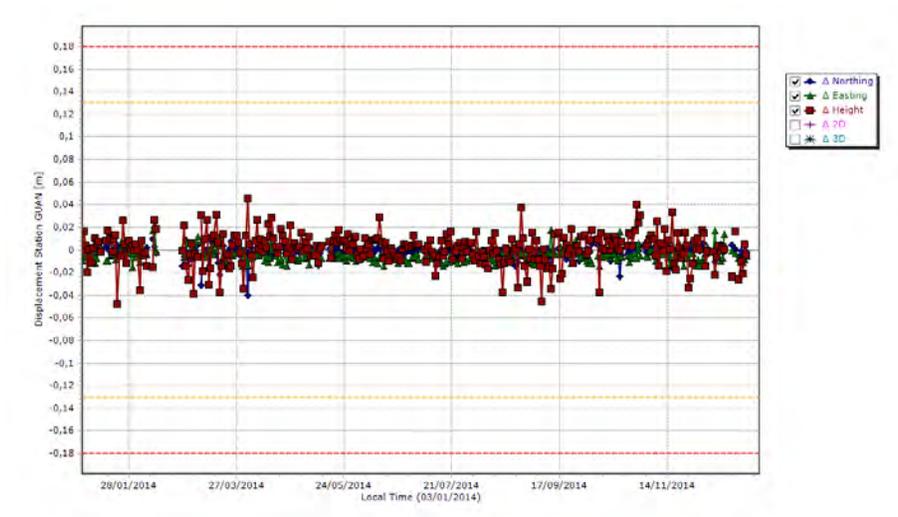


Figura 50: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Guañarita a diciembre de 2014.

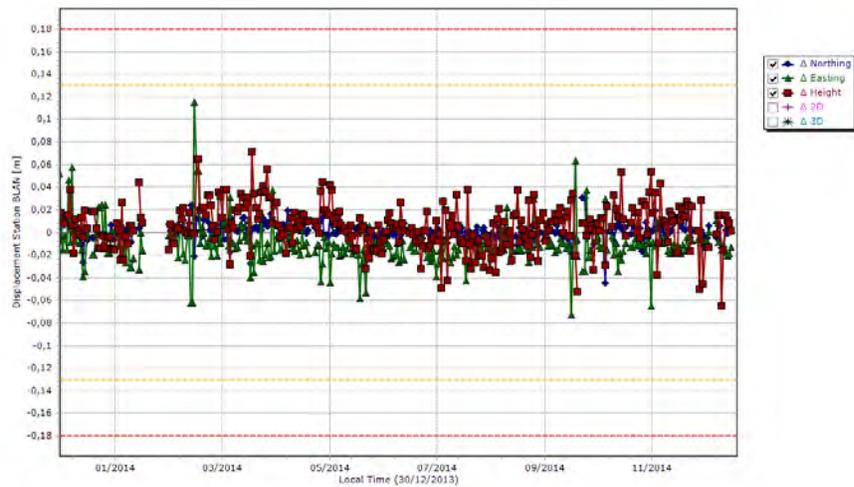


Figura 51: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Blanca a diciembre de 2014.

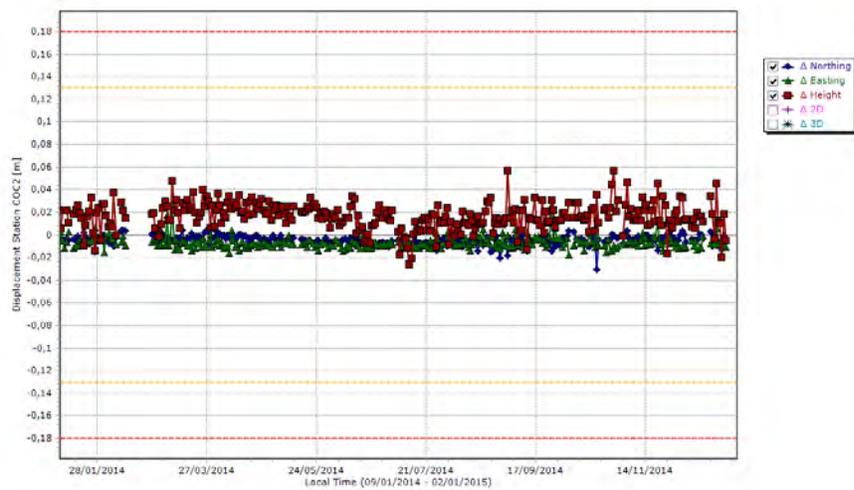


Figura 52: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Cocuy2 a diciembre de 2014.

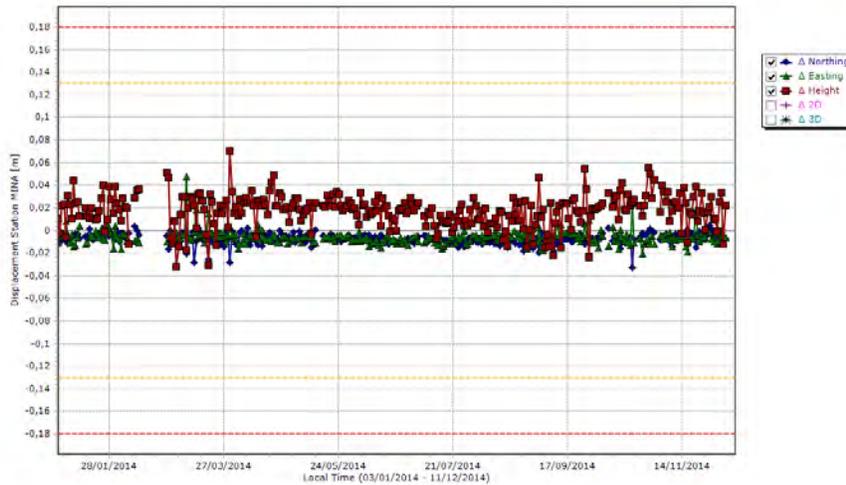


Figura 53: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Mina a diciembre de 2014.

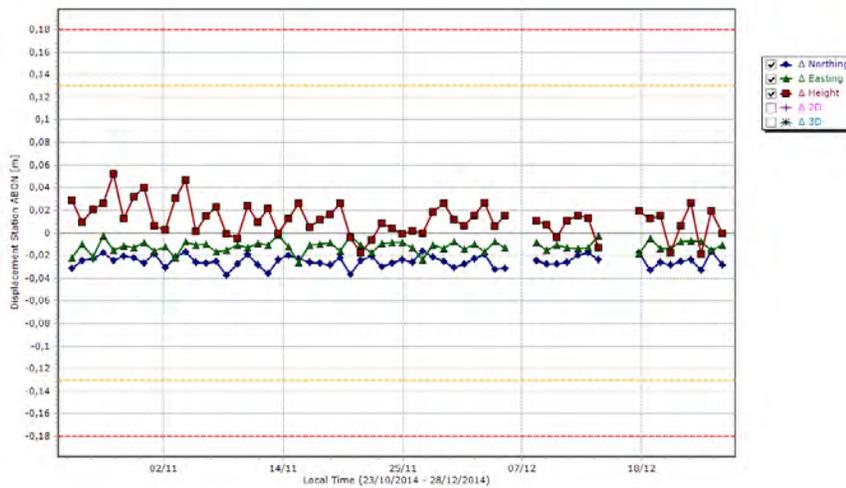


Figura 54: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Bonita a diciembre de 2014.

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.

Durante el año 2014 sólo se realizaron dos campañas EDM, ambas ejecutadas en el primer trimestre. Los resultados obtenidos muestran variaciones dentro del margen de precisión del equipo; por consiguiente, se puede inferir que no se están presentando procesos deformativos considerables en el volcán hasta el momento de ocupación de las líneas EDM.

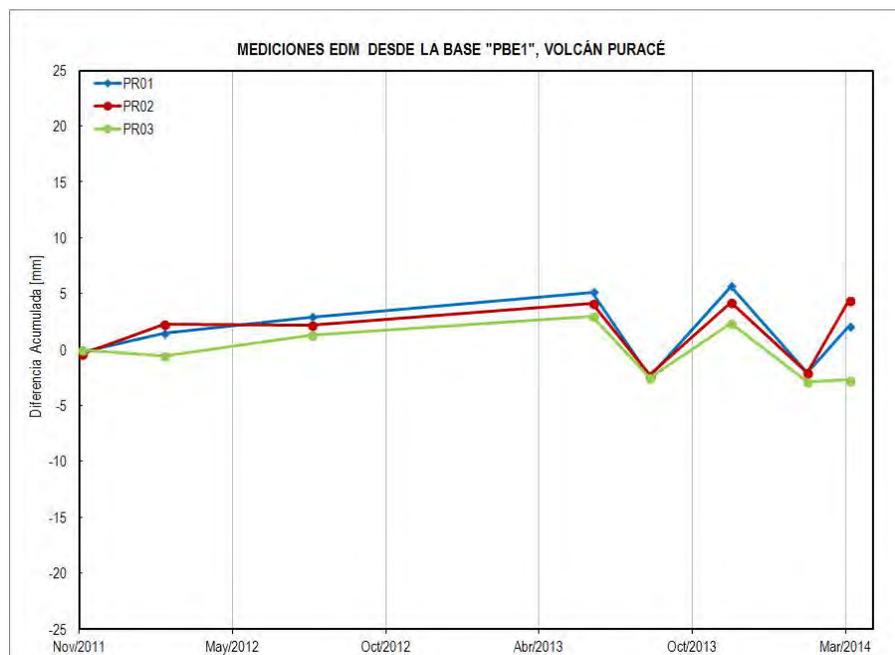


Figura 55: Línea base de mediciones EDM en el volcán Puracé.

2.3.4. Interferometría con radar

El interferograma obtenido por el proyecto UAVSAR, para el volcán Puracé en el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014 evidencia que no hay un proceso deformativo considerable o superior al orden centimétrico, como para ser detectado con esta técnica. El interferograma se aprecia en la figura 56.

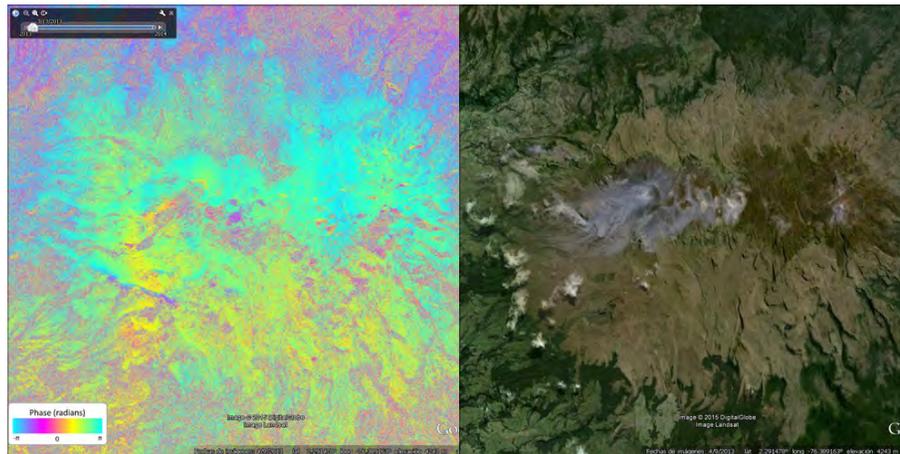


Figura 56: Interferograma para el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014, publicado por el proyecto UAVSAR (<http://uavsar.jpl.nasa.gov/>) para el volcán Puracé.

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 Anambío y Cerro Sombrero. Esta última instalada el 22 de octubre al Suroeste de la Cadena volcánica Los Coconucos, a una distancia de 18 *km* y a una altura de 3331 *msnm*. El mapa de la figura 57 permite apreciar la distribución geográfica de dichas cámaras. 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 así como los posibles cambios que puedan ocurrir sobre la superficie del volcán Puracé, así como en la cadena volcánica Los Coconucos.

Durante el año 2014 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 fenómenos meteorológicos (vientos fuertes, precipitaciones intensas, heladas, granizadas, etc).

2.4.1. Cámara web Mina

Está ubicada a 2.5 *km* al noroccidente del cráter Puracé. En las imágenes captadas durante el año 2014, fue posible observar desgasificación normal del sistema volcánico en pequeñas columnas de color blanco, emitidas desde el campo fumarólico lateral (ver figura 58). 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 promedio hasta de 7.8 *m/s*, equivalentes a 28 *km/h*. (ver figuras 59 y 60).

Desde el ángulo que cubre esta cámara 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 2014 se muestran en las figuras 61 y 62

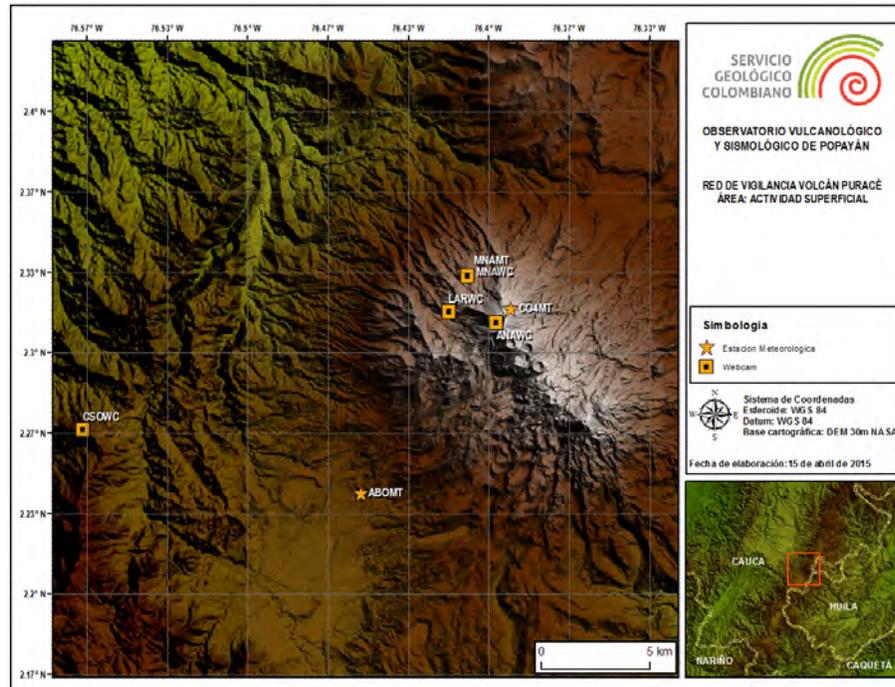


Figura 57: Mapa de localización de las cámaras web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Puracé.



Figura 58: Detalle del campo fumarólico lateral del volcán Puracé monitoreado por cámara web.

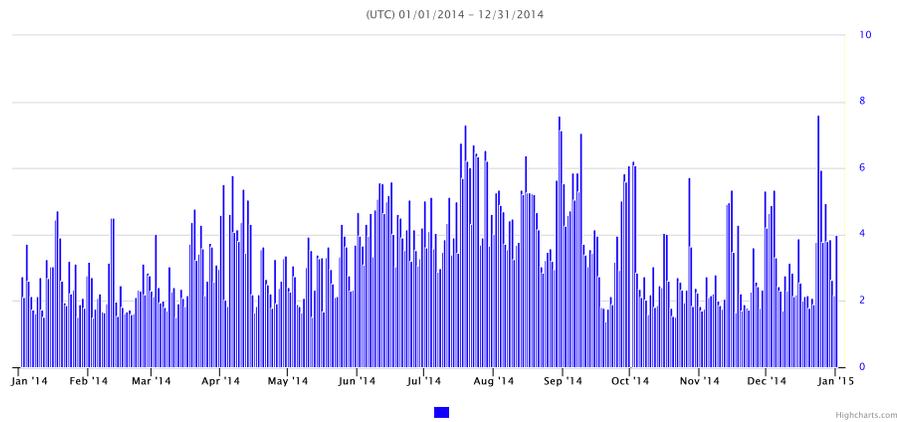
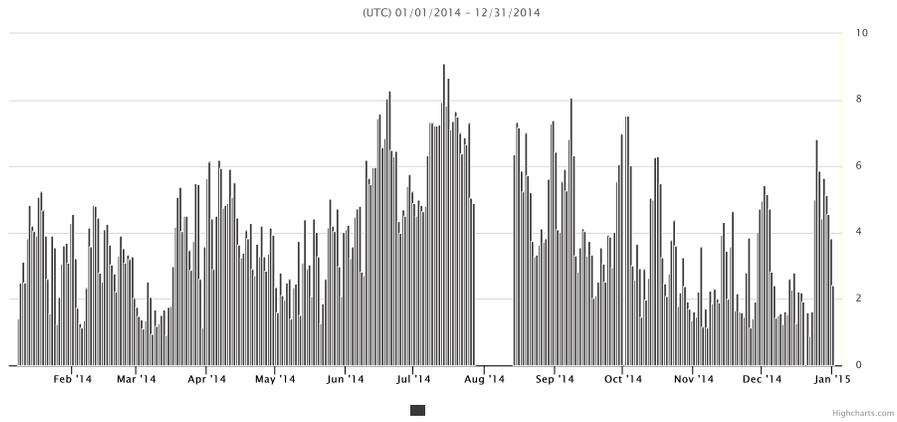


Figura 59: Histograma de velocidades del viento reportadas por el anemómetro de Mina y Modelo pronostico WRF – 2014.

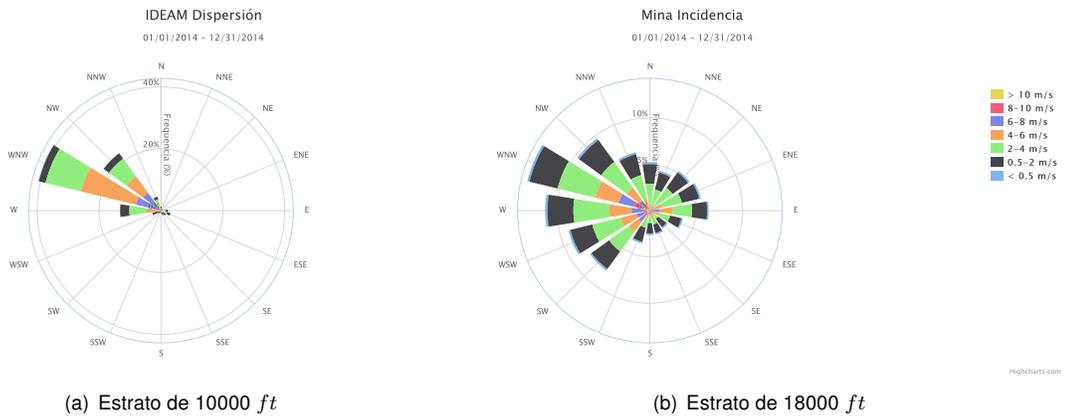


Figura 60: Diagrama de Rosa de los vientos, anemómetro de Mina y Modelo pronóstico WRF. Volcán Puracé, 2014.



Figura 61: Imágenes de la estación web Mina en el primer semestre de 2014.



Figura 62: Imágenes de la estación web Mina en el segundo semestre de 2014.

2.4.2. 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 2014 se pudieron apreciar algunas emisiones importantes, en donde se alcanza a apreciar como la fumarola lateral conserva altura; ocasionalmente se evidencia escarcha depositada sobre la superficie del volcán Puracé y el volcán Curiqinga. Las imágenes más representativas de este período se aprecian en las figuras 63 y 64.



Figura 63: Imágenes obtenidas en la cámara web Lavas Rojas durante el primer semestre de 2014.



Figura 64: Imágenes obtenidas en la cámara web Lavas Rojas durante el segundo semestre de 2014.

2.4.3. Cámara web Anambío

Esta cámara localizada a 0.5 *km* en dirección sur-occidental respecto al cráter interno, permite obtener 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 65).



Figura 65: Detalle del campo visual cámara web Anambío instalada en septiembre de 2013 en el cráter del volcán Puracé.

Para el primer semestre de 2014 se evidenciaron algunas emisiones desde el campo fumarólico interno, generalmente en columnas de color blanco (gases y vapor de agua). Igualmente durante los meses de mayo, octubre y noviembre se presentaron lluvias localizadas en la zona (fuertes precipitaciones, escarcha, nevadas). En la figura 66 se pueden apreciar algunas imágenes destacadas por la cámara Anambío en el 2014.



Figura 66: Cámara Anambio ubicada en el cráter del volcán Puracé. 2014.

2.4.4. Cámara web Cerro Sombrero

Desde esta cámara instalada para el segundo semestre del 2014 fue posible obtener buena línea de vista panorámica de la Cadena volcánica Los Coconucos, fue posible apreciar las emisiones del campo fumarólico lateral en el volcán Puracé, tal como se aprecia el 30 de octubre del 2014 en horas de la mañana. Ver figura 11.



Figura 67: Cámara Cerro Sombrero, Cadena volcánica Los Coconucos. Imagen panorámica del 30 de octubre de 2014.

2.5. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

El volcán Puracé cuenta con dos estaciones para la detección de potenciales eléctricos espontáneos: Cónдор (CONPE) y Cocuy2 (CO2PE), así como con dos magnetómetros utilizados para el monitoreo del campo magnético local: el primero localizado en el sector denominado Laguna (LGNMG), y el segundo llamado Agua Blanca (ABLMG). La figura 68 muestra la ubicación geográfica de dichos sensores.

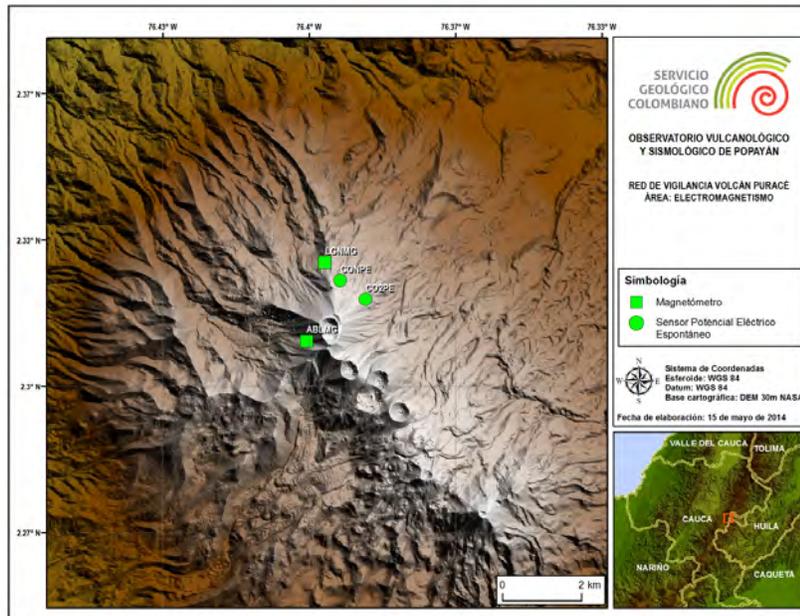


Figura 68: Red de monitoreo de campos electromagnéticos del volcán Puracé.

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 PEE: una por el sistema hidrotermal (para volcanes activos) y otra por el sistema hidrogeológico. Para las mediciones de PEE, la estación Cocuy2 cuenta con cuatro sensores de potencial, un par orientado radialmente y otro tangencialmente respecto del cráter del volcán Puracé. Por su parte, la estación Cónдор posee un par de sensores orientados tangencialmente al cráter del volcán. Los datos adquiridos por las estaciones de PEE, se correlacionan con los valores de pluviosidad detectados por la estación climática Mina, la cual se localiza a 2.1 y 3.4 km al NO de las estaciones Cónдор y Cocuy2, respectivamente, además de la estación climatológica Cocuy 4 instalada el 21 de noviembre de 2014, que está ubicada a 0.48 km al SO de Cocuy2 y a 0.7 km al SE de Cónдор.

La estación Cónдор durante el año 2014 (figura 69), presentó un comportamiento estable durante casi todo el primer semestre, a pesar de no tener registro entre el 20 de febrero y el 15 de mayo, ver figura ???. Sin embargo debido al cambio de los electrodos el mes de junio, se ha venido haciendo seguimiento a los cambios detectados por esta estación, pues los valores arrojados por la misma pueden corresponder a un periodo de estabilización del equipo. Los cambios más representativos en lapsos cortos de tiempo (de 1 a 3 días), relacionados con días de alta pluviosidad del primer semestre del 2014, se resumen en la tabla 7 y se resaltan con líneas rojas en la figura 70.

Del registro de la estación Cocuy2 durante el año 2014, es posible concluir que presentó un comportamiento estable, en el que se observaron variaciones día noche, además de variaciones asociables a los cambios en

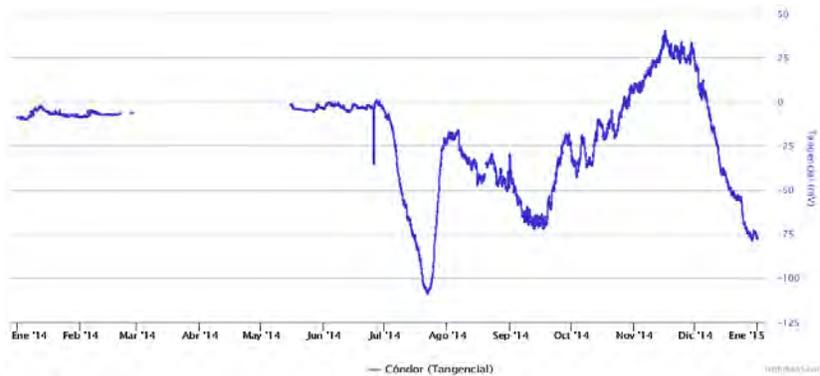


Figura 69: Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Córdor durante el año 2014.

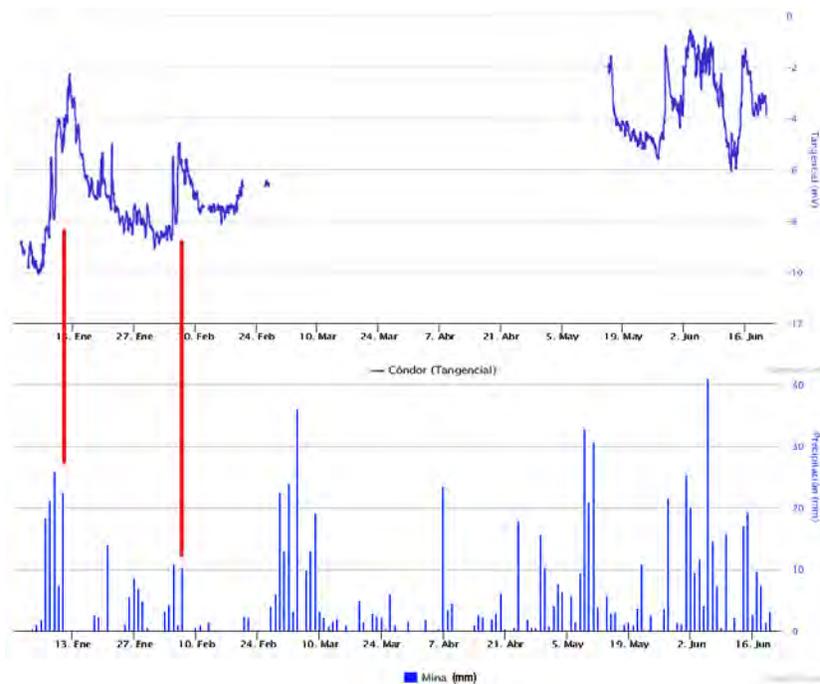


Figura 70: Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Córdor durante el primer semestre del año 2014.

Fecha	Variación en los PEE Estación Córdor	Pluviosidad acumulada para el período (mm). Estación Mina
7 a 12 de enero	Desde -8.5 a -2.3 $mV = 10.8$	66
4 a 6 de febrero	Desde -8.6 a -5.1 $mV = 3.5$	26

Tabla 7: Variaciones más relevantes, registradas en la estación de PEE Córdor, durante el primer semestre de 2014

la precipitación en la zona, dentro de las que se resaltan las de la tabla 8, y que se señalan con líneas rojas en la figura ??.

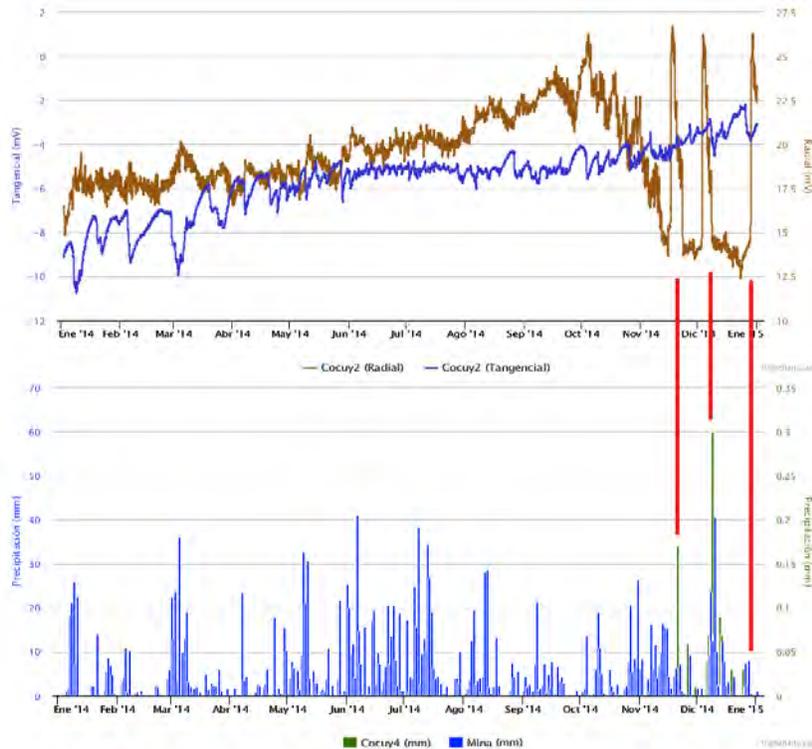


Figura 71: Arriba: Potencial eléctrico espontáneo y temperatura registrada por la estación Cocuy2 durante los meses de enero de 2014 y diciembre de 2014. Abajo: Valores de pluviosidad detectados por las estaciones climáticas Mina y Cocuy4 para el mismo periodo.

Fecha	Variación en los PEE Estación Cocuy2 (Radial)	Pluviosidad acumulada para el período (mm). Estación Mina
14 a 17 de noviembre	Desde 15 a 26 mV = 11	31
3 a 5 de diciembre	Desde 14 a 23 mV = 9	32
28 a 29 de diciembre	Desde 15 a 26 mV = 11	18

Tabla 8: Variaciones más relevantes, registradas en la estación de PEE Cocuy2, durante el año 2014

2.5.2. Magnetometría

Durante el año 2014 el magnetómetro Laguna mostró un comportamiento estable (ver figura 72). Se observaron ciclos de oscilaciones día-noche debidos a las variaciones de radiación solar, además 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, y los datos de Campo Magnético Interplanetario (IMF). En la figura 72¹ se señalan, con líneas rojas, algunas de las perturbaciones temporales más representativas: los días 19 y 27 de febrero, 12 de abril, 28 de agosto y 12 de septiembre.

Por su parte, el magnetómetro Agua Blanca presentó un comportamiento similar.

La ocurrencia de eventos como ascenso de material magmático y emisiones de ceniza a la atmósfera entre otros fenómenos asociados a cambios en la actividad de un volcán, pueden constituir variaciones en el campo

¹Se debe tomar en cuenta que en las gráficas de la figura 72, los datos presentados son los datos originales sin la corrección del modelo IGRF11.

magnético local, razón por la que el método geofísico que mide el campo magnético local se ha implementado en la vigilancia volcánica. Durante el mes de septiembre el magnetómetro Laguna mostró un comportamiento estable (ver figura 72). Se observaron ciclos de oscilaciones día-noche debidos a las variaciones de radiación solar. Los días 3, 7, 9, 11 y 20 de septiembre se presentaron 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, y los datos de Campo Magnético Interplanetario (IMF). Así mismo, se resalta que algunos de los valores más altos durante el mes están relacionados con la radiación solar y sus efectos locales. Por su parte, el magnetómetro Agua Blanca presentó un comportamiento similar (ver figura 72)

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 correlación con los demás parámetros de monitoreo volcánico empleados, y permita identificar cambios posiblemente asociados a la actividad volcánica.

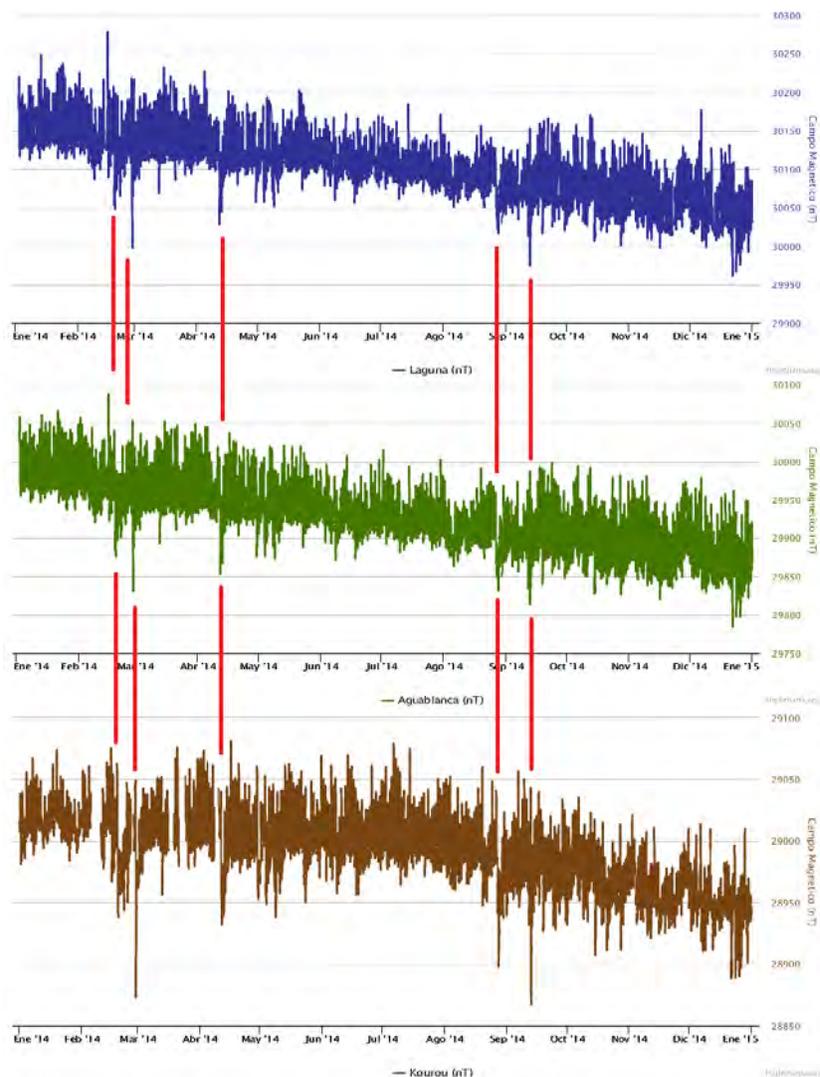


Figura 72: Mediciones magnetométricas del volcán Puracé durante el año 2014. Arriba: Magnetómetro de Laguna. Al centro: Magnetómetro de Agua Blanca. Abajo: Magnetómetro de Kourou en la Guiana Francesa.

favorable y es abundante, por lo que se convierte en el isótopo más útil para estudios hidrogeológicos. En las labores de monitoreo volcánico se saca provecho de este comportamiento para registrarlo en superficie. Por lo anterior, se puede inferir 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 en zonas donde existe una alta probabilidad de movimiento de fluidos y generación de fracturas.

Durante el año 2014 se recolectaron datos en las estaciones no telemétricas de radón permanente en campo lejano del volcán, mediante el método que emplea cámaras ionizantes E-perm. En la figura 74 se pueden observar algunos cambios en concentración de algunas estaciones, los cuales se encuentran en el rango de normalidad comparada con datos históricos registrados en la línea base, las estaciones que registraron la mayor concentración de gas radón durante el periodo evaluado fueron: La Mina con 1389 PCi/L entre el periodo septiembre-octubre y San Juan con 1326 PCi/L entre el periodo agosto-septiembre.

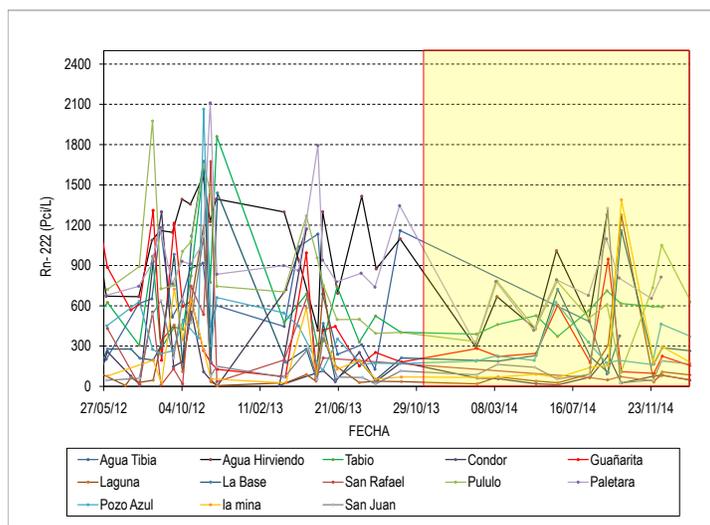


Figura 74: Variación de la concentración de Radón en suelo en las estaciones isotópicas no telemétricas permanentes del volcán Puracé, Año 2014. El recuadro amarillo indica el periodo evaluado en el presente informe.

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 alfa contenidas en un volumen específico por minuto a través de un contador de partículas (Sensor BT45N BARASOL), de manera que al recibir los datos se determine la concentración en unidades de picoCurio 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 día, con márgenes de error bajos.

En la figura 75, 76 y 77 se ilustran las variaciones en el tiempo de las concentraciones de gas radón registradas por las estaciones telemétricas Guañarita, Cráter y Cocuy3 respectivamente. La mayor concentración durante el periodo evaluado se da en la estación Guañarita, con un valor de 1227.11 pCi/L , ocurrido el 13 de noviembre de 2014, estas variaciones están relacionadas con la actividad sísmica e hidrotermal del edificio volcánico.

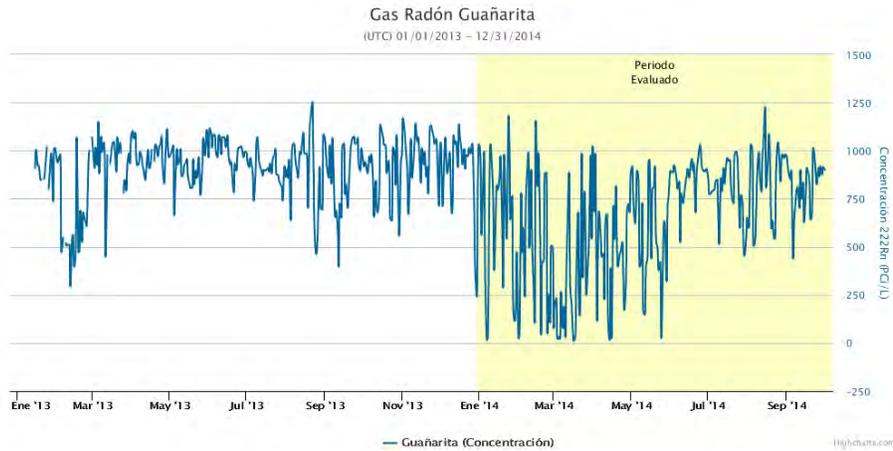


Figura 75: Variación de la concentración de Radón en suelo de la estación Guañarita. Año 2014.

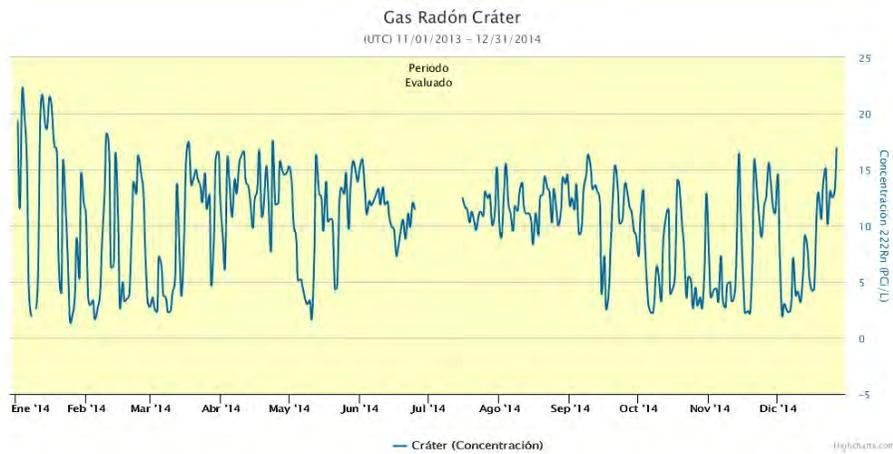


Figura 76: Variación de la concentración de Radón en suelo de la estación Cráter. Año 2014.

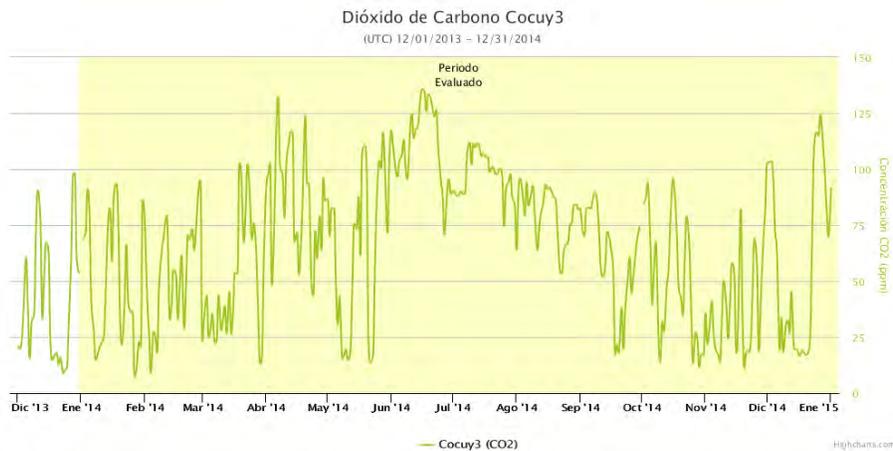


Figura 77: Variación de la concentración de Radón en suelo de la estación Cocuy3. Año 2014.

2.6.2. Medidas de Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas incoloro e inodoro, ligeramente soluble en agua, y tiene una densidad de 1.799 g/L (Lide, 2005), su origen en sistemas geotermales se debe a las reacciones químicas derivadas de la actividad magmática que se dan en algunos minerales, en rocas carbonatadas y sedimentarias no carbonatadas y en la materia orgánica presente en sedimentos la cual representa la principal fuente de emisión en sistemas volcánicos (Fridriksson, 2009). Debido a esta relación con los procesos que dan origen al vulcanismo, y con el fin de comprender la interacción de su sistema con la superficie, este gas es monitoreado en el volcán Puracé.

En las figuras 78, 80 y ?? se ilustran las variaciones en el tiempo de las concentraciones de CO_2 registradas por las estaciones telemétricas Cráter, Cocuy3 y Anambío. Los datos registrados evidencian cambios durante algunos periodos en el año, siendo 515.85 ppm el valor más alto registrado para el período 2014, el cual ocurrió el día 1 de abril en la estación Cráter. La estación Anambío en el mes de septiembre presentó inconvenientes de tipo electrónico y hasta la fecha continúa con la falla.

Las variaciones anteriormente mencionadas están relacionadas con la actividad sísmica y con procesos de desgasificación, los cuales en general también han sido reportados como de bajo nivel de actividad para el mismo período de tiempo.

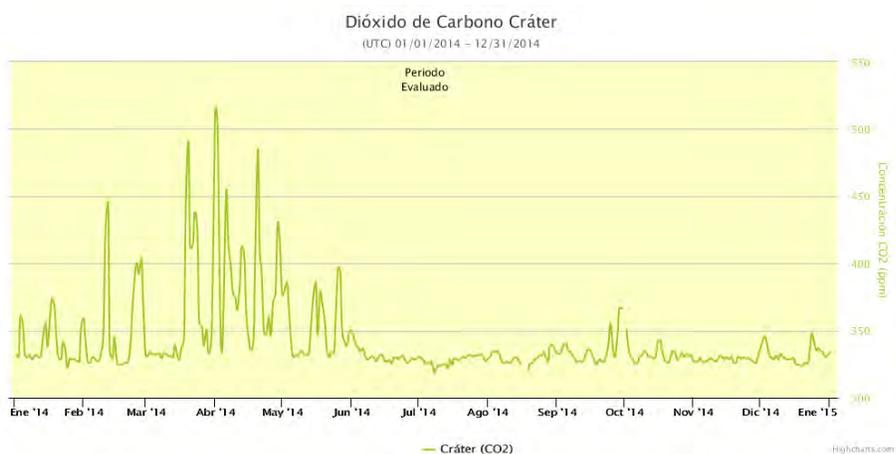


Figura 78: Variación de la concentración de CO_2 en suelo de la estación Cráter. Año 2014.



Figura 79: Detalle de la variación de la concentración de CO_2 en suelo de la estación Cráter. Año 2014.

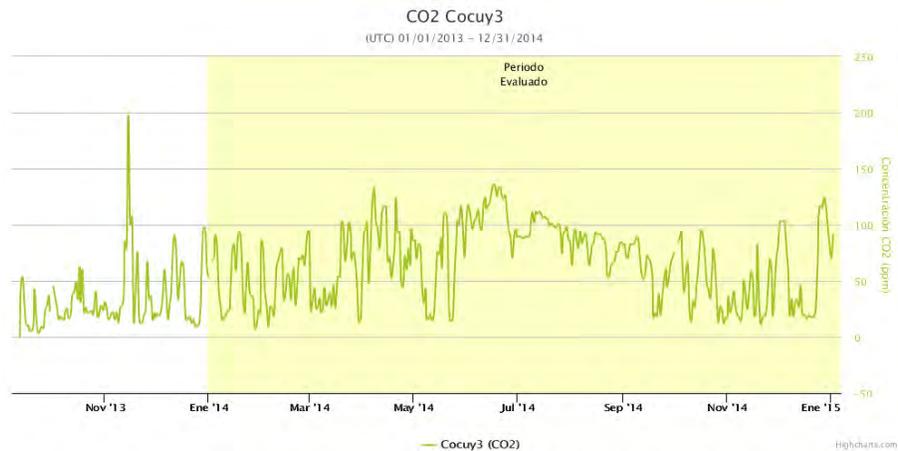


Figura 80: Variación de la concentración de CO_2 en suelo de la estación Cocuy3. Año 2014.

2.6.3. Fuentes Termales

Las áreas termales están formadas por aguas que se calientan al circular subterráneamente por las fisuras de las rocas y que emergen a temperaturas superiores a la de la atmósfera, y por minerales disueltos en dichas aguas que a menudo se depositan alrededor del manantial y crean formas fantásticas, a veces llenas de color. Dichos minerales disueltos no son más que lodos termales formados a partir de la descomposición de la roca encajante (huésped) por el contenido de ácidos que hay en el vapor que emana, que pueden ser comparados con la superficie de una olla en ebullición constantemente agitada por las burbujas y borbotones que forma el vapor al escapar. (Tomado y modificado de Instituto Geológico y Minero de España, 1985).

Las fuentes termales, por lo general, se encuentran a lo largo de líneas de fallas geológicas y/o adyacentes a estructuras volcánicas con sistemas activos, ya que a través de los planos de fractura pueden introducirse aguas y posteriormente calentarse al llegar a cierta profundidad, antes de subir en forma de vapor o de agua caliente. Las fuentes termales asociadas al volcán Puracé que actualmente están siendo medidas térmica y fisicoquímicamente son: Guarquelló, Pozo Azul 1, Pozo Azul 2, Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina (Socavón), La Mina 1 (Socavón), Hornos 3, Hornos 7, San Juan, Pululó y Versalles (ver figura 81).

Las figuras 82, 83 y 84, y las tablas 9, 10 y 11 muestran los valores de los parámetros fisicoquímicos tomados directamente en las fuentes termales durante año 2014. Entre los parámetros fisicoquímicos analizados se tiene el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (μS) y la temperatura ($^{\circ}C$), el primero en ser mencionado permite determinar la acidez de un líquido o fuente de agua, mientras que el segundo está relacionado con la presencia de sales en un medio acuoso, las cuales tienen la capacidad de transportar energía eléctrica.

Con los datos obtenidos de potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y temperatura se puede apreciar que se conservan los promedios mensuales registrados precedentemente para cada una de las fuentes termales.

2.6.4. Termometría

Las zonas con actividad volcánica permiten reacciones a altas temperaturas que liberan gases geotérmicos y por consiguiente relacionables con sistemas de alta liberación de calor, por lo tanto, es de importancia primordial conocer las variaciones en el comportamiento térmico bajo el cual tienen lugar dichas reacciones en los sistemas volcánicos. La aplicación de las diferentes metodologías de termometría sobre las surgencias termales, debe facilitar la detección de procesos físicos perturbadores y cambios composicionales y/o volumétricos de los gases en el sistema hidrotermal y en la estructura condicionante del mismo.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán



Figura 81: Imágenes de las fuentes termales muestreadas durante el año 2014.

Fuente Termal	Febrero		Marzo		Mayo		Junio	
	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)
La Mina1	1.39	9.79	1.54	9.66	1.49	10.6	1.47	10.74
La Mina2	–	–	1.49	10.86	1.52	9.45	1.49	9.51
Agua Hirviendo	6.32	12.02	6.51	11.7	6.57	11.61	6.43	12.06
Agua Tibia	6.14	8.2	6.42	8.15	6.27	8.18	6.33	7.97
San Juan	4.54	1.93	4.56	1.94	4.63	1.86	4.7	1.94
Pozo Azul1	5.44	1.19	4.9	2.71	5.78	1.12	5.94	1.08
Pozo Azul(ZA)	–	–	1.76	4.3	1.67	4.7	1.82	5.07
Hornos 3	3.31	3.76	3.53	3.86	3.52	3.85	3.5	4.19
Hornos 7	3.33	3.93	3.56	4.0	3.5	4.04	3.55	4.26
Versalles	5.96	36.1	6.6	2.34	6.19	2.08	6.05	1.97
Guarquelló	–	–	2.17	2.95	2.17	2.93	2.1	2.9
Pululó	–	–	2.02	4.31	2.01	4.19	2.04	4.19

Tabla 9: Potencial de hidrógeno y conductividad térmica para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé, febrero a junio de 2014

En el año 2014 se hizo seguimiento de las temperaturas que están siendo emitidas por las fuentes termales y por el campo fumarólico del volcán Puracé. Para ello, se utilizó la técnica indirecta de captura de imágenes térmicas, y la técnica de medidas directas con termocupla portátil.

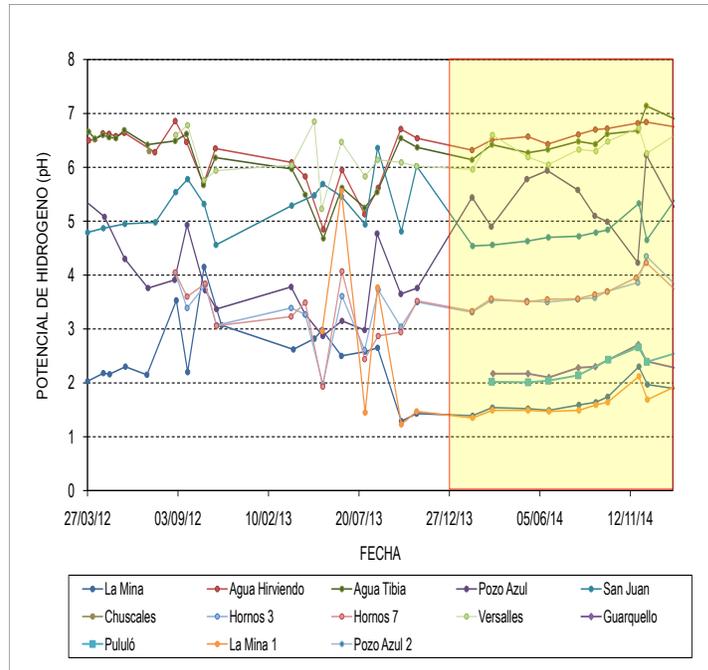


Figura 82: Variación del pH en fuentes termales del Volcán Puracé, año 2014. El recuadro amarillo indica el periodo evaluado en el presente informe.

Fuente Termal	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica (μS)
La Mina1	1.49	11.12	1.59	11.05	1.64	11.02	2.12	10.89	1.69	10.77
La Mina2	1.59	9.6	1.64	9.64	1.74	9.56	2.3	9.46	1.97	9.35
Agua Hirviendo	6.61	11.66	6.7	11.64	6.72	11.89	6.82	11.99	6.84	13.79
Agua Tibia	6.48	7.98	6.43	8.15	6.62	8.03	6.68	7.9	7.14	8.12
San Juan	4.72	1.87	4.79	1.83	4.84	1.84	5.33	1.9	4.65	1.89
Pozo Azul1	5.58	1.34	5.1	2.43	4.99	2.81	4.23	3.79	6.23	1.05
Pozo Azul(ZA)	2.06	3.1	2.15	2.74	2.32	2.51	2.77	1.2	3.3	1.32
Hornos 3	3.55	3.79	3.58	3.83	3.7	3.84	3.86	4.02	4.35	3.71
Hornos 7	3.56	3.87	3.64	3.88	3.69	3.87	3.95	4.1	4.23	3.95
Versalles	6.33	1.91	6.3	2.03	6.48	2.2	6.73	2.2	6.26	2.24
Guarquello	2.28	2.98	2.3	3.04	2.43	3.1	2.71	3.05	2.4	2.93
Pululó	2.14	4.16	2.23	4.23	2.4	3.1	2.66	3.51	2.39	3.61

Tabla 10: Potencial de hidrógeno y conductividad térmica para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé, agosto a diciembre de 2014

2.6.4.1. Captura de imágenes térmicas Se empleó una cámara tipo FLIR para captar la información térmica procedente de las manifestaciones volcánicas en superficie, este equipo termográfico permite obtener

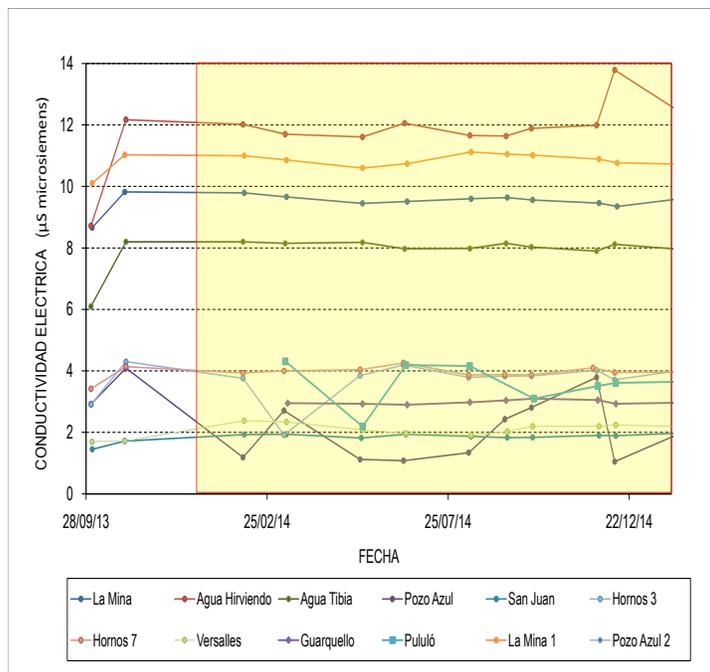


Figura 83: Variación de la conductividad eléctrica en las fuentes termales del Volcán Puracé, año 2014. El recuadro amarillo indica el periodo evaluado en el presente informe.

Fuente Termal	Temperatura (°C)									
	Feb	Mar	May	Jun	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
La Mina1	45	45.7	45.1	45	45.7	45.7	46.6	45.5	45.7	
La Mina2	50.9	50.8	50.8	50.8	45.7	49.9	50	49.9	49.8	
Agua Hirviendo	73	73.1	73.1	73.0	72.8	72.8	72.6	71	72.5	
Agua Tibia	54.1	53.9	54.1	53.4	53.2	53.7	52.3	52.6	53.5	
San Juan	34.8	34.9	34.6	34.5	34.4	34.4	35.4	34.4	34.3	
Pozo Azul1	43	85.4	40.2	43.5	49.2	76.4	80.9	86.2	40	
Pozo Azul(ZA)	88.6	89.1	86.4	88	87	84.6	85.4	84.8	76.8	
Hornos 3	79.6	79.4	80	78	80.7	80.8	80.7	75.6	76.8	
Hornos 7	79.8	77.6	78.1	88	78.2	78.8	85.4	77.7	77.6	
Versalles	36.1	36.3	34.7	33.7	33.2	34.4	34.8	34.1	35.3	
Guarquelló	–	23.6	23.4	23.6	23.5	23.5	23.4	24.2	23.3	
Pululó	–	26.9	26.9	27.0	26.1	26.5	26.6	25.6	23	

Tabla 11: Valores de la temperatura para las fuentes termales asociadas al volcán Puracé, Año 2014.

medidas de temperatura de objetos a distancia (sin entrar en contacto directo) partiendo 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). La radiación está relacionada con la temperatura de los cuerpos (ley de Planck) y permite

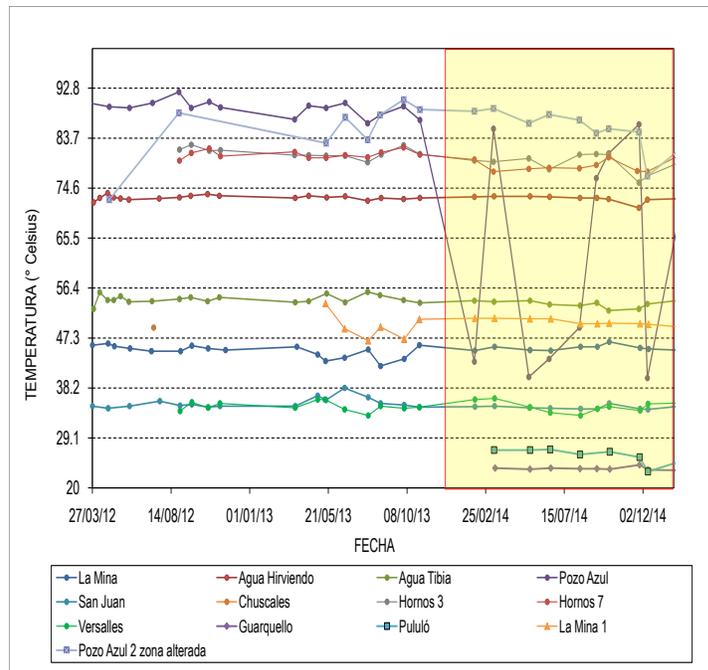


Figura 84: Variación de temperatura en las fuentes termales del volcán Puracé, Año 2014.

la creación de una matriz de puntos de temperatura a la que se le incorpora una paleta de colores, dando como resultado una imagen visible.

2.6.4.2. Medidas con termocupla portátil El termómetro utilizado para hacer la medida directa de la temperatura de las fuentes termales y el campo fumarólico es el denominado termopar portátil (también llamado termocupla) tipo K, que se puede definir como un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado de "medida" y el otro llamado de "referencia". Tiene un rango de temperatura de medida de -200 a $1372^{\circ}C$ y una sensibilidad de $41 \mu V/^{\circ}C$ aproximadamente.

La medida con termocupla de las temperaturas de las aguas termales y las fumarolas relacionadas con la actividad del volcán Puracé, se hicieron simultáneamente con la captura de imágenes térmicas en seis campañas durante el año 2014, de las cuales se presentan algunas imágenes en las figuras 85, 86 y 87. La clasificación de las aguas empleada, se basa en rangos de temperatura así: aguas frías $10 - 20^{\circ}C$, hipotermales $20 - 30^{\circ}C$, mesotermales $30 - 50^{\circ}C$ y termales con valores superiores a los $50^{\circ}C$. (Ellis, 1983)

Para tener una idea acerca de la calibración instrumental que hay entre la cámara termográfica (FLIR) y la TERMOCUPLA (termómetro termopar portátil tipo K), se presenta a continuación una tabla comparativa donde se observan las temperaturas obtenidas para cada una de las fuentes termales con los diferentes instrumentos mencionados anteriormente, además de la clasificación según el promedio entre la temperatura de las medidas directas y las indirectas (tabla 12).

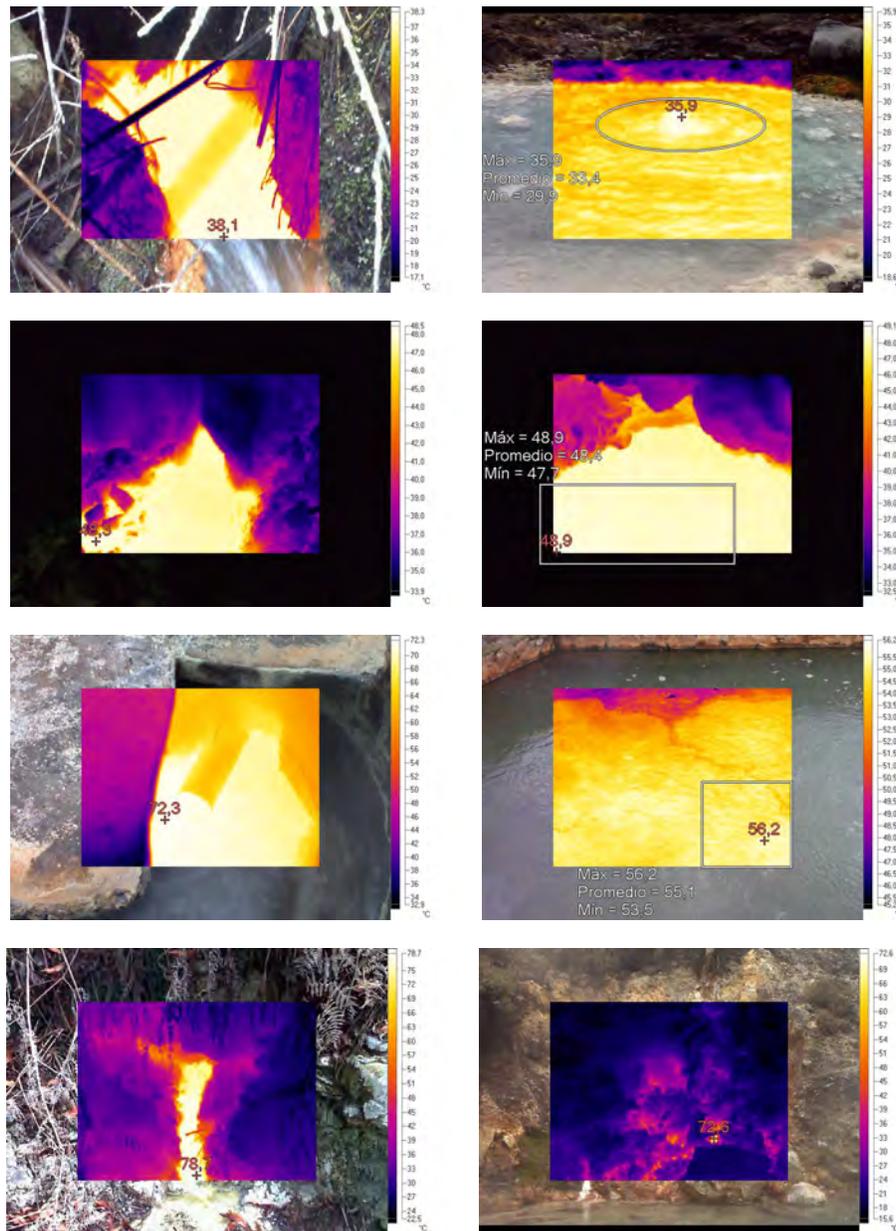
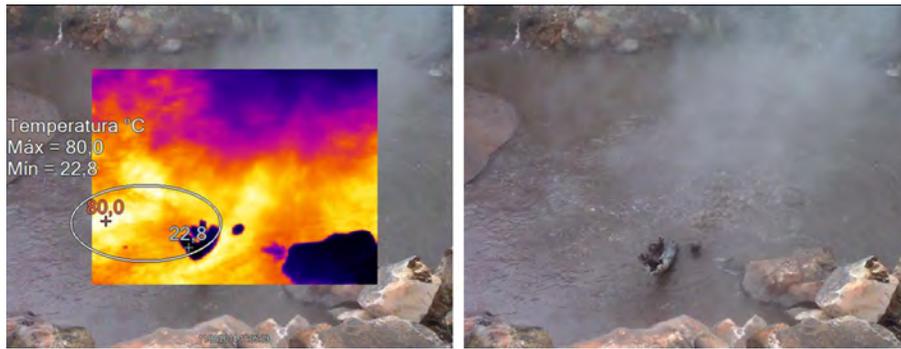
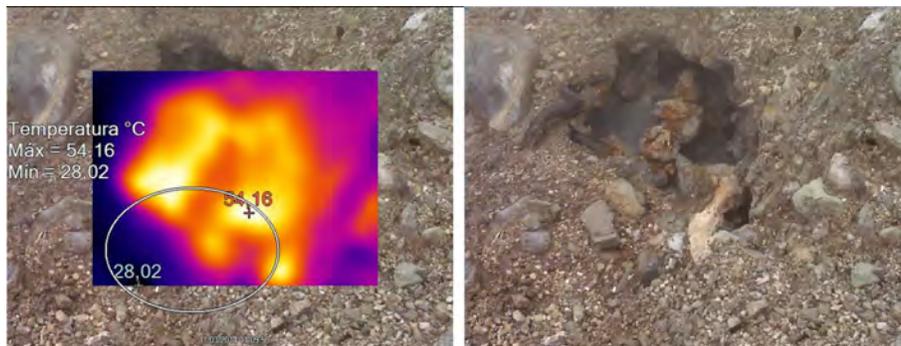


Figura 85: Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales en el volcán Puracé entre los días 5 y 6 de febrero de 2014.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán



(a) Pozo Azul 1



(b) Pozo Azul 2



(c) Hornos 3

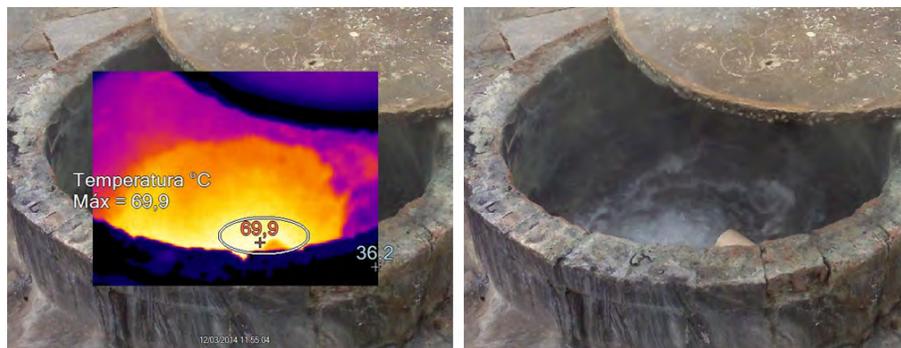


(d) Hornos 7

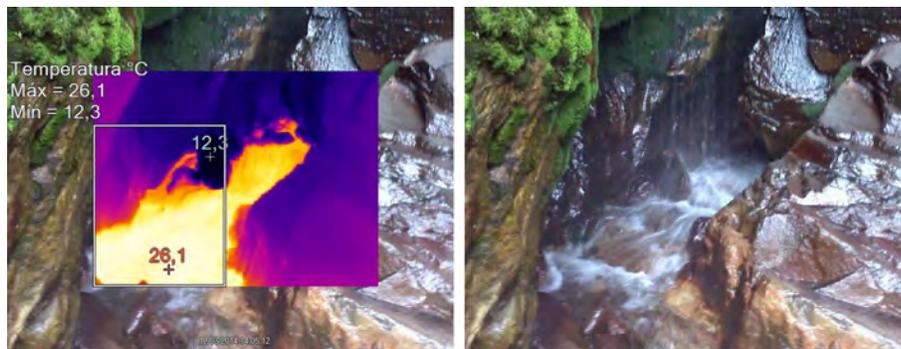
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán



(e) Agua Tibia



(f) Agua Hirviendo



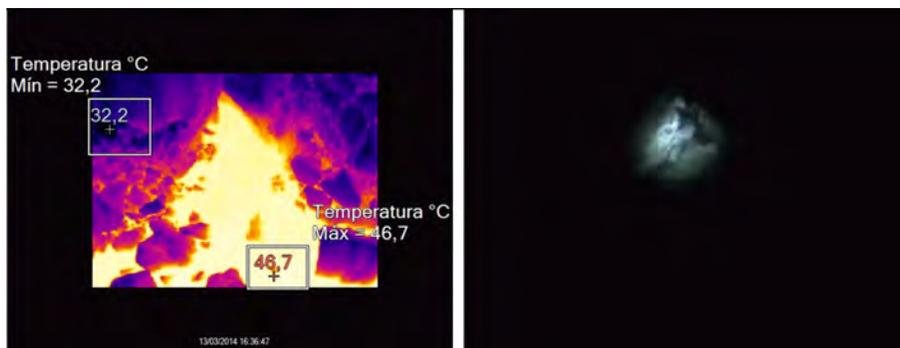
(g) Puló



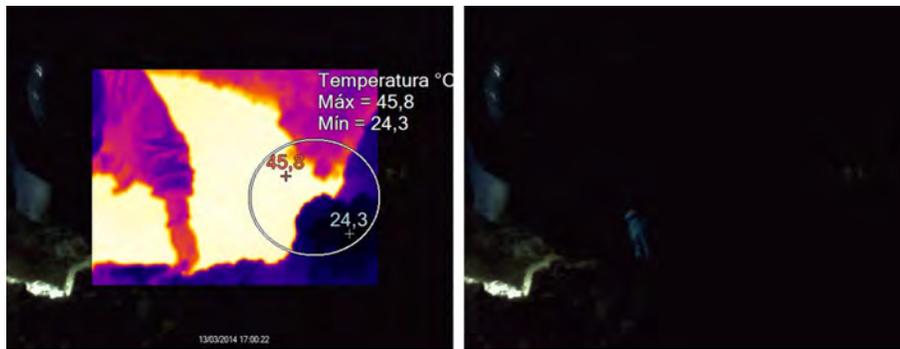
(h) Versalles



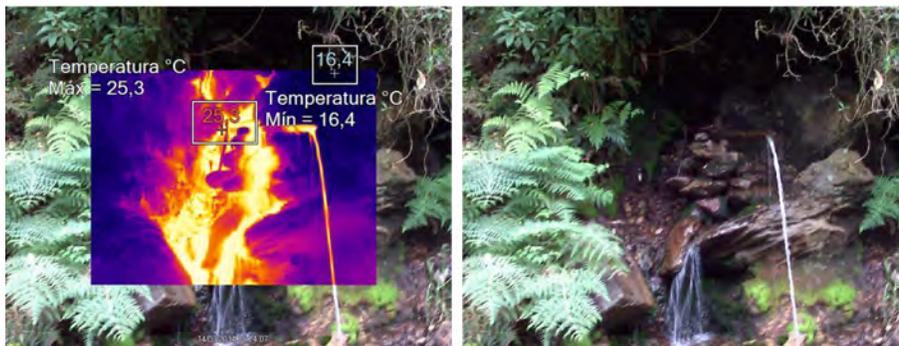
(i) San Juan



(j) Mina 1



(k) Mina 2



(l) Guarquelló

Figura 86: Imágenes térmicas tomadas a las aguas termales asociadas al volcán Puracé entre los días 10 y 15 de marzo de 2014.

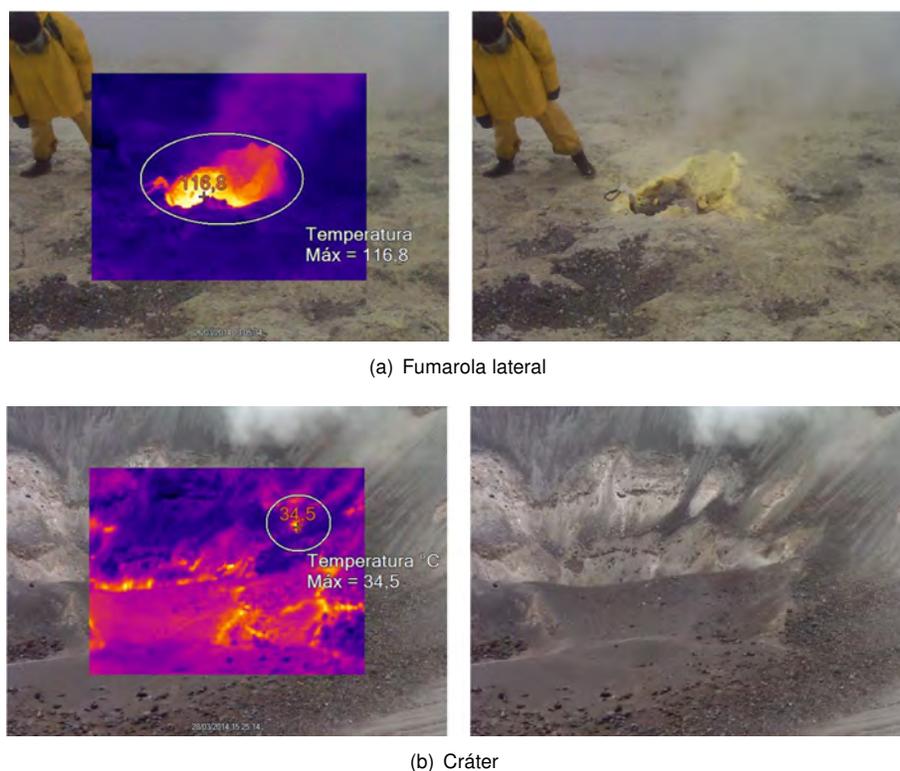


Figura 87: Imágenes térmicas tomadas a la fumarola lateral y al cráter del volcán Puracé entre los días 26 y 28 de marzo de 2014.

Fuente termal	Temperatura medida con termocupla promedio ($^{\circ}C$)	Temperatura medida con FLIR promedio ($^{\circ}C$)	Promedio entre medidas directas e indirectas	Clasificación de las aguas termales según su temperatura
Pozo Azul	80.9	73.3	77.1	Termales
Pozo Azul2	85.4	–	–	Termales
Hornos 3	80.7	73.9	77.3	Termales
Hornos 7	80.2	80	80.1	Termales
Agua Tibia	52.3	–	–	Termales
Agua Hirviendo	72.6	72.2	72.4	Termales
Pululó	26.6	32.4	29.5	Hipotermiales
Versalles	34.8	30.6	32.7	Mesotermiales
San Juan	35.4	33.4	34.4	Mesotermiales
La Mina1	50	–	–	Mesotermiales
La Mina	46.6	–	–	Mesotermiales
Guarquelló	23.4	29.6	26.5	Hipotermiales
Fumarola	130.1	110.5	120.3	N/A

Tabla 12: Listado de temperaturas de fuentes termales. Medición con TERMOCUPLA y CÁMARA TERMOGRÁFICA. Año 2014

Se realiza la comparación entre los datos de temperatura obtenidos durante el período evaluado y los registrados históricamente para cada una de las fuentes termales, encontrándose un único cambio térmico considerable en la fuente Pozo Azul, pasando de una temperatura de $49.2^{\circ}C$ en el mes de agosto a $80.9^{\circ}C$ en el mes de octubre, como se indicó anteriormente, estos cambios se deben a mezcla del cuerpo de agua

termal con otros de naturaleza superficial (quebradas). En cuanto al comportamiento térmico de las demás surgencias se observa estabilidad.

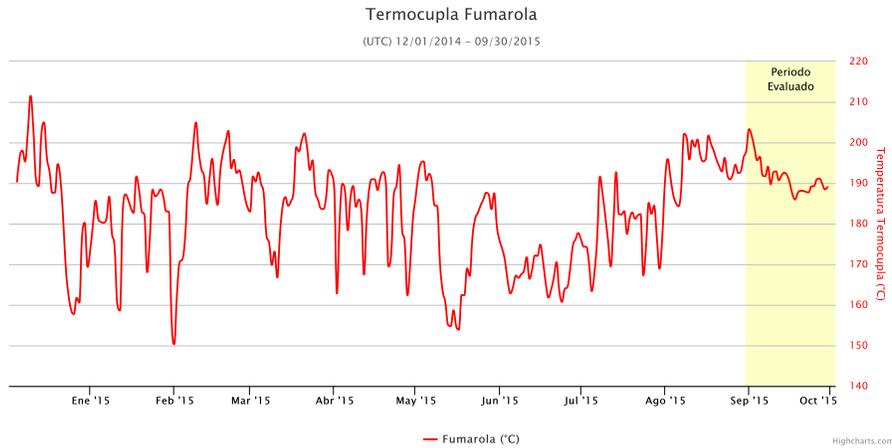


Figura 88: Variación de la temperatura en la fumarola lateral. Agosto de 2015.

Las técnicas de muestreo en fumarolas, fuentes termales, medidas móviles de gases y análisis en laboratorio están bien establecidos y buscan proporcionar información completa sobre la composición y especificación de los puntos de emisión identificados para cada volcán; de ahí la importancia de hacer una vigilancia continua que provea datos que indiquen cambios temporales en las concentraciones de gases y otras manifestaciones de actividad volcánica. Las técnicas y métodos usados actualmente estiman la presencia de las especies gaseosas, y pueden mostrar cambios relacionados con la dinámica del sistema volcánico, especialmente cuando se correlaciona esta información con otras técnicas de monitoreo. De lo registrado en el área de fisicoquímica durante el período evaluado en el volcán Puracé, no se reportan cambios importantes en el sistema volcánico.

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 2014, 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.

El volcán Sotará se encuentra ubicado en la Cordillera Central, en las coordenadas $2^{\circ}12' N$ y $76^{\circ}31' O$, con una elevación máxima de 4420 msnm , a una distancia de 25 km al sureste de la ciudad de Popayán (ver figura 90).

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. Tanto su caldera externa como 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 se iniciaron en noviembre de 1993, con la instalación de la estación sismológica telemétrica Sotará, en el sector nororiental del volcán. 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 valores 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 monitoreo permanente. Cabe resaltar que, como respuesta al incremento en la actividad sísmica registrado entre mayo y noviembre de 2012, se llevó a cabo un fortalecimiento de las redes de sismología y 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 2015), y desde el año 1999 en el campo fumarólico (el más reciente en julio de 2014).

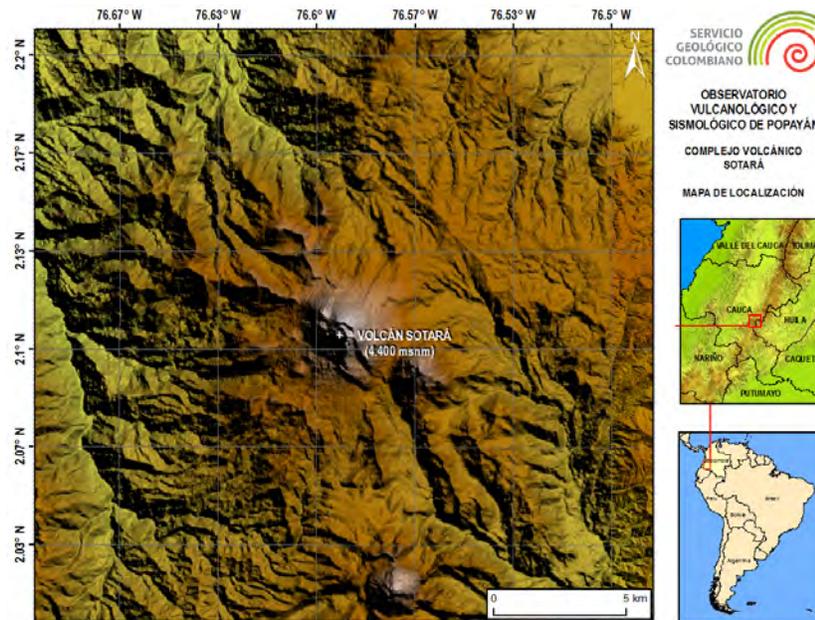


Figura 90: Mapa de localización del volcán Sotará.

3.1. RED DE VIGILANCIA

El volcán Sotará cuenta en la actualidad con una red de vigilancia compuesta por 27 estaciones: 13 telemétricas (que transmiten datos por medio de un sistema telemétrico) y 14 puntos de muestreo (no telemétricas). Estas estaciones permiten la medición de diferentes parámetros físicos relacionados a la sismología, deformación y actividad superficial. En la figura 91 se muestra la red de vigilancia del volcán Sotará, mientras que en la tabla 13 se detallan las principales características de las estaciones que componen la red de vigilancia de este volcán.

3.1.1. Generalidades

3.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. Actualmente, el volcán Sotará cuenta con siete estaciones sísmicas: tres de ellas son corto período; en orden de cercanía a la cima del volcán son: Triángulo (TRICO) a 0.7 km al N, Oso2 (OS2CO) ubicada a 0.8 km al NO, y Cerro Gordo (CGOCO) a 2.9 km al SE de la cima del volcán; al Noroccidente del volcán están las estaciones Sotará (SOTBA), a 3.1 km; Peñón Bajo, (PBABA) a 11.3 km; y Cerro Sombrero (CSOBA), a 18 km; y al Nororiente se encuentra la estación Pirámide (PIRBA), a 1.8 km de la cima del volcán.

3.1.1.2. Red de Deformación. Esta red se encuentra conformada por tres inclinómetros electrónicos: Oso2 y Sotará, localizados a 0.7 km y 3.1 km al NO de la cima del volcán respectivamente; y Triángulo ubicado a 0.7 km al N del cráter. De igual forma, se cuenta con dos estaciones GNSS permanentes denominadas Oso y Pirámide, las cuales se encuentran ubicadas a 0.7 km al NO y a 1.8 km al NE del edificio volcánico, respectivamente. Adicionalmente, se tienen dos bases y nueve reflectores EDM para la realización de medidas de control topográfico.

3.1.1.3. Red de Actividad Superficial. 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, ubicada a 3.1 km al NO del edificio volcánico.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán



Figura 91: Red de vigilancia del volcán Sotará.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Distancia al Cráter (km)
Aguas Calientes	Fuente Termal	2.1216	76.6105	3670	2.7
Amarillas	Fuente Termal	2.1099	76.6078	3611	1.9
Cerro Crespo	Cámara web	2.1322	76.6041	3848	3.1
Cerro Gordo	Estación Corto Período	2.0954	76.5678	3874	2.9
Cerro Sombrero	Estación Banda Ancha	2.0954	76.5678	3874	2.9
Domo1	Reflector EDM	2.1158	76.5977	3932	1.2
Domo2	Reflector EDM	2.1149	76.5978	3988	1.1
Domo3	Reflector EDM	2.1148	76.5985	3969	1.2
Flautas1	Base EDM	2.1299	76.6172	3408	3.8
Flautas2	Base EDM	2.1444	76.6331	3225	6.2
Jelimá	Muestreo de gases	2.0933	76.5839	3737	1.8
Oso	Estación GNSS	2.1111	76.5968	4189	0.7
Oso2	Estación Corto Período	2.1115	76.5966	4106	0.8
	Inclímetro electrónico	2.1111	76.5968	4106	0.8
	Reflector EDM	2.1129	76.5989	4050	1.1
Oso3	Reflector EDM	2.1126	76.6010	3916	1.2
Oso4	Reflector EDM	2.1132	76.6000	3993	1.2
Oso5	Reflector EDM	2.1125	76.6003	3979	1.2
Oso6	Reflector EDM	2.1120	76.6006	3973	1.2
Oso7	Reflector EDM	2.1115	76.6008	3964	1.2
Peñón Bajo	Estación Banda Ancha	2.1970	76.5430	3330	11.3
Pirámide	Estación Banda Ancha	2.1155	76.5775	3759	1.8
	Estación GNSS				
Sotará	Estación Banda Ancha	2.1322	76.6042	3795	3.1
	Inclímetro electrónico			3874	
Triángulo	Estación Corto Período	2.1132	76.5891	4166	0.7
	Inclímetro electrónico				

Tabla 13: Características de la red de vigilancia del volcán Sotará.

3.1.2. Funcionamiento de Estaciones

Durante el mes de septiembre de 2015, la red de vigilancia del volcán Sotará tuvo un porcentaje de funcionamiento del 94.7 % sobre el 91 % del total de la red de monitoreo. La figura 92 muestra el consolidado del funcionamiento de estaciones para el volcán Sotará, durante el año 2014.

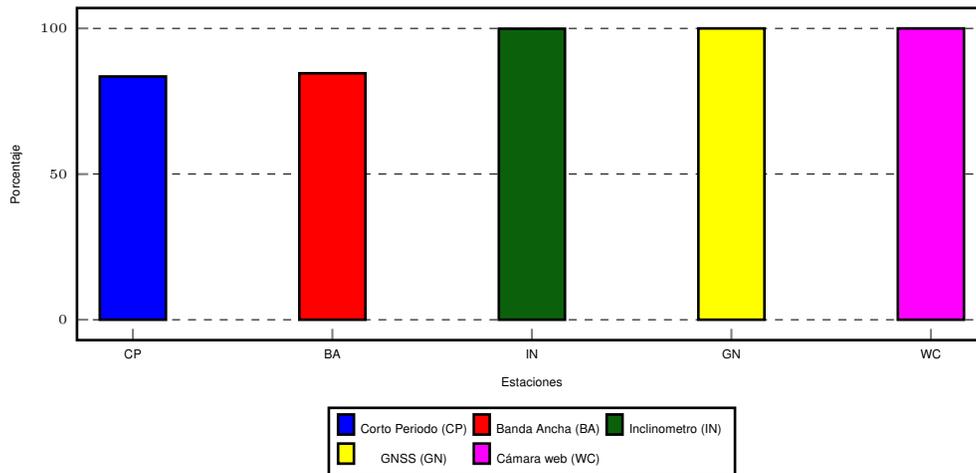


Figura 92: Funcionamiento de estaciones de la red de vigilancia del volcán Sotará durante septiembre de 2015.

3.2. SISMOLOGÍA

Durante el año 2014 la red de monitoreo sísmico del volcán Sotará contó con la operatividad de siete estaciones sísmológicas (Cerro Sombrero, Sotará, Triángulo, Cerro Gordo, Peñón Bajo, Oso2 y Pirámide). La figura 93 muestra el mapa de localización de las estaciones que conforman esta red de monitoreo.

3.2.1. Actividad Sísmica

La red de estaciones sísmológicas del volcán Sotará, durante el año 2014 registró un total de 297 eventos sísmicos asociados exclusivamente con procesos de fracturamiento de roca (tipo VT). La figura 94 muestra el número de eventos registrados durante el año 2014 para este volcán.

3.2.2. Energía Sísmica Liberada

El comportamiento de la energía sísmica liberada diariamente por parte de los eventos asociados al fracturamiento de roca durante el año 2014 fue estable. En la figura 95 se pueden apreciar algunas variaciones asociadas al mayor o menor registro de eventos y en algunos casos a niveles de aporte energético superior al promedio, sin embargo se aclara que los eventos en su mayoría se caracterizaron por ser de bajo aporte energético. Los eventos más destacados en cuanto a energía sísmica liberada se presentaron los días 3 de enero, 11 de marzo y 24 de mayo, respectivamente alcanzaron valores de $8.57E+14$, $5.41E+14$ y $5.60E+14$ *ergios*.

El comportamiento anteriormente descrito se refleja en la figura 96, en la tendencia de la energía sísmica al ser evaluada de forma acumulada, adicionalmente se puede apreciar que en el mes de mayo se presentó un aumento súbito de la energía sísmica acumulada, asociado a la ocurrencia del mayor número de eventos registrados por día en el año 2014.

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.

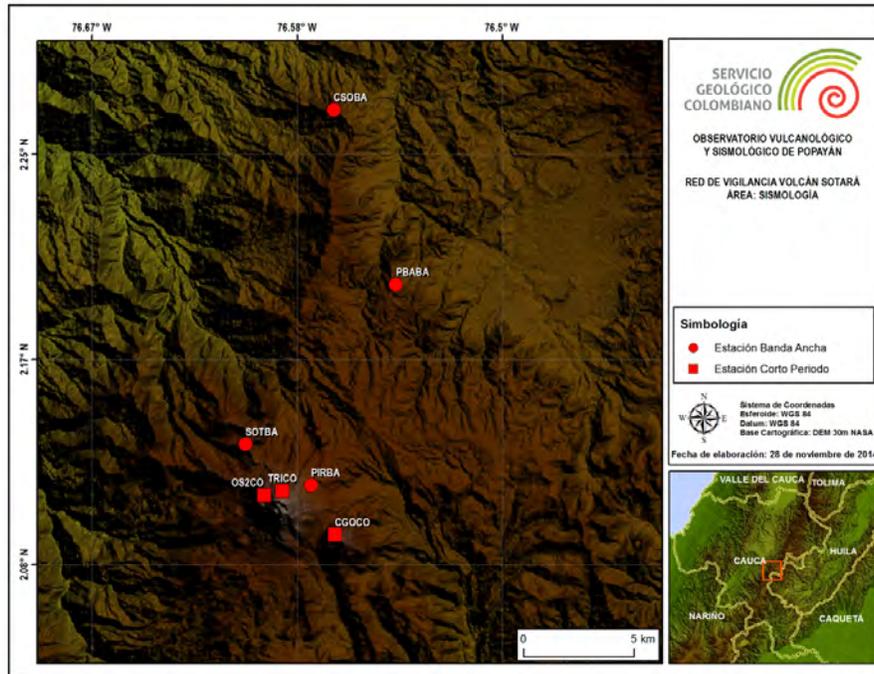


Figura 93: Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará.

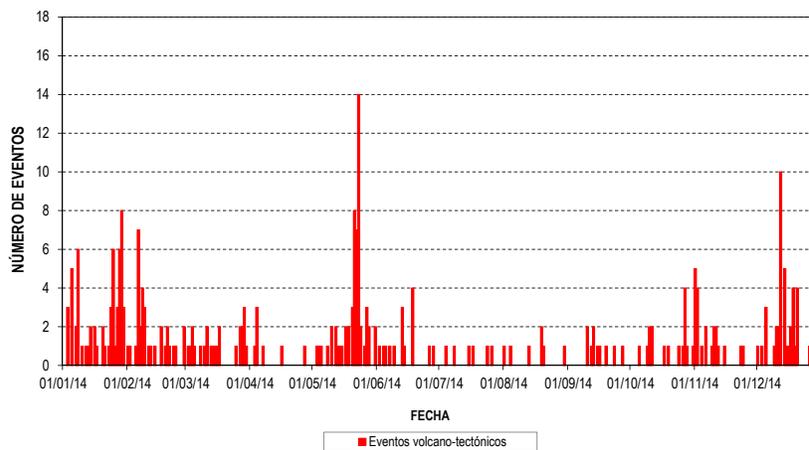


Figura 94: Número de eventos registrados diariamente en el volcán Sotará durante el año 2014.

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

3.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

3.2.3.1. Localización de eventos asociados con procesos de fractura. Durante el año 2014 fue posible realizar la localización epicentral e hipocentral de 141 eventos asociados al fracturamiento de material cortical,

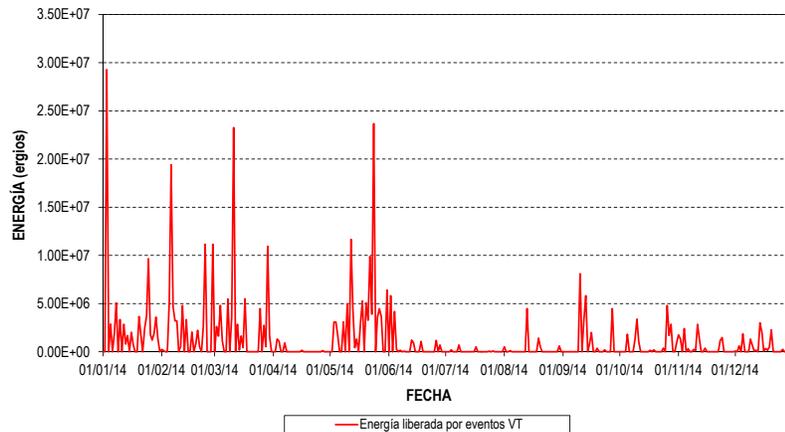


Figura 95: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT en el volcán Sotará, año 2014.

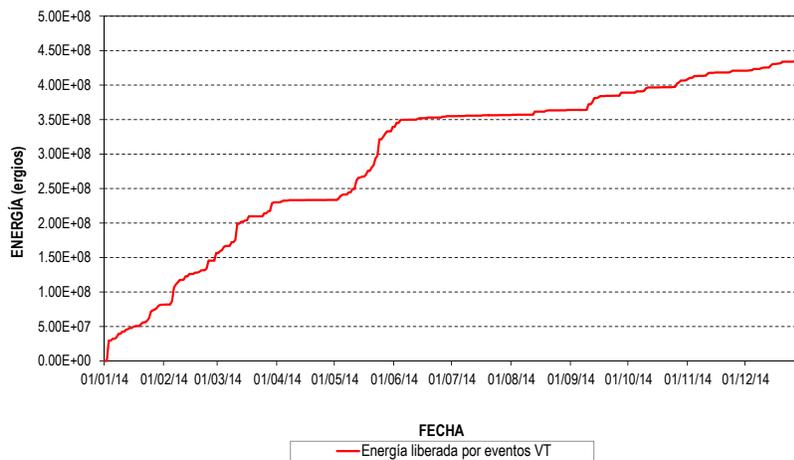


Figura 96: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT en el volcán Sotará, año 2014.

sismicidad que se distribuyó principalmente en dos zonas: en el sector denominado Valle de Paletará y en la parte alta del edificio volcánico. En el valle de Paletará se registró la mayor parte de la sismicidad del periodo evaluado y se localizó a una distancia promedio de 11 *km* al nororiente del edificio volcánico, en un rango de profundidades que varió de 5 a 12 *km*. Se resalta que en esta zona se presentaron los eventos con las magnitudes locales M_L más importantes del periodo evaluado, el evento con la máxima magnitud M_L se presentó el 3 de enero de 2014, el cual alcanzó una magnitud M_L de 3.7 *grados* en la escala de Richter, este evento se localizó a 12 *km* al nororiente del edificio del volcán a una profundidad de 7 *km*.

El segundo sector corresponde a la parte alta del edificio del volcán, donde se presentaron eventos a profundidades muy superficiales menores a 3 *km* y se caracterizaron además por presentar bajas magnitudes M_L , la máxima magnitud M_L alcanzada fue de 1.6 *grados* en la escala de Richter.

La figura 97 muestra la distribución de magnitudes M_L a lo largo del año 2014, se puede observar que por lo general las magnitudes M_L fueron bajas menores a 2 *grados*, destacándose un único evento que alcanzó una magnitud M_L de 3.7 *grados* en la escala de Richter.

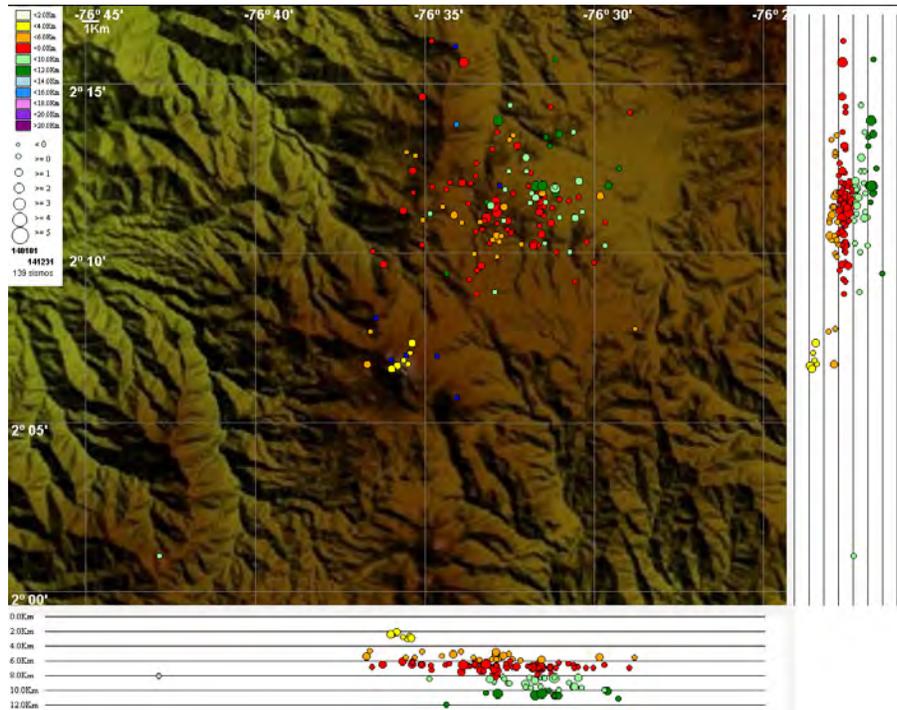


Figura 97: Mapa de localización de eventos volcánico-tectónicos del volcán Sotará durante el año 2014. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud calculada, denominada magnitud local (M_L). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

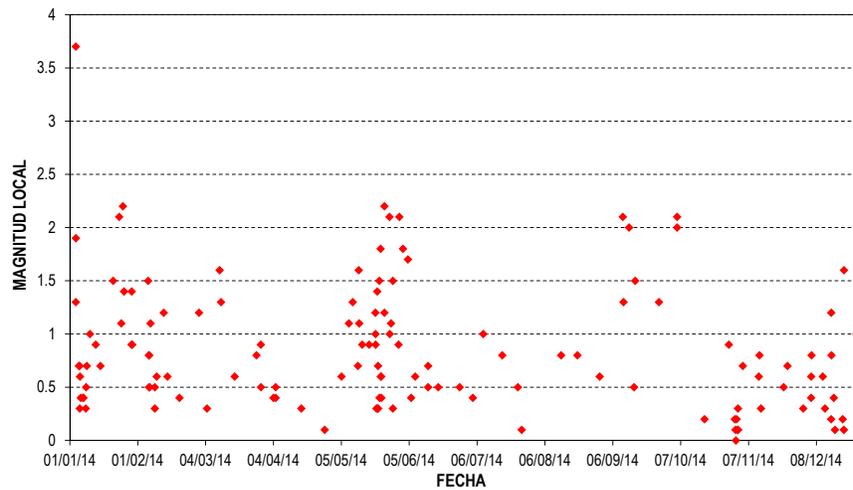


Figura 98: Dispersión de los valores de M_L para los eventos de fractura localizados en el volcán Sotará, año 2014.

3.3. DEFORMACIÓN

Durante el año 2014, se contó con el funcionamiento de tres inclinómetros electrónicos (Sotará, Oso y Triángulo) y dos estaciones GNSS permanentes (Oso y Piramide). Durante el año no fue posible la ocupación de las líneas EDM por las condiciones climáticas adversas durante las campañas. La localización de las estaciones de monitoreo puede apreciarse en la figura 99.

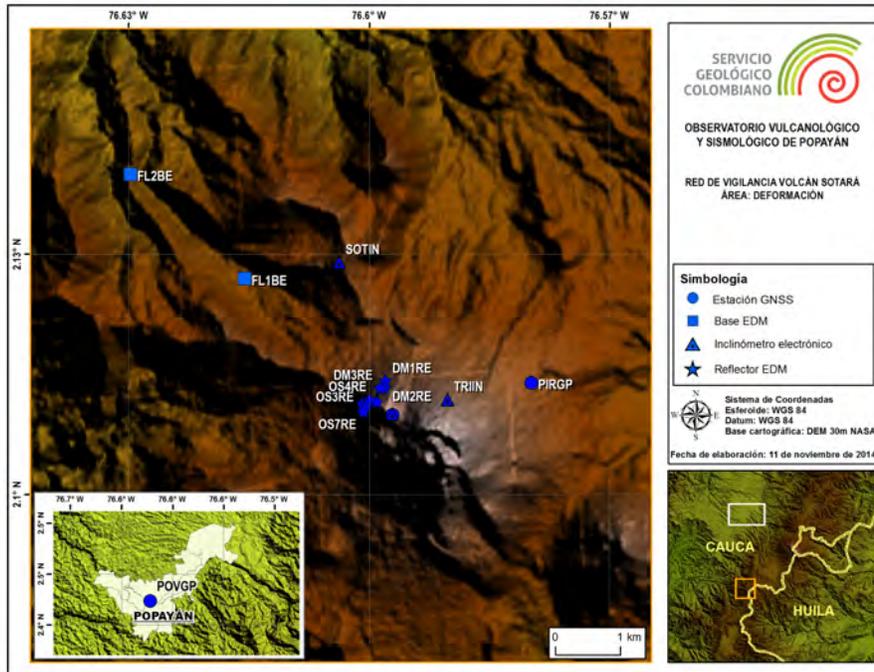


Figura 99: Red de vigilancia en deformación del volcán Sotará.

3.3.1. Inclinometría Electrónica

Los inclinómetros Sotará, Oso2 y Triángulo, durante el año 2014 en general mostraron un comportamiento estable para las componentes norte y este. Este comportamiento indica que no se presentaron procesos deformativos considerables en el volcán. En las figuras 101, 100 y 102 se aprecian las tendencias de dichos inclinómetros hasta diciembre de 2014.

3.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

Durante el año 2014 se contó con el funcionamiento continuo de dos estaciones GNSS permanentes en el volcán (Oso y Pirámide). De acuerdo a las tendencias mostradas por las componentes (norte, este y altura), en las dos estaciones, se puede decir que se registra un comportamiento estable y que por el momento, en el edificio volcánico no se registran procesos deformativos considerables.

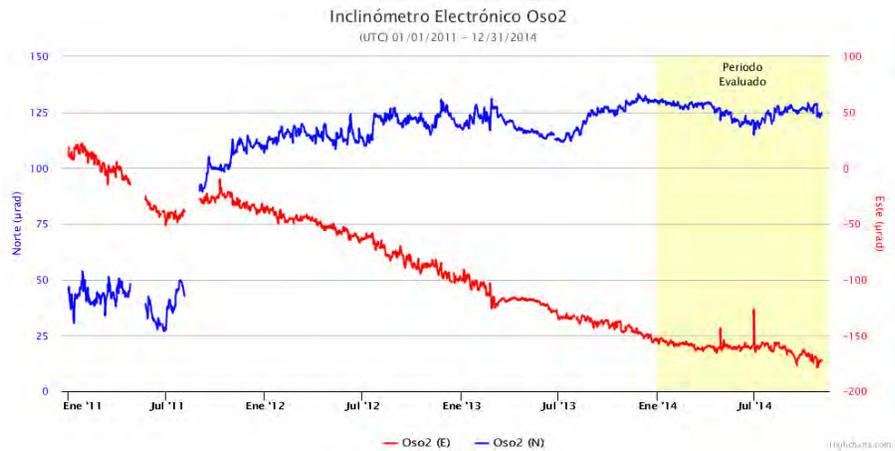


Figura 100: Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará a diciembre de 2014.

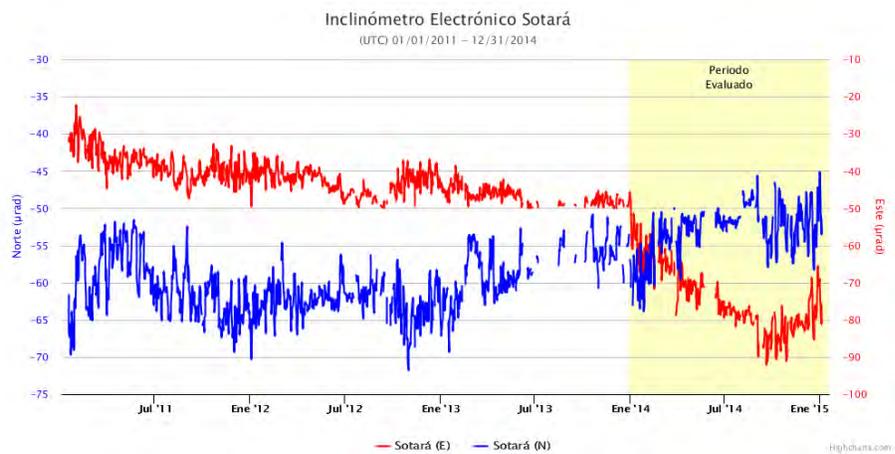


Figura 101: Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará a diciembre de 2014.

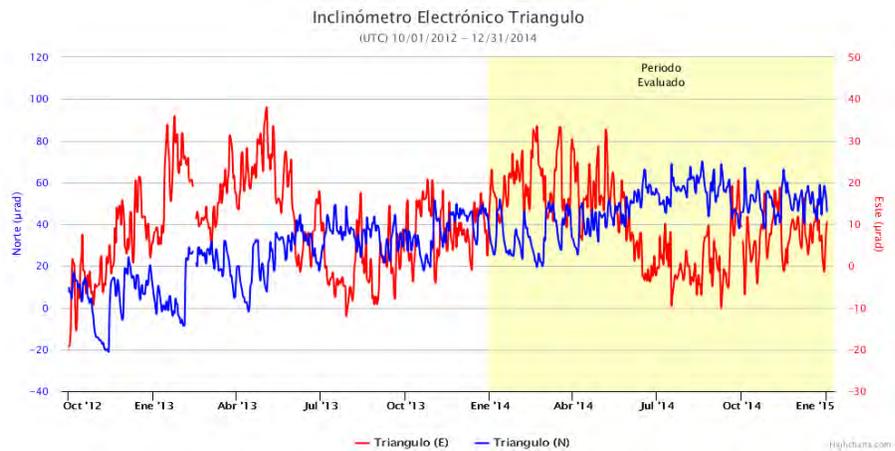


Figura 102: Comportamiento del inclinómetro electrónico Triángulo a diciembre de 2014.

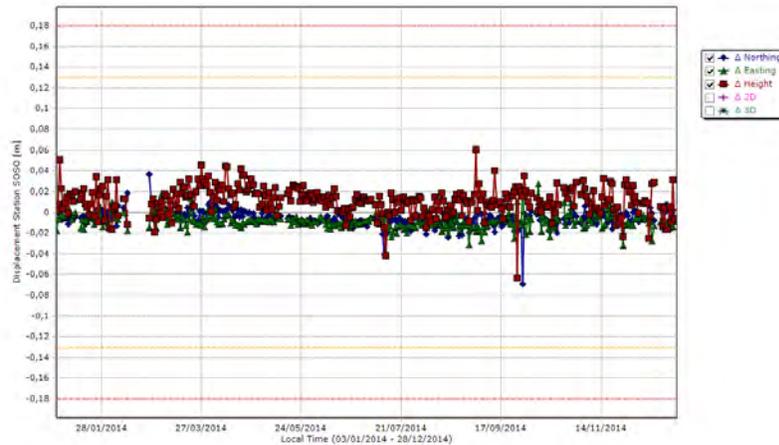


Figura 103: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Oso a diciembre de 2014.

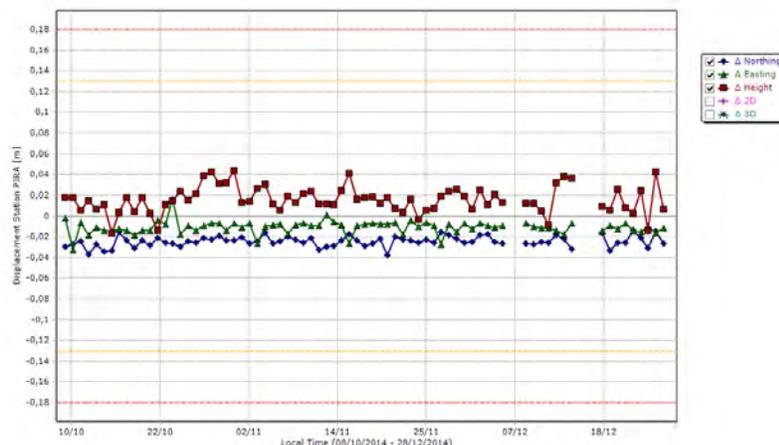


Figura 104: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Pirámide a diciembre de 2014.

3.3.3. Interferometría con radar

El interferograma obtenido por el proyecto UAVSAR para el volcán Sotará en el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014, evidencia que no hay un proceso deformativo considerable o superior al orden centimétrico para ser detectado con esta técnica. El interferograma se aprecia en la figura 105.

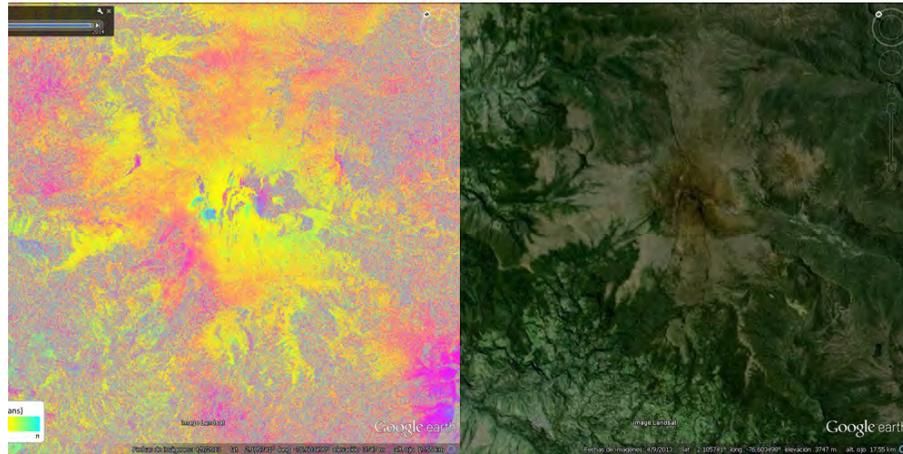


Figura 105: Interferograma para el periodo 12 de marzo de 2013 a 12 de abril de 2014, publicado por el proyecto UAVSAR (<http://uavsar.jpl.nasa.gov/>) para el volcán Sotará.

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 106 se muestra la localización geográfica de dicho equipo. Durante el año 2014, no se observaron cambios destacables en la actividad superficial.



Figura 106: Mapa de localización de la cámara web Cerro Crespo, para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Sotará.



Figura 107: Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará en el primer semestre de 2014.

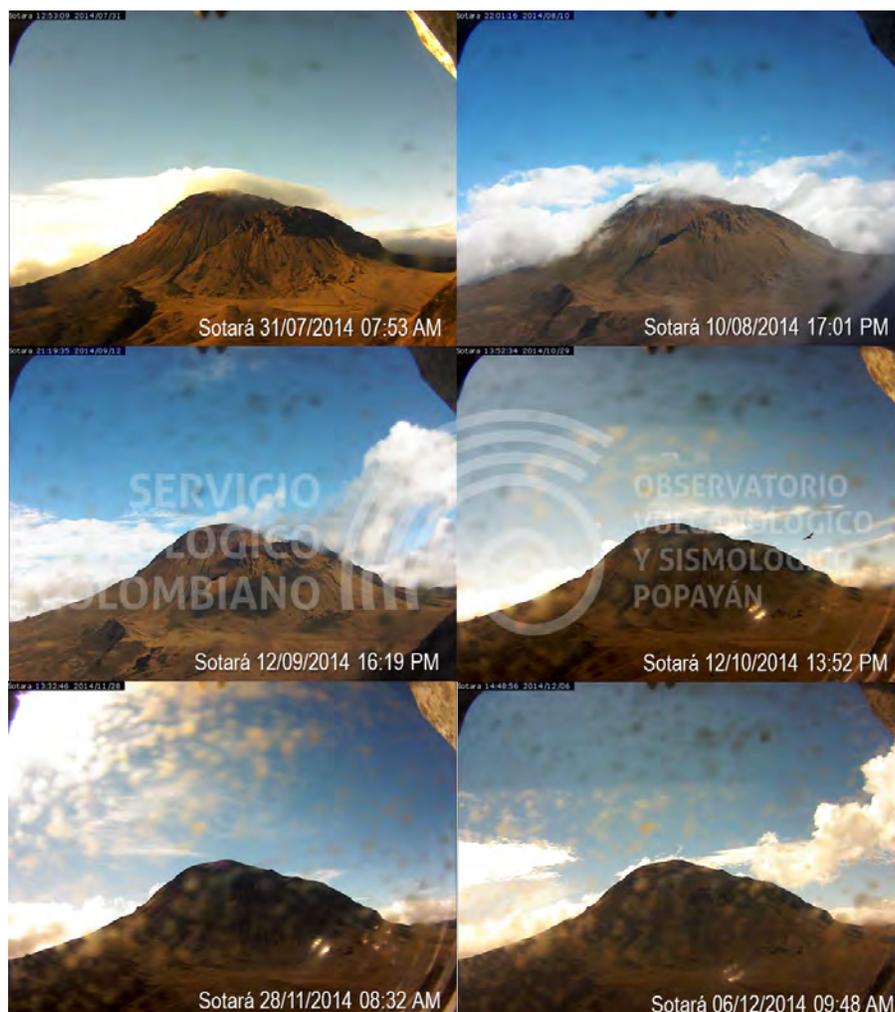


Figura 108: Imágenes captadas por la cámara web del volcán Sotará en el segundo semestre de 2014.

3.5. FISICOQUÍMICA

La red de vigilancia en geoquímica del volcán Sotará actualmente se encuentra conformada por tres puntos de muestreo que son: las fuentes termales Aguas Calientes y Las Amarillas y el campo fumarólico Jelima. Con el fin de obtener datos que permitan establecer líneas base de comportamiento, y hacer un seguimiento de las variaciones en los parámetros físico-químicos del sistema volcánico-hidrotermal, se realizan muestreos periódicos in situ simultáneos con medidas físico-químicas. La figura 109 muestra la localización geográfica de los puntos de muestreo geoquímico en el volcán Sotará.

3.5.1. Fuentes Termales

Durante el mes de julio se realizaron muestreos de aguas directamente en las fuentes termales Aguas Calientes y Las Amarillas, con esto se busca conocer el comportamiento en su composición química e isótopos mediante análisis químicos de laboratorio. Además, se realizaron para ambas surgencias medidas de pH, conductividad y temperatura, para esta última variable de forma directa e indirecta. En la figura 110 se pueden apreciar imágenes de las fuentes termales.

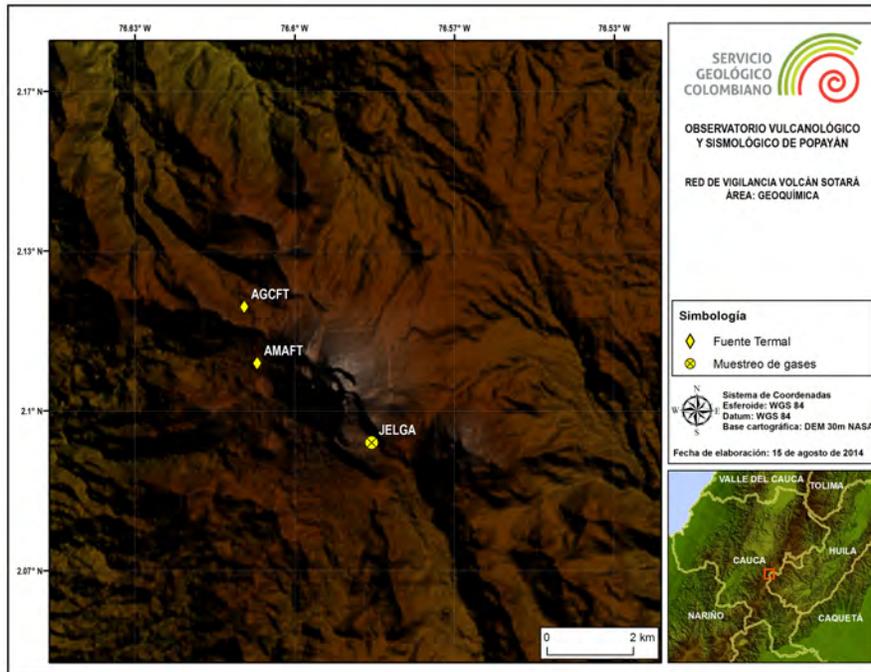


Figura 109: Red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Sotará.

La comparación de los datos obtenidos de temperatura y pH durante el periodo evaluado, con las líneas base que se tienen establecidas para cada una de estas fuentes termales, no presentó ninguna variación a destacar (ver figuras 111 y 112). Por otra parte, se hace por primera vez la medida de la conductividad para las fuentes termales del volcán Sotará, y por tal motivo estos datos marcan la pauta para comenzar a establecer la línea base de comportamiento de esta variable. En la tabla 14 se presentan los valores de conductividad para cada fuente termal.

Fuente Termal	Conductividad Eléctrica ($\mu S/cm$)
Las Amarillas	1.01
Las Calientes	0.98

Tabla 14: Valores de conductividad (mS/cm) de las fuentes termales del volcán Sotará. Año 2014

Con el fin de complementar las técnicas de monitoreo del comportamiento geoquímico volcánico, se utilizó también la técnica indirecta de captura de imágenes térmicas para analizar caloríficamente las fuentes termales anteriormente mencionadas. Se utilizó una cámara Fluke Ti32 para captar la información térmica procedente de las manifestaciones volcánicas en superficie, este equipo permite obtener medidas de temperatura de objetos a distancia (sin entrar en contacto directo). Los resultados obtenidos mediante la termometría indirecta se observan en la figura 113.

En la tabla 15 se presentan los datos de temperatura obtenidos en las fuentes termales con los diferentes instrumentos de medida empleados, cámara termográfica (Fluke Ti32) y Termocupla (termómetro termopar portátil tipo K), además de la clasificación térmica de las aguas de cada una de las surgencias.

De la similitud en los datos logrados con ambas técnicas, se comprueba la buena medición de los instrumentos utilizados en campo y se infiere la veracidad de tales datos.



Figura 110: Fuentes termales muestreadas en el volcán Sotará, año 2014

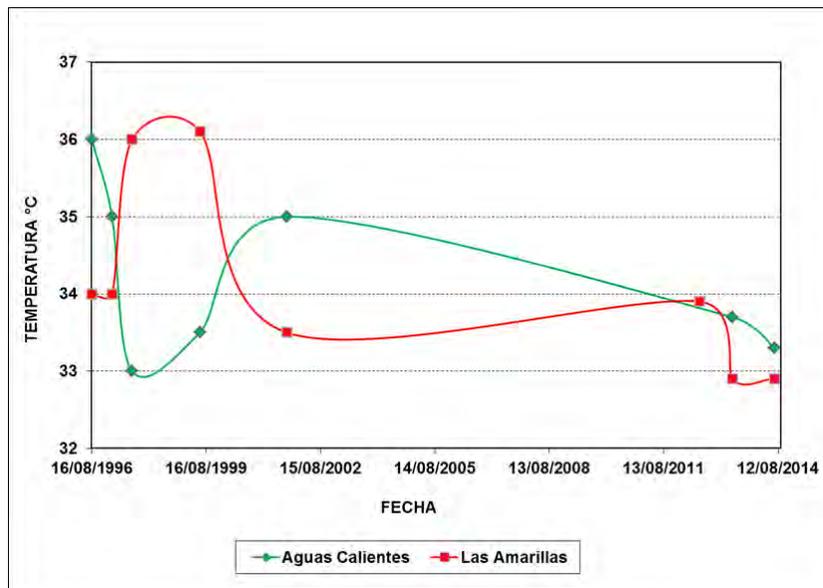


Figura 111: Variación de temperatura en las fuentes termales del volcán Sotará en el año 2014

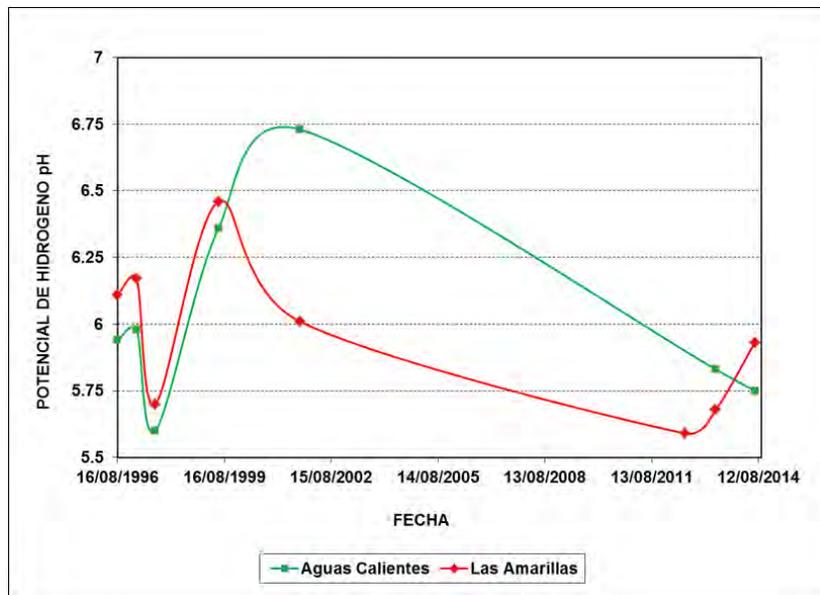


Figura 112: Variación del potencial de hidrógeno en las fuentes termales del volcán Sotará año 2014

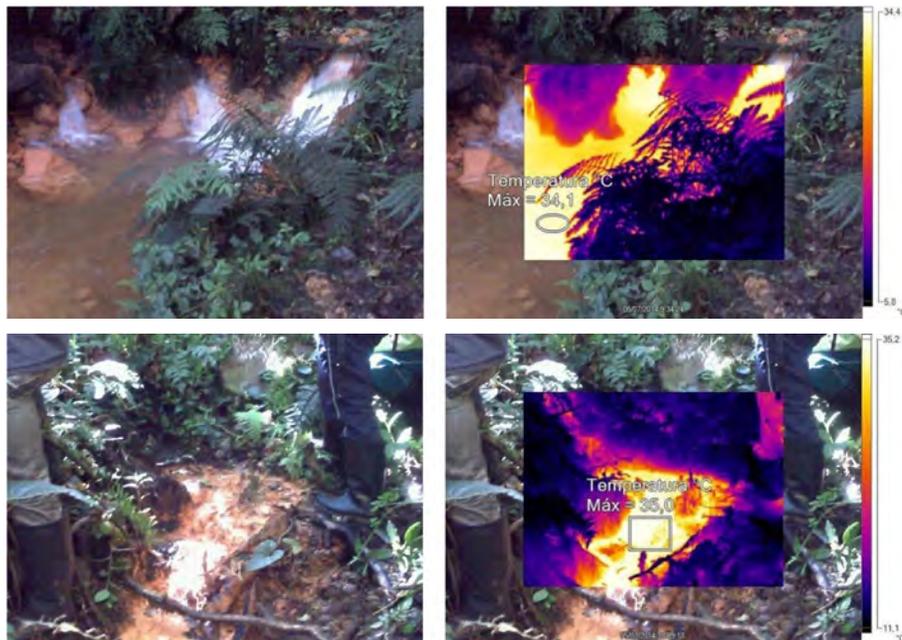


Figura 113: Imágenes térmicas de las fuentes termales del volcán Sotará, Aguas Calientes (arriba) y Las Amarillas (abajo) tomadas en 2014

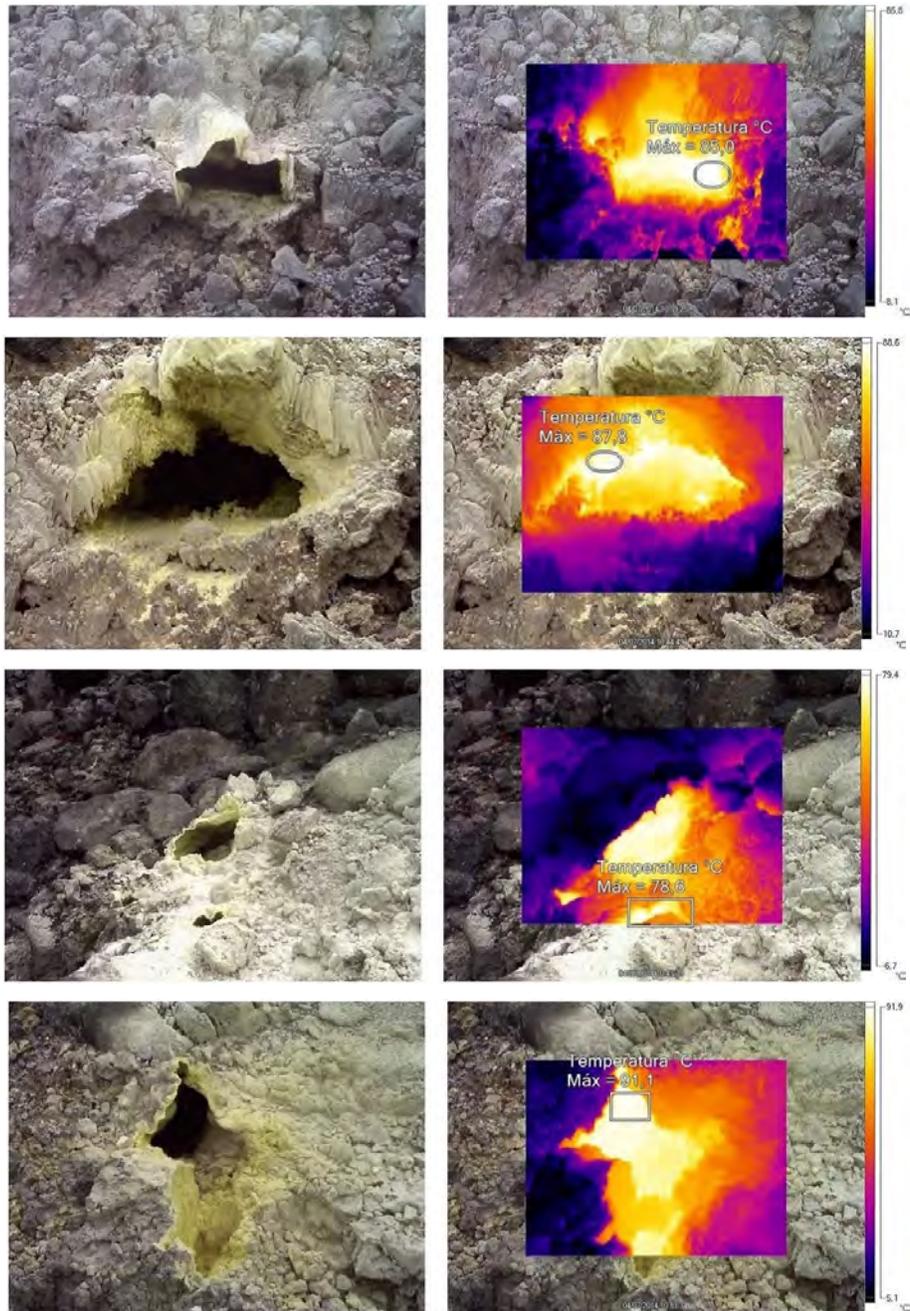
Fuente termal	Temperatura medida con termocupla ($^{\circ}C$)	Temperatura medida con Fluke Ti32 ($^{\circ}C$)	Clasificación de las aguas termales según su temperatura
Aguas Calientes	33.3	34.1	Mesotermales
Las Amarillas	32.9	35	Mesotermales

Tabla 15: Temperatura de las fuentes termales del volcán Sotará medidas con termocupla y con cámara termográfica en el año 2014

3.5.2. Campo Fumarólico

La aplicación de las diferentes metodologías de termometría sobre las surgencias termales y sobre el campo fumarólico del volcán Sotará, permiten detectar procesos físicos perturbadores y cambios composicionales y/o volumétricos de los gases en el sistema hidrotermal y en la estructura condicionante del mismo. Por tal motivo, para complementar el seguimiento de las características caloríficas del volcán, se utilizó además de las medidas directas con termocupla portátil, la técnica indirecta de captura de imágenes térmicas sobre los focos más representativos de emisión de gases que se pueden observar en el campo fumarólico Jelima y sobre los flancos del mismo.

La termometría directa mostró medidas que se ubicaron en un rango entre 80 y $87^{\circ}C$, y mediante la técnica indirecta se obtuvieron temperaturas en un rango entre 75.6° y $91.1^{\circ}C$. De la similitud en los datos logrados con ambas técnicas, se comprueba la veracidad de los mismos. En las figuras 114 y 115 se pueden observar las imágenes térmicas.



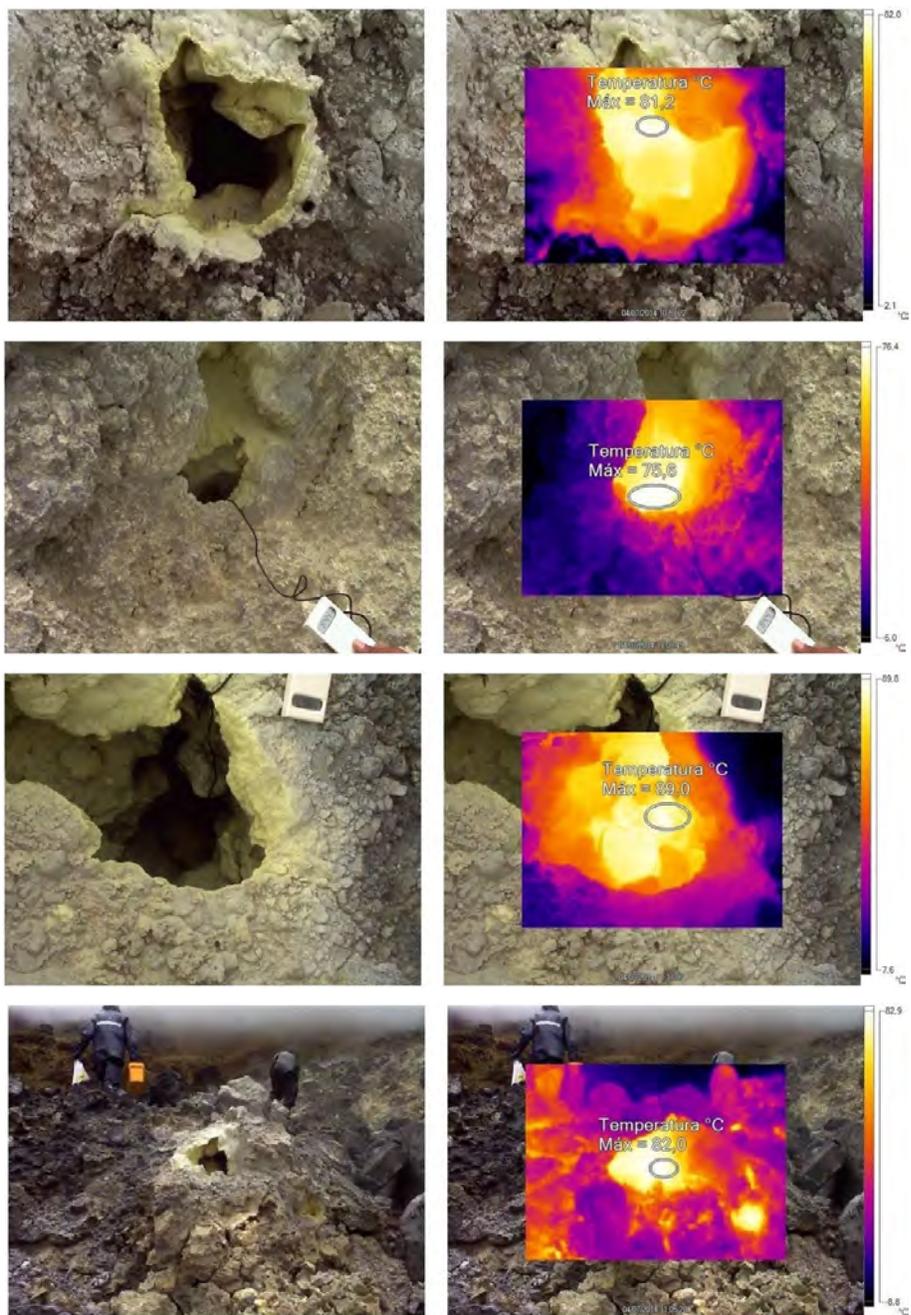


Figura 114: Imágenes térmicas de los focos más representativos de emisión de gases del campo fumarólico Jelima en el volcán Sotará. año 2014

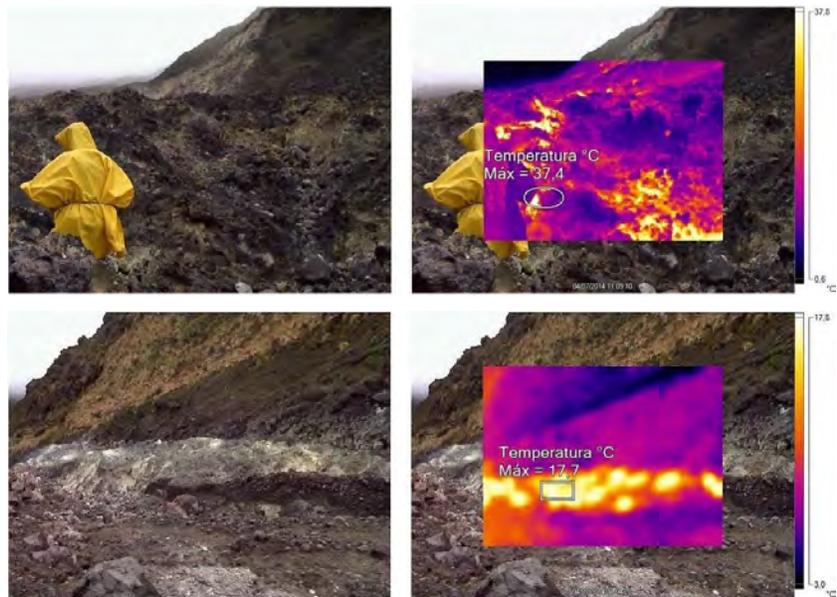


Figura 115: Imágenes térmicas del flanco este (arriba) y flanco oeste (abajo) del campo fumarólico Jelima en el volcán Sotará, año 2014

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 el año 2014 este continuo 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.

Con respecto a la actividad sísmica asociada con la dinámica tectónica (fracturas y fallas) en la región suroccidental de Colombia durante el año 2014, las estaciones sísmicas que conforman la red de monitoreo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán – OVS Popayán registraron 1284 eventos sísmicos de carácter local, de los cuales se localizaron 376 en los departamentos de Huila, Cauca, Valle del Cauca y Sur del Tolima, con una magnitud máxima de 4.3 M_L en la escala de Richter. En la figura 116 se muestra la distribución epicentral e hipocentral de la sismicidad tectónica localizada.

Por su parte, la Red Sismológica Nacional de Colombia RSNC, reportó la ocurrencia de 1320 eventos sísmicos en los departamentos del Huila, Cauca y Valle del Cauca, entre los cuales se destacan aquellos localizados en los municipios de Páez, Padilla (Cauca), y en El Cairo (Valle del Cauca). En la tabla 16 se relacionan los eventos destacados con Magnitud Local (M_L) > 4.0 en la RSNC.

Fecha	Hora UT	Magnitud local	Municipio
09/01/2014	11:07:31	4.3	Páez
09/01/2014	12:50:16	5	Páez
04/06/2014	18:53:49	4.2	Padilla
31/10/2014	21:24:28	4	El Cairo

Tabla 16: Eventos tectónicos destacados registrados por la RSNC con $M_L > 4.0$ en el 2014

Nota: Los puntos indican las localizaciones hipocentrales y epicentrales, cuyos colores varían según su profundidad, y los tamaños según su magnitud local, de acuerdo a las escalas mostradas en la leyenda en la parte superior izquierda.

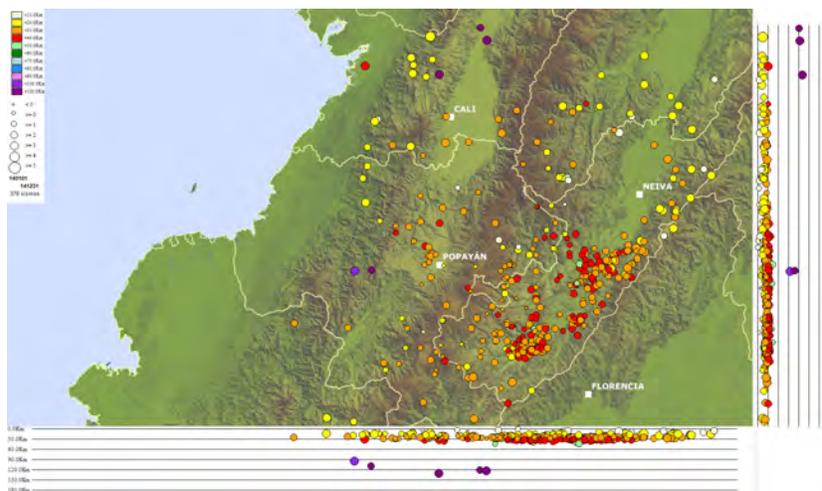


Figura 116: Localización de la sismicidad tectónica local registrada en la red del OVS-Popayán en los departamentos del Cauca, Huila, Valle del Cauca y sur del Tolima (Región Suroccidente del territorio Colombiano) durante el 2014.

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.