



REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE POPAYÁN

INFORME SEMESTRAL DE LA ACTIVIDAD EN LOS VOLCANES
NEVADO DEL HUILA, PURACÉ Y SOTARÁ
SEMESTRE II DE 2012

POPAYÁN, 2013

TABLA DE CONTENIDO

1	VOLCÁN NEVADO DEL HUILA	3
	1.1 RED DE VIGILANCIA	3
	1.1.1 Generalidades	3
	1.1.1.1 Red de Estaciones Sísmicas.	3
	1.1.1.2 Red de Estaciones de Monitoreo de Flujos de Lodo.	4
	1.1.1.3 Cámaras Web.	4
	1.1.1.4 ScanDOAS.	4
	1.1.1.5 Inclínometría.	4
	1.1.1.6 Sensor Acústico.	4
	1.1.2 Funcionamiento de Estaciones	4
	1.2 SISMOLOGÍA	5
	1.2.1 Actividad Sísmica	5
	1.2.2 Energía Sísmica Liberada	6
	1.2.3 Localización de Eventos Sísmicos	8
	1.2.3.1 Localización de eventos asociados a procesos de fractura.	8
	1.3 DEFORMACIÓN	9
	1.3.1 Inclínometría Electrónica	10
	1.4 ACTIVIDAD SUPERFICIAL	11
	1.4.1 Cámaras para el Seguimiento a la Actividad Superficial	11
	1.5 GEOQUÍMICA Y FÍSICOQUÍMICA	16
	1.5.1 Medidas móviles del flujo de SO_2	16
	1.6 CONCLUSIÓN.	18
2	VOLCÁN PURACÉ	19
	2.1 RED DE VIGILANCIA	20
	2.1.1 Red de Estaciones Sísmicas.	20
	2.1.2 Red de Deformación.	20
	2.1.3 Cámaras web.	20
	2.1.4 Magnetotelúrica.	20
	2.1.5 Termometría.	21
	2.1.6 Geoquímica.	21
	2.1.7 Meteorología.	21
	2.1.8 Funcionamiento de Estaciones	22
	2.2 SISMOLOGÍA	23
	2.2.1 Actividad Sísmica	23
	2.2.2 Localización de Eventos Sísmicos	25
	2.3 DEFORMACIÓN	26
	2.3.1 Inclínometría Electrónica	26
	2.3.2 Estaciones GNSS Permanentes	29
	2.3.3 Medición Electrónica de Distancias (EDM)	31
	2.4 CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	32
	2.4.1 Potenciales Eléctricos Espontáneos	32
	2.4.2 Magnetometría	33

2.5	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	34
2.6	FISICOQUÍMICA	38
2.6.1	Medidas de Gas Radón	38
2.6.2	Fuentes Termales	39
2.6.3	Termometría	42
2.6.4	Imagen térmica de la cima del volcán Puracé	42
2.6.5	Medidas Móviles de Flujo de SO_2	44
2.6.6	Medidas de flujo de CO_2	45
3	VOLCÁN SOTARÁ.	46
3.1	RED DE VIGILANCIA	46
3.1.1	Generalidades	46
3.1.1.1	Red de Estaciones Sísmicas.	46
3.1.1.2	Red de Deformación.	47
3.1.1.3	Red de Actividad Superficial.	47
3.2	SISMOLOGÍA	48
3.2.1	Actividad Sísmica	48
3.2.2	Energía Sísmica Liberada	49
3.2.3	Localización de Eventos Sísmicos	51
3.2.3.1	Localización de eventos asociados con procesos de fractura.	51
3.3	DEFORMACIÓN	51
3.3.1	Inclinometría Electrónica	51
3.3.2	Estaciones GNSS Permanentes	53
3.3.3	Medición Electrónica de Distancias (EDM)	55
3.4	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	55
3.5	CONCLUSIÓN	55
4	ACTIVIDAD TECTÓNICA LOCAL.	57

TABLA DE FIGURAS

Figura 1	Volcán Nevado del Huila.	3
Figura 2	Funcionamiento de la red de monitoreo volcánico del volcán Nevado del Huila durante el año 2012.	5
Figura 3	Red de vigilancia en sismología del volcán Nevado del Huila.	6
Figura 4	Número de eventos registrados diariamente en el VNH para el segundo semestre del año 2012.	6
Figura 5	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila.	7
Figura 6	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila.	7
Figura 7	Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos.	8
Figura 8	Relación magnitud local (M_L) – fecha de los eventos VT localizados para el segundo semestre del año 2012.	9
Figura 9	Red de vigilancia en deformación del volcán Nevado del Huila.	10
Figura 10	Comportamiento del inclinómetro electrónico Caloto.	11
Figura 11	Red de monitoreo de la actividad superficial del volcán Nevado del Huila.	11
Figura 12	Diagrama de Rosa de los vientos VNH. Modelo WRF IDEAM para el segundo semestre de 2012.	12
Figura 13	Imágenes captadas por la cámara web Tafxnú.	13
Figura 14	Imágenes captadas por la cámara web Maravillas.	14
Figura 15	Imágenes captadas por la cámara web Caloto.	15
Figura 16	Espectrogramas de SO_2 , Movildoas y Flyspec.	16
Figura 17	Medidas móviles de flujo de SO_2 en el VNH.	17
Figura 18	Velocidades del viento reportadas por el Modelo WRF.	17
Figura 19	Velocidades del viento reportadas por el Modelo WRF.	18
Figura 20	Volcán Puracé.	19
Figura 21	Mapa de la red de vigilancia del volcán Puracé.	20
Figura 22	Funcionamiento de la red de monitoreo volcánico del volcán Puracé durante el año 2012.	23
Figura 23	Número de eventos registrados diariamente en el volcán Puracé.	24
Figura 24	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Puracé.	24
Figura 25	Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Puracé.	24
Figura 26	Distribución de la magnitud de duración para eventos VT, volcán Puracé.	25
Figura 27	Distribución de la magnitud de coda para eventos LP, volcán Puracé.	25
Figura 28	Mapa de localización epicentral e hipocentral de eventos VT, registrados durante el segundo semestre de 2012 en el volcán Puracé.	26
Figura 29	Mapa de localización de los eventos LP y TO, durante el segundo semestre de 2012 en el volcán Puracé.	26
Figura 30	Red de vigilancia en deformación del volcán Puracé.	27
Figura 31	Comportamiento del inclinómetro electrónico Lavas Rojas hasta diciembre de 2012.	27
Figura 32	Comportamiento del inclinómetro electrónico Guañarita hasta diciembre de 2012.	28
Figura 33	Comportamiento del inclinómetro electrónico Agua Blanca hasta diciembre de 2012.	28

Figura 34	Comportamiento del inclinómetro electrónico Curiqinga hasta diciembre de 2012. . .	29
Figura 35	Línea Base de comportamiento para la estación GNSS permanente Lavas Rojas. . .	30
Figura 36	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Guañarita. . .	30
Figura 37	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Blanca.	31
Figura 38	Mediciones EDM desde la base La Mina en el volcán Puracé.	31
Figura 39	Red de monitoreo de campos electromagnéticos del volcán Puracé.	32
Figura 40	Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Cóndor.	33
Figura 41	Mediciones magnetométricas en el volcán Puracé.	34
Figura 42	Mapa de localización de las cámaras web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Puracé.	35
Figura 43	Detalle del campo fumarólico lateral del volcán Puracé.	35
Figura 44	Mosaico de imágenes cámara web Mina.	36
Figura 45	Mosaico de imágenes cámara web Lavas Rojas.	37
Figura 46	Red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Puracé.	38
Figura 47	Variación de la concentración de Radón en suelo medidos en campo cercano.	39
Figura 48	Variación de la concentración de Radón en suelos medidos en campo lejano.	40
Figura 49	Mosaico fuentes termales volcán Puracé.	40
Figura 50	Valores de temperatura en fuentes termales del volcán Puracé.	41
Figura 51	Variación del pH en las fuentes termales del volcán Puracé.	42
Figura 52	Ubicación de la estación termográfica telemetrizada, la cual fue instalada en el campo fumarólico lateral del volcán Puracé.	43
Figura 53	Imágenes del sector de la cima del volcán Puracé, tomadas por el sensor satelital Landsat7.	43
Figura 54	Espectrograma de medida móvil a flujo de SO_2 realizado en la Fuente Termal Pozo Azul.	44
Figura 55	Recorrido de las medidas de flujo de SO_2 realizadas en el sector Pozo Azul.	44
Figura 56	Recorrido de las medidas de flujo de SO_2 realizadas en el sector Pozo Azul.	45
Figura 57	Imagen panorámica del volcán Sotará.	46
Figura 58	Red de vigilancia del volcán Sotará.	47
Figura 59	Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará.	48
Figura 60	Número de eventos VT de muy bajo nivel energético clasificados en el volcán Sotará.	49
Figura 61	Número de eventos VT ocurridos en el volcán Sotará.	49
Figura 62	Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT en el volcán Sotará.	50
Figura 63	Curva de energía liberada y graficada de forma acumulada en el volcán Sotará.	51
Figura 64	Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos del volcán Sotará.	52
Figura 65	Dispersión de los valores de ML para los eventos de fractura localizados en el volcán Sotará.	52
Figura 66	Red de vigilancia en deformación del volcán Sotará.	53
Figura 67	Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará.	53
Figura 68	Comportamiento del inclinómetro electrónico Oso.	54
Figura 69	Comportamiento del inclinómetro electrónico Triángulo.	54
Figura 70	Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Estumo.	54
Figura 71	Mapa de localización de la cámara web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Sotará.	55
Figura 72	Imágenes captadas por la cámara web Cerro Crespo.	56
Figura 73	Localización de la sismicidad tectónica local registrada por la red del OVS-Popayán en la región sur occidente del territorio Colombiano durante el segundo semestre del 2012.	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características de la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila.	4
Tabla 2	Eventos sísmicos ocurridos en el volcán Nevado del Huila para el segundo semestre de 2012.	5
Tabla 3	Eventos con valores de magnitud mayores a $3.0 M_L$	5
Tabla 4	Resumen de las mediciones de SO_2 realizadas durante el segundo semestre de 2012.	16
Tabla 5	Resultado de las mediciones de SO_2 realizadas durante el segundo semestre de 2012.	17
Tabla 6	Características de la red de vigilancia telemétrica del volcán Puracé.	21
Tabla 7	Características de la red de vigilancia no telemétrica del volcán Puracé.	22
Tabla 8	Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012.	23
Tabla 9	Resumen de las mediciones de SO_2 realizadas durante el segundo semestre de 2012.	32
Tabla 10	Valores de temperatura en fuentes termales del volcán Puracé.	41
Tabla 11	Potencial de hidrogeno medido en las fuentes termales del volcán Puracé.	41
Tabla 12	Características de la red de vigilancia del volcán Sotará.	47
Tabla 13	Potencial de hidrogeno medido en las fuentes termales del volcán Puracé.	57



**SERVICIO GEOLÓGICO
COLOMBIANO**

Libertad y Orden

República de Colombia

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 correspondiente al segundo semestre de 2012.



RESUMEN

En el segundo semestre de 2012 el volcán Nevado del Huila continuó presentando una tendencia estable en los bajos niveles de sismicidad ocurridos, no obstante, se destaca la ocurrencia de tres eventos de fractura con magnitudes mayores a $3.0 M_L$ en la escala de Richter, ocurridos los días 16 de julio, 27 de noviembre y 5 de diciembre, presentando un rango de profundidades entre 1 y 14 *km*, y localizados en su respectivo orden en dirección SW, SE y NE del Pico Central. El inclinómetro electrónico Caloto registró un comportamiento estable en sus componentes Este y Norte, con ligeras variaciones debidas a efectos externos causados por la temperatura, que no se relacionaron con cambios en las demás técnicas de vigilancia volcánica. En cuanto a las mediciones de Dióxido de Azufre (SO_2) a la atmósfera, las mediciones realizadas durante el segundo semestre del año 2012 captaron niveles considerados bajos, el valor máximo obtenido se presentó el día 7 de noviembre, con un flujo total estimado de 757 toneladas diarias. Del seguimiento realizado a la actividad superficial a través de las cámaras web, no se detectaron cambios morfológicos destacables. Por lo anterior, y de acuerdo al análisis de la información obtenida a partir de las diferentes redes de vigilancia durante el segundo semestre de 2012, 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 cuanto a la sismicidad registrada en el volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012, se mantuvo el predominio de la actividad asociada a la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos sobre aquella relacionada con procesos de fracturamiento de roca. El análisis de los datos registrados por la red de inclinómetros electrónicos y de estaciones GNSS con que cuenta el volcán Puracé, permite establecer que por el momento no se están presentando procesos deformativos en el volcán; de igual forma, mediante el monitoreo de los diferentes parámetros geoquímicos, así como del análisis de los datos registrados por el sensor de autopotencial Cóndor y el magnetómetro Laguna, se determina que tales parámetros de monitoreo presentan una tendencia estable, con pequeñas variaciones que no tienen relación con la actividad del volcán. Cabe destacar que con el fin de ampliar y mejorar la cobertura de las redes de monitoreo, el día 17 de julio se llevó a cabo la instalación de una estación sismológica banda ancha, que se ubicó en la parte norte del Valle del Paletará, a la cual se le denominó Agua Bonita; así mismo, el día 5 de septiembre se instaló una estación climatológica en el sector conocido como Mina. A partir del análisis de la información de los diferentes parámetros monitoreados durante el semestre II de 2012, el OVS Popayán mantiene el nivel de actividad volcánica del volcán Puracé en *NIVEL IV: VOLCAN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE*.

El volcán Sotaró registró un incremento en la actividad sísmica durante el segundo semestre de 2012, registrándose en él 8908 eventos sísmicos, los cuales estuvieron relacionados exclusivamente con procesos de fracturamiento de roca, todos considerados como de bajo nivel energético, no obstante, se registraron 8 sismos con magnitudes entre 2.0 y 2.2 M_L en la escala de Richter. Los datos registrados por el inclinómetro de Oso evidenciaron un comportamiento inflacionario, coherente con el incremento en la actividad sísmica de los meses de junio, julio y agosto. En el mes de septiembre se llevó a cabo la instalación de la estación sismológica Triángulo, mientras que en diciembre se instaló la estación sismológica y el GNSS denominados Estumo. Considerando que durante el segundo semestre de 2012 se registraron cambios importantes en la actividad del volcán Sotaró, se declaró cambio de nivel de actividad volcánica a partir del 8 de agosto del mismo año. Por tanto se pasó de *NIVEL IV: VOLCÁN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE a NIVEL III: CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA*.



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 la ciudad de Popayán (ver figura ??).

Este complejo volcánico presenta una forma elongada en dirección N-S, con ejes basales de $16 km$ de largo y $11 km$ de ancho. Su cima está cubierta por un casquete glaciar de $10 km^2$, en la que sobresalen las topografías que se conocen como Pico Norte, La Cresta, Pico Central y Pico Sur, dispuestos en dirección N-S; así como los domos Cerro Negro y El Morrillo, descubiertos en el sector sur, a raíz del retroceso glaciar de los últimos años; además del domo extruido en los procesos eruptivos ocurridos en noviembre de 2008 y octubre de 2009, el cual se halla emplazado en la parte alta del edificio volcánico entre los Picos Central y Sur.

El Pico Central, que se caracteriza por tener una altura de $5364 msnm$. (máxima altura del complejo volcánico), se constituye en la máxima altura de la cadena montañosa de los Andes en Colombia y en el eje central de la actividad volcánica del Nevado del Huila; dado que en él se concentran los principales focos de actividad sísmica y fumarólica que presenta el edificio volcánico.

1.1. RED DE VIGILANCIA

La red de vigilancia del volcán Nevado del Huila está compuesta por diversos instrumentos, que se emplean para medir diferentes parámetros mediante técnicas tales como: sismología, geoquímica y geodesia. Durante todo el año se hace un seguimiento al desempeño de toda la red de vigilancia, el cual se evalúa en términos porcentuales.

1.1.1. Generalidades

1.1.1.1. Red de Estaciones Sísmicas. Durante el segundo semestre de 2012 el OVS-Popayán contó con una red operativa de cuatro estaciones sísmicas. La estación triaxial de corto período Verdún2 (VER2), instalada en el extremo norte del edificio volcánico a $5.5 km$ del Pico Central; y tres estaciones triaxiales



de Banda Ancha, Buco (BUCB), a 11.2 *km* al sur del Pico Central, Maravillas (MARB), a 12.6 *km* al sureste del Pico Central, y Caloto (CALB), a 3.7 *km* al sur del Pico central.

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

1.1.1.3. Cámaras Web. El volcán Nevado del Huila cuenta con tres cámaras con conexión IP para el monitoreo de la actividad superficial; estos equipos se encuentran ubicados en el extremo sur del edificio volcánico, en los sectores de Tafxnú (Resguardo de Taravira, 21 *km* al sur del Pico Central), Maravillas (12.6 *km* al suroriente del Pico Central) y Caloto (3.5 *km* del domo que emergió en noviembre de 2008).

1.1.1.4. ScanDOAS. Con el fin de monitorear las emisiones de SO_2 del volcán Nevado del Huila, se cuenta con una estación ScanDOAS, la cual se encuentra instalada a 52 *km* al NW del Pico Central.

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

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 3.7 *km* al SW del Pico Central.

La tabla 1 describe la red de vigilancia del volcán Nevado del Huila en cuanto a localización y operatividad.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altitud (<i>msnm</i>)	Distancia al Pico Central (<i>km</i>)	Operativa
Aurora	Flujos de lodo	2.7755	75.9597	1904	17.9	SI
Buco	Estación Banda Ancha	2.8265	76.0548	2310	18.5	SI
	Flujos de lodo	2.8014	76.0578	2107	13.7	SI
Calderitas	Flujos de lodo	2.7385	75.9691	1757	21.3	SI
Cali	Estación ScanDOAS	3.3721	76.5297	998	74.11	SI
Caloto	Estación Banda Ancha	2.8901	76.0426	4184	3.8	SI
	Cámara web					SI
	Estación Acústica					SI
	Inclinómetro Electrónico					SI
Cohetandiyó	Flujos de lodo	2.7371	76.0304	1842	20.5	NO
Maravillas	Estación Banda Ancha	2.8397	75.9510	2207	12.5	SI
	Cámara web	2.8383	75.9515	2194	12.6	SI
Manantial	Flujos de lodo	2.9968	76.4938	1159	51.7	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 desempeño de su sistema telemétrico y de adquisición de datos (50%), al igual que 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 2012 la red de vigilancia del Volcán Nevado del Huila presentó un porcentaje de funcionamiento del 84 %, sobre el 89 % 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 2.

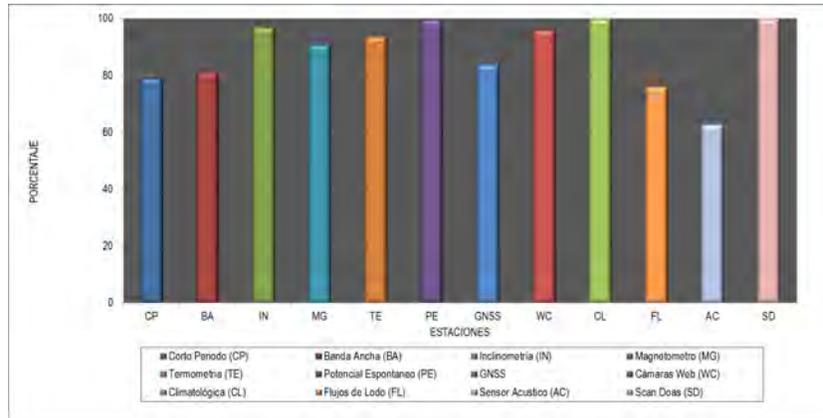


Figura 2: Funcionamiento de la red de monitoreo volcánico del volcán Nevado del Huila durante el año 2012.

1.2. SISMOLOGÍA

1.2.1. Actividad Sísmica

Durante el segundo semestre del año 2012 la red de estaciones sísmológicas del volcán Nevado del Huila registró un total de 2295 eventos sísmicos, de los cuales 831 estuvieron asociados a procesos de fracturamiento de roca (Tipo VT) y 1376 con la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos. De estos últimos, 1253 fueron catalogados como eventos de Largo Periodo (Tipo LP), 87 como pulsos de tremor (Tipo TR), 122 eventos asociados tanto a fracturamiento de roca como tránsito de fluidos (Topo HB), además de un evento catalogado como Tipo tornillo (TO) y uno más como señal de baja frecuencia (Tipo BF). En la figura 3 se aprecia la distribución de la red de monitoreo sísmico del Nevado del Huila.

La tabla 2 y la figura 4 muestran la tendencia en cuanto al número de eventos registrados cada dos meses, además del total para el año 2012 en el volcán Nevado del Huila.

Fecha	Tipos de eventos					Total fluidos	VT + Fluidos
	VT	LP	HB	TO	TR		
Sismicidad segundo semestre de 2012.	831	1254	122	1	87	1464	2295

Tabla 2: Eventos sísmicos ocurridos en el volcán Nevado del Huila para el segundo semestre de 2012.

De la sismicidad ocurrida se destacan 7 eventos tipo VT de magnitudes superiores a 3 M_L en la escala de Richter, los cuales en su momento fueron reportados a la comunidad y se listan a continuación:

Fecha	M_L	Profundidad (km)	Epicentro respecto del Pico Central (km)
16/07/2012	3.6	6.8	10 SW
27/11/2012	3.1	14	32 SE
05/12/2012	3.1	1	1 NE

Tabla 3: Eventos con valores de magnitud mayores a 3.0 M_L .

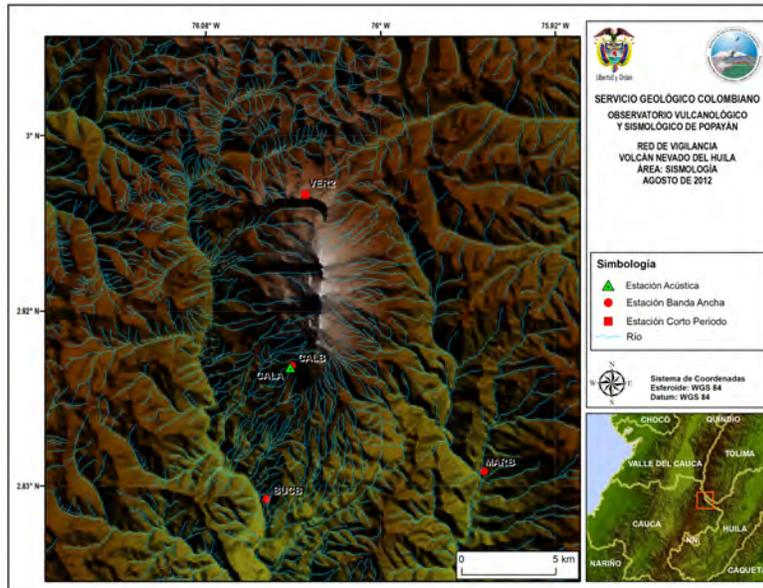


Figura 3: Red de vigilancia en sismología del volcán Nevado del Huila. Diciembre de 2012.

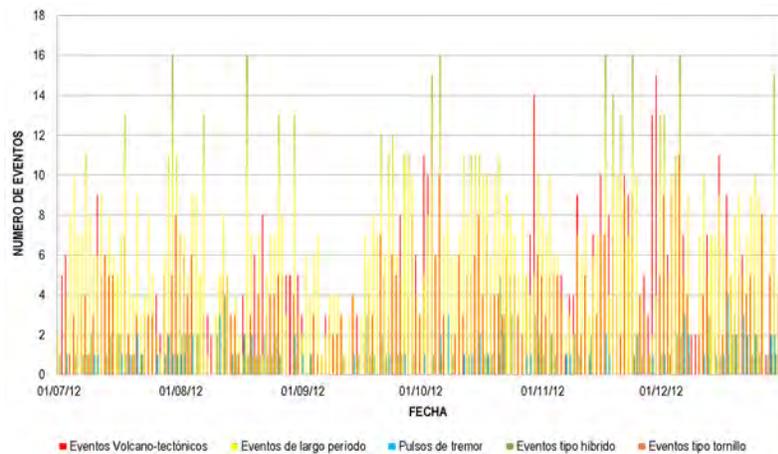


Figura 4: Número de eventos registrados diariamente en el VNH para el segundo semestre del año 2012.

1.2.2. Energía Sísmica Liberada

Los aportes energéticos realizados tanto por la sismicidad VT así como por la tipo LP se caracterizaron por presentar una tendencia estable a lo largo del período evaluado. El valor máximo de energía liberada diariamente por los eventos VT fue de $5.9E+15$ *ergios*, el cual fue alcanzado el día 27 de noviembre, asociado a la ocurrencia de 5 eventos, de los cuales dos alcanzaron una magnitud local de 1.7 y 3.1 M_L , respectivamente. Por su parte, la sismicidad LP liberó el máximo de energía diaria el día 19 de noviembre, con un valor de $7.14E+13$ *ergios* asociado al registro de catorce señales sísmicas de este tipo.

La figura 5 muestra la tendencia de la energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP. En ella es posible apreciar que los aportes energéticos presentaron una tendencia estable durante el segundo semestre del año 2012, con picos máximos cuando se presentaron eventos VT de magnitudes considerables como los mencionados en la tabla 3 (resaltados con flechas rojas en la figura 5), situación que igualmente se refleja en la gráfica contenida en la figura 6, la cual ilustra la tendencia de las curvas de energía sísmica



liberada de forma acumulada. En ella se aprecia que la energía liberada por los eventos LP presentaron un comportamiento más continuo y estable que la sismicidad VT. No obstante, fue esta última la que realizó los mayores aportes energéticos acumulados dentro del período evaluado, pese a que no constituye la principal fuente de generación de sismicidad dentro del proceso volcánico actualmente.

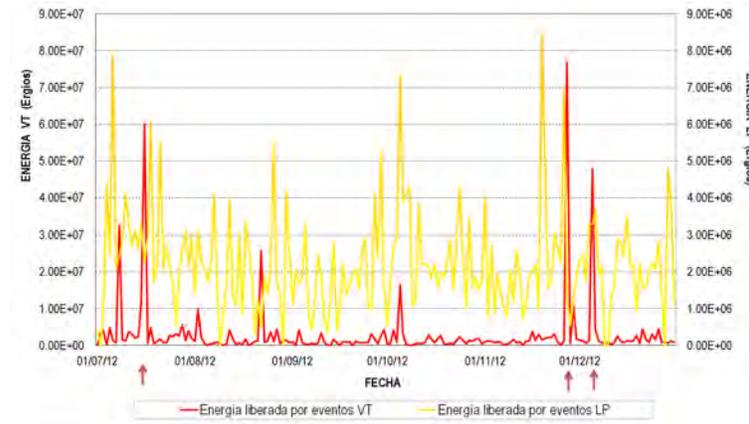


Figura 5: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila. Segundo semestre del año 2012.

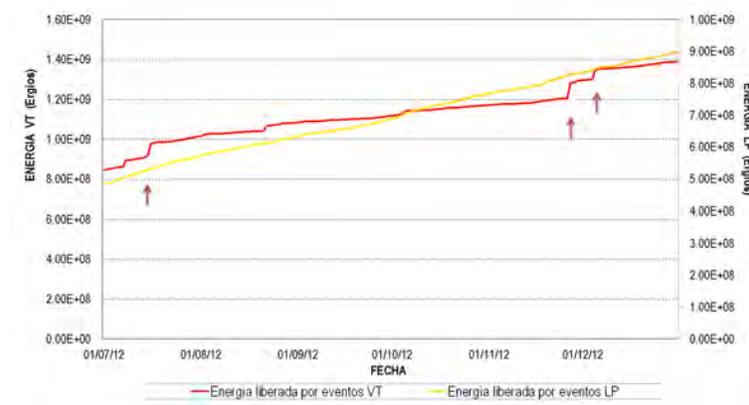


Figura 6: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Nevado del Huila. Segundo semestre del año 2012.

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

1.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

1.2.3.1. Localización de eventos asociados a procesos de fractura. Se obtuvo un total de 831 eventos sísmicos asociados con procesos de fracturamiento de roca registrados durante el segundo semestre del año 2012, fue posible localizar 339 de ellos (figuras 7 y 8). Se reconocieron cuatro zonas principales de concentración epicentral:

La primera de ellas corresponde al sector Suroeste del edificio volcánico, en un área localizada a distancias de entre 4 y 15 *km* del Pico Central. Dicha sismicidad ocurrió en un rango hipocentral que osciló principalmente entre los 3 y los 13 *km*, así como por alcanzar magnitudes de hasta 3.6 M_L en la escala de Richter, no obstante, en su mayoría estos eventos se caracterizaron por ser de bajo nivel energético.

El segundo sector se ubicó al Noreste del edificio, a distancias hipocentrales entre 9 y 15 *km*, con profundidades entre 2 y 5 *km*, alcanzando magnitudes de 1.7 M_L en la escala de Richter.

La tercer zona al Este y Sureste del edificio, con distancias hipocentrales entre 5 y 10 *km*, con profundidades entre 3 y 7 *km*, alcanzando magnitudes de 3.3 M_L en la escala de Richter.

El último sector ubicado en la parte alta del edificio volcánico, se caracterizó por presentar profundidades entre 0.7 y 6 *km*, alcanzando magnitudes de 3.1 M_L en la escala de Richter. (tabla 3).

La sismicidad restante se localizó de forma dispersa hacia los sectores E, Noreste y Noroeste del volcán, caracterizándose en su mayoría por presentar hipocentros profundos de hasta 18 *km*, y por no alcanzar niveles energéticos representativos.

La figura 7 muestra el mapa de localización epicentral e hipocentral de los eventos de fractura localizados durante el año 2012, por su parte, la figura 8 muestra la distribución de magnitudes locales a lo largo del año, apreciándose que la mayoría de los eventos sísmicos se caracterizaron por presentar magnitudes locales menores a 1.0, según la escala de Richter.

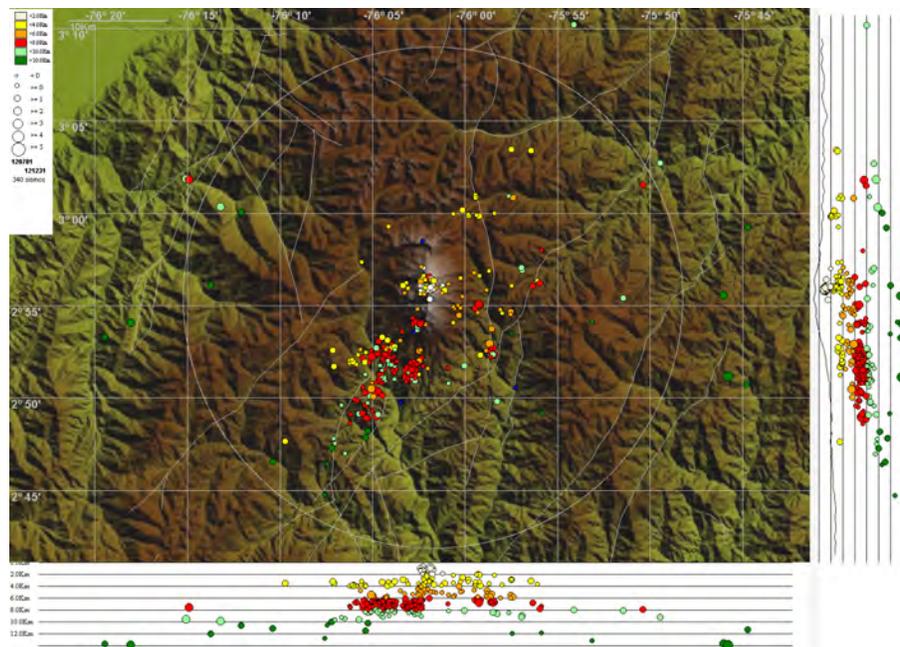


Figura 7: Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos. Segundo semestre del año 2012.

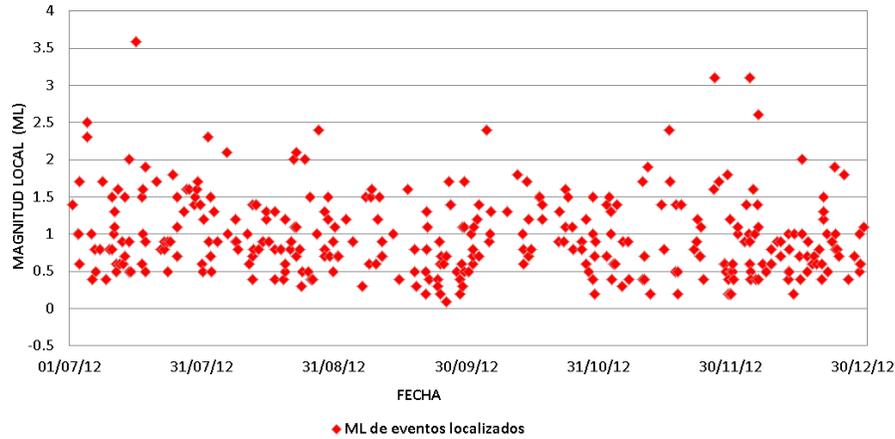


Figura 8: Relación magnitud local (M_L) – fecha de los eventos VT localizados para el segundo semestre del año 2012.

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 centimetrito, 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 9 muestra la localización geográfica de este equipo de monitoreo.

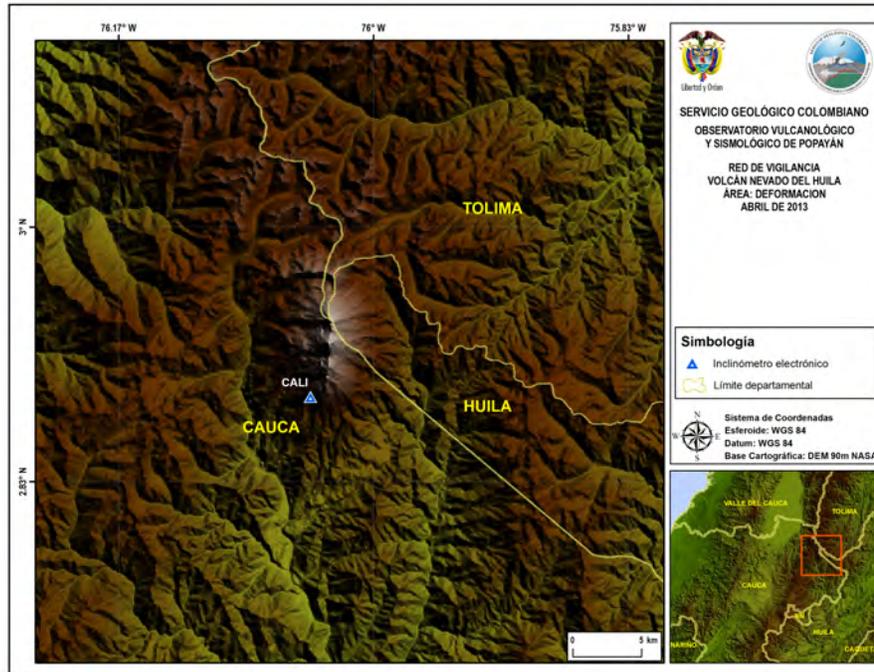


Figura 9: Red de vigilancia en deformación del volcán Nevado del Huila.

1.3.1. Inclínometría 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 segundo semestre de 2012, el inclinómetro Caloto registró un comportamiento estable en sus componentes este y norte, con ligeras variaciones debidas a efectos externos causados por la temperatura. En la figura 10 se puede apreciar la tendencia que han mostrado los registros del inclinómetro durante el período evaluado.

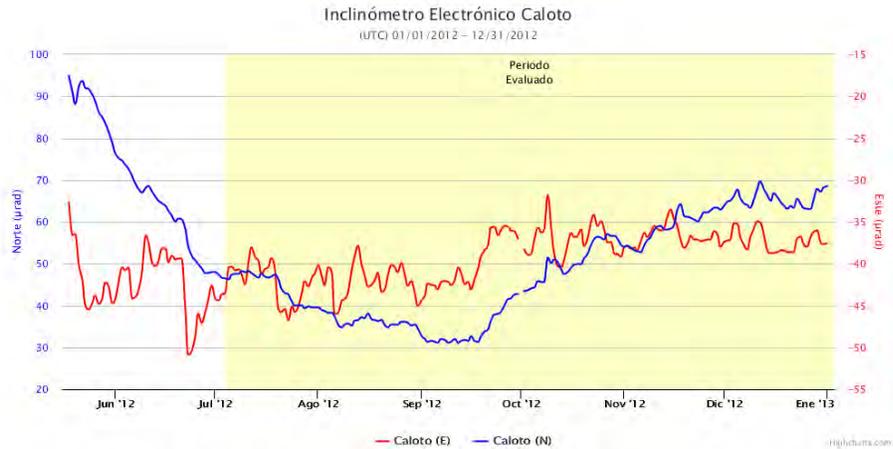


Figura 10: Comportamiento del inclinómetro electrónico Caloto hasta diciembre de 2012.

1.4. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

1.4.1. Cámaras para el Seguimiento a la Actividad Superficial

Durante el segundo semestre de 2012 se continuó realizando el monitoreo de la actividad superficial relacionada con la dinámica interna del volcán por medio de las cámaras web instaladas en el edificio volcánico y área de influencia, Tafxnu, Maravillas y Caloto. Esta ultima instalada el 21 de mayo para apoyar las labores de vigilancia desde el costado sur-occidental del edificio a 3.7 km del domo emplazado sobre el Pico Central. El mapa de la figura 11 permite apreciar la distribución geográfica de dichas cámaras.

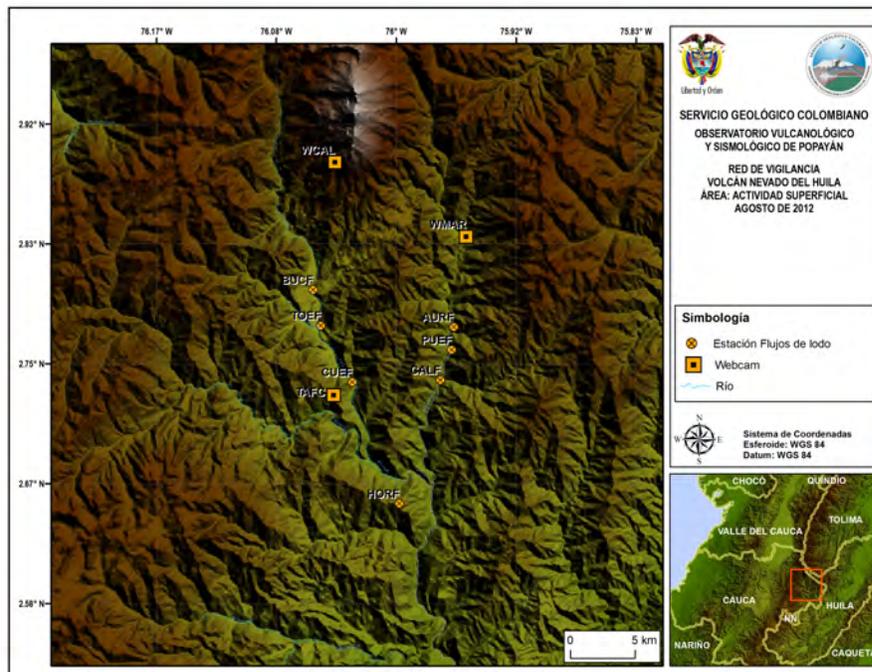


Figura 11: Red de monitoreo de la actividad superficial del volcán Nevado del Huila.

Se observaron algunas descargas del sistema con columnas fumarólicas, las cuales alcanzaron alturas menores a tres kilómetros (3.0 km), emitidas principalmente desde la superficie del cuerpo dómico y



desde las grietas localizadas sobre el Pico Central. En algunas ocasiones estas columnas presentaron una dispersión preferencial hacia los costados Occidental y Noroccidental (W – NW) del edificio, esto debido al patrón de vientos dominante en la zona, siguiendo el comportamiento del viento de manera coherente con las tendencias pronosticadas en el modelo WRF del IDEAM, simuladas para los estratos de 10.000 y 18.000 *pies*, con valores que alcanzan los 21 *m/s* equivalentes a 76 *km/h* (ver figura 12).

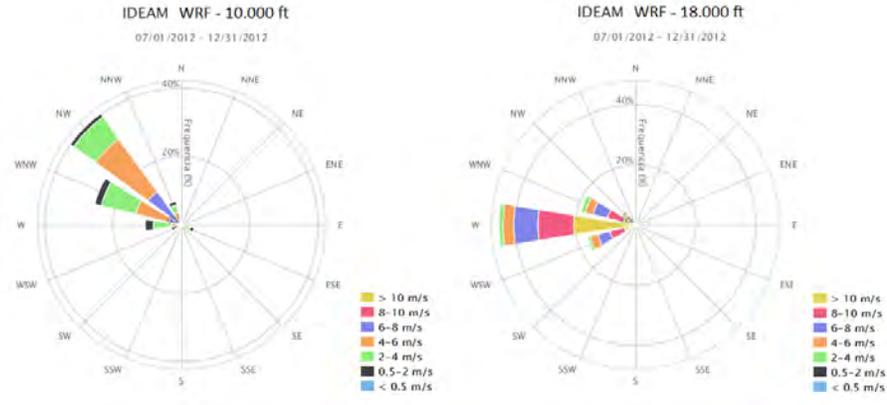


Figura 12: Diagrama de Rosa de los vientos VNH. Modelo WRF IDEAM para el segundo semestre de 20125.

Se capturaron algunas imágenes con línea de vista al edificio volcánico, como se ve en las figuras 3, 4 y 5, especialmente en horas de la mañana entre las 5:30 am y 9:00 am y al caer la tarde, 5:00 pm y las 7:30 pm.



Figura 13: Imágenes del volcán Nevado del Huila captadas por la cámara web Tafxnú durante el segundo semestre de 2012.

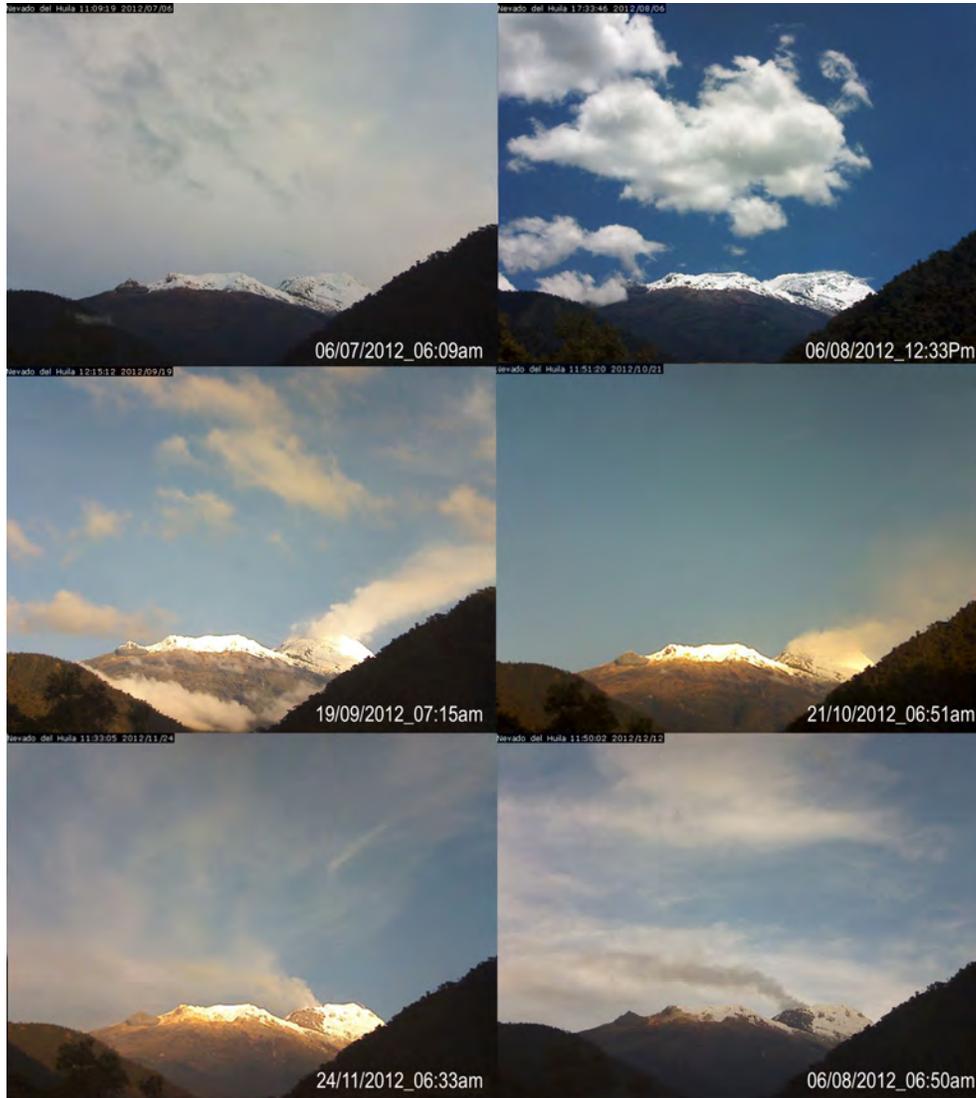


Figura 14: Imágenes del volcán Nevado del Huila captadas por la cámara web Maravillas durante el segundo semestre de 2012.



Figura 15: Imágenes del volcán Nevado del Huila captadas por la cámara web Caloto durante el segundo semestre de 2012.



1.5. GEOQUIMICA Y FISICOQUIMICA

Las medidas de concentración de Dióxido de Azufre (SO_2) constituyen una importante herramienta para el proceso de vigilancia y monitoreo de un complejo volcánico, toda vez que este compuesto químico en estado gaseoso se halla presente en las columnas de gases emitidas por los volcanes activos y algunas veces se relacionan con incrementos en la actividad sísmica interna y/o superficial del mismo, o con procesos eruptivos en evolución.

Dentro del proceso de monitoreo y estudio de los gases en el volcán Nevado del Huila se han venido empleando técnicas de medición conocidas como el DOAS (*Differential Optical Absorption Spectrometer* -MovilDOAS), y FLYSPEC (Espectrómetro ultravioleta de correlación), la primera de ellas se viene realizando de manera periódica desde el 2007, en las carreteras del norte del Cauca y suroriente del Valle, la segunda técnica se implementó desde el primer semestre de 2010.

1.5.1. Medidas móviles del flujo de SO_2

Durante el segundo semestre del 2012, en el Volcán Nevado del Huila se realizaron 11 campañas para medir el flujo de SO_2 a través de la técnica MobileDOAS y algunas mediciones paralelas con FLYSPEC. El valor máximo obtenido se realizó el día 7 de noviembre, sobre la vía Panamericana entre el puente del Río Ovejas (Cauca) y el corregimiento del Arenal (Candelaria – Valle del Cauca); en ella el flujo total estimado fue de 757 toneladas diarias con una velocidad del viento de 10.3 m/s, en una columna con dispersión preferencial hacia el noroccidente del edificio volcánico (ver figura 16).

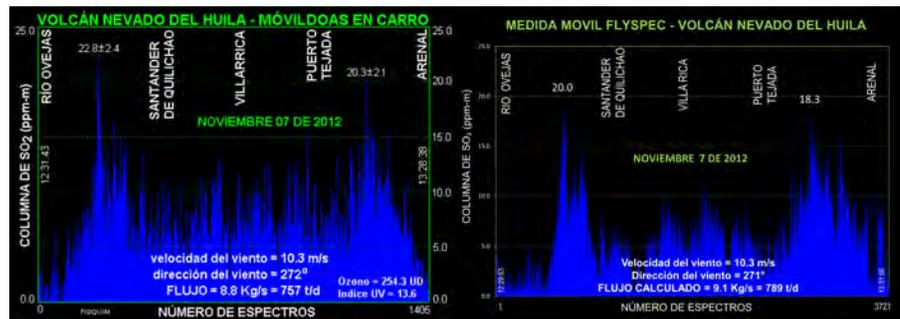


Figura 16: Espectrogramas de SO_2 , Movildoas y FLYspec, VNH – 7 de noviembre de 2012.

Los detalles de las mediciones realizadas durante el segundo semestre del 2012 y el resultado de los cálculos efectuados a los flujos de dióxido de azufre reportados se compilan en las tablas 9 y 5. Algunas de las mediciones más importantes se presentan en la figura 17.

Fecha	Recorrido	Dispersión de la columna	Flujo SO_2 (t/día)	Flujo SO_2 (kg/s)
03/jul/2012	Quinamayó – Florida	NW	299	3.5
18/jul/2012	El Cabuyal – Santander de Quilichao	W	359	4.2
30/jul/2012	Santander de Quilichao – El Cabuyal	NW	493	5.7
17/sep/2012	Villa Rica – Cabuyal	NW	450	5.2
25/sep/2012	Juanchito – Florida (Valle del Cauca)	NW	151	1.7
03/oct/2012	Ingenio Castilla, Florida - Quinamayó	NW	374	4.3
30/oct/2012	Mandivá (Cauca) – Pradera (Valle del Cauca)	NW	376	4.4
07/nov/2012	Río Ovejas (Cauca) - El Arenal (Valle del Cauca)	W–NW	757	8.8
14/nov/2012	Pradera (Valle del Cauca) - Santander de Quilichao (Cauca)	NW	171	2.0
19/nov/2012	Mandivá (Cauca) - Incauca	NW	162	1.9
27/nov/2012	La Agustina - Villa Rica	NW	345	4.0

Tabla 4: Resumen de las mediciones de SO_2 realizadas durante el segundo semestre de 2012.

La figura 17 presenta los valores de flujos de SO_2 calculados durante el segundo semestre del 2012; el área sombreada resalta las 11 mediciones realizadas durante este período. Estos valores muestran un



Fecha	SO ₂ Max. (ppm - m)	Dirección del viento (°)	Velocidad del viento m/s	Ancho de la columna (km)
03/jul/2012	13.3	306	10	57.6
18/jul/2012	7.7	304	18	48.4
30/jul/2012	15.6	307	14.1	37
17/sep/2012	48	316	7.8	15.6
25/sep/2012	63.8	325	6.2	27.1
03/oct/2012	15.2	318	6.4	59
30/oct/2012	30.5	293	3.4	60
07/nov/2012	22.8	272	10.3	67
14/nov/2012	29.2	322	3.9	73
19/nov/2012	15.9	291	4.2	25
27/nov/2012	16.5	296	10.5	42

Tabla 5: Resultado de las mediciones de SO₂ realizadas durante el segundo semestre de 2012.

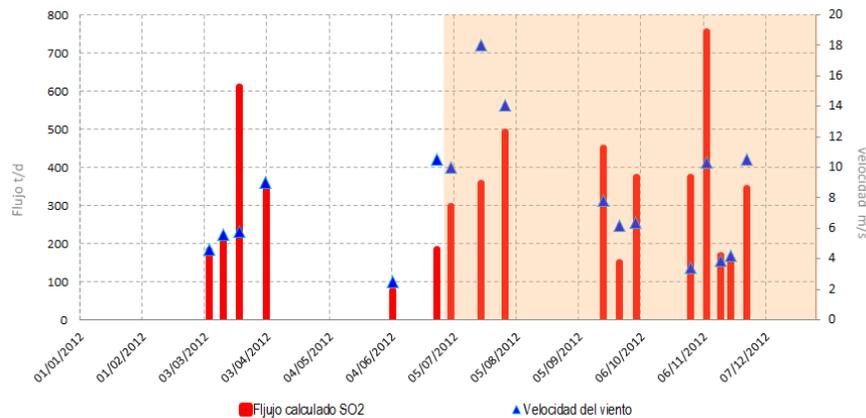


Figura 17: Medidas móviles de flujo de SO₂ en el VNH. Segundo semestre de 2012.

sistema con bajos aportes de dióxido de azufre (SO₂) a la atmósfera, el cual se sostiene, comparándolo con lo históricamente registrado en estados de crisis (2007-2008) y post-crisis (2009-2011) para este volcán (valores menores a las ≤ 800 t/día).

Los flujos de SO₂ fueron calculados con valores de velocidad del viento reportados por el Modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*), pronóstico diario suministrado por el IDEAM para el volcán Nevado del Huila. Teniendo en cuenta la altura del edificio volcánico (5365 msnm) se asumen las velocidades del modelo a 18000 pies, las cuales se presentan en nudos y se convierten en m/s. Las velocidades promedio reportadas por este pronóstico se encuentran entre los 2 m/s a 21 m/s, con vientos que alcanzan velocidades entre los 7.2 y 7.6 km/h (ver figura 18)

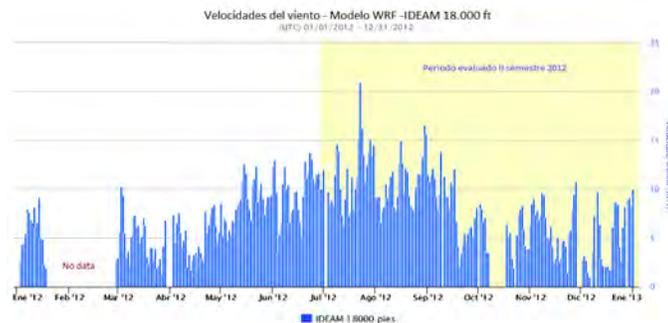


Figura 18: Velocidades del viento reportadas por el Modelo WRF. Segundo semestre de 2012.

Las detección de columnas de flujo de SO_2 emitido por el volcán Nevado del Huila en el segundo semestre de 2012 presentó una tendencia dominante hacia el costado occidental y noroccidental del edificio, tal y como se muestran en los mapas de dispersión reportados en la figura 19.

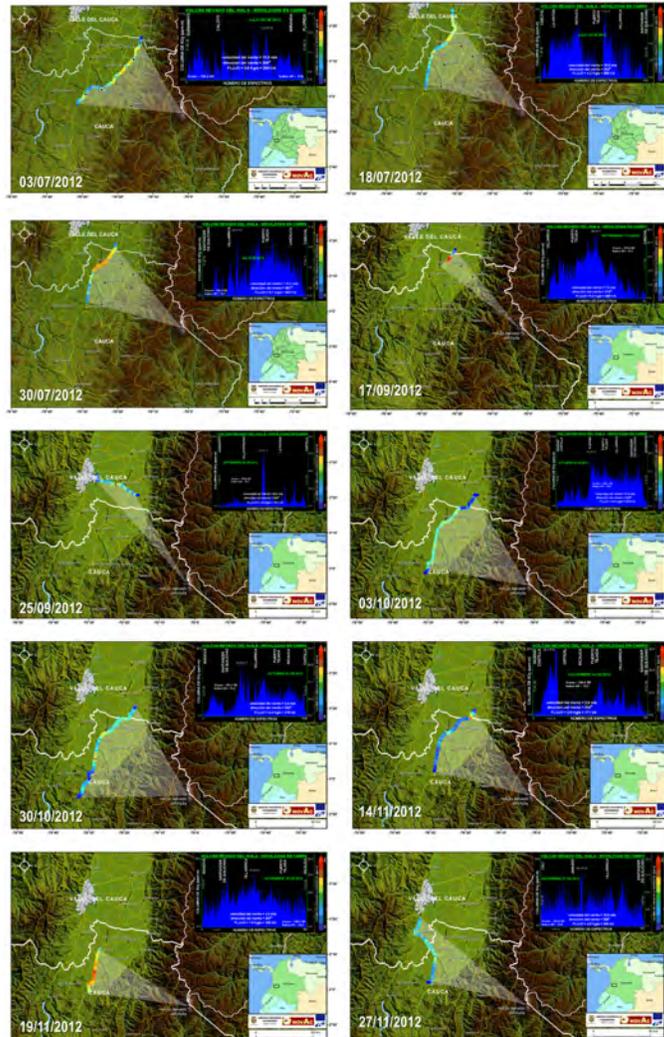


Figura 19: Velocidades del viento reportadas por el Modelo WRF. Segundo semestre de 2012.

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 segundo semestre del año 2012 los niveles de actividad permanecieron estables, donde predominan los procesos relacionados 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 20: Volcán Puracé. Imagen captada durante sobrevuelo del 22 de octubre de 2011.

El volcán Puracé se encuentra ubicado en el departamento del Cauca, en las coordenadas geográficas $2^{\circ} 22' N$ y $76^{\circ} 23' O$, 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 20).

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 20)

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 las fuentes termales de San Juan, Pilimbalá, Agua Tibia y Agua Hirviendo.

2.1. RED DE VIGILANCIA

El volcán Puracé cuenta en la actualidad con una red de vigilancia compuesta por 66 estaciones, las cuales, se emplean para medir diferentes parámetros físicos mediante técnicas tales como sismología, deformación, magneto - telúrica, geoquímica y actividad superficial. Esta red presentó un nivel óptimo de funcionamiento durante el segundo semestre del 2012 alcanzando el 90

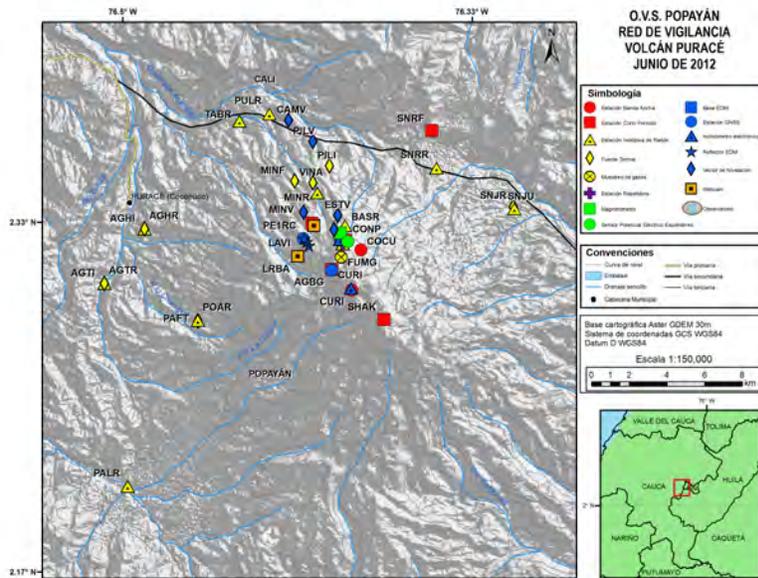


Figura 21: Mapa de la red de vigilancia del volcán Puracé.

2.1.1. Red de Estaciones Sísmicas.

En el período evaluado se contó con una red operativa de diez estaciones sismológicas, de las cuales seis cuentan con sensores de corto periodo, así como con cuatro estaciones equipadas con sensores de Banda Ancha. Su promedio de funcionamiento durante el período presentado fue del 82 %.

2.1.2. Red de Deformación.

Para el monitoreo de los procesos de deformación asociados con la actividad volcánica, el volcán Puracé contó durante el segundo semestre de 2012 con nueve estaciones operativas: cuatro inclinómetros electrónicos, cuatro estaciones GNSS permanentes y la estación de referencia, Popayán, localizada a 27 km del cráter del volcán Puracé. Por otro lado, se realizaron medidas periódicas con una línea de tres reflectores EDM desde una una base. Durante el período analizado, esta red de monitoreo presentó un promedio de funcionamiento con un valor del 90 %.

2.1.3. Cámaras web.

Para el monitoreo de la actividad superficial el volcán Puracé contó durante el periodo presentado con dos cámaras con conexión IP, localizadas a 2 km al noroccidente del volcán Puracé. Para este período estas cámaras tuvieron un valor de funcionamiento de 93 %.

2.1.4. Magnetotelúrica.

Con el fin de monitorear las variaciones del campo natural del potencial eléctrico así como del campo magnético local, el volcán Puracé contó durante este período con un sensor de potencial eléctrico espontáneo (Cóndor), localizado a 1.1 km al norte del cráter, así como con un magnetómetro (Laguna),



localizado a 1.3 km al norte del cráter. Estos equipos presentaron un funcionamiento durante este período del 93 %.

2.1.5. Termometría.

Para el monitoreo de las variaciones de temperatura del campo fumarólico lateral se tiene instalada una termocupla, localizada a 0.1 km del cráter. Este sensor se mantuvo operativo al 100 % de funcionamiento durante el segundo semestre de 2012.

2.1.6. Geoquímica.

El volcán Puracé cuenta en la actualidad con una red de 33 estaciones isotópicas para el monitoreo del gas radón, las cuales permanecieron operativas al 100 % durante este período. De igual forma, el funcionamiento de la estación telemétrica para el monitoreo de las concentraciones de gas radón (Guañarita) presentó un buen funcionamiento, alcanzado un valor del 100 %.

2.1.7. Meteorología.

Durante el período evaluado la estación meteorológica Mina presentó un funcionamiento del 100 %.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Distancia al Cráter (km)
Cocuy	Banda Ancha	2.3202	76.3866	4289	1.4
Cóndor	Banda Ancha	2.3248	76.3938	4294	1.1
	Corto Período				
	Potencial eléctrico	2.3241	76.3928	4049	1.1
Lavás Rojas2	Banda Ancha	2.3171	76.4166	4049	2
	Cámara web				
Curiqinga	Banda Ancha	2.3010	76.3908	4507	1.9
	Inclinómetro electrónico	2.3018	76.3913	4482	1.8
Agua Blanca	Corto Período	2.3108	76.4005	4374	0.7
	Estación GNSS	2.3105	76.4005	4380	
	Corto Período				
Lavás Rojas	Inclinómetro electrónico	2.3171	76.4165	4046	2
	Estación GNSS	2.3256	76.4141	4051	2.0
	Corto Período	2.3330	76.4099	4049	2.2
Mina	Cámara web	2.3317	76.3959	4082	2.0
	Corto Período	2.3771	76.3527	3518	8.5
Shaka	Corto Período	2.2873	76.3756	4445	4.1
Guañarita	Inclinómetro electrónico	2.3251	76.3964	4248	1
	GNSS				
Laguna	Magnetómetro	2.3283	76.3963	4177	1.33
Cráter	Termocupla	2.3170	76.3960	4500	0.31

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



Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Distancia al Cráter (km)
La Mina	Base EDM	2.3320	76.4090	4075	2.07
	Estación Isotópica de Radón	2.3473	76.4072	3670	3.56
Reflector 1RA	Reflector EDM	2.3223	76.4113	4087	1.53
Reflector 1RB	Reflector EDM	2.3240	76.4123	4067	1.72
Reflector 1RC	Reflector EDM	2.3256	76.4135	4019	1.93
Agua Hirviendo	Estación Isotópica de Radón	2.3301	76.4896	2649	10.21
Agua Tibia	Estación Isotópica de Radón	2.3041	76.5088	2683	12.31
Pozo Azul	Estación Isotópica de Radón	2.2867	76.4642	3125	8.00
San Juan	Estación Isotópica de Radón	2.3398	76.3133	3237	9.83
	Fuente Termal	2.3406	76.3138	3265	9.81
Laguna	Estación Isotópica de Radón	2.3279	76.3954	4196	1.33
Tabío	Estación Isotópica de Radón	2.3816	76.4445	2861	8.84
Base	Estación Isotópica de Radón	2.3318	76.3941	4056	1.77
Paletará	Estación Isotópica de Radón	2.2074	76.4977	2986	16.37
Pululó	Estación Isotópica de Radón	2.3851	76.4301	2867	8.39
Cráter NO1	Estación Isotópica de Radón	2.3209	76.3934	4417	0.77
Cráter NO2	Estación Isotópica de Radón	2.3200	76.3935	4425	0.70
Cráter NO3	Estación Isotópica de Radón	2.3193	76.3937	4451	0.63
Cráter NO4	Estación Isotópica de Radón	2.3186	76.3938	4505	0.59
Cráter NO5	Estación Isotópica de Radón	2.3178	76.3940	4536	0.54
Cráter N1	Estación Isotópica de Radón	2.3193	76.3965	4389	0.40
Cráter N2	Estación Isotópica de Radón	2.3185	76.3961	4440	0.37
Cráter N3	Estación Isotópica de Radón	2.3178	76.3958	4451	0.36
Cráter N4	Estación Isotópica de Radón	2.3171	76.3954	4453	0.37
Cráter N5	Estación Isotópica de Radón	2.3164	76.3951	4575	0.41
Cráter W1	Estación Isotópica de Radón	2.3180	76.3985	4403	0.17
Cráter W2	Estación Isotópica de Radón	2.3174	76.3980	4444	0.13
Cráter W3	Estación Isotópica de Radón	2.3181	76.3985	4503	0.18
Cráter W4	Estación Isotópica de Radón	2.3162	76.3971	4573	0.18
Cráter W5	Estación Isotópica de Radón	2.3154	76.3967	4588	0.25
Cráter SW1	Estación Isotópica de Radón	2.3100	76.3999	4431	0.73
Cráter SW2	Estación Isotópica de Radón	2.3098	76.3991	4451	0.75
Cráter SW3	Estación Isotópica de Radón	2.3095	76.3984	4501	0.77
Cráter SW4	Estación Isotópica de Radón	2.3093	76.3976	4541	0.81
Cráter SW5	Estación Isotópica de Radón	2.3090	76.3968	4592	0.86
Cóndor	Estación Isotópica de Radón	2.3248	76.3947	4317	1.03
San Rafael	Estación Isotópica de Radón	2.3592	76.3504	3425	7.16
Guañarita	Estación Isotópica de Radón	2.3229	76.3953	4393	0.81
Mina El Vinagre	Fuente Termal	2.3522	76.4094	3624	4.14
Versalles	Fuente Termal	2.3529	76.4103	2761	4.25
Hornos Tres	Fuente Termal	2.3049	76.4872	2747	9.92
Hornos Siete	Fuente Termal	2.3049	76.4873	2743	9.92
Fumarola Lateral	Muestreo de gases	2.3167	76.3959	4545	0.31

Tabla 7: Características de la red de vigilancia no telemétrica del volcán Puracé.

2.1.8. Funcionamiento de Estaciones

Durante el año 2012 la red de vigilancia del volcán Puracé mostró un funcionamiento del 91 %, sobre 89 % del total de la red de monitoreo. La gráfica de porcentaje de funcionamiento por cada metodología empleada se muestra en la figura 22.

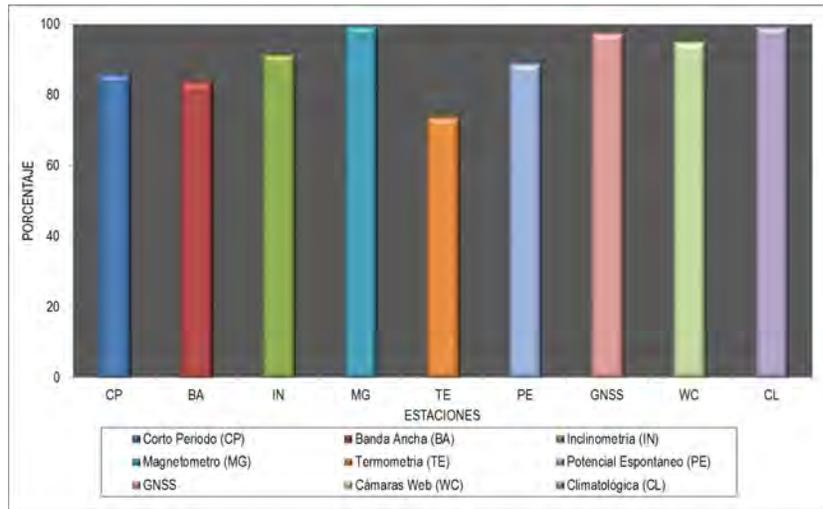


Figura 22: Funcionamiento de la red de monitoreo volcánico del volcán Puracé durante el año 2012.

2.2. SISMOLOGÍA

2.2.1. Actividad Sísmica

Durante el segundo semestre de 2012 se registraron en el volcán Puracé 2026 eventos sísmicos, de los cuales 349 estuvieron relacionados con fracturamiento de roca (tipo VT), 1226 se catalogaron como eventos asociados a la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos (tipo LP), 118 presentaron características combinadas tanto de fracturamiento de roca como de tránsito de fluidos (tipo HB), 235 eventos tipo Tornillo (tipo TO) y 88 pulsos de tremor (tipo TR) de baja magnitud.

De acuerdo a los valores de número de ocurrencia de eventos respecto al primer semestre de 2012, se registró una disminución del 18% en el número total de eventos registrados. La tabla 8 y la figura 23 detallan la ocurrencia de eventos registrados en el volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012.

Fecha	Tipos de eventos						Total VT + fluidos
	VT	LP	HB	TO	TR	Total fluidos	
Número de eventos registrados en el volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012.	179	791	8	90	9	898	1077

Tabla 8: Número de eventos sísmicos registrados en el volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012.

Los niveles energéticos registrados en la sismicidad tipo VT y LP durante este período mostraron un comportamiento estable en términos generales, se observó un incremento en la actividad tipo VT en el mes de diciembre (figura 24), asociado a la ocurrencia de 15 eventos con un rango de magnitudes de duración entre 2 y 2.5 s. Los eventos LP alcanzaron un valor de energía acumulado diariamente de $3.32E+14$ ergios, el comportamiento de esta sismicidad fue estable durante todo el período evaluado (figuras 24 y 25).

Nota: Con el objetivo de visualizar de mejor manera los detalles en los cambios de energía, las gráficas se presentan con el valor de la raíz cuadrada calculada sobre los valores obtenidos. Así mismo ocurre con los valores reportados.

Se puede notar que la energía sísmica acumulada del tipo LP fue mayor en términos de energía liberada en comparación con la de tipo VT, a pesar de mostrar un comportamiento más estable durante todo el semestre (Figura 25).

En las figuras 26 y 27 se aprecia la distribución de la magnitud de duración para los eventos tipo VT y LP, en el segundo semestre de 2012, respectivamente. En las gráficas se observa que un gran porcentaje

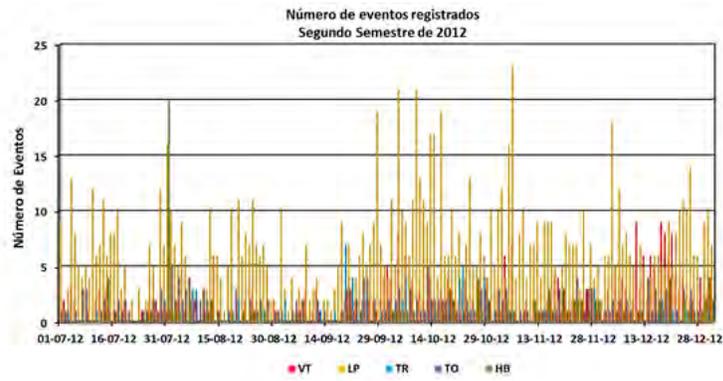


Figura 23: Número de eventos registrados diariamente en el volcán Puracé en el segundo semestre de 2012.

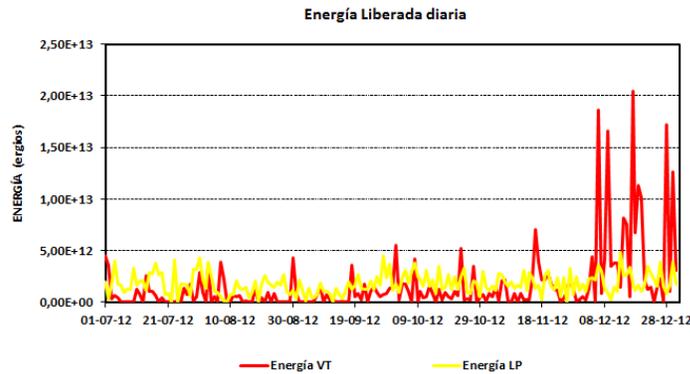


Figura 24: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT y LP en el volcán Puracé en el segundo semestre de 2012.

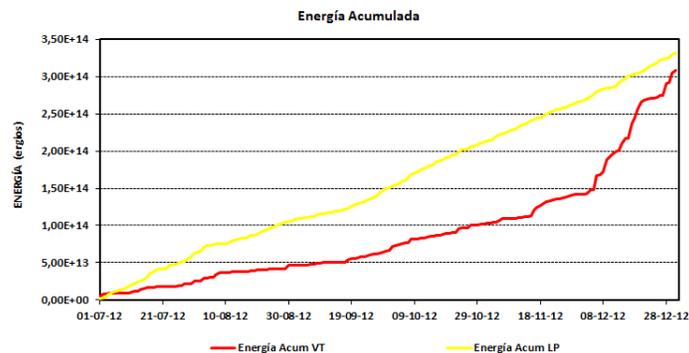


Figura 25: Energía sísmica liberada de forma acumulada por eventos VT y LP en el volcán Puracé en el segundo semestre de 2012.

de los eventos VT presentan magnitudes de duración inferiores a 2.5, siendo los valores más recurrentes los inferiores a 1.9, con una ocurrencia del 96 %; por su parte, los eventos LP en su mayoría presentan magnitudes de duración inferiores a 1.0 en una proporción del 92 %.

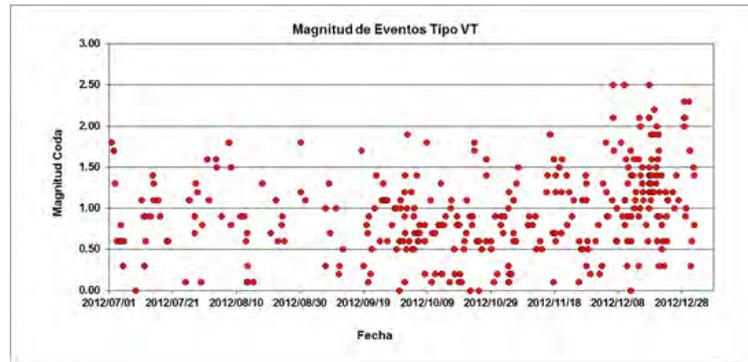


Figura 26: Distribución de la magnitud de duración para eventos VT, volcán Puracé, segundo semestre de 2012.

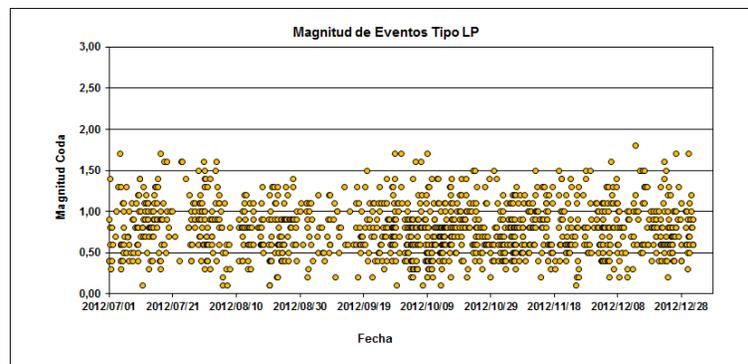


Figura 27: Distribución de la magnitud de coda para eventos LP, volcán Puracé, segundo semestre de 2012.

2.2.2. Localización de Eventos Sísmicos

Con la red de vigilancia sísmica del volcán Puracé fue posible localizar 191 eventos VT (de los 349 registrados, es decir, un 98 % del total) para el segundo semestre de 2012; estos eventos se concentraron principalmente en su extremo NE a distancias epicentrales aproximadas de 10.5 km, (el 46 % de los eventos localizados corresponden a esta fuente sismogénica), con rangos de profundidad de 6 y 15 km así como de magnitud local entre 0.3 y 3.6. En orden de ocurrencia le sigue el edificio volcánico, con profundidades en un rango de 0.5 a 7.5 km, siendo un evento de magnitud local de 2.7 el sismo con mayor magnitud dentro de esta zona. La sismicidad restante se localizó de manera dispersa en los alrededores del edificio volcánico y en dirección SO, en el Valle de Paletará, con distancias al cono activo entre 7 y 19 km, rangos de profundidad entre 5 y 14 km, con magnitudes locales entre 0.4 y 2.1 (figura ??). El punto de referencia empleado para la ubicación hipocentral (profundidad) de los eventos localizados es de 4400 msnm.

Las localizaciones epicentrales de eventos tipo LP y tornillos – realizadas utilizando la atenuación de las amplitudes sísmicas – se concentraron principalmente en el área del cráter actual. En total se atenuaron 647 eventos LP (el 86 % del total de eventos LP registrados) y 181 eventos tipo Tornillo (el 77 % del total), sin mostrar cambios importantes con respecto al período anterior (figura 29).

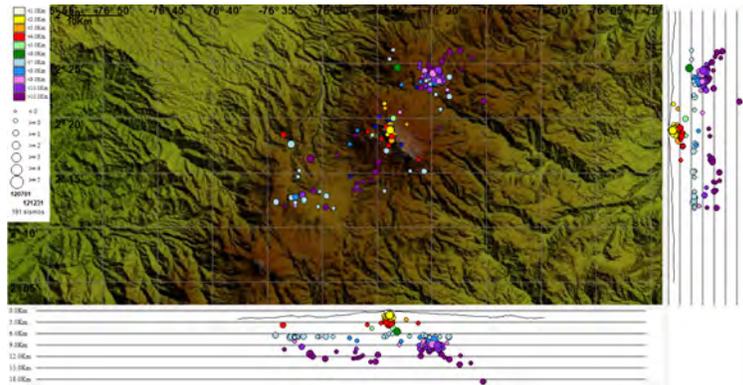


Figura 28: Mapa de localización epicentral e hipocentral de eventos VT, registrados durante el segundo semestre de 2012 en el volcán Puracé. La magnitud de la sismicidad se representa según el tamaño de los círculos, y su color la profundidad de localización. En los cortes EW (abajo) y NS (derecha), cada línea representa 3.0 km de profundidad.

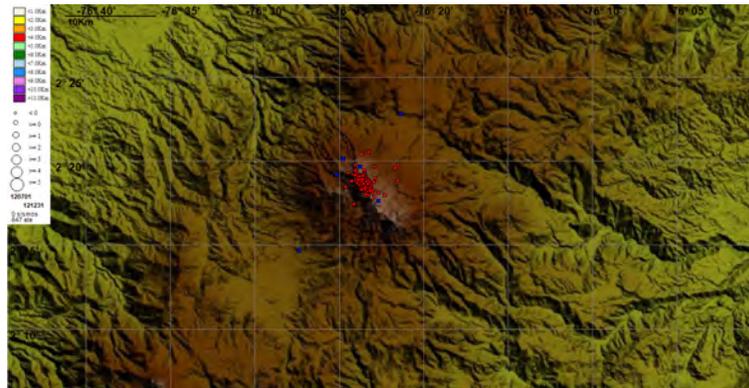


Figura 29: Mapa de localización de los eventos LP y TO, durante el segundo semestre de 2012 en el volcán Puracé.

2.3. DEFORMACIÓN

Durante el segundo semestre de 2012 se contó con el funcionamiento de los cuatro inclinómetros electrónicos (Lavás Rojas, Guañarita, Curiquinga y Agua blanca) y tres estaciones GNSS permanentes (Guañarita, Lavás Rojas y Agua Blanca); también se realizaron mediciones de control topográfico (EDM). La figura 30 muestra la distribución geográfica de las diferentes estaciones que conforman la red de vigilancia en deformación para el 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. Los inclinómetros Lavás Rojas, Curiquinga y Agua Blanca, mostraron durante el segundo semestre de 2012 un comportamiento estable en las componentes norte y este. Hasta finales del mes de octubre las componentes del inclinómetro Guañarita2 continuaron con la misma tendencia que traían desde 2011, a partir de esa fecha y hasta finales de diciembre, las componentes de dicho inclinómetro empezaron a mostrar estabilidad. El comportamiento

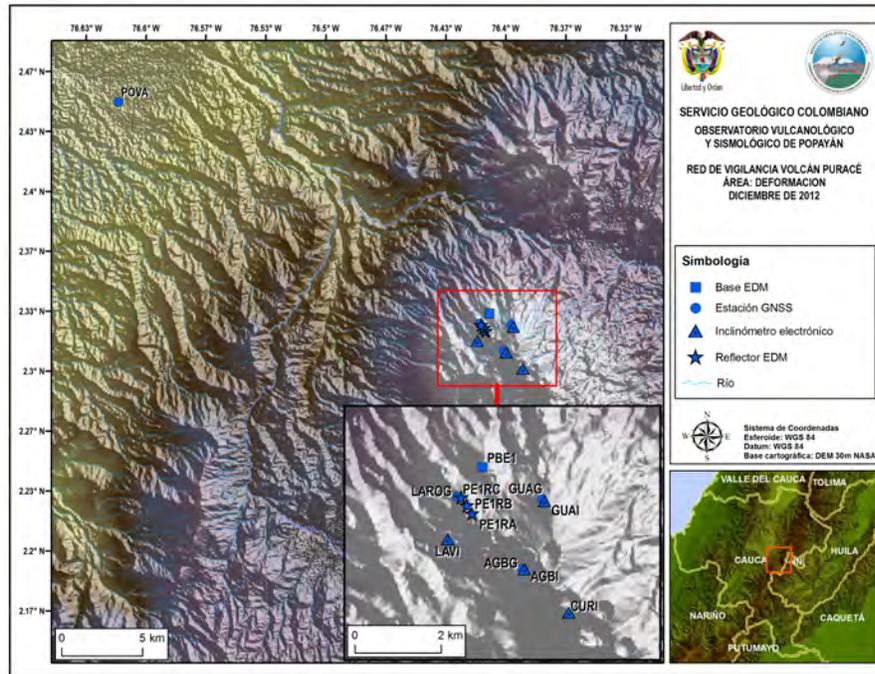


Figura 30: Red de vigilancia en deformación del volcán Puracé.

de este inclinómetro analizado en conjunto con los registros de los demás equipos de la red, sugiere la culminación de un proceso deformativo local que se asocia con la dinámica tectónica regional, lo cual hasta el momento no ha comprometido la estabilidad del sistema volcánico.

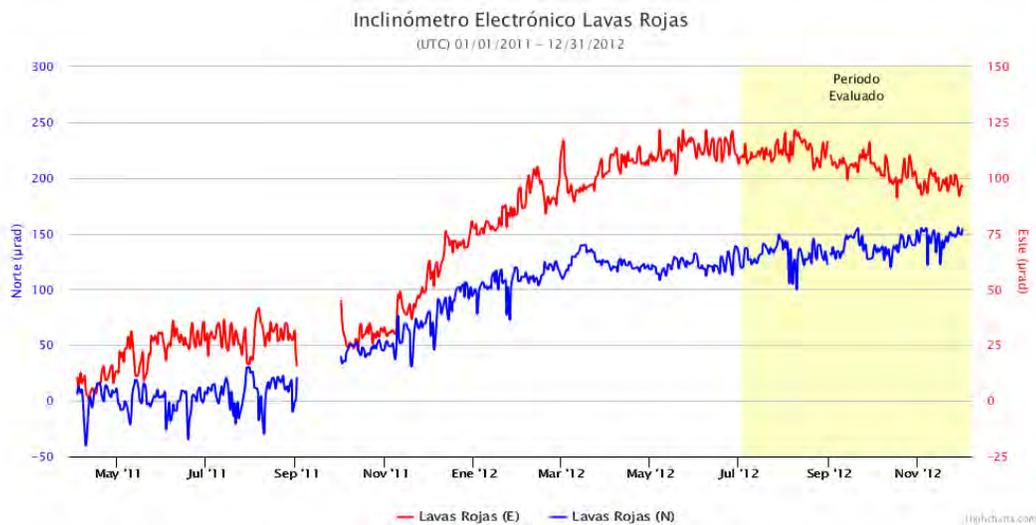


Figura 31: Comportamiento del inclinómetro electrónico Lavas Rojas hasta diciembre de 2012.

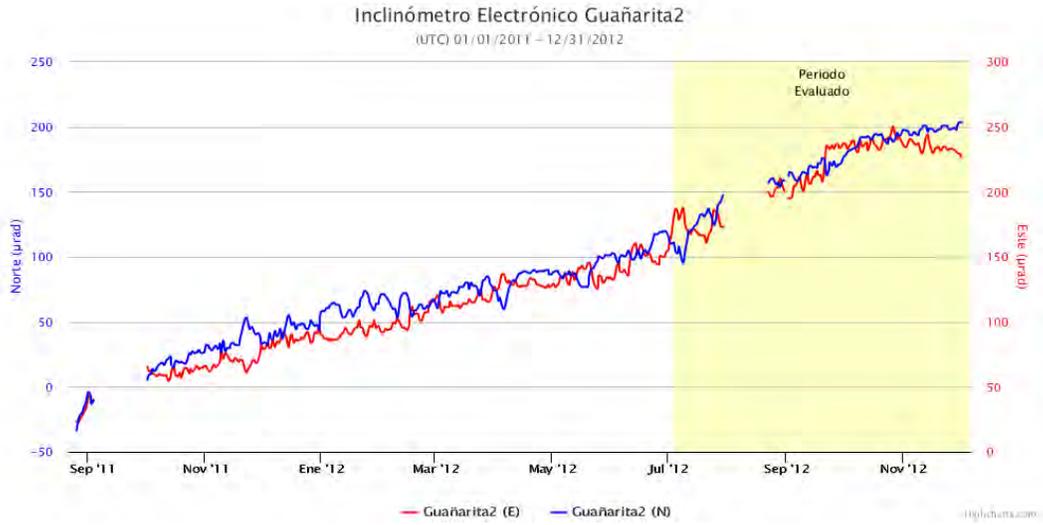


Figura 32: Comportamiento del inclinómetro electrónico Guañarita hasta diciembre de 2012.

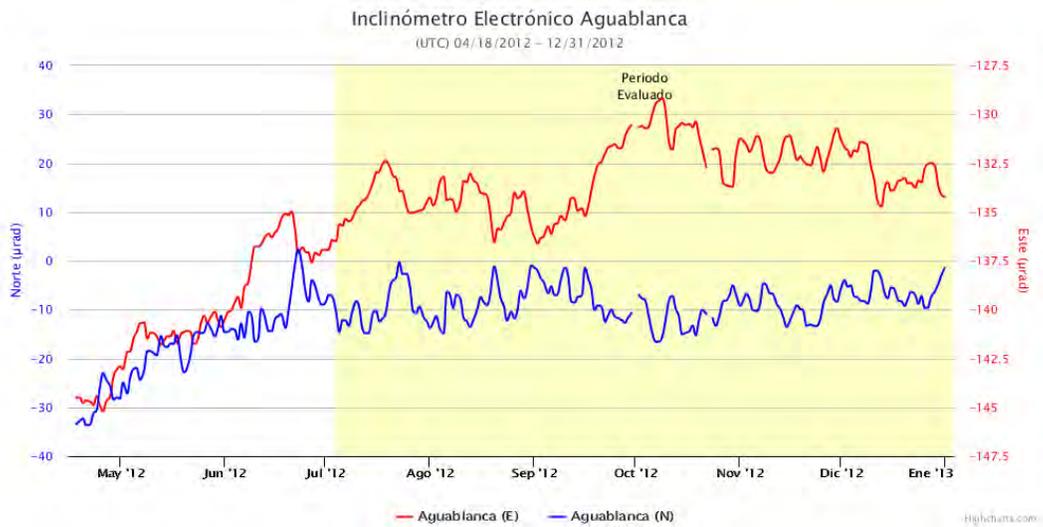


Figura 33: Comportamiento del inclinómetro electrónico Agua Blanca hasta diciembre de 2012.

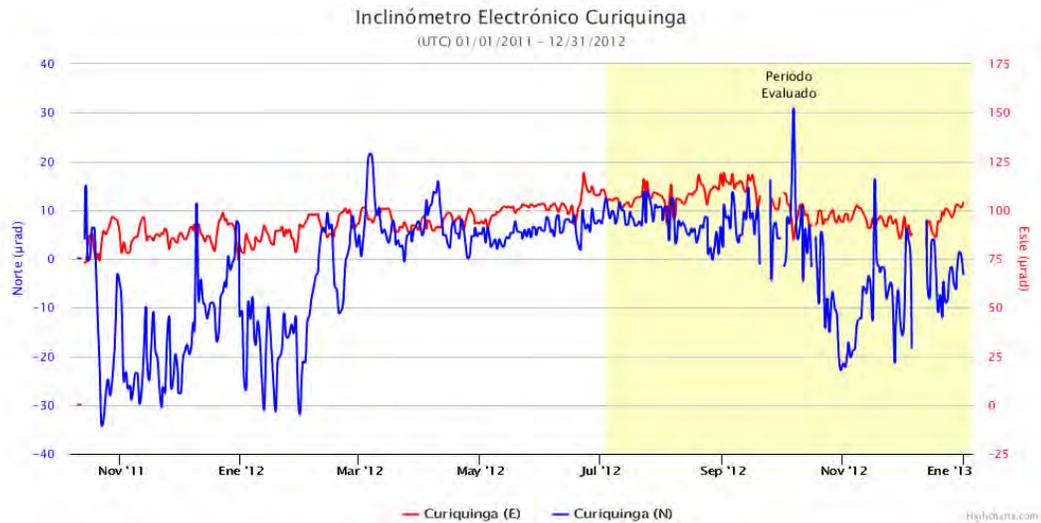


Figura 34: Comportamiento del inclinómetro electrónico Curiqinga hasta diciembre de 2012.

La red de inclinómetros electrónicos del volcán Puracé evidenció un comportamiento estable durante el segundo semestre de 2012, lo que indica que por el momento no se están presentando procesos deformativos considerables en el volcán.

2.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

En la actualidad la aplicación de la tecnología GNSS (Sistema Satelital de Navegación Global), basada en el posicionamiento global por satélite, se constituye como la herramienta más versátil, eficaz y exacta para medir la deformación de la superficie de un volcán activo. 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, con ella es posible detectar deformaciones de la superficie volcánica tanto en el plano horizontal como vertical, así como una mejor comprensión del movimiento tectónico local y las mediciones y resultados se realizan en tiempo real.

Durante el segundo semestre de 2012 las estaciones GNSS permanentes evidenciaron un comportamiento estable en sus tres componentes, con ligeras variaciones propias del procesamiento diferencial que se efectúa con dicha información. En las figuras 35, 36 y 37 se puede observar los registros de las estaciones, Lavas Rojas, Guañarita, Agua Blanca, Cocuy2, Mina y Agua Bonita, hasta diciembre de 2012.

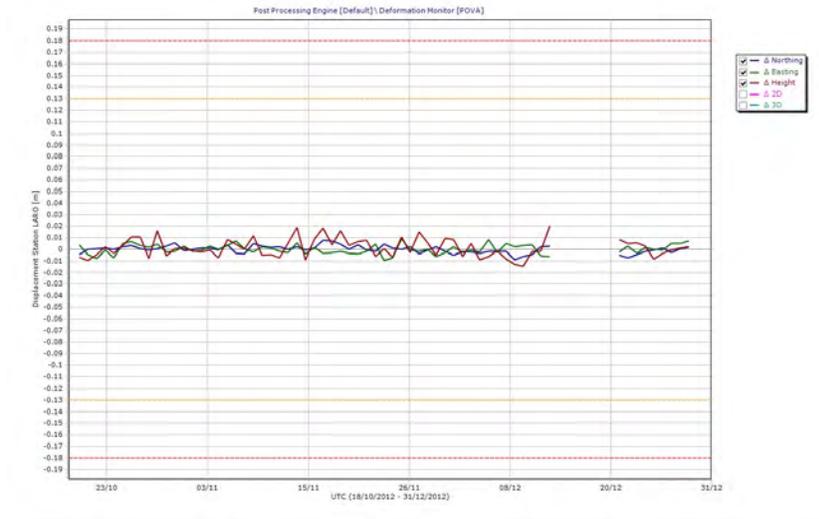


Figura 35: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Lavas Rojas.

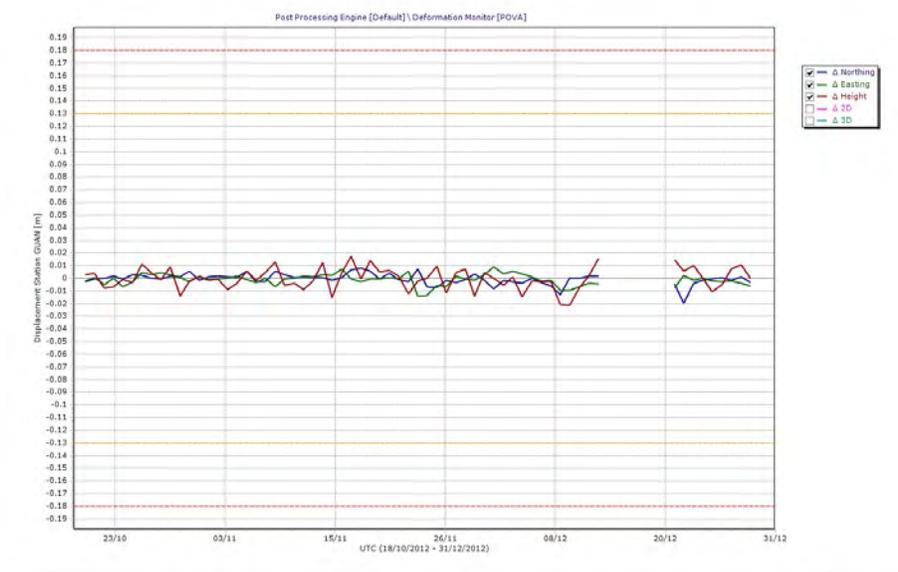


Figura 36: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Guañarita.

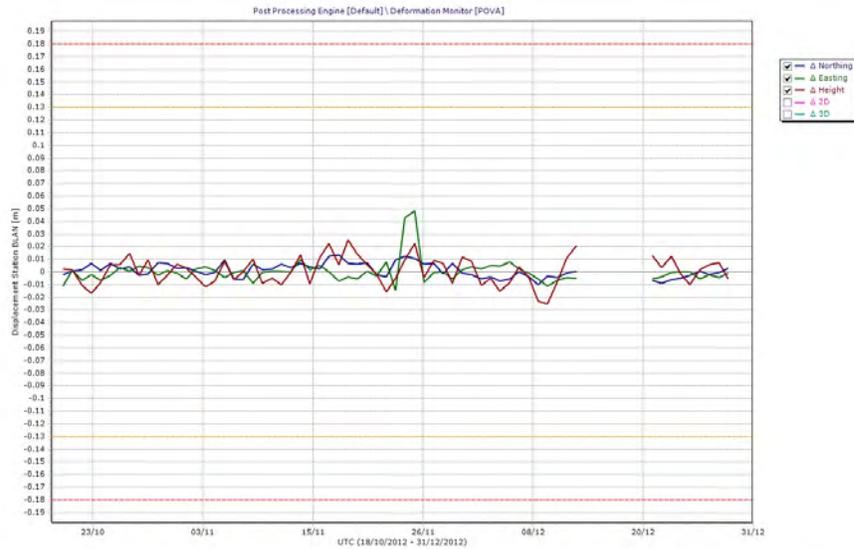


Figura 37: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Agua Blanca.

2.3.3. Medición Electrónica de Distancias (EDM)

Durante el segundo semestre de 2012 se realizó una campaña para ocupación de las líneas de EDM en el volcán Puracé. Los datos medidos evidencian estabilidad en las líneas EDM. En la figura 38 se aprecia la línea base que se tiene hasta diciembre.

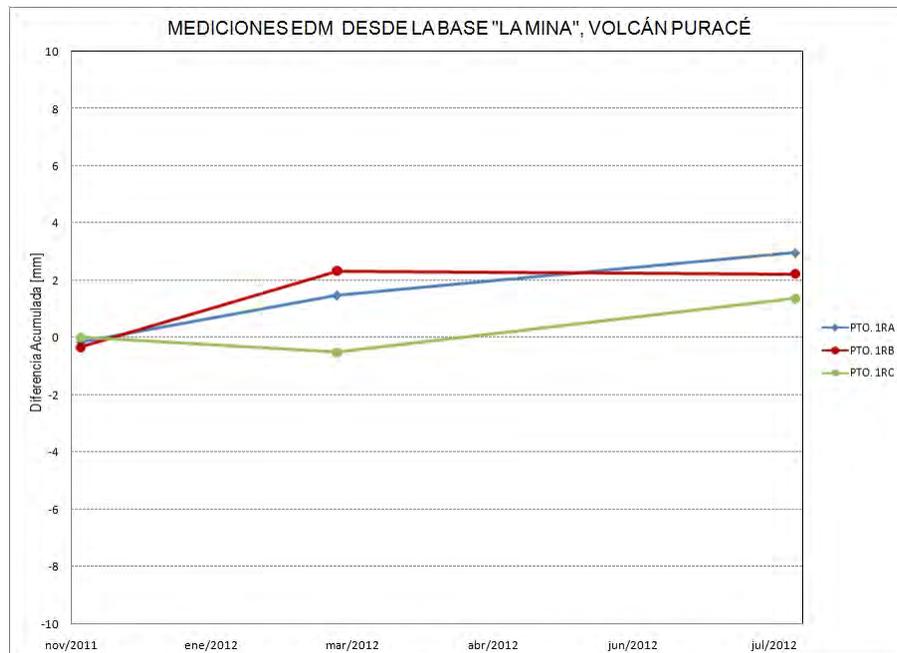


Figura 38: Mediciones EDM desde la base La Mina en el volcán Puracé.



2.4. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Durante el segundo semestre del año 2012 el volcán Puracé contó con una estación para la detección de potenciales eléctricos espontáneos (Cóndor), así como un magnetómetro, instalado en el lugar denominado Laguna, utilizado para el monitoreo del campo magnético local. La figura 39 muestra la ubicación geográfica de dichos sensores.

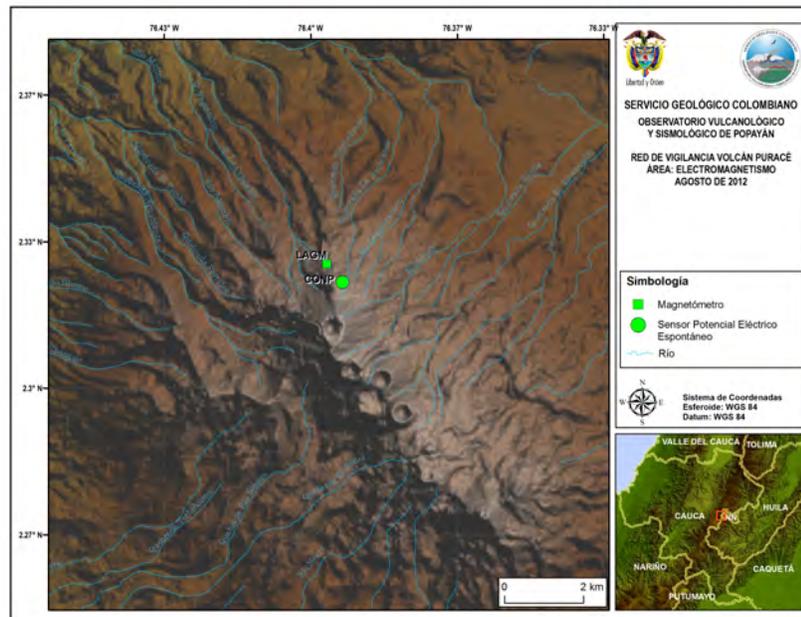


Figura 39: Red de monitoreo de campos electromagnéticos del volcán Puracé.

2.4.1. Potenciales Eléctricos Espontáneos

El método geofísico que mide el campo natural de Potencial Eléctrico Espontáneo (PEE) se ha implementado como una metodología dentro de la vigilancia volcánica, ya que los volcanes tienen dos fuentes de generación de señales de PEE: una debido a la actividad del sistema hidrotermal (para volcanes activos) y otra por la dinámica del sistema hidrogeológico. En el caso del volcán Puracé, la estación de autopotencial Cóndor, posee un par de sensores orientados tangencialmente al cráter del volcán Puracé; adicionalmente, la información obtenida se correlaciona con la obtenida con la estación climática Mina, instalada el 5 de septiembre de 2012 a 2.1 km de la estación de PEE Cóndor.

La estación Cóndor mostró a lo largo del semestre un comportamiento fluctuante, lo cual es coherente con las lluvias registradas en el mismo período de tiempo, tal y como se muestra en la figura 40 por medio de las líneas verticales rojas. Los cambios más representativos en lapsos cortos de tiempo (de 1 a 3 días), relacionados con días de alta pluviosidad se resumen en la tabla 1 y se resaltan con líneas rojas en la figura 40.

Fecha	Variación en los PEE. Estación Cóndor	Pluviosidad acumulada para el periodo (mm)
18 a 20 de octubre	Desde 2.3 a -5.2 mV = -7.5	40
14 a 15 de noviembre	Desde 5.2 a -0.6 mV = -5.8	25
1 a 3 de diciembre	Desde 3.7 a 1.1 mV = -2.6	40
18 a 19 de diciembre	Desde 2.2 a -1.9 mV = -4.1	24

Tabla 9: Resumen de las mediciones de SO_2 realizadas durante el segundo semestre de 2012.

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

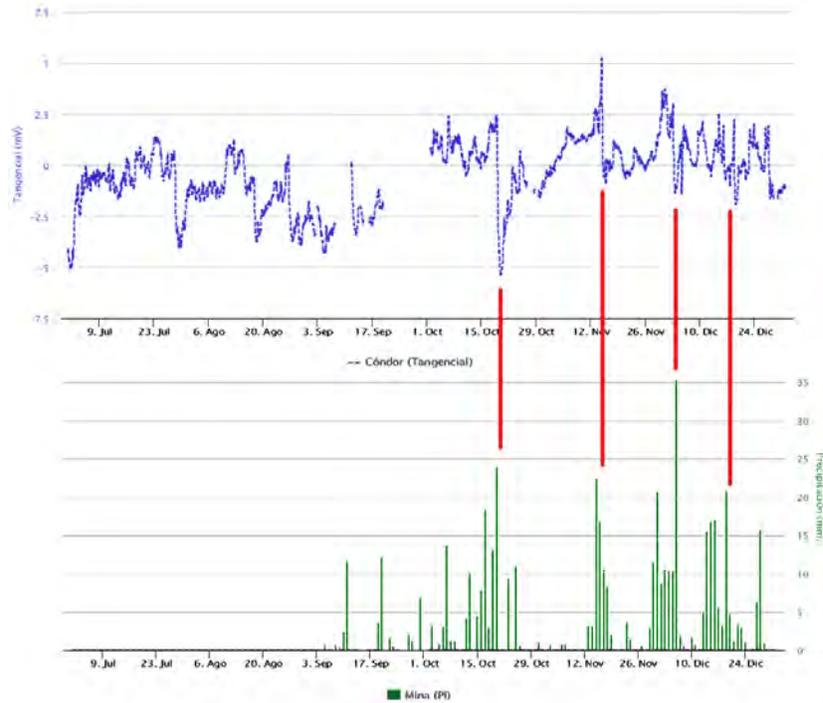


Figura 40: *Arriba*: Potencial eléctrico espontáneo registrado por la estación Córdor, para el periodo desde el 1 de julio al 31 de diciembre de 2012. *Abajo*: Valores de precipitación diaria registrados por la estación climática Mina para el mismo periodo. Las líneas rojas indican fluctuaciones del potencial eléctrico asociables a periodos diarios de alta pluviosidad.

2.4.2. Magnetometría

Durante el segundo semestre del año 2012, el magnetómetro Laguna mostró un comportamiento estable, registrando ciclos de oscilaciones día-noche debidos a las variaciones de radiación solar. A lo largo del semestre se presentaron una gran cantidad de fluctuaciones asociables a perturbaciones temporales en la magnetosfera terrestre (causadas por eyecciones de masa coronal del Sol), de acuerdo con los datos de la estación magnetométrica de referencia Kourou (instalada en Guyana Francesa y administrada por el Instituto Central del Magnetismo Terrestre, con sede en Paris-Francia) y los datos de Campo Magnético Interplanetario (IMF, por sus siglas en inglés: *Interplanetary Magnetic Field*) registrados por el magnetómetro AceRt, acoplado al satélite GOES, como se puede apreciar en la figura 41. Así mismo, se resalta que algunos de los valores más altos durante el semestre están directamente relacionados a la radiación solar local.

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 y permita identificar cambios posiblemente asociados a la actividad volcánica.

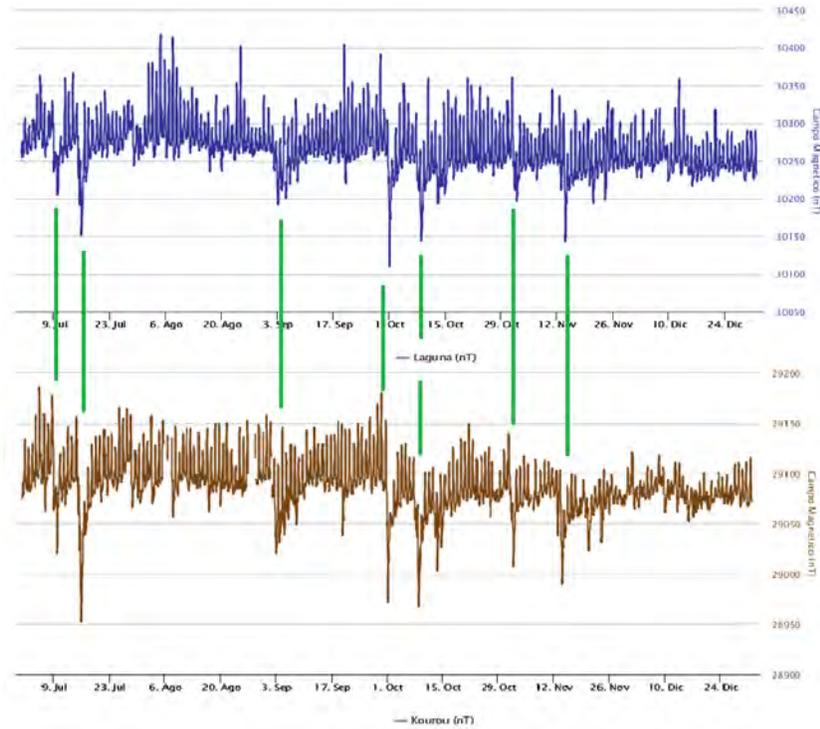


Figura 41: Mediciones magnetométricas en el volcán Puracé (incluyendo estación de referencia), desde el 1 de julio al 31 de diciembre de 2012. Las líneas verdes son algunos de los periodos en los que hubo reporte de tormenta solar.

2.5. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

El monitoreo continuo de la actividad superficial se efectúa a través de dos cámaras web: Mina y Lavas Rojas, ubicadas a 2.5 km del cráter Puracé. La figura 42 muestra la localización de estos equipos. El objetivo principal de estas cámaras es monitorear el comportamiento del campo fumarólico ubicado en la cima del flanco noroccidental (ver figura 43). En el segundo semestre de 2012, no se observaron cambios destacables en la actividad superficial; la emisión de gases desde este campo fumarólico fue constante, y la dirección de su dispersión se vio condicionada por las fluctuaciones en el estado del tiempo, acompañado de lluvias intensas, granizadas y por incidencia del viento.

Durante el segundo semestre de 2012 se observó la actividad fumarólica proveniente de campo fumarólico que bordea el cráter; estas plumas presentaron una tendencia en su dispersión influenciada por los fuertes vientos en dirección Noroeste, que se generan a estratos de 15.000 *pies* (4.600 m). Durante el segundo semestre del 2012 se alcanzaron velocidades del viento hasta de 27.8 *nudos*, equivalentes a 14.3 m/s – 52 km/h, (anemómetro de MINA–volcán Puracé). En las imágenes captadas por las cámaras web se evidenciaron en algunas ocasiones escarcha delimitada hacia la parte alta del volcán, fenómeno asociado a las bajas temperaturas de la época del año (septiembre – octubre).

En las figuras 44 y 45, se pueden apreciar algunas de las imágenes más representativas registradas por las cámaras durante el segundo semestre de 2012.

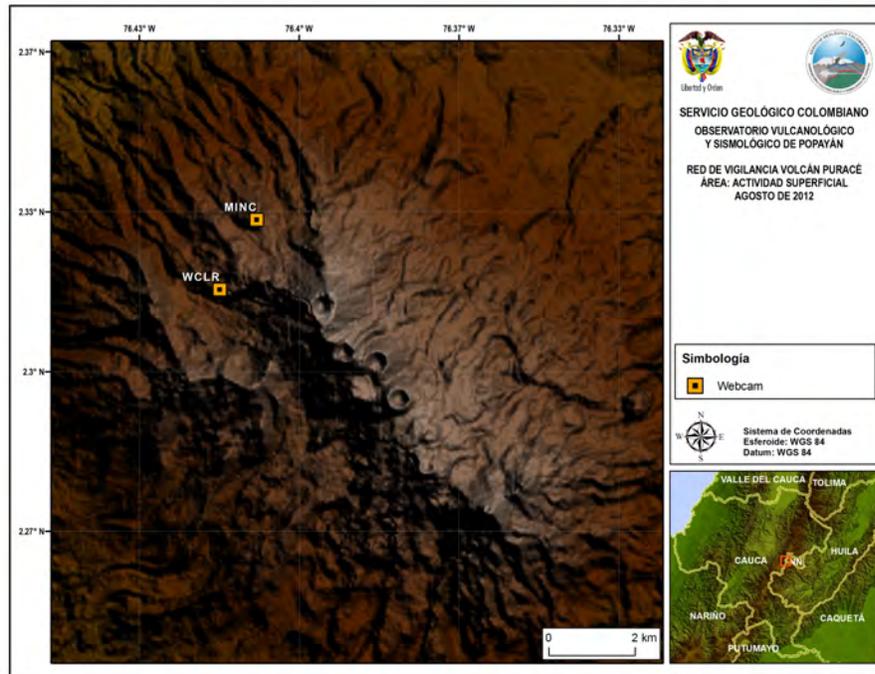


Figura 42: Mapa de localización de las cámaras web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Puracé.



Figura 43: Detalle del campo fumarólico lateral del volcán Puracé.



Figura 44: Mosaico de imágenes cámara web Mina, segundo semestre de 2012.



Figura 45: Mosaico de imágenes cámara web Lavas Rojas volcán Puracé, segundo semestre de 2012.

2.6. FISICOQUÍMICA

El monitoreo geoquímico del volcán Puracé se realiza actualmente con 33 estaciones isotópicas de Radón instaladas en el edificio volcánico y en su área de influencia, de las cuales se recogen datos periódicamente; además, se realiza el muestreo de aguas de 7 fuentes termales ubicadas en sectores aledaños al volcán, y muestreo de gases de origen fumarólico y difuso como lo son el SO_2 (Dióxido de Azufre) y el CO_2 (Dióxido de Carbono). La figura 46 muestra la localización geográfica de los puntos que actualmente son monitoreados por el área de geoquímica en el volcán Puracé.

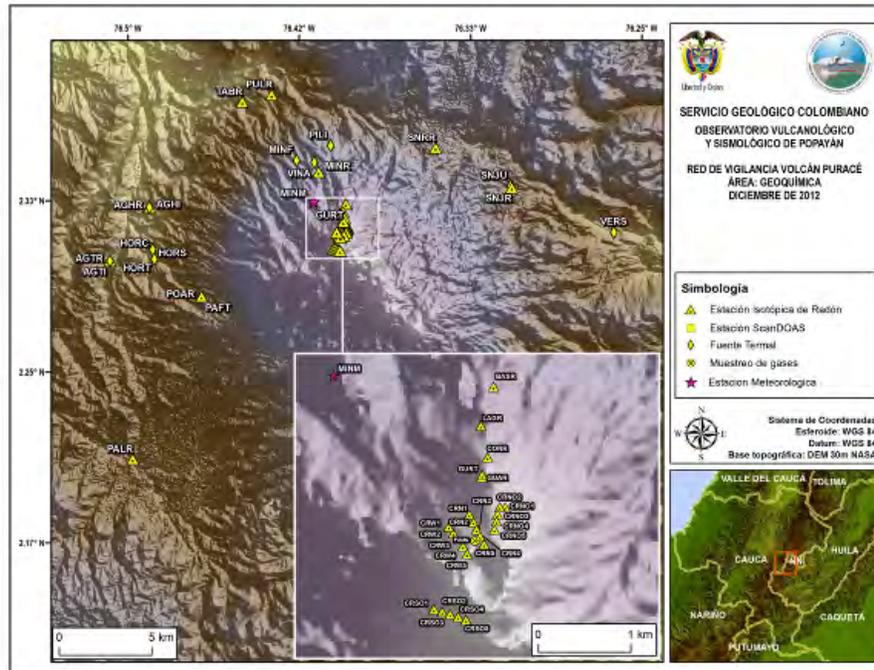


Figura 46: Red de vigilancia en fisicoquímica del volcán Puracé.

En este período se resalta la instalación de 20 nuevas estaciones isotópicas de gas radón entre septiembre y octubre. De igual forma se realizaron campañas de SO_2 con el instrumento FLYSPEC, y para CO_2 con la cámara de acumulación de flujo West System. El fortalecimiento de la red de geoquímica se ha realizado dada la importancia de hacer un seguimiento constante al comportamiento de este gas como un posible precursor de la actividad sísmica y volcánica.

2.6.1. Medidas de Gas Radón

El Radón (^{222}Rn) es un elemento radioactivo, cuya producción se da de manera continua en el interior de la corteza terrestre; al ser un gas tiende a escapar de las rocas donde se genera, liberándose frecuentemente por las fallas o estructuras del subsuelo. Por sus características físicas su detección se facilita en fisuras, fallas geológicas y flujos de agua subterránea. Las mediciones continuas que el OVS-Popayán hace de las emisiones del isotopo radiactivo ^{222}Rn en los suelos del volcán Puracé, principalmente sobre los trazos de fallas activas, son realizadas con una periodicidad de diez días. A partir de este seguimiento continuo, se encontró que para el segundo semestre del 2012 las emisiones de gas Radón variaron entre 5 y 2896 PCi/L en las zonas de fallamiento activo.

En la materialización de dichas estaciones de muestreo, se disponen tubos de Cloruro de Polivinilo (PVC) donde se espera sea atrapado el isótopo del ^{222}Rn , en su interior se coloca un sensor llamado Electret con una cámara de volumen conocido. El análisis de la concentración de ^{222}Rn se fundamenta en la capacidad que tiene el isótopo para desintegrarse, produciendo partículas alfa, las cuales ionizan el aire de la cámara



de medición, bombardean el sensor y lo descargan. La concentración de ^{222}Rn es directamente proporcional a la diferencia de potencial para el sensor e inversamente proporcional al tiempo de análisis. Durante el segundo semestre de 2012 se realizó la evaluación de las emisiones del isótopo del gas ^{222}Rn en 33 estaciones, donde cada medida fue tomada con aproximadamente 15 días de exposición del electret al medio.

El gas radón (^{222}Rn) es un elemento radioactivo, cuya producción es de manera continua en el interior de la corteza terrestre. Al ser un gas inerte, no reacciona con otros elementos y compuestos y, de acuerdo con su mecanismo de difusión, tiende a escapar de las rocas donde se genera, liberándose frecuentemente por las fallas u otras estructuras del subsuelo. Por sus características físicas, su detección se facilita en fisuras, fallas geológicas y flujos de agua subterránea. El isótopo ^{222}Rn tiene un tiempo de vida media favorable y es abundante, por lo que se convierte en el isótopo más útil para estudios geohidrológicos, debido a que las estructuras geológicas alteran la permeabilidad del suelo, aprovechándose así el comportamiento del gas para registrarlos 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.

Por otro lado se realizaron quince campañas de muestreo geoquímico, en las cuales se evaluaron las concentraciones de Radón (^{222}Rn) emitidas en las 33 estaciones del complejo volcánico Puracé. Las figuras 47 y 48 permiten apreciar el comportamiento y variación de la concentración del gas Radón en las diferentes estaciones isotópicas.

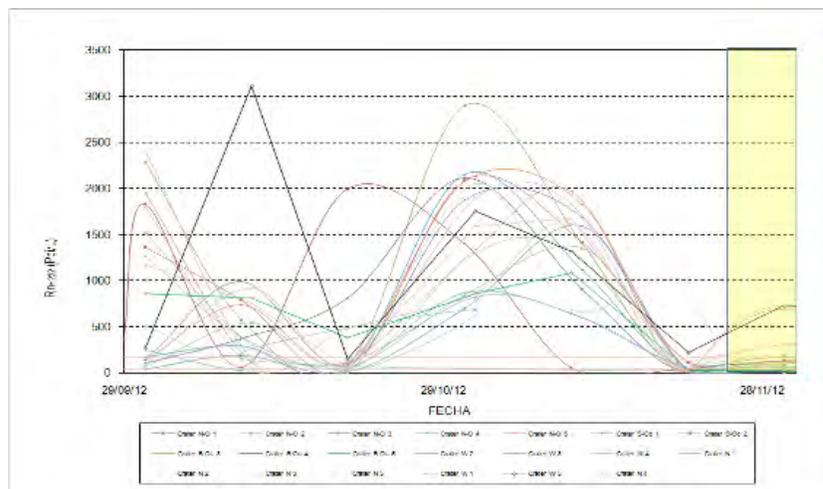


Figura 47: Variación de la concentración de Radón en suelo medidos en campo cercano. Volcán Puracé. Segundo semestre de 2012.

2.6.2. Fuentes Termales

En el segundo semestre de 2012 se realizaron muestreos y mediciones de parámetros *in-situ* de las siguientes fuentes termales: Agua Tibia, Agua Hirviendo, San Juan, Pozo Azul, La Mina (socavón), los valores en los parámetros físico-químicos del agua presentaron pocas variaciones con respecto a las mediciones del semestre anterior. Es importante resaltar que los valores encontrados a partir de estas mediciones, permitirán construir a través del tiempo, una línea base confiable con la que posteriormente se pueda establecer correlación con los diferentes estados de actividad del sistema volcánico. Las imágenes contenidas en la figura 49 muestran las fuentes termales que fueron monitoreadas durante estos meses. En la tabla 10 y la figura 50 se evidencian los valores tomados para el registro de temperatura en cada fuente termal durante las campañas realizadas en el segundo semestre de 2012.

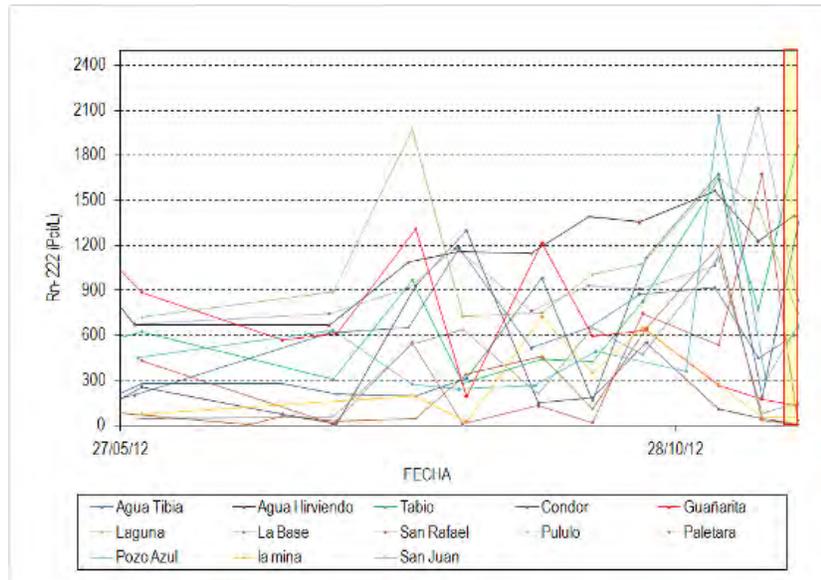


Figura 48: Variación de la concentración de Radón en suelos medidos en campo lejano. Volcán Puracé. Segundo semestre de 2012.

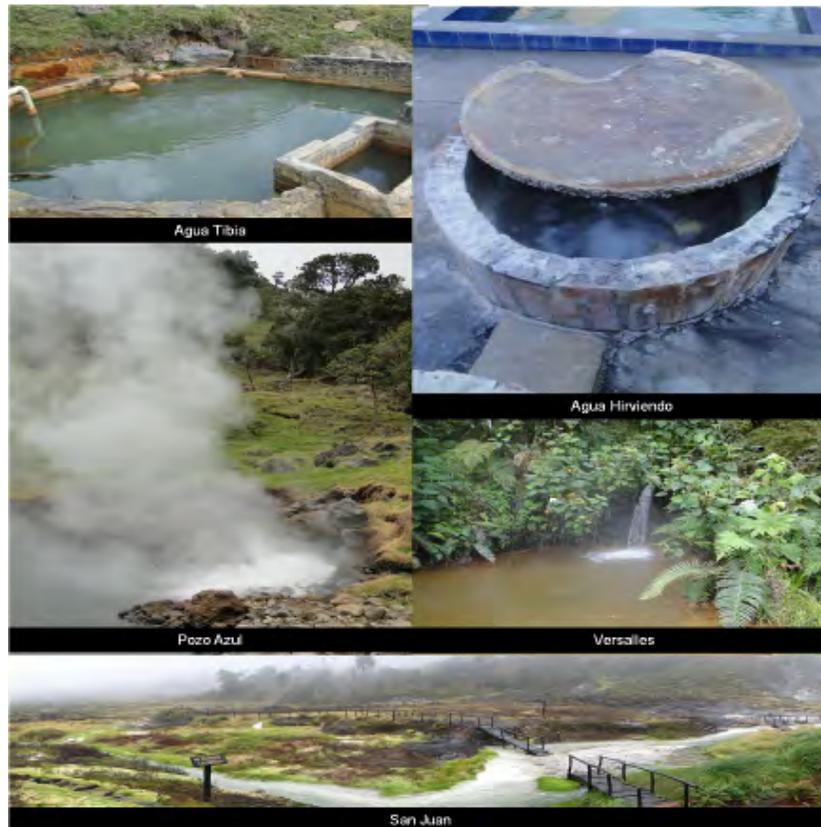


Figura 49: Mosaico fuentes termales volcán Puracé – 2012.

Por otro lado, el potencial de hidrogeno (pH) de las fuentes termales no presentó variaciones significativas en las medidas tomadas durante el segundo semestre de 2012, como se observa en la grafica de la Figura



Fuente Termal	1	2	3	4	5
La Mina	47.2	44.9	44.9	45.4	45.1
Agua Hirviendo	72.7	72.9	72.9	73.5	73.2
Agua Tibia	54	54.4	54.4	54	54.7
San Juan	35.8	35	35	34.7	34.9
Pozo Azul	90.1	92.1	92.1	90.3	89.3
Hornos3		81.6	81.6	81.4	81.5
Hornos7		79.6	79.6	81.8	80.4
Versalles		34	34	34.6	35.4

Tabla 10: Valores de temperatura en fuentes termales del volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012.

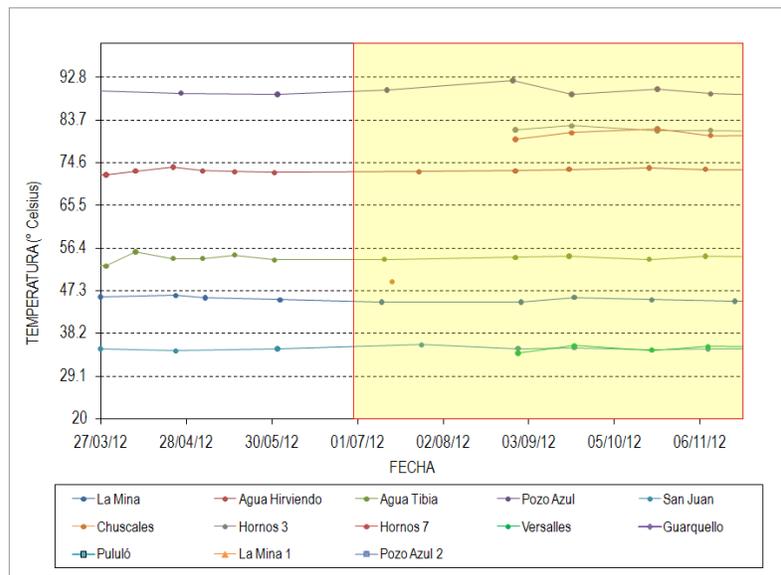


Figura 50: Valores de temperatura en fuentes termales del volcán Puracé durante el segundo Semestre de 2012.

6 se conservan valores estables con respecto al semestre anterior. En la tabla 4 se evidencian los valores tomados para el registro de pH en cada fuente termal durante las campañas realizadas en el segundo semestre de 2012.

Fuente Termal	1	2	3	4	5
La Mina	2.09	3.53	45.9	4.15	3.07
Agua Hirviendo	6.28	6.86	73.2	5.69	6.35
Agua Tibia	6.42	6.49	54.7	5.67	6.18
San Juan	4.98	5.54	35.2	5.32	4.56
Pozo Azul	3.76	3.91	89.2	3.72	3.37
Hornos3		4.04	82.5	3.81	3.07
Hornos7		4.1	81.0	3.84	3.06
Versalles		6.6	35.6	5.76	5.49

Tabla 11: Potencial de hidrogeno medido en las fuentes termales del volcán Puracé. Segundo semestre de 2012.

Las técnicas de muestreo en fumarolas, fuentes termales, medidas móviles de gases en suelo y análisis en laboratorio están bien establecidas y con ellas se busca 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 de los mismos, para la obtención de datos que puedan sugerir cambios temporales en las concentraciones de gases y otras manifestaciones visibles de actividad volcánica. Las técnicas y métodos usados actualmente, estiman la presencia de las especies gaseosas, y pueden mostrar

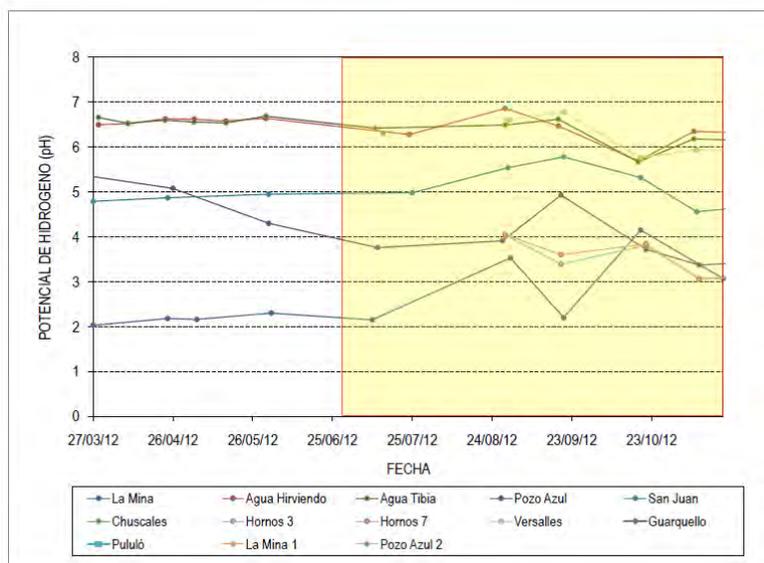


Figura 51: Variación del pH en las fuentes termales del volcán Puracé durante el segundo semestre de 2012.

cambios relacionados con la dinámica del sistema volcánico, especialmente cuando se correlaciona esta información con otras técnicas de monitoreo. Por lo tanto, los datos evaluados en el área de geoquímica durante el segundo semestre de 2012, permanecen estables y no se reportan cambios significativos en el periodo de análisis.

2.6.3. Termometría

El monitoreo de los cambios en la temperatura de las emanaciones del volcán Puracé se lleva a cabo mediante una termocupla tipo K, introducida aproximadamente un metro en uno de los orificios que componen el campo fumarólico lateral del volcán. El actual campo fumarólico se encuentra ubicado sobre el flanco norte del cono volcánico, aproximadamente a 300 m en línea recta del centro del cráter, y a una altitud aproximada de 4545 msnm. Cabe anotar que sobre este campo fumarólico se han hecho reportes de su intensa actividad durante las últimas cuatro décadas por parte del personal del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Así mismo, se ha venido monitoreando la temperatura en esta fumarola con medidas *in situ*.

La temperatura registrada desde el 14 de abril hasta el fin del mes de diciembre ha sido generalmente estable, con variaciones de hasta 26 °C, en un rango entre 136 y 163°C (figura 52). Cabe anotar que las temperaturas registradas por este sistema son mayores (entre un rango de 20 ó 30°C) a las medidas *in situ*, obtenidas en puntos de muestreo ubicados hacia el borde exterior del orificio (por el hecho de que el sensor está enterrado aproximadamente a unos 80 cm, dentro del conducto), por lo que las variaciones registradas son muy marcadas dadas las condiciones cambiantes a medida que el sensor empleado esté más cerca de la superficie y expuesto a los cambios ambientales de la cima del volcán (ver figura ??).

2.6.4. Imagen térmica de la cima del volcán Puracé

La figura 53 muestra imágenes del sector de la cima del volcán Puracé, tomadas por el sensor satelital Landsat7, el 6 de agosto de 2012 a las 10:14 a.m. La resolución espacial de estas imágenes es de 30 m/pixel. La imagen de la izquierda muestra el espectro visible (combinación de bandas 3-2-1); la de la derecha, el espectro infrarrojo (imagen térmica, combinación de bandas 7 y 8), donde las temperaturas más altas son representadas con colores más claros. Se observa una anomalía térmica hacia el sector nor-noroeste del cráter, que corresponde a la localización de la fumarola lateral. A la hora de toma de esta imagen, la



**SERVICIO GEOLÓGICO
COLOMBIANO**

República de Colombia

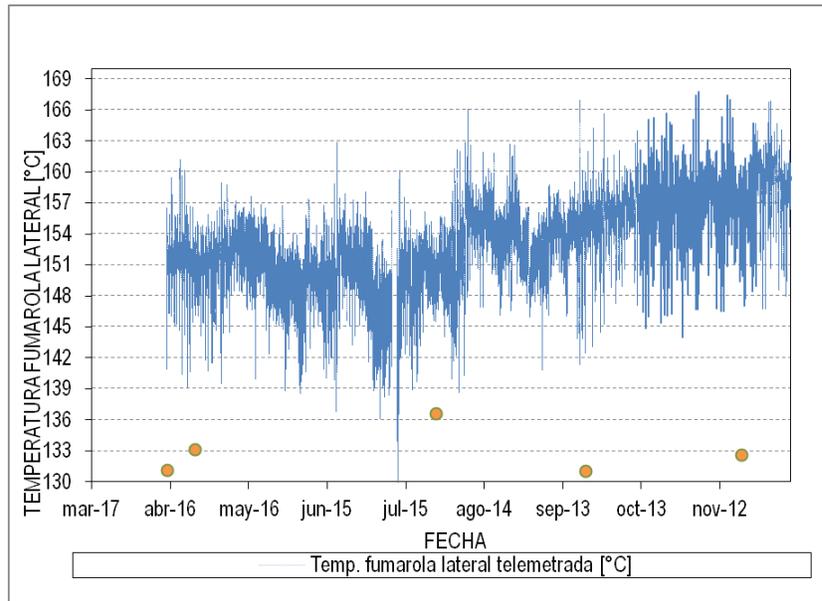


Figura 52: Ubicación de la estación termográfica telemetrizada, la cual fue instalada en el campo fumarólico lateral del volcán Puracé. Detalle de imagen termográfica tomado al orificio de mayor emisión de gas y calor.

termocupla telemétrica instalada en la fumarola lateral registraba una temperatura cercana a los $137\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cabe anotar que no se observaron anomalías térmicas resaltables en la zona del fondo del cráter, a pesar de que se encontraba visible (sin nubosidad).

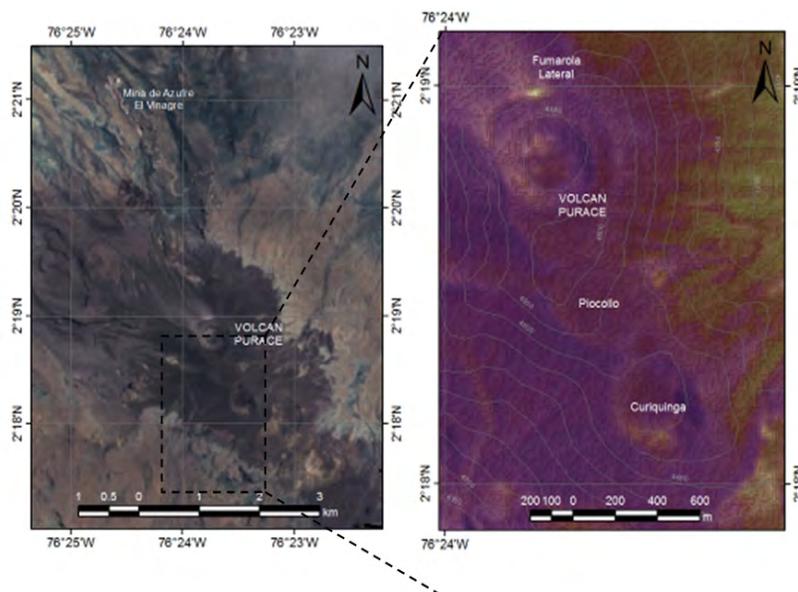


Figura 53: Imágenes del sector de la cima del volcán Puracé, tomadas por el sensor satelital Landsat7, el 6 de agosto de 2012. La imagen de la izquierda muestra el espectro visible; la de la derecha, el espectro infrarrojo (imagen térmica), donde las temperaturas más altas son representadas con colores más claros. Fuente de información: EROS: Earth Resources Observation and Science Center (<http://eros.usgs.gov/>) del USGS de los Estados Unidos.

2.6.5. Medidas Móviles de Flujo de SO_2

En el mes de agosto de 2012 se realizaron medidas móviles del flujo de SO_2 emitido por las fuentes termales del área de influencia del volcán Puracé. Para estas mediciones realizadas mediante la técnica FLYSPEC (espectrómetro de correlación ultravioleta) se resalta la realizada el día 29 de agosto en el sector Pozo Azul, donde se detectó una columna con un valor calculado de hasta 1.1 t/día , en una columna que se dispersó hacia el costado noroeste del edificio a una dirección de 307° (ver figuras 54 y 55)

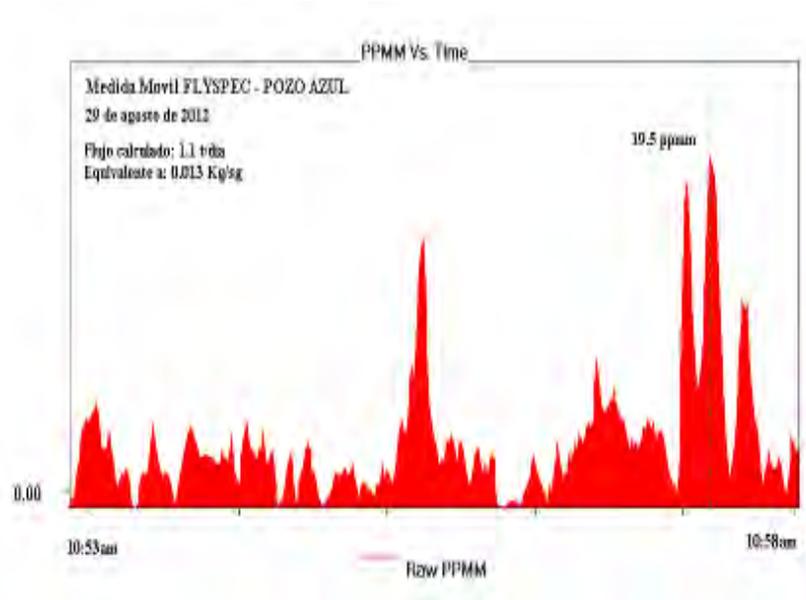


Figura 54: Espectrograma de medida móvil a flujo de SO_2 realizado en la Fuente Termal Pozo Azul el día 29 de agosto de 2012.

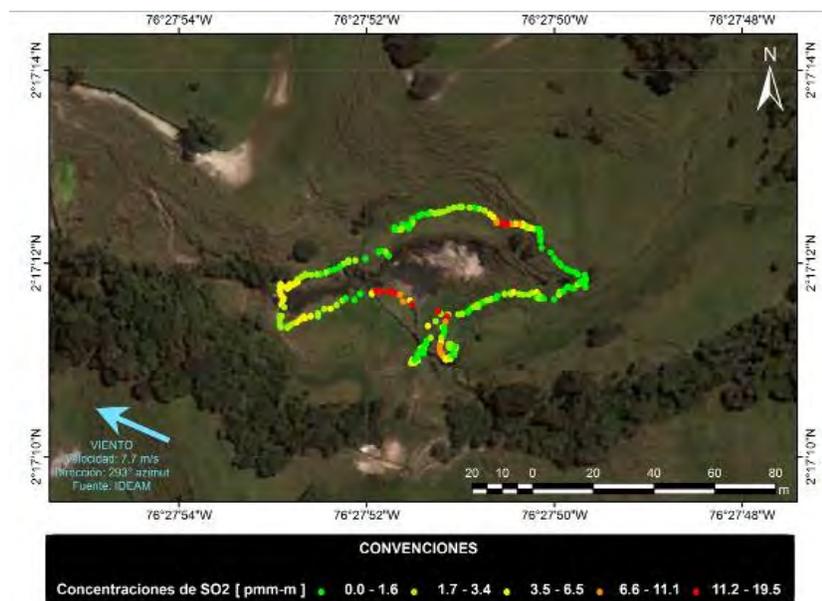


Figura 55: Recorrido de las medidas de flujo de SO_2 realizadas en el sector Pozo Azul. Área de influencia volcánica Puracé.



2.6.6. Medidas de flujo de CO_2

En el mes de Noviembre se realizó una campaña de medición de flujo de CO_2 en suelo sobre el Volcán Puracé. Se realizó un recorrido desde el flanco noreste bordeando el cráter y terminando en el flanco suroeste. En la figura 56 se aprecia un mapa de localización de los puntos de medición durante el recorrido.

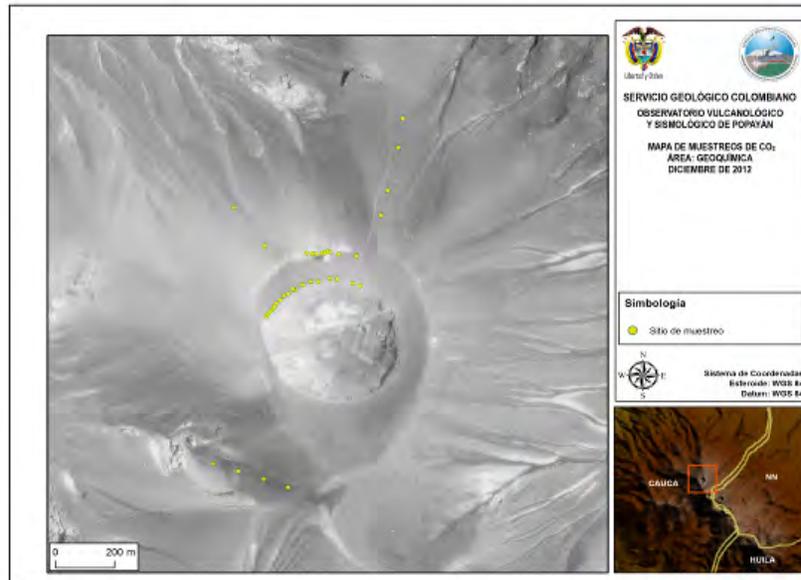


Figura 56: Recorrido de las medidas de flujo de SO_2 realizadas en el sector Pozo Azul. Área de influencia volcán Puracé..

Los valores de flujo de CO_2 que se registraron durante las medidas realizadas oscilaban entre 0.1965 y 67.41068 $mol/m^2/dia$, estos cálculos se realizaron usando la herramienta Fluxrevision del programa desarrollado por West System para el sistema LICOR 820. Los datos muestran que en algunos sectores se presentan flujos altos, esto indica posibles anomalías de desgasificación difusa en suelo en los sectores medidos. En próximas campañas se realizará el monitoreo continuo en los sitios donde se han registrado dichas anomalías.



3 VOLCÁN SOTARÁ.

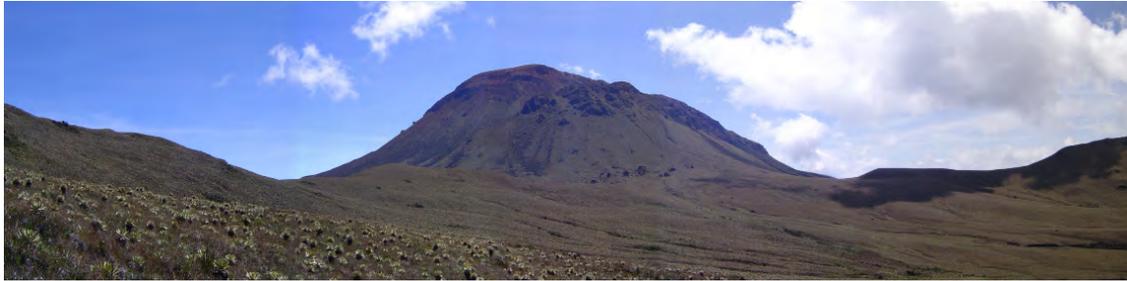


Figura 57: Imagen panorámica del volcán Sotará.

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.

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.

Se destaca que la red de vigilancia instalada en el volcán Sotará durante el segundo semestre del 2012 continuó registrando un incremento de la actividad sísmica detectado desde el día 24 de junio del mismo año. Como respuesta a este incremento 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, y desde el año 1999 en el campo fumarólico de este volcán.

3.1. RED DE VIGILANCIA

El volcán Sotará cuenta en la actualidad con una red de vigilancia compuesta por 14 estaciones, 12 de ellas telemétricas y 2 no telemétricas. Estas se emplean para medir diferentes parámetros físicos mediante técnicas tales como sismología, deformación y cambios en la actividad superficial. La figura 58 muestra la red de vigilancia del volcán Sotará, mientras que en la tabla 12 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 sismológicas, dos de ellas de corto periodo: Oso y Estumo, las cuales se encuentran localizadas hacia el sector NW del edificio volcánico, a distancias de 0.8 y 3.1 *km*, respectivamente; y las cinco restantes



equipadas con sensores de banda ancha: Sotar, Triángulo y Oso, localizadas a distancias de 3.2, 3.8 y 0.8 km al NW de la cima del volcán, así como las estaciones Cerro Gordo y Agua Bonita, localizadas a 2.9 km al SE y a 21.4 km al NE del edificio volcánico, respectivamente.

3.1.1.2. Red de Deformación. Esta red se encuentra conformada por tres inclinómetros electrónicos: Oso, localizado a 3.2 km al NW del volcán Sotar y a 3795 msnm; Sotar, ubicado a 0.8 km al NW del volcán Sotar y 4153 msnm, y Triángulo, localizado a 1.3 km al N del cráter del volcán Sotar y a 3805 msnm; igualmente, se cuenta con una estación GNSS permanente denominada Estumo, la cual se encuentra ubicada a 3.2 km al NW del edificio volcánico; así como con dos bases y dos 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 Sotar, se cuenta con una cámara web con conexión IP, la cual se encuentra instalada en el sector denominado Cerro Crespo, a 3.1 km al NO del edificio volcánico.

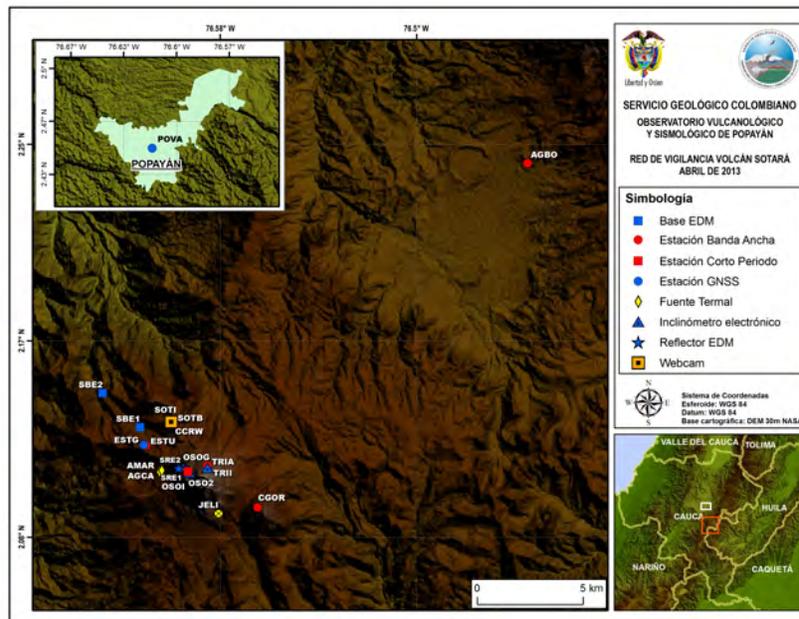


Figura 58: Red de vigilancia del volcán Sotar.

Nombre	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Distancia al Crater (km)
Oso	Estación Corto Período	2.111190	76.596840	4106	0.8 NW
	Inclinómetro electrónico				
	Estación Banda Ancha				
Sotar	Estación Banda Ancha	2.132200	76.604220	3795	3.2 NW
	Inclinómetro electrónico				
Triángulo	Estación Banda Ancha	2.113215	76.589155	4167	3.8 NW
	Inclinómetro electrónico				
Cerro Gordo	Estación Banda Ancha	2.095495	76.567868	3874	2.9 SE
Agua Bonita	Estación Banda Ancha	2.241557	76.453247	3192	21.40 NE
Cerro Crespo	Cámara web	2.132200	76.604220	3795	3.2 NW
Base EDM1	Base EDM	2.129950	76.617283	3408	3.88 NW
Base EDM2	Base EDM	2.144433	76.633133	3225	6.26 NW
Reflector A	Reflector EDM	2.112933	76.598950	4050	1.10 NW
Reflector B	Reflector EDM	2.112617	76.601017	3916	1.28 NW
Estumo	Estación Banda Ancha	2.122015	76.615223	3603	3.12 NW
	Estación GNSS				

Tabla 12: Características de la red de vigilancia del volcán Sotar.



3.2. SISMOLOGÍA

La red de monitoreo sísmico del volcán Sotará se encuentra distribuida tanto en el edificio volcánico, como hacia el sector del valle de Paletará. La figura 59 muestra la distribución geográfica de dichas estaciones.

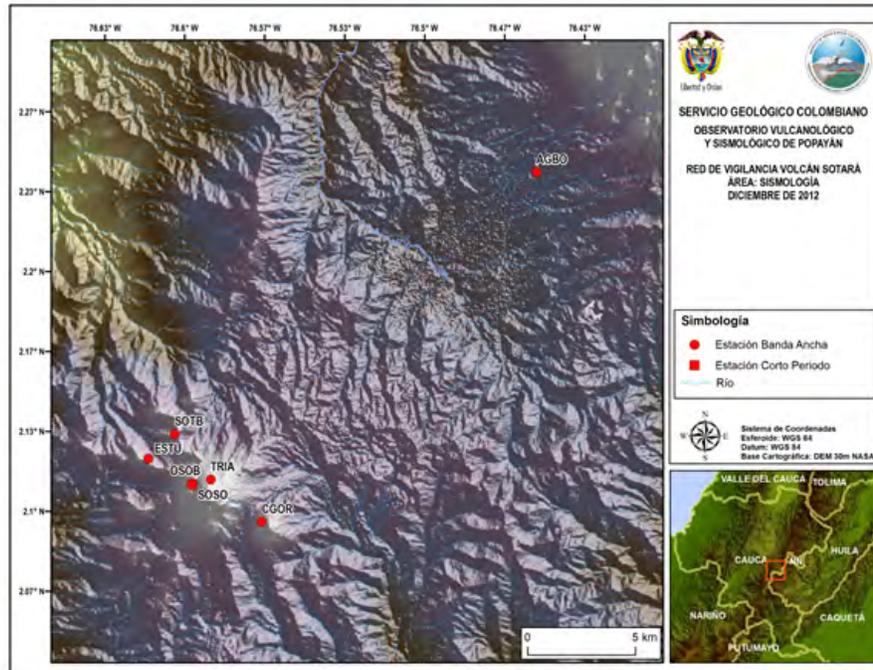


Figura 59: Red de vigilancia en sismología del volcán Sotará.

3.2.1. Actividad Sísmica

La red de estaciones sismológicas del volcán Sotará registró un incremento en la actividad sísmica durante el segundo semestre de 2012, principalmente en el número de eventos registrados diariamente. En total se presentaron 8908 eventos sísmicos, los cuales estuvieron relacionados exclusivamente con procesos de fracturamiento de roca, destacándose que 6931 de estos, fueron considerados como de muy bajo nivel energético.

La Tabla 2 y las figuras 60 y 61 muestran la tendencia en cuanto al número de eventos registrados durante el segundo semestre del 2012 en el volcán Sotará.

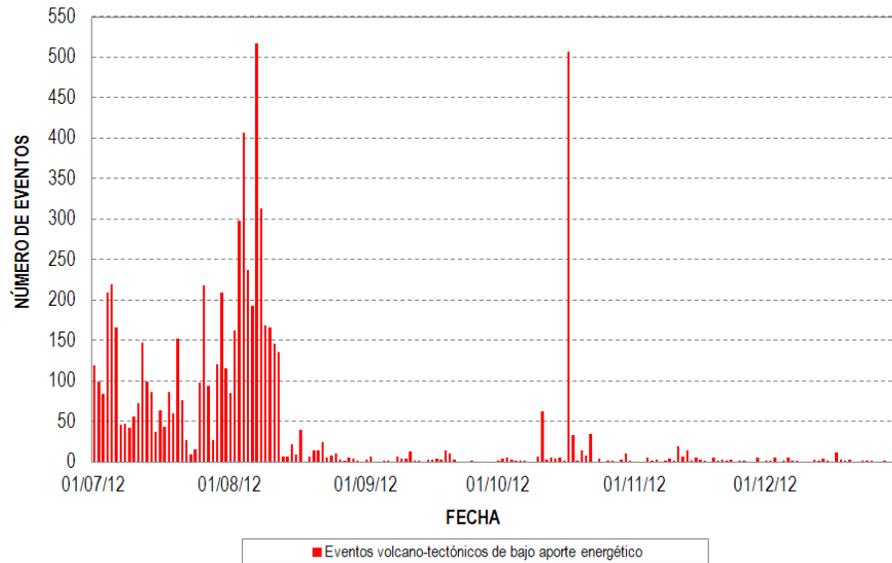


Figura 60: Número de eventos VT de muy bajo nivel energético clasificados en el volcán Sotará durante el segundo semestre del 2012.

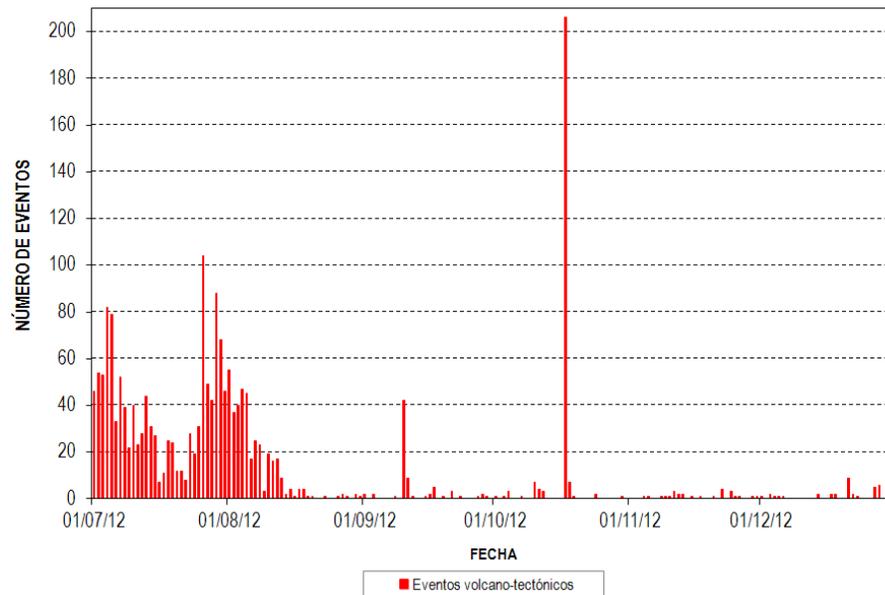


Figura 61: Número de eventos VT ocurridos en el volcán Sotará durante el segundo semestre de 2012, con bajo aporte energético.

3.2.2. Energía Sísmica Liberada

Durante el segundo semestre de 2012 se evidenció un notable aumento en los aportes energéticos por parte de la sismicidad asociada al fracturamiento de roca. Históricamente el volcán Sotará se había caracterizado por presentar un bajo nivel de ocurrencia sísmica y así mismo de bajos aportes energéticos, en promedio se presentaban seis eventos mensuales. Sin embargo a partir del 24 junio se empezó a presentar el mayor incremento de eventos registrados hasta la fecha, durante los dos primeros meses de mayor registro, se presentaron en promedio 120 eventos por día, como se observa en la figura 62. Los eventos fueron en general de bajo aporte energético, los más destacados se presentaron los días 2 y 27 de julio, alcanzando



un valor de $1.63E+14$ y $7.65E+13$ *ergios*. A partir de Septiembre del mismo año la actividad empezó a disminuir gradualmente tanto en el número de eventos como en el contenido energético, aunque no retornó a los niveles base de registro.

El comportamiento anteriormente descrito se refleja en la tendencia de la energía sísmica al ser evaluada de forma acumulada. Las variaciones registradas definen directamente los días en que se presentó mayor actividad de fractura y niveles de aporte energético superior al promedio.

Las gráficas contenidas en las figuras 62 y 63, ilustran el comportamiento de la energía sísmica liberada diaria y acumulada, respectivamente, a lo largo del periodo evaluado.

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

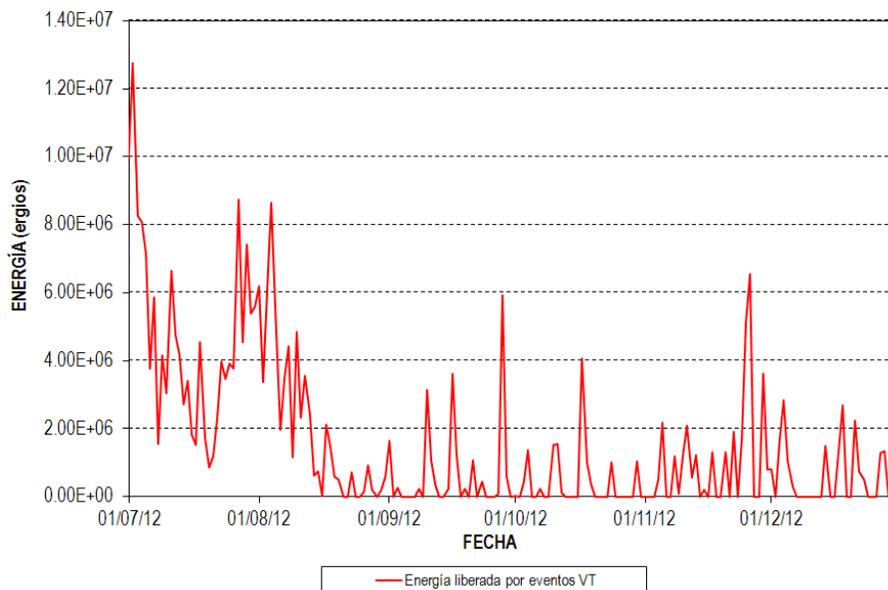


Figura 62: Energía sísmica liberada diariamente por eventos VT en el volcán Sotará durante el segundo semestre de 2012.

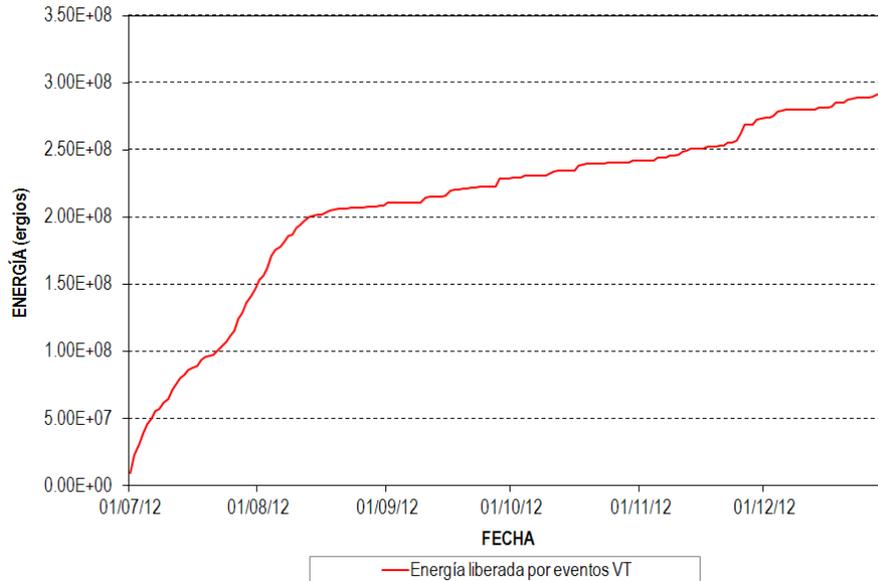


Figura 63: Curva de energía liberada y graficada de forma acumulada en el volcán Sotará. Segundo semestre de 2012.

3.2.3. Localización de Eventos Sísmicos

3.2.3.1. Localización de eventos asociados con procesos de fractura. Durante el segundo semestre del 2012 fue posible realizar la localización epicentral e hipocentral de 796 eventos asociados al fracturamiento de material cortical, sismicidad que se distribuyó en un rango de distancia entre 0.3 y 5.3 *km* hacia el costado nororiental del volcán. Inicialmente esta sismicidad ocurrió en un rango de profundidades que varía de 3 a 6 *km* del edificio volcánico; sin embargo gradualmente la sismicidad se acercó a la parte alta del edificio del volcán, presentando profundidades más superficiales desde 1 a 4 *km*. Las magnitudes locales M_L en este sector se mantuvieron en un rango de variación de 0.1 hasta 2.2 *grados* en la escala de Richter.

De manera dispersa la sismicidad restante se localizó en el sector conocido como el valle de Paletará, a una distancia promedio de 12 *km* al nororiente del edificio volcánico. Los eventos localizados en esta zona se registraron en un rango de profundidad de 6 a 12 *km*. La máxima magnitud local M_L alcanzada fue de 1.9 *grados* en la escala de Richter.

La figura 65 muestra la distribución de magnitudes locales (M_L) a lo largo del segundo semestre, se puede observar que por lo general las magnitudes (M_L), fueron menores a 1.5 *grados* en la escala de Richter, destacándose algunos eventos que alcanzaron magnitudes (M_L) de hasta 2.2 *grados* en la escala de Richter, por lo que predominan los bajos niveles energéticos.

3.3. DEFORMACIÓN

Durante el segundo semestre de 2012 se contó con el funcionamiento de tres inclinómetros electrónicos (Sotará, Triangulo y Oso), una estación GNSS permanente (Estumo) y se ocuparon las líneas EDM de este volcán. La localización de las estaciones de monitoreo pueden apreciarse en la figura 66.

3.3.1. Inclinometría Electrónica

Los inclinómetros Sotará y Triángulo durante el segundo semestre de 2012 mostraron un comportamiento estable para las componentes norte y este. El inclinómetro Oso evidenció un comportamiento inflacionario coherente con el incremento en la actividad sísmica de los meses de junio, julio y agosto del mismo año.

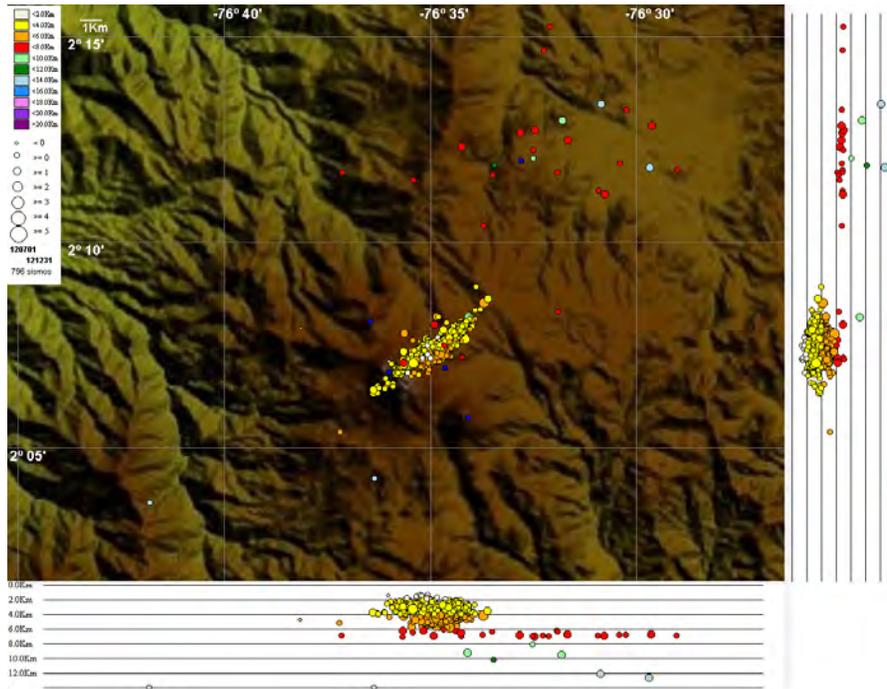


Figura 64: Mapa de localización de eventos Volcano-tectónicos del volcán Sotará durante el segundo semestre de 2012. Los círculos indican las localizaciones epicentrales e hipocentrales, cuyos colores varían según su profundidad y los tamaños según la magnitud Local (ML). Los cuadros azules representan las estaciones sísmicas.

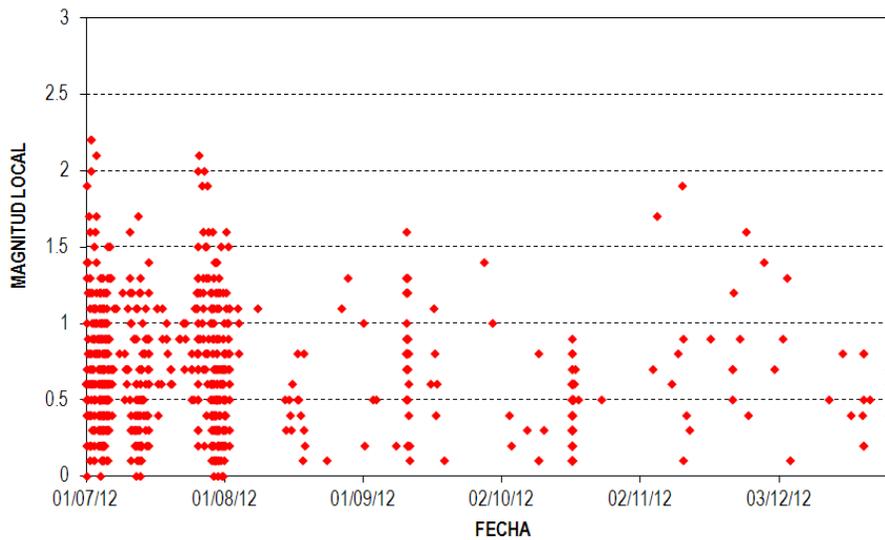


Figura 65: Dispersión de los valores de M_L para los eventos de fractura localizados en el volcán Sotará. Segundo semestre de 2012.

En las figuras 67, 68 y 69 se aprecian las tendencias de los inclinómetros anteriores registradas hasta diciembre de 2012.

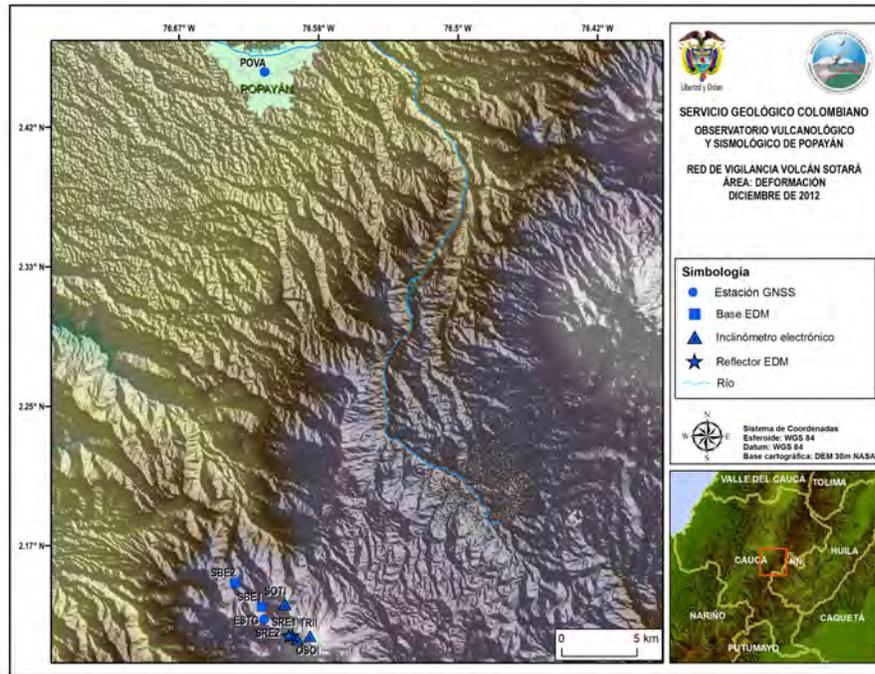


Figura 66: Red de vigilancia en deformación del volcán Sotará.

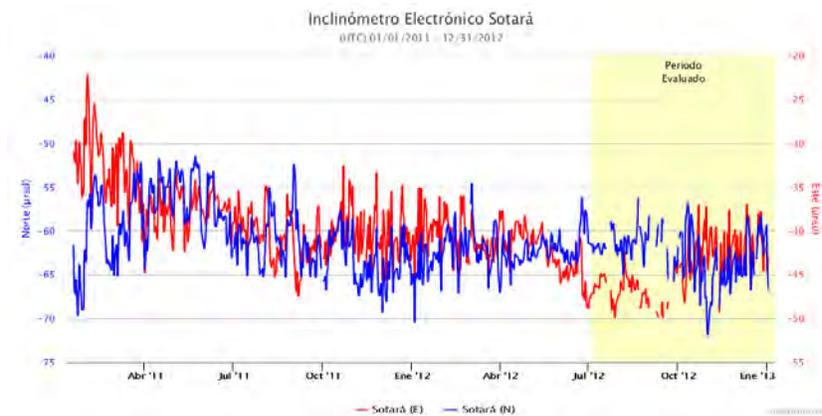


Figura 67: Comportamiento del inclinómetro electrónico Sotará.

La red de inclinómetros electrónicos del volcán Puracé evidenció un comportamiento estable durante el segundo semestre de 2012, lo que indica que por el momento no se están presentando procesos deformativos considerables en el volcán.

3.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

Durante el mes de diciembre del año 2012 se realizó la instalación de una estación GNSS en el sector conocido como el Estumo en el volcán Sotará, con esta estación se empieza a implementar una técnica adicional en monitoreo de la deformación para este volcán. De acuerdo a las tendencias mostradas por las componentes (norte, este y altura) de la estación, se puede decir que hasta la fecha se registra un comportamiento estable y que por el momento en el edificio volcánico, no se registran procesos deformativos considerables (ver figura 70).

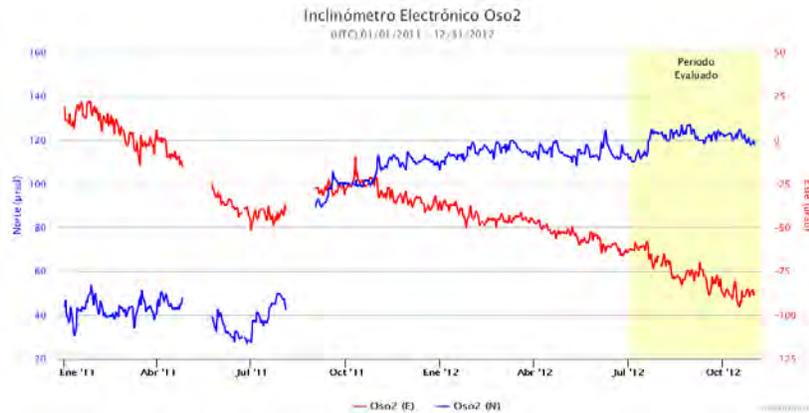


Figura 68: Comportamiento del inclinómetro electrónico Oso.

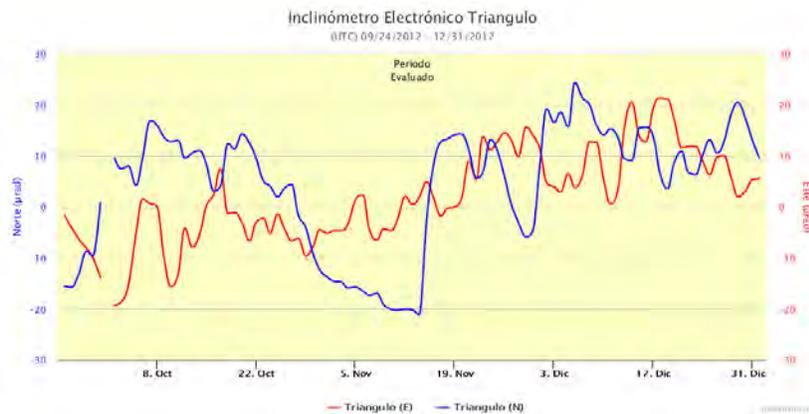


Figura 69: Comportamiento del inclinómetro electrónico Triángulo.



Figura 70: Línea base de comportamiento para la estación GNSS permanente de Estumo a diciembre de 2012.



3.3.3. Medición Electrónica de Distancias (EDM)

Durante el segundo semestre de 2012 se realizó una campaña para ocupación de las líneas de EDM en el volcán Sotará. Hasta el momento se está empezando a generar una línea base con esta técnica.

3.4. ACTIVIDAD SUPERFICIAL

El monitoreo de la actividad superficial en el volcán Sotará durante el segundo semestre de 2012 se realizó mediante una cámara de conexión IP conectada en línea a la web institucional, la cual se encuentra ubicada en el sector denominado Cerro Crespo, a 3.5 km al noroccidente del edificio volcánico. En la figura 71 se muestra la localización geográfica de dicho equipo.

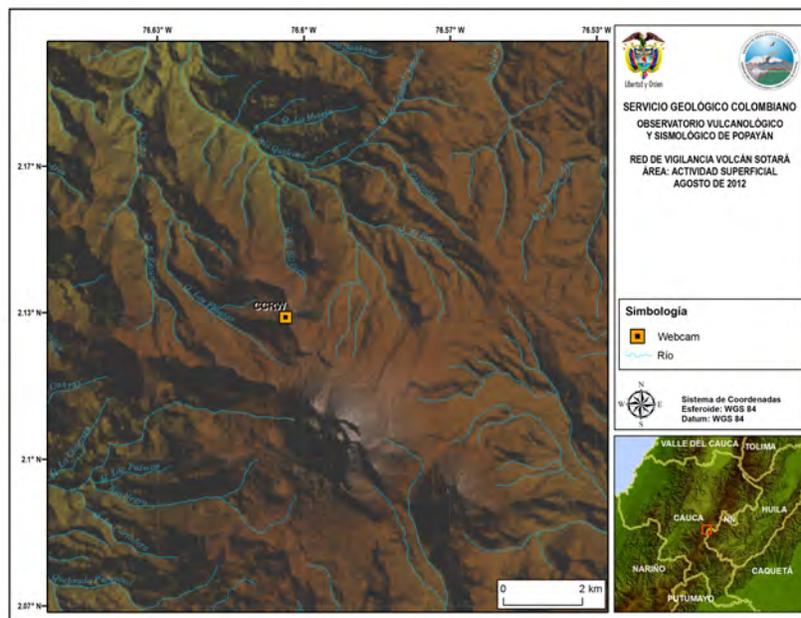


Figura 71: Mapa de localización de la cámara web para monitoreo de la actividad superficial en el volcán Sotará.

Se captaron imágenes del edificio volcánico durante este período en las cuales no se evidenciaron cambios morfológicos ni procesos asociados con emanaciones de gases. En La figura 2 se muestran algunas de las imágenes destacadas durante el segundo semestre de 2012.

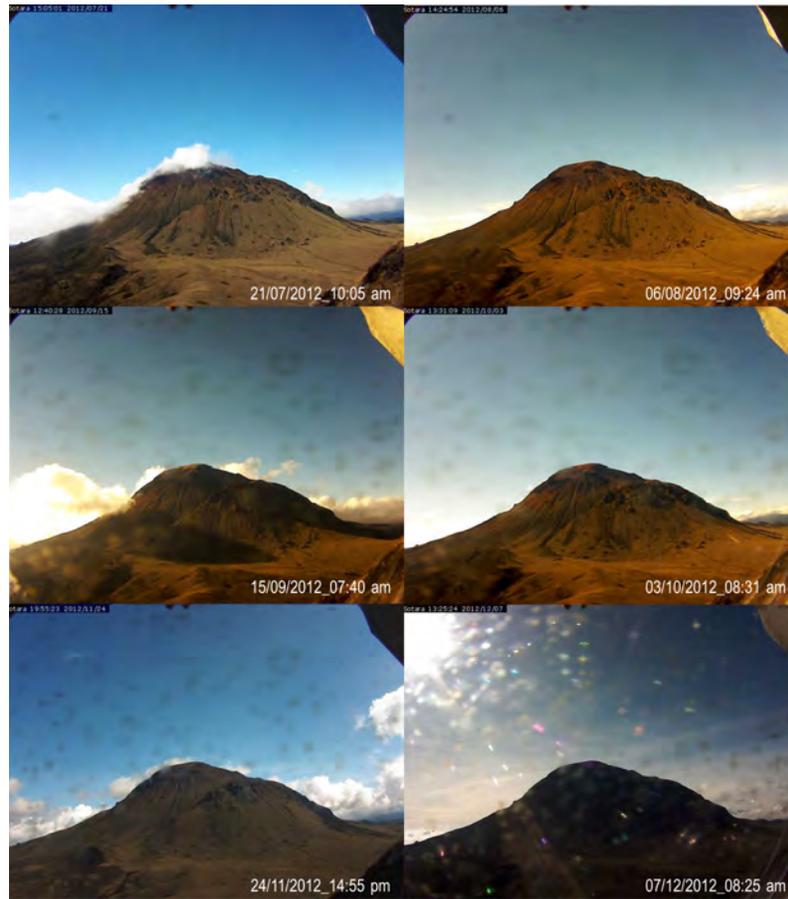


Figura 72: Imágenes del volcán Sotará captadas por la cámara web Cerro Crespo, segundo semestre del 2012.

3.5. 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, y considerando que durante el segundo semestre de 2012 se registraron cambios importantes en la actividad del volcán Sotará, se declaró cambio de nivel de actividad volcánica a partir del 8 de agosto del mismo año. Por tanto se pasó de *NIVEL VERDE: VOLCÁN ACTIVO Y COMPORTAMIENTO ESTABLE* a *NIVEL III (AMARILLO): CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA*. No obstante, se destaca que las variaciones presentadas hasta el momento no desestabilizaron el comportamiento del sistema volcánico, pese a que los niveles de actividad sísmica permanecieron por encima de los niveles básicos históricos para este volcán.



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 segundo semestre del año 2012, las estaciones sísmicas que conforman la red de monitoreo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán OVS – Popayán registraron 605 eventos sísmicos de carácter local, de los cuales se localizaron 46 en los departamentos de Huila, Cauca, Valle del Cauca y Sur del Tolima, con una magnitud máxima de 5.6 M_L en la escala de Richter, cercano al municipio de La Vega, Cauca. En la figura 73 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 511 eventos sísmicos locales, entre ellos se destacan los ocurridos en cercanías a los municipios de La Argentina (Huila), Obando (Valle del Cauca) y La Vega (Cauca). En la tabla 1 se relacionan los eventos destacados con Magnitud Local (ML) mayor a 4.0 por la RSNC.

Fecha	Hora UT	Magnitud Local	Municipio
31/07/2012	01:26	4.2	Obando
30/09/2012	16:31	6.4	La Vega
10/12/2012	10:50	4.1	La Argentina

Tabla 13: Potencial de hidrogeno medido en las fuentes termales del volcán Puracé. Segundo semestre de 2012.

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.

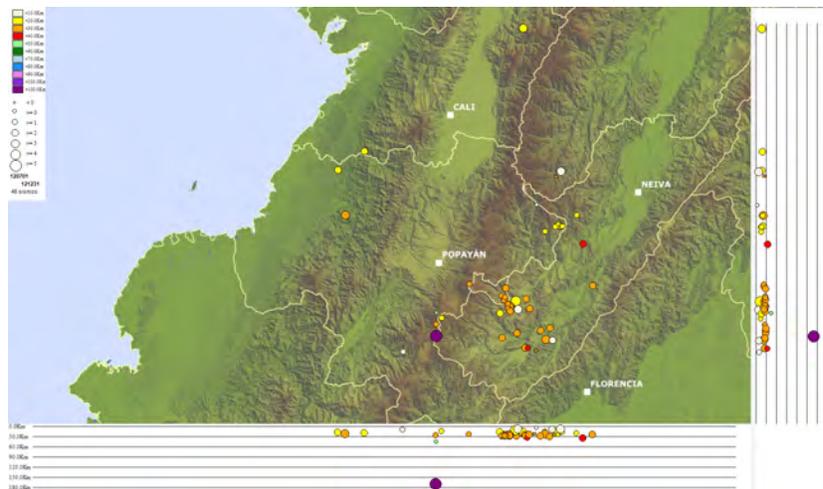


Figura 73: Localización de la sismicidad tectónica local registrada por la red del OVS-Popayán en la región suroccidente del territorio Colombiano durante el segundo semestre del 2012.