



***INFORME TÉCNICO ANUAL DE LA ACTIVIDAD VOLCANICA DEL SEGMENTO
NORTE DE COLOMBIA***

Manizales, 2017





Dirección de
Geoamenazas

***INFORME TÉCNICO ANUAL DE LA ACTIVIDAD VOLCANICA DEL SEGMENTO
NORTE DE COLOMBIA***

Por:

Grupo de Evaluación de Monitoreo de la Actividad Volcánica.

Manizales, 2017

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	14
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN.....	17
1. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ (VNR).....	19
1.1 RED DE VIGILANCIA	19
1.2 SISMOLOGÍA.....	31
1.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)	34
1.2.2 Sismos de tipo drumbeat (DB)	37
1.2.3 Sismos híbridos (HB)	42
1.2.4 Sismos de largo periodo (LP y VLP)	43
1.2.5 Pulsos de tremor y tremor volcánico continuo (TR y TC)	51
1.2.6 Actividad superficial (la columna de gas y señales sísmicas asociadas a la actividad glaciaria).....	58
1.3 DEFORMACIÓN.....	62
1.3.1 Inclínometría electrónica	63
1.3.2 Estaciones GNSS permanentes	65
1.4 GEOQUÍMICA	66
1.4.1 Estimación de las emisiones de SO ₂ con estaciones ScanDOAS	67
1.4.2 Imágenes satelitales descargas de SO ₂	73
1.4.3 Medidas móviles de SO ₂	75
1.4.4 Emisiones de Gas Radón	77
1.4.5 Fuentes Termales	78
1.4.6 Gases en botellas de Giggenbach	84
1.4.7 Gases en Trampas Alcalinas (TA).....	85
2. VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA (VNT).....	88
2.1 RED DE VIGILANCIA	88
2.2 SISMOLOGÍA.....	89
2.2.1 Sismos de Largo Periodo (LP)	92
2.2.2 Señales asociadas a la actividad glaciaria	92
2.3 DEFORMACIÓN.....	93
2.3.1 Inclínometría electrónica	93
2.4 GEOQUÍMICA	94
3. VOLCÁN CERRO MACHÍN (VCM).....	96

3.1	RED DE VIGILANCIA	96
3.2	SISMOLOGÍA	101
3.2.1	Sismos volcano-tectónicos	101
3.3	OTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS	105
3.3.1	Magnetometría	105
3.4	DEFORMACIÓN.....	106
3.4.1	Inclinometría electrónica	106
3.4.2	Estaciones GNSS permanentes	108
3.5	GEOQUÍMICA	109
3.5.1	Fuentes Termales (FT).....	110
3.5.2	Gas Radón	113
3.5.3	Termocupla FT ESTATUAS	114
3.5.4	Gases en botellas de Giggenbach	114
4.	VOLCÁN CERRO BRAVO (VCB)	116
4.1	RED DE VIGILANCIA	116
4.2	SISMOLOGÍA.....	119
4.2.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	119
4.2.2	Sismos de Largo Período (LP)	122
4.2.3	Señales asociadas con una actividad superficial.....	122
4.3	DEFORMACIÓN.....	122
4.3.1	Inclinometría electrónica	123
5.	VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA (VPSR).....	124
5.1	RED DE VIGILANCIA	124
5.2	SISMOLOGÍA	127
5.2.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	127
5.3	GEOQUÍMICA	130
5.3.1	Manantiales termales SAN VICENTE	131
5.3.2	Manantiales termales SANTA ELENA	133
5.3.3	Manantiales termales SANTA ROSA.....	136
6.	VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL (VNSI).....	138
6.1	RED DE VIGILANCIA	138
6.2	SISMOLOGÍA.....	139
6.2.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	139
6.2.2	Señales asociadas a la actividad glaciar	144
6.3	DEFORMACIÓN.....	144
6.3.1	Inclinometría electrónica	145
6.3.2	Estaciones GNSS permanentes	146
6.4	GEOQUÍMICA	146
7.	VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE (VPC)	148

7.1	SISMOLOGÍA.....	148
7.1.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	148
7.1.2	Sismos Híbridos (HB)	151
8.	VOLCÁN PARAMILLO DEL QUINDÍO (VPQ)	153
8.1	RED DE VIGILANCIA	153
8.2	SISMOLOGÍA	153
9.	VOLCÁN SAN DIEGO (VSD).....	156
9.1	RED DE VIGILANCIA	156
9.2	SISMOLOGÍA	156
9.3	GEOQUÍMICA	156
10.	VOLCÁN ROMERAL (VR)	158
10.1	RED DE VIGILANCIA	158
10.2	SISMOLOGÍA	158
11.	VOLCÁN EL ESCONDIDO (VE)	159
11.1	SISMOLOGÍA	159

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Red de estaciones. Segmento Volcánico Norte de Colombia.....	18
Figura 2. Estación multiparamétrica AZUFRADO.....	19
Figura 3. Estación repetidora EL CAMION.	20
Figura 4. Estación multiparamétrica RECIO3.	21
Figura 5. Estación sismológica BIS con ceniza en sus paneles solares.....	22
Figura 6. Estación sismológica RECIO.....	22
Figura 7. Nuevo magnetómetro de ALFOMBRALES.....	23
Figura 8. Nuevo sismómetro de la estación sismológica BIS.....	24
Figura 9. Acumulación de hielo en las antenas del repetidor EL CISNE.	24
Figura 10. Acumulación de hielo en la estación sismológica BIS.....	25
Figura 11. Estación multiparamétrica INDERENA.	26
Figura 12. ScanDoas de la estación multiparamétrica REFUGIO.	26
Figura 13. Acelerómetro del repetidor EL ALGUACIL.	27
Figura 14. ScanDoas del repetidor EL CAMION.	28
Figura 15. Inclínómetros de la estación multiparamétrica LISA.	28
Figura 16. Nueva repetidora de comunicaciones OLLETA3.....	29
Figura 17. Sensores acústicos de infrasonido instalados en la estación multiparamétrica RUBI.....	30
Figura 18. Sensores acústicos de infrasonido instalados en la estación multiparamétrica OLLETA2.	30
Figura 19. Red Sismológica. Volcán Nevado del Ruiz.....	31
Figura 20. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Nevado del Ruiz y episodios de drumbeats, a) Periodo 2010 – 2016 y, b) Periodo 2016.....	32
Figura 21. Raíz de la energía sísmica diaria liberada por eventos tipo VT y HB en el Volcán Nevado del Ruiz. a) Periodo 2010 – 2016 y, b) Periodo 2016.	33
Figura 22. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo VT (círculos de colores) registrados en el área del VNR durante año 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.	35
Figura 23. Incremento en la actividad sísmica tipo VT en el VNR durante el mes de Octubre, ocurrido los días 07 y 11 de Octubre. Al lado izquierdo el mapa de localización de sismos entre el 7 y 11 de Octubre. Al lado derecho sismograma representativo del 07 de Octubre desde las 15:00 a las 21:30 (Hora Local).....	37

Figura 24. Registro sísmico y espectrograma asociado al evento sísmico tipo VT de mayor energía registrado durante Octubre de 2016 en el VNR. Evento ocurrido el día 07 de Octubre a las 15:34, con una magnitud de 4.4 M_L (Magnitud Local), a una profundidad de 5.4 km. El registro sísmico y el espectrograma son de la estación OLLETA, componente vertical..... 37

Figura 25. Registro sísmico del episodio tipo drumbeat del 16 de Julio de 2016, entre las 07:32 y 07:40 (Hora Local) en el VNR. Sismograma (arriba) y espectrograma (abajo) de la estación BIS, componente vertical. Periodicidad entre eventos 26 s..... 40

Figura 26. Domo de lava, características y proceso de formación. a) Esquema de la extrusión domo sobre el conducto de emisión de un volcán. b) Formas típicas de los domos de lava. c) y d) Esquema de la dinámica de flujo del magma-tapón (plug) y el conducto volcánico y sismicidad asociada. 41

Figura 27. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo HB (círculos de colores) registrados en el área del VNR durante año 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas instaladas en el área..... 43

Figura 28. a) Registro sísmico y espectrograma de uno de los sismos tipo LP de mayor desplazamiento reducido registrado durante el año 2016 en el VNR, ocurrido el 28 de Julio a las 05:37 (Hora Local), con un D_r promedio de 26.7 cm^2 y una duración 34 s. Componente vertical, estación OLLETA. b) Registro sísmico y espectrograma de uno de los sismos tipo LP de mayor desplazamiento reducido registrado durante el año 2016 en el VNR, ocurrido el 03 de Octubre a las 06:29 (Hora Local), con un D_r promedio de 26.9 cm^2 y una duración 43 s. Componente vertical, estación OLLETA. 45

Figura 29. Mapa de localización epicentral de sismos tipo LP (Círculos naranja) registrados durante el año 2016 en el VNR. Los cuadros blancos representan las estaciones sismológicas. 47

Figura 30. a) Gráfica de frecuencias asociadas a la máxima amplitud de los eventos sísmicos tipo LP y VLP registradas durante el año 2016 en el VNR. b) Gráfica de duración de los eventos tipo LP y VLP registradas durante el año 2016 en el VNR. 49

Figura 31. Qr del volcán Nevado del Ruiz obtenido mediante el método Sompí, Enero-Diciembre de 2016..... 50

Figura 32. Gráficas de desplazamiento reducido y duración entre las señales sísmicas (LP + TR) de los sismos múltiples registrados durante el periodo Enero-Diciembre de 2016 en el VNR..... 51

Figura 33. Sismograma y espectrograma del pulso de tremor (TR) de mayor nivel energético en el año 2016 en el VNR. La señal tuvo un D_r promedio de 18.79 cm^2 , con duración de 68 s, fue registrada el 03 de Marzo a las 09:24 (Hora Local) y fue antecedida por un LP de 2.11 cm^2 de D_r promedio. Estación Olleta banda ancha. La fotografía muestra la emisión de ceniza asociada a la señal y el mapa muestra la localización epicentral obtenida por atenuación de la amplitud con la distancia. 53

Figura 34. Gráfica de las frecuencias asociadas a la mayor amplitud registrada en cada pulso de tremor volcánico registrado en el VNR durante el año 2016.	54
Figura 35. Gráfica de la duración de los pulsos de tremor volcánico (TR) registrados en el VNR durante el año 2016.	54
Figura 36. Sismograma y espectrograma del pulso de tremor (TR) de mayor duración (1386 s) en el año 2016 en el VNR. La señal tuvo un Dr promedio de 4.7 cm ² , registrada el 14 de Marzo a las 14:50 (Hora Local), fue localizada en el cráter Arenas. Estación Olleta banda ancha.	55
Figura 37. Mapa de localización epicentral de los pulsos de tremor registrados en el VNR durante el año 2016. Los círculos amarillos representan los eventos sísmicos y los cuadros blancos las estaciones sismológicas.	56
Figura 38. Espectrograma y sismograma del episodio de tremor continuo (TC) más energético registrado en el VNR en el año 2016. Este episodio se registró el 10 de Marzo. El mayor desplazamiento reducido alcanzado durante el episodio fue de 2.0 cm ² . Estación Bis, corto periodo, registro entre las 00:00 y las 19:00 (Hora Local). La flecha roja señala el periodo más energético del episodio.	57
Figura 39. Gráfica del RSAM (Real-time Seismic Amplitude Measurement) para el año 2016 en el VNR. Estación de BIS, componente vertical. La flecha roja señala el episodio de tremor continuo más energético del 2016, registrado entre el 10 y el 11 de Marzo.	58
Figura 40. Altura de columna de gases y ceniza observada entre Enero-Diciembre de 2016 a partir de apreciaciones visuales desde el OVSM y de las cámaras instaladas en el área del volcán.	59
Figura 41. Columna de gases del cráter Arenas, Volcán Nevado del Ruiz. Fotografías capturadas durante el año de 2016, desde las cámaras ubicadas en inmediaciones de la estructura volcánica del VNR -Sector de Piraña - Azufrado y sector del Cerro Gualí y desde las instalaciones del SGC sede Manizales.	60
Figura 42. Imágenes ASTER del Sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, captada el 22 de Mayo del año 2016.	61
Figura 43. Anomalías térmicas registradas por el Proyecto MIROVA, en el VNR desde Enero hasta Diciembre de 2016.	62
Figura 44. Red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz.	63
Figura 45. Comportamiento de las componentes Norte (N) (Azul) y Este (E) (Verde) de los inclinómetros electrónicos AZUF, BIS, GUAL, LISA, MOLI, NERE, RECI y REFU de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz desde Enero de 2012 hasta Diciembre de 2016.	64
Figura 46. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Verde) de los inclinómetros electrónicos BIS (a), NERE (b), RECI (c) y REFU (d) de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz durante 2016.	65

Figura 47. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Verde) y Vertical (Rojo) de los GPS permanentes OLLE (a), NERE (b), RUBI (c) y SINN (d) de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz durante 2016.	66
Figura 48. Red Geoquímica del Volcán Nevado del Ruiz.	67
Figura 49. Ubicación de las Estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz.	68
Figura 50. Flujos Máximos de SO ₂ estimados en el Volcán Nevado del Ruiz entre los años 2010-2016.	69
Figura 51. Flujos de SO ₂ : Promedio y Máximo estimado desde estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	70
Figura 52. Descarga de SO ₂ acumulada a 2012-2016. Volcán Nevado del Ruiz.	71
Figura 53. Descarga de SO ₂ emitida a la atmósfera en el año 2016. Volcán Nevado del Ruiz.....	72
Figura 54. Frecuencia de la Velocidad y Dirección del Viento predominantes para el año 2016.	73
Figura 55. Imágenes OMI desgasificación SO ₂ en el Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	74
Figura 56. Flujos de SO ₂ estimados con equipo MobileDOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	76
Figura 57. Ruta de medida de SO ₂ con equipo MobileDOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	77
Figura 58. Variación de los niveles de Radón en suelo estaciones AZUFRADO y GUALI. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	78
Figura 59. Variación de la Temperatura en Fuentes Termales: HOTEL, AGUAS CALIENTES, GUALI, LA GRUTA, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.....	79
Figura 60. Variación del pH en Fuentes Termales HOTEL, AGUAS CALIENTES, GUALÍ, LA GRUTA, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.....	80
Figura 61. Variación de la conductividad eléctrica en Fuentes Termales HOTEL, AGUAS CALIENTES, GUALÍ, LA GRUTA, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.....	81
Figura 62. Variación del contenido de gases en la Fumarola Nereidas. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.....	85
Figura 63. Variación del contenido de gases en estaciones de Trampas Alcalinas: refugio1, refugio 2, Olleta y Alfombrales. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.....	87
Figura 64. Estación NIDO DE AGUILA.....	88
Figura 65. Red Sismológica. Volcán Nevado del Tolima.	90
Figura 66. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Nevado del Tolima durante el año 2016.	91
Figura 67. Raíz de la energía diaria liberada en el Volcán Nevado del Tolima durante el año 2016.	91

Figura 68. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores), registrados en el VNT durante el año 2016. Los cuadros negros representan las estaciones sismológicas.....	92
Figura 69. Red de deformación del Volcán Nevado del Tolima.....	93
Figura 70. Comportamiento de las componentes Norte y Este del inclinómetro electrónico ESME, de la red de deformación del VNT durante 2016.....	94
Figura 71. Estación multiparamétrica CIMA.....	96
Figura 72. Nuevo sismómetro de la estación SAN LORENZO.....	97
Figura 73. Estación sismológica SILENCIO.....	98
Figura 74. Nueva ubicación del sismómetro de CIMA.....	98
Figura 75. Estación de medición de temperatura de aguas termales ESTATUAS.....	99
Figura 76. Mejoramiento de la instalación del sismómetro en la estación SANTA MARTA.....	100
Figura 77. Mejoramiento de la instalación del sismómetro en la estación SILENCIO..	100
Figura 78. Estación repetidora CIELO ROTO.....	101
Figura 79. Red Sismológica. Volcán Cerro Machín.....	102
Figura 80. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Cerro Machín, Enero a Diciembre de 2016.....	103
Figura 81. Raíz de la energía sísmica diaria liberada por el Volcán Cerro Machín, Enero a Diciembre de 2016.....	103
Figura 82. Localización hipocentral de sismos volcano-tectónicos en el Volcán Cerro Machín, año 2016, los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas. ..	104
Figura 83. Registro sísmico y espectro asociado al sismo volcano-tectónico de mayor energía durante el año, registrado el día 09 de Junio a las 19:47 (Hora Local) en el VCM. El eje horizontal de la imagen es el tiempo (s) y el eje vertical es la amplitud en manómetros nm/s y la frecuencia (Hz).....	104
Figura 84. Variaciones del campo magnético en el Volcán Cerro Machín, Enero-Diciembre de 2016, Estación DOMO.....	105
Figura 85. Red de deformación. Volcán Cerro Machín.....	106
Figura 86. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Verde) del inclinómetro electrónico CIMA, de la red de deformación del VCM durante 2016.	107
Figura 87. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Verde) del inclinómetro electrónico LAGU, de la red de deformación del VCM durante 2016.	108
Figura 88. Comportamiento de las componentes Norte, Este y Vertical de la estación GNSS LAGU hasta Agosto de 2017.....	109
Figura 89. Red Geoquímica. Volcán Cerro Machín.....	110
Figura 90. Variación de la Temperatura en Fuentes Termales: PISCINA, ESTATUAS, TOCHE, LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín. 2016.....	111

Figura 91. Variación del pH en Fuentes Termales: PISCINA, ESTATUAS, TOCHE, LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín. 2016.	112
Figura 92. Variación del Conductividad Eléctrica en Fuentes Termales: PISCINA y ESTATUAS TOCHE, LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín. 2016.	112
Figura 93. Comportamiento de las estaciones de Gas Radón ALEJANDRIA y LAGUNA. Volcán Cerro Machín. 2016.	113
Figura 94. Monitoreo Telemétrico de la Temperatura en la Fuente Termal ESTATUAS. Volcán Cerro Machín. 2016.	114
Figura 95. Variación del contenido de gases en Fumarola LA MACHA. Volcán Cerro Machín. 2016.	115
Figura 96. Estación multiparamétrica CERRO BRAVO.	116
Figura 97. Circuito de Control Automático de Encendido.	117
Figura 98. Nuevo sismómetro de la estación LA SIBERIA.	118
Figura 99. Sismómetro de corto periodo pasivo (izquierda) y sismómetro de corto periodo activo (derecha) en la estación multiparamétrica CERRO BRAVO.	119
Figura 100. Red Sismológica. Volcán Cerro Bravo.	120
Figura 101. Número diario de eventos sísmicos registrados en el Volcán Cerro Bravo, durante el año 2016.	121
Figura 102. Número diario de eventos sísmicos registrados en el Volcán Cerro Bravo, durante el año 2016.	121
Figura 103. Red de deformación del Volcán Cerro Bravo.	123
Figura 104. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Verde) del inclinómetro electrónico CBRA, de la red de deformación del Volcán Cerro Bravo durante 2016.	124
Figura 105. Estación de banda ancha AFRICA.	125
Figura 106. Estación multiparamétrica EL AGUILA.	126
Figura 107. Estación multiparamétrica PARAMILLO.	127
Figura 108. Red Sismológica. Volcán Paramillo de Santa Rosa.	128
Figura 109. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el año 2016 en el VPSR.	129
Figura 110. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el año 2016, en el VPSR.	129
Figura 111. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPSR, durante el año 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.	130
Figura 112. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	131
Figura 113. Variación del pH en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	132

Figura 114. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	133
Figura 115. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	134
Figura 116. Variación del pH en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	135
Figura 117. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	135
Figura 118. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	136
Figura 119. Variación del pH en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	137
Figura 120. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.	137
Figura 121. Estación LAGUNA VERDE.	138
Figura 122. Red Sismológica. Volcán Nevado de Santa Isabel.	140
Figura 123. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el 2016 en el VNSI.	141
Figura 124. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2016, en el VNSI.	141
Figura 125. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VNSI, durante el 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.	142
Figura 126. Número diario de eventos sísmicos tipo VT ocurridos durante el 2016 en el Cerro España.	143
Figura 127. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2016, en el Cerro España.	143
Figura 128. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del Cerro España, durante el 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.	144
Figura 129. Red de deformación. Volcán Nevado de Santa Isabel.	145
Figura 130. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Verde) de los inclinómetros electrónicos CHAV a) y GLAC b) durante 2016.	146
Figura 131. Variación del contenido de gases en campo fumarólico La Azufrera. Volcán Nevado Santa Isabel. 2016.	147
Figura 132. Número de eventos sísmicos tipo VT e HB diarios, registrados durante 2016, en el VPC.	149
Figura 133. Raíz de la energía sísmica liberada diaria por eventos tipo VT e HB registrados durante 2016, en el VPC.	149

Figura 134. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPC, durante el año 2016. Los cuadros blancos representan las estaciones sismológicas.	150
Figura 135. Mapa de localización hipocentral incremento sísmico de mayor energía registrado en el VPC en el año 2016, el 21 de Marzo. Los círculos de colores representan los eventos sísmicos y los cuadros blancos las estaciones sismológicas. El recuadro de la parte inferior muestra el sismograma y el espectrograma en la estación Laguna Verde (LAVM) y un detalle de la localización del sismo de mayor magnitud, 2.9 M_L (Magnitud Local).....	151
Figura 136. Mapa de localización hipocentral de los sismos híbridos (círculos de colores) registrados en el área del VPC, durante el año 2016. Los cuadros blancos representan las estaciones sismológicas. El recuadro de la parte inferior muestra el sismograma y el espectrograma en la estación Laguna Verde (LAVM) del sismo híbrido de mayor magnitud, 1.8 M_L (Magnitud Local) registrado el 08 de Mayo a las 12:28 (Hora Local).	152
Figura 137. Estación QUINDIO.	153
Figura 138. Número de eventos sísmicos diarios tipo VT, ocurridos durante el 2016 en el VPQ.....	154
Figura 139. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2016 en el VPQ.....	154
Figura 140. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPQ, durante el 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.	155

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Listado de los eventos de mayor magnitud registrados mensualmente durante el 2016.....	35
Tabla 2. Episodios sísmicos tipo “drumbeats” registrados en el VNR durante 2016.	38
Tabla 3. Principales eventos tipo LP de cada mes del año 2016, registrados en el VNR.	45
Tabla 4. Flujos de SO ₂ estimados de las estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz.....	68
Tabla 5. Parámetros de viento y rutas usadas para medidas móviles de SO ₂ . Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	75
Tabla 6. Contenido iónico y parámetros Fisicoquímicos Fuentes Termales. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	82
Tabla 7. Datos de Gases en la Fumarola NEREIDAS (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Nevado del Ruiz. 2016.	85
Tabla 8. Parámetros Fisicoquímicos y composición iónica manantiales termales Volcán Nevado del Tolima. 2016.	94
Tabla 9. Datos de Gases en Fumarola LA MACHA (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Cerro Machín. 2016.	115
Tabla 10. Datos de Gases en campo fumarólico LA AZUFRERA (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Nevado Santa Isabel. 2016.	146
Tabla 11. Parámetros Fisicoquímicos y composición iónica manantiales termales Volcán San Diego. 2016.	156

RESUMEN

El segmento Volcánico Norte de Colombia durante el 2016, continúa registrando principalmente actividad sísmica volcano-tectónica relacionada con el fracturamiento de roca. La sismicidad se puede comparar energéticamente al año 2013 juntos son los años en los que mayor energía se ha liberado y con respecto a los años 2014 y 2015 un leve aumento.

En el volcán Nevado del Ruiz la actividad asociada a fracturamiento de roca se localizó principalmente en los sectores Sur-Suroccidente, Sur, Norte, Nororiente del cráter Arenas y en el cráter, y en una menor proporción en las fuentes sismogénicas localizadas al Occidente-Suroccidente y Noroccidente y Oriente de éste. Las profundidades oscilaron entre 0.1 (en proximidades del cráter) y 10 km (en sectores distales del cráter) con un predominio de eventos tipo VT con profundidades menores a 6 km. Las magnitudes locales (ML) estimadas oscilaron entre -0.6 y 4.4 ML, registrándose 64 eventos con magnitud local mayor o igual ≥ 2.0 ML, siendo algunos de éstos reportados como sentidos por los habitantes en el área de influencia del volcán.

El volcán Nevado del Ruiz (VNR) continuó presentando cambios importantes y mostró un grado de inestabilidad mayor con respecto al año anterior. El 2016 estuvo caracterizado por el registro frecuente de señales sísmicas relacionadas con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos y sismicidad asociada con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica. La actividad de fluidos al interior de los conductos volcánicos, mostró un leve incremento tanto en el número de eventos como en los desplazamientos reducidos y la duración de éstos, siguiendo así la evolución del proceso volcánico iniciado a partir del 18 Noviembre de 2014. Relacionado con la actividad de fluidos, se registraron a través del 2016, episodios de tremor volcánico continuo de corta duración, así como eventos múltiples de fluido y de periodo muy largo. Algunas de señales estas estuvieron asociadas a limpieza de conductos y emisiones de ceniza a la atmósfera. Estas emisiones fueron confirmadas mediante fotografías, reportes de los habitantes en las inmediaciones del volcán y municipios aledaños, imágenes satelitales, entre otros.



Se registraron varios episodios de sismicidad tipo *drumbeat* o “golpes de tambor”, estos episodios de sismicidad periódica tipo VT, de muy corta duración y de niveles energéticos bajos a muy bajos. En conjunto la actividad sísmica registrada durante el año en el VNR, manifestó la salida de un volumen de material magmático o domo de lava a la superficie del cráter Arenas, que fue detectado en Imágenes de radar ASTER

del Sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, a pesar de los esfuerzos realizados por el Servicio Geológico Colombiano para tener una observación directa del domo, las condiciones atmosféricas y la dinámica de columna de gases (densa y espesa) no ha permitido hasta el momento de elaboración de este informe la observación directa de dicho fenómeno, que continua en evolución.

Durante el año 2016 la actividad sísmica del Volcán Cerro Machín fue principalmente de tipo volcano-tectónica, asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico; la red de estaciones sismológicas, registró un total de 1479 eventos de carácter volcano-tectónico. En general estos eventos sísmicos presentaron niveles bajos de energía; La actividad sísmica se localizó principalmente en el domo principal y al Suroccidente del mismo a profundidades que variaron entre 2.0 y 7.5 km, y en menor proporción hacia el sector Sur y Sureste a profundidades entre 2.5 y 13 km.

Los otros edificios volcánicos del complejo mostraron leves variaciones en la tasa de sismicidad durante el 2016, que hacen parte del proceso de inestabilidad contemplado hasta el momento.

Con relación a los demás parámetros monitoreados en los volcanes, se observó en el volcán Nevado del Ruiz, algunos cambios en la deformación del volcán, así como en los parámetros fisicoquímicos monitoreados. Los demás edificios volcánicos no mostraron cambios en dichos parámetros.

Con base en la evaluación integral de los parámetros que se monitorean continuamente, se concluye que continúan en NIVEL AMARILLO  (o III): Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica los volcanes Nevado del Ruiz y Cerro Machín, y en NIVEL VERDE  (o IV): Volcán activo y comportamiento estable, los volcanes Nevado del Tolima, Cerro Bravo, Nevado Santa Isabel, Paramillo del Cisne, Paramillo del Quindío, Paramillo de Santa Rosa, San Diego y Romeral.

INTRODUCCIÓN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), a través de la dirección de Geoamenazas, ha implementado una red de Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos en el costado centro-occidental del territorio colombiano, con el fin de monitorear los volcanes activos de esta sección del país. El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (SGC-OVSM), creado en 1986, se encarga de realizar monitoreo continuo de los volcanes pertenecientes al Segmento Norte de Colombia. Se monitorea permanentemente los volcanes San Diego, Romeral, Cerro Bravo, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Paramillo del Cisne, Volcán Nevado de Santa Isabel, Volcán Paramillo de Santa Rosa, Volcán Paramillo del Quindío, Volcán Nevado del Tolima y Volcán Cerro Machín, así como los demás centros volcánicos situados dentro del complejo volcánico. Estos volcanes se encuentran localizados en los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Tolima.

Cumpliendo con la misión que le ha sido encomendada, el SGC-OVSM realiza monitoreo continuo del comportamiento que presentan los volcanes anteriormente mencionados, prestando especial atención a la actividad registrada por el Volcán Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel y el Volcán Cerro Machín, los cuales han venido mostrando variaciones en su comportamiento con diferentes fluctuaciones en cuanto a la liberación de energía sísmica y demás parámetros geofísicos, geodésicos y geoquímicos que se tienen en cuenta para valorar la actividad volcánica.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC-OVSM) presenta el informe de actividad de los volcanes del Segmento Norte de Colombia, correspondiente al año 2016. Este informe compila la información obtenida a través de las redes de vigilancia instaladas en los alrededores de los centros volcánicos (Figura 1).

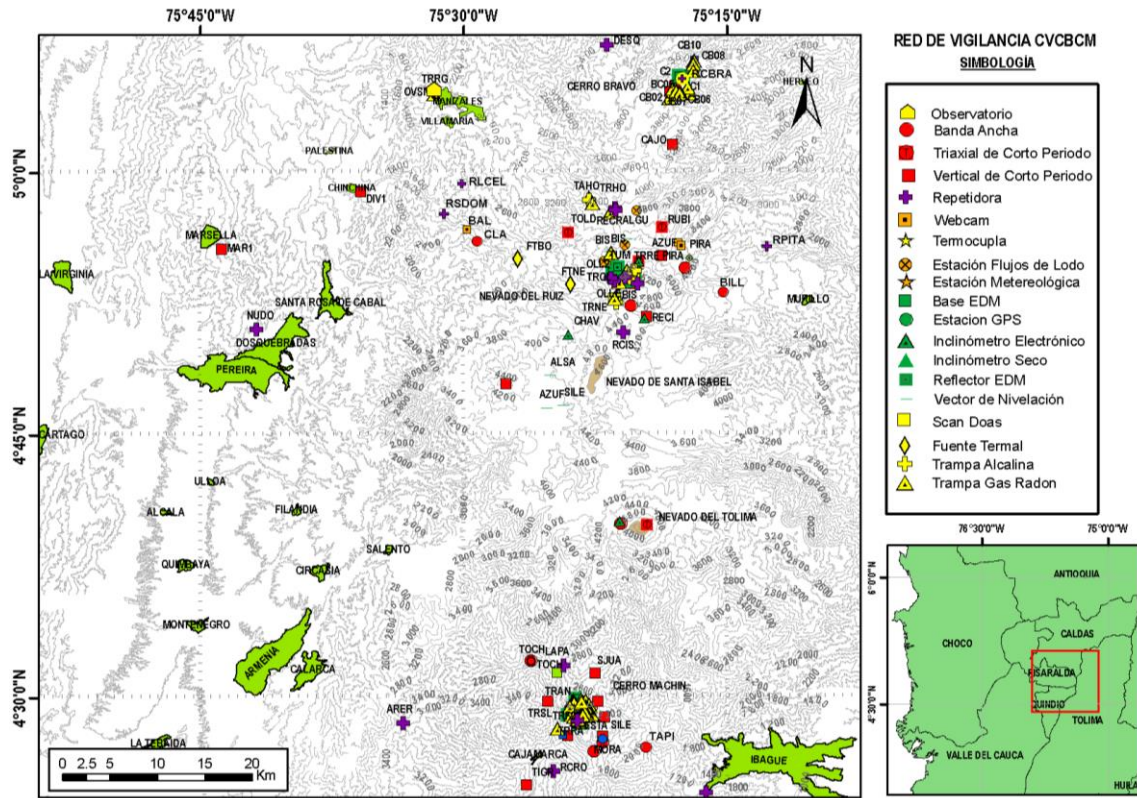


Figura 1. Red de estaciones. Segmento Volcánico Norte de Colombia.



1. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ (VNR)

1.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán en el año de 2016 fue del **90.3%**.

Durante el mes de Enero se destacaron los siguientes trabajos en la red de estaciones de monitoreo:

- **INDERENA:** Se corrigió el circuito impreso de conexión de la señal de calibración del sensor de banda ancha Nanometrics Trillium Compact con el digitalizador Guralp CMG-DM24. También se instaló un sistema de ScanDoas.
- **LISA:** Se desinstalaron los equipos de monitoreo analógicos para dejar en funcionamiento solo equipos digitales modernos.

En el mes de Febrero se destaca la modernización y unificación de 3 estaciones independientes en una sola estación multiparamétrica llamada AZUFRADO (Figura 2). Esta estación cuenta con un sismómetro de banda ancha, un inclinómetro digital y un sensor acústico de infrasonido.



Figura 2. Estación multiparamétrica AZUFRADO.



También durante este mes se mejoró la infraestructura del repetidor EL CAMION para soportar la instalación de más equipos en el futuro (Figura 3).



Figura 3. Estación repetidora EL CAMION.

En el mes de Marzo se destaca la instalación de un nuevo sensor acústico de infrasonido en la estación multiparamétrica RECIO3 (Figura 4), la cual además cuenta con un sismómetro de corto periodo, un inclinómetro digital y un GNSS.

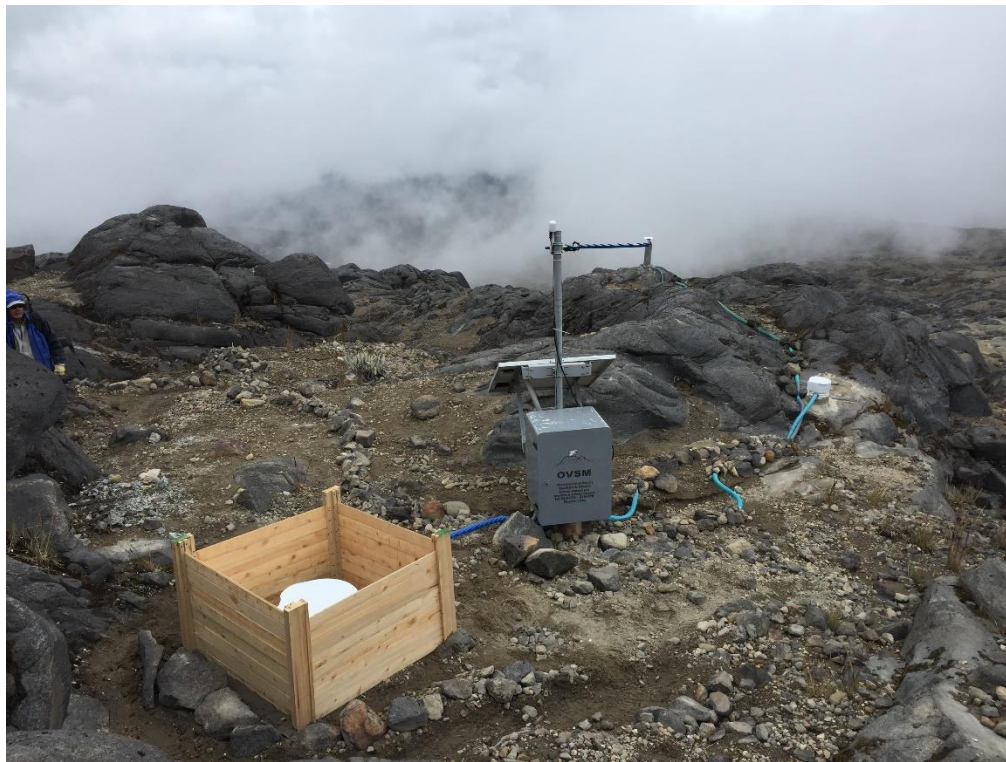


Figura 4. Estación multiparamétrica RECIO3.

Durante este mes algunas estaciones cercanas al cráter se vieron afectadas por la emisión de ceniza del día 15 de Marzo, especialmente la estación sismológica BIS (Figura 5), sin embargo esto no afectó su funcionamiento normal.



Figura 5. Estación sismológica BIS con ceniza en sus paneles solares.

También se destaca la digitalización de la estación sismológica RECIO, que además se mejoró con un sismómetro de banda ancha que reemplazo al de corto periodo (Figura 6).



Figura 6. Estación sismológica RECIO.



En el mes de Abril se destacan las instalaciones de un nuevo magnetómetro paralelo al de ALFOMBRALES (Figura 7) y de una cámara web en el repetidor del Nevado del CISNE pero que apunta hacia el Nevado del Ruiz.



Figura 7. Nuevo magnetómetro de ALFOMBRALES.

En el mes de Mayo se realizaron labores de mantenimiento general en algunas estaciones del volcán, pero se destaca la actualización instrumental de la estación sísmológica BIS (Figura 8), la cual ahora cuenta con un sismómetro activo de corto periodo con un digitalizador moderno de 24 bits. La estación de BIS es referencia cuando se trata de realizar detecciones de temblor volcánico.



Figura 8. Nuevo sismómetro de la estación sismológica BIS.

En el mes de Junio se realizaron mantenimientos preventivos y correctivos en algunas estaciones del volcán, notablemente en el repetidor EL CISNE (Figura 9) donde la acumulación de hielo en las antenas ocasiono intermitencia en algunas telemetrías.



Figura 9. Acumulación de hielo en las antenas del repetidor EL CISNE.



En el mes de Julio el clima en la zona alta del volcán continuó ocasionando la acumulación excesiva de hielo en antenas y paneles solares, lo que ocasiono que la estación sismológica BIS (Figura 10) presentara intermitencia en su telemetría y se hiciera necesario programar visitas de mantenimiento.



Figura 10. Acumulación de hielo en la estación sismológica BIS.

En el mes de Agosto se realizaron mantenimientos preventivos y correctivos en varias estaciones del volcán. Se destacan las instalaciones de dos sensores acústicos de infrasonido en paralelo en la estación multiparamétrica de INDERENA (Figura 11) y la instalación de un ScanDoas en la estación multiparamétrica REFUGIO (Figura 12).



Figura 11. Estación multiparamétrica INDERENA.



Figura 12. ScanDoas de la estación multiparamétrica REFUGIO.

En el mes de Septiembre se destaca la re-instalación del acelerómetro de la Red Sismológica Nacional de Colombia en el repetidor EL ALGUACIL (Figura 13),



adicionalmente se realizaron mantenimientos preventivos y correctivos en otras estaciones del volcán.



Figura 13. Acelerómetro del repetidor EL ALGUACIL.

En el mes de Octubre se destacan la instalación de un ScanDoas en el repetidor EL CAMION (Figura 14), el mejoramiento del sistema eléctrico de la estación multiparamétrica RECIO3, la instalación de un inclinómetro digital en paralelo al analógico en la estación multiparamétrica LISA (Figura 15) y la instalación de una repetidora de voz en la OLLETA (Figura 16).



Figura 14. ScanDoas del repetidor EL CAMION.



Figura 15. Inclinómetros de la estación multiparamétrica LISA.



Figura 16. Nueva repetidora de comunicaciones OLLETA3.

En el mes de Noviembre se destacan las instalaciones de sensores acústicos de infrasonido en las estaciones multiparamétricas de RUBI (Figura 17) y OLLETA 2 (Figura 18). También se realizaron trabajos de mantenimiento preventivo con el objetivo de asegurar el funcionamiento de las estaciones durante la época de fin de año.



Figura 17. Sensores acústicos de infrasonido instalados en la estación multiparamétrica RUBI.



Figura 18. Sensores acústicos de infrasonido instalados en la estación multiparamétrica OLLETA2.

Durante el mes de Diciembre no se realizaron tareas de mantenimiento preventivo ni correctivo en las estaciones de monitoreo del volcán.

1.2 SISMOLOGÍA

En el año 2016, la red de estaciones sismológicas instaladas en el Volcán Nevado del Ruiz (VNR), (Figura 19) registró actividad sísmica principalmente relacionada con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica y la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos.

En totalidad se registraron 108312 eventos sísmicos volcánicos, entre ellos se destacan 64588 sismos de tipo volcano-tectónico (VT), 9483 sismos de largo periodo (LP), 153 sismos híbridos (HB), 4277 pulsos de tremor volcánico (TR) y 29811 episodios de tremor continuo (TC) de energía variable. (Figura 20 y Figura 21)

Adicionalmente la red registró una cantidad considerable de eventos sísmicos relacionados con la dinámica del glaciar que cubre la parte superior del edificio volcánico.

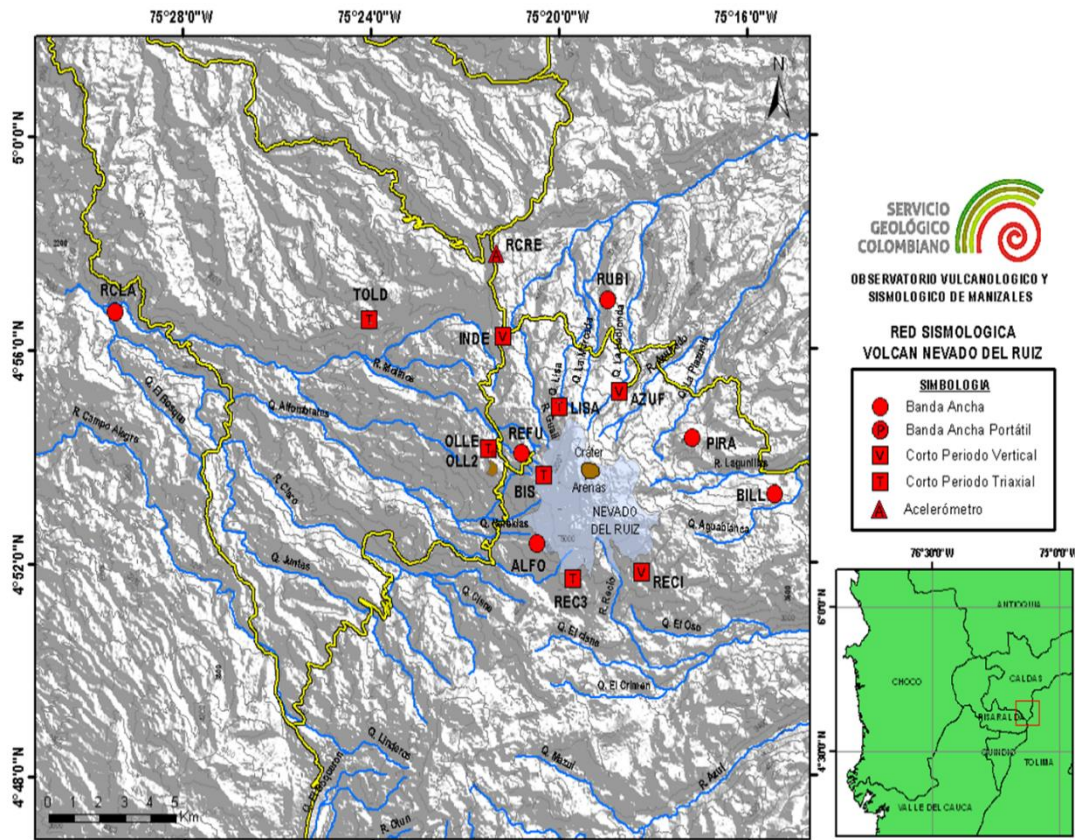


Figura 19. Red Sismológica. Volcán Nevado del Ruiz.

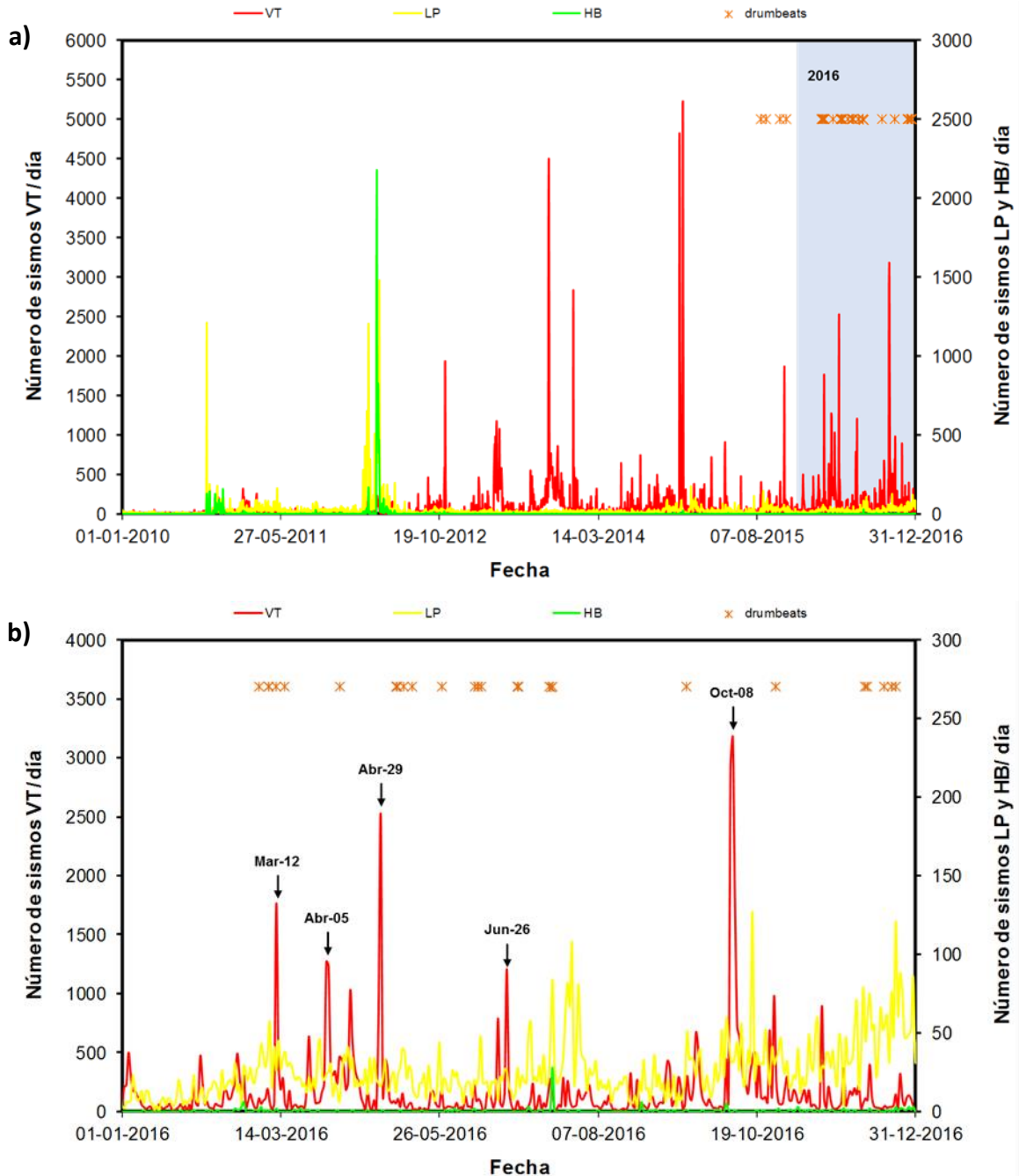


Figura 20. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Nevado del Ruiz y episodios de drumbeats, a) Periodo 2010 – 2016 y, b) Periodo 2016.

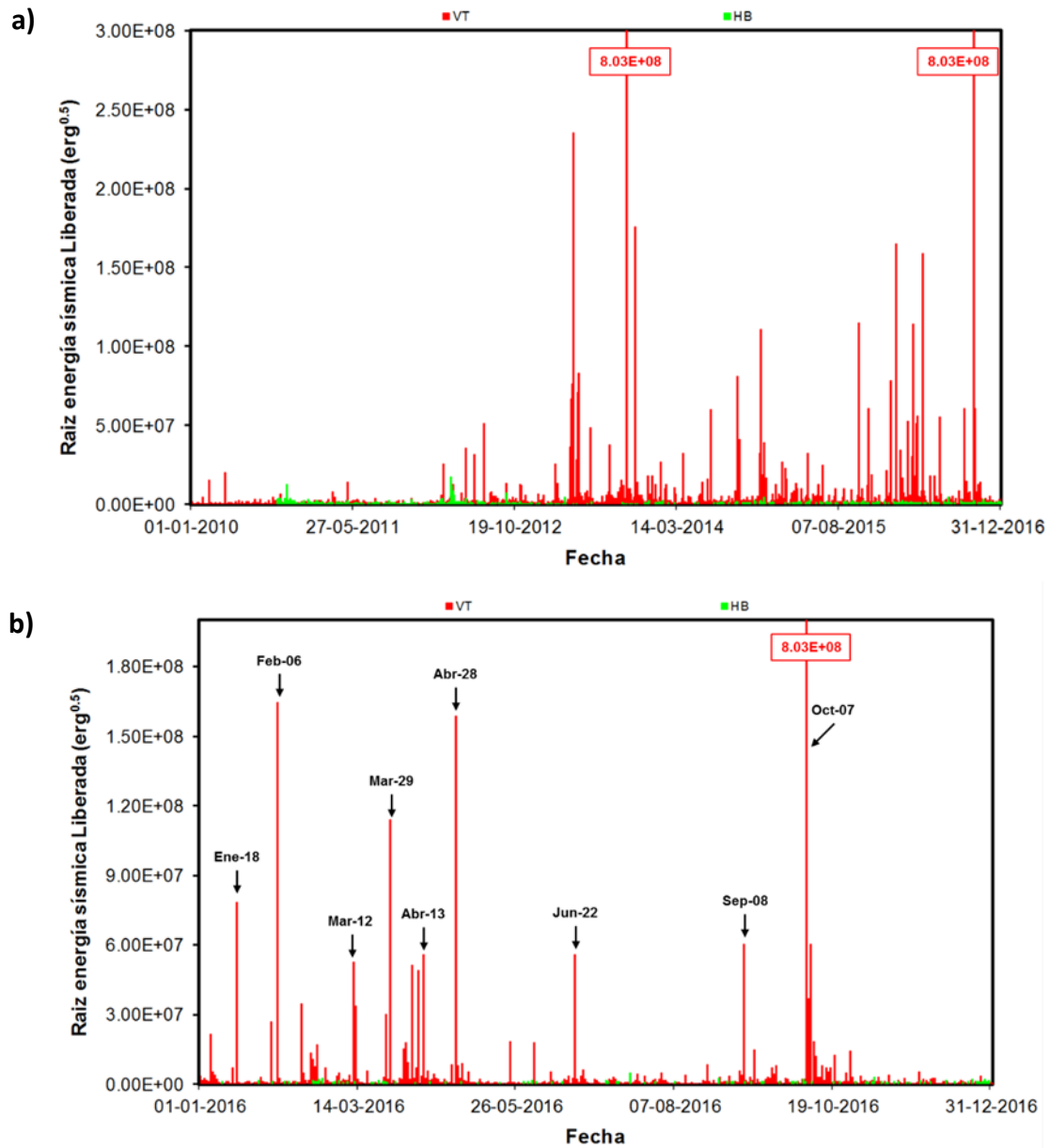


Figura 21. Raíz de la energía sísmica diaria liberada por eventos tipo VT y HB en el Volcán Nevado del Ruiz. a) Periodo 2010 – 2016 y, b) Periodo 2016.

1.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

La actividad sísmica asociada al fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, tipo VT, en el 2016 estuvo comparable energéticamente al año 2013 y aumentó con respecto a los años 2014 y 2015. En cuanto a número de sismos tuvo mayor cantidad de eventos que en años pasados sin embargo por eventos individuales tuvo menor número que el 2013 y 2014 y mayor que el 2015.

La actividad de tipo VT en el VNR durante el 2016 mostró niveles significativos de sismicidad relacionados al fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica, continuando con el proceso en la actividad sísmica que inició a finales de 2010, este año junto con el 2013 fue en los que mayor energía se ha liberado. Esta actividad fue localizada principalmente en los sectores Sur-Suroccidente, Sur, Norte, Nororiente del cráter Arenas y en el cráter, y en una menor proporción en las fuentes sismogénicas localizadas al Occidente-Suroccidente y Noroccidente y Oriente de éste (Figura 22). Las profundidades oscilaron entre 0.1 (en proximidades del cráter) y 10 km (en sectores distales del cráter) con un predominio de eventos tipo VT con profundidades menores a 6 km. Las magnitudes locales (M_L) estimadas oscilaron entre -0.6 y 4.4 M_L , registrándose 64 eventos con magnitud local mayor o igual $\geq 2.0 M_L$, siendo algunos de éstos reportados como sentidos por los habitantes en el área de influencia del volcán.

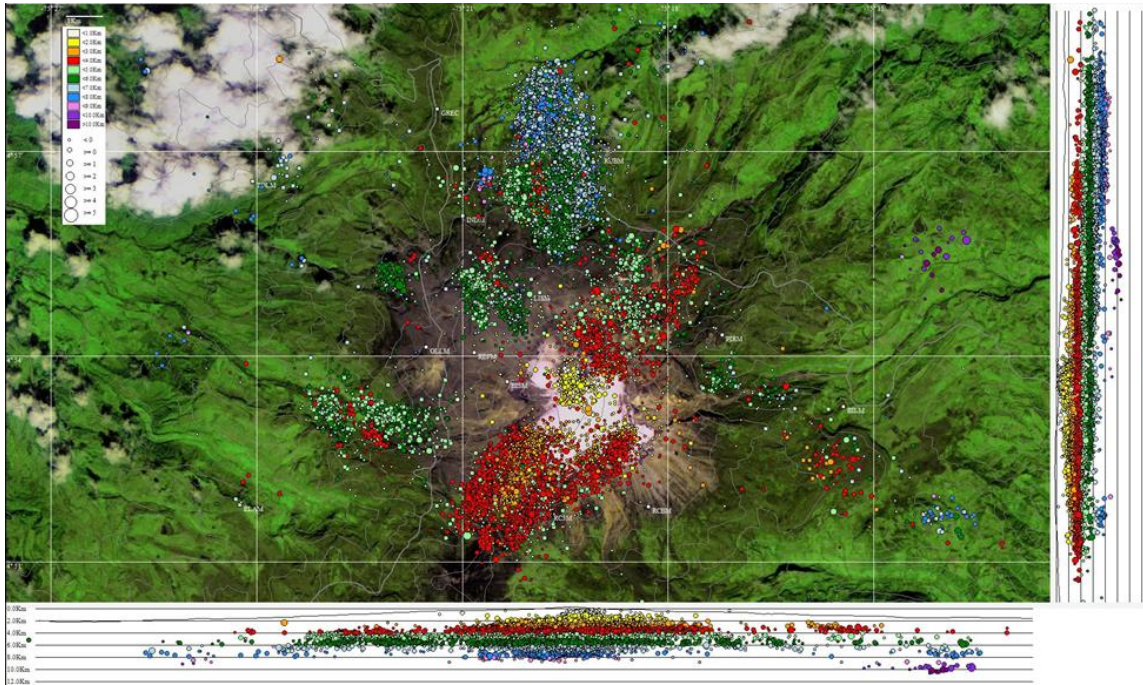


Figura 22. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo VT (círculos de colores) registrados en el área del VNR durante año 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.

En la Tabla 1 se enumeran los eventos tipo VT de mayor relevancia para cada uno de los meses del año 2016 de acuerdo con la magnitud estimada, indicando la relación del evento con incrementos en la actividad sísmica del volcán y si dicho evento fue reportado como sentido.

Tabla 1. Listado de los eventos de mayor magnitud registrados mensualmente durante el 2016.

Mes	Fecha y Hora Local	Magnitud (ML)	Profundidad (km)	Fuente sismogénica*	Sismo Sentido	Observaciones**
Enero	18/01/2016 03:05	3.2 ML	3.26	Suroccidente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
Febrero	06/02/2016 20:39	3.6 ML	5.0	Norte	NO	Asociado a un incremento menor al Norte del Cráter.
Marzo	12/03/2016 02:32	3.0 ML	5.5	Noroccidente	SI	Asociado a un incremento mayor al Noroccidente del Cráter.
	29/03/2016 20:02	3.4 ML	3.0	Norte	SI	Evento aislado, no asociado a un incremento.
Abril	04/04/2016 13:15	2.4 ML	3.7	Suroccidente	NO	Asociado a un incremento mayor al Suroccidente del Cráter.
	28/04/2016 20:26	3.4 ML	3.7	Noroccidente	SI	Asociado a un incremento mayor al Noroccidente del Cráter el 28 y 29 de

						abril.
	28/04/2016 20:45	3.4 ML	3.7	Noroccidente	SI	Asociado a un incremento mayor al Noroccidente del Cráter el 28 y 29 de abril.
Mayo	01/05/2016 21:06	2.1 ML	3.8	Suroccidente	NO	Asociado a un incremento menor al Suroccidente del Cráter.
	23/05/2016 18:57	2.6 ML	3.5	Nororiente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
Junio	22/06/2016 12:13	3.0 ML	3.1	Suroccidente	NO	Asociado a un incremento mayor al Suroccidente del Cráter.
	26/06/2014 06:15	1.8 ML	3.6	Suroccidente	NO	Asociado a un incremento mayor al Suroccidente del Cráter.
Julio	21/07/2016 01:07	1.8 ML	2.5	Suroccidente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
	22/07/2016 18:13	0.5 ML	4.9	Noroccidente	NO	Asociado a un incremento menor en el sector Noroccidente del Cráter.
Agosto	22/08/2016 05:09	2.1 ML	4.9	Noroccidente	NO	Asociado a un incremento menor en el sector Noroccidente del Cráter.
Septiembre	08/09/2016 02:40	2.9 ML	4.5	Norte	NO	Asociado a un incremento menor en el sector Norte.
	08/09/2016 03:08	2.9 ML	4.3	Norte	NO	
Octubre	07/10/2016 15:34	4.4 ML	5.4	Norte	SI	Asociado a un incremento mayor en el sector Norte distal.
Noviembre	14/11/2016 15:44	1.7 ML	3.2	Sur-Suroccidente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
	14/11/2016 08:49	1.7 ML	1.3	Cráter	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
	18/11/2016 09:14	1.1 ML	5.5	Norte	NO	Asociado a un incremento mayor en el sector Norte.
	28/11/2016 09:12	1.2 ML	3.0	Sur-Suroriente	NO	Asociado a un incremento menor en el sector Sur-suroriente.
	28/11/2016 12:43	1.2 ML	3.0	Sur-Suroriente	NO	Asociado a un incremento menor en el sector Sur-suroriente.
Diciembre	26/12/2016 10:32	1.6 ML	4.9	Norte distal	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
*Las fuentes sismogénicas son mencionadas con referencia al Cráter Arenas.						
**Incremento menor: Hace referencia a la actividad volcano-tectónica registrada en el área con un número menor o igual a ≤500 VTs y, Incremento Mayor: a la actividad volcano-tectónica registrada en el área con un número mayor a >500 VTs.						

El incremento de sismicidad VT más importante durante el año fue el que ocurrió entre el 07 al 11 de Octubre (Figura 23), localizado en el sector Norte distal respecto al cráter Arenas a profundidades entre 4.6 y 7.3 km. Dentro de este incremento se registró, a las 15:34 del 07 de Octubre, un sismo de magnitud 4.4 M_L (Magnitud Local) a 5.4 km de profundidad, el cual fue reportado como sentido y contribuyó significativamente a la energía liberada durante todo el incremento, similar al registrado el 06/10/2013 a las 12:14 también en el mismo sector (Figura 24).

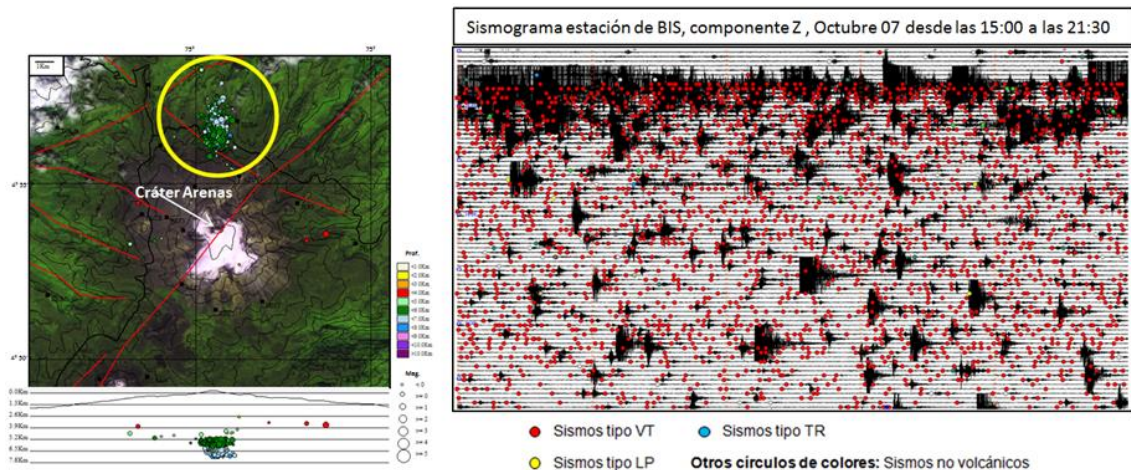


Figura 23. Incremento en la actividad sísmica tipo VT en el VNR durante el mes de Octubre, ocurrido los días 07 y 11 de Octubre. Al lado izquierdo el mapa de localización de sismos entre el 7 y 11 de Octubre. Al lado derecho sismograma representativo del 07 de Octubre desde las 15:00 a las 21:30 (Hora Local).

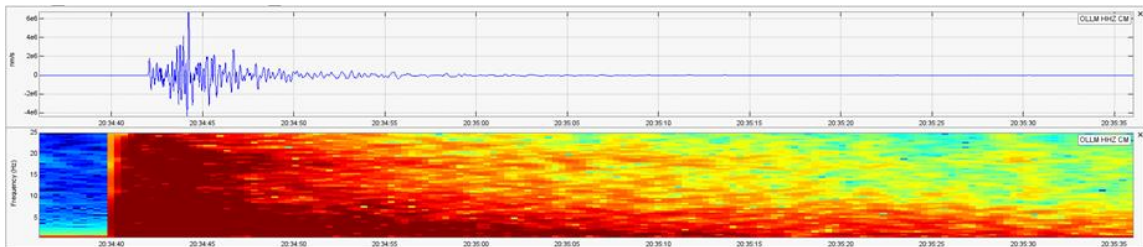


Figura 24. Registro sísmico y espectrograma asociado al evento sísmico tipo VT de mayor energía registrado durante Octubre de 2016 en el VNR. Evento ocurrido el día 07 de Octubre a las 15:34, con una magnitud de 4.4 M_L (Magnitud Local), a una profundidad de 5.4 km. El registro sísmico y el espectrograma son de la estación OLLETA, componente vertical.

1.2.2 Sismos de tipo drumbeat (DB)

Durante los meses de Marzo a Diciembre de 2016, se registraron diversos episodios de sismicidad tipo drumbeat (Moran et al. 2008) o “golpes de tambor”. Estos episodios fueron de corta duración (Tabla 2) y estuvieron caracterizados por el registro de una serie de sismos de fractura de muy baja energía y en la mayoría de los casos no localizable, que ocurrieron en intervalos de tiempo relativamente regulares y presentaron formas de onda y energía similares. El episodio de sismicidad tipo drumbeat destacado en el año 2016, ocurrió el día 16 de Julio (Tabla 2 y Figura 25). Este episodio presentó un nivel energético mayor que los demás y algunos de los sismos fueron localizados indicando como fuente principal el Cráter Arenas.

Tabla 2. Episodios sísmicos tipo “drumbeats” registrados en el VNR durante 2016.

Fecha episodio	Hora local	Duración episodio (min)	Tipo señales sísmicas	Periodicidad señales (s)	Localización sismos	Magnitud máxima (ML)
Marzo 04/2016	05:52 – 05:53	Episodio 1: 1 min	Sismos volcano-tectónicos	12 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	07:25 – 07:31	Episodio 2: 6 min	Sismos volcano-tectónicos	9 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Marzo 08/2016	11:00 – 11:28	Episodio 1: 28 min	Sismos volcano-tectónicos	80 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Marzo 12/2016	00:55 – 01:14	Episodio 1: 9 min	Sismos volcano-tectónicos	16 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Marzo 15/2016	20:06 – 20:30	Episodio 1: 24 min	Sismos volcano-tectónicos	23 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	21:35 – 21:46	Episodio 2: 11 min	Sismos volcano-tectónicos	13 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	22:26 – 22:54	Episodio 3: 11 min	Sismos volcano-tectónicos	22 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
abril 10/2016	04:00-04:39	Episodio 1: 39 min	Sismos volcano-tectónicos	35 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Mayo 06/2016	05:29-05:33 05:55-05:58 06:06-06:11	Episodio 1: 4 min Episodio 2: 3 min Episodio 3: 5 min	Sismos volcano-tectónicos	Episodio 1: 26 s Episodio 2: 30 s Episodio 3: 34 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Mayo 07/2016	00:09 – 00:14 00:25 – 00:28 00:32 – 00:34 01:33 – 01:38 01:42 – 01:57	Episodio 1: 3 min Episodio 2: 4 min Episodio 3: 5 min Episodio 4: 5 min Episodio 5: 15 min	Sismos volcano-tectónicos	Episodio 1: 26 s Episodio 2: 23 s Episodio 3: 13 s Episodio 4: 15 s Episodio 5: 30 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Mayo 09/2016	22:20 – 22:33	Episodio 1: 13 min	Sismos volcano-tectónicos	11 – 12 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Mayo 13/2016	11:47 – 11:54	Episodio 1: 7 min	Sismos volcano-tectónicos	12 – 13 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Mayo 27/2016	11:14 – 12:55	Episodio 1: 115 min	Sismos volcano-tectónicos	27 – 33 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Mayo 30/2016	20:32 -20:43	Episodio 1: 10 min	Sismos	40 s	No localizables	Nivel energético muy bajo

			volcano- tectónicos			bajo
Junio 11/2016	9:20 – 9:37	Episodio 1: 17 min	Sismos volcano- tectónicos	17 – 20 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	9:47 – 9:54	Episodio 2: 8 min	Sismos volcano- tectónicos	8 – 9 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Junio 13/2016	03:46 – 04:06 04:13 – 04:24	Episodio 1 20 min Episodio 2 11 min	Sismos volcano- tectónicos	18 - 20 s 24 - 26 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Junio 14/2016	10:41 – 10:42 11:23 – 11:26 11:45 – 11:47 12:18 – 12:21	Episodio 1: 1 min Episodio 2: 3 min Episodio 3: 2 min Episodio 4: 3 min	Sismos volcano- tectónicos	13 s 8 -10 s 9 -10 s 20 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Julio 01/2016	18:07 – 18:32	Episodio 1: 25 min	Sismos volcano- tectónicos	15 – 40 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Julio 13/07/2016	15: 01 – 15:05 15:06 – 15: 09 15:12 – 15: 17 15:19 – 15: 22 15:26 – 15: 29 15:33 – 15: 36	Episodio 1: 4 min Episodio 2: 3 min Episodio 3: 5 min Episodio 4: 3 min Episodio 5: 3 min Episodio 6: 3 min	Sismos volcano- tectónicos	51 – 53 s 33 s 40 s 28 – 30 s 29 – 32 s 33 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Julio 15/07/2016	14:01 – 14:03 14:15 – 14:20 14:31 – 14:42 14:45 – 14:46	Episodio 1: 2 min Episodio 2: 5 min Episodio 3: 11 min Episodio 4: 1 min	Sismos volcano- tectónicos	30 s 30 s 24 s 24 s	Se Localizaron algunos de los del Episodio 3 en el cráter	14:39 -0.3 ML, 1.32 Km Localizado en el cráter
Julio 16/07/2016	05:55 – 07:52 07:56 – 08:09	Episodio 1 : 117 min Episodio 2 : 13 min	Sismos volcano- tectónicos	27 – 34 s 42 – 52 s	Algunos localizables	-0.3 ML 1.18 Km Localizado cerca al cráter
Julio 17/07/2016	02:33 – 02:40 03:09 – 03:19 06:28 – 07:01 07:01 – 07:10 07:10 – 07:21 07:21 – 07:50	Episodio 1 Episodio 2 Episodio 3 Episodio 4	Sismos volcano- tectónicos	35 – 36 s 61 - 63 s 16 – 24 s 26 – 33 s	No localizables	
Agosto 29/08/2016	18:25 – 18:26	Episodio 1	Sismos volcano- tectónicos	9 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
17/09/2016	8:40 – 8:45 9:31 – 9:38 9:50 – 9:53 10:02 – 10:10 10:16 – 10:24 10:31 – 10:39	Episodio 1 Episodio 2 Episodio 3 Episodio 4 Episodio 5 Episodio 6	Sismos volcano- tectónicos	10-14 s 9-11 s 9-12 s 8 – 10 s 7-11 s 13 – 16 s	No localizables	

	10:51 – 10:55	Episodio 7		6-17 s		
28/10/2016	10:06 – 10:35	Episodio 1	Sismos volcano-tectónicos	25 - 40	No localizables	
Diciembre 08/12/2016	11:13 – 11:15 11:18 – 11:20 11:21 – 11:25 11:27 – 11:27 12:42 – 12:46 12:50 – 12:57	Episodio 1: 2 min Episodio 2: 2 min Episodio 3: 4 min Episodio 4: 1 min Episodio 5: 4 min Episodio 6: 7 min	Sismos volcano-tectónicos	12 – 15 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
09/12/2016	17:15-17:25:25	Episodio 1: 10 min	Sismos volcano-tectónicos	47 - 52 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
17/12/2016	01:12:52 - 01:14:00 01:19:30 – 01:22:46	Episodio 1: 1 min Episodio 2: 3 min	Sismos volcano-tectónicos	13 - 17 s 21 – 22 s	No localizables	Nivel energético muy bajo Nivel energético muy bajo
20/12/2016	17:09 – 17:14	Episodio 1: 5 min	Sismos volcano-tectónicos	27 – 40 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
22/12/2016	1:57 – 2:31 2:37-2:40	Episodio 1: 34 min Episodio 2: 2 min	Sismos volcano-tectónicos	12 – 29 s 12 s	No localizables	Nivel energético muy bajo

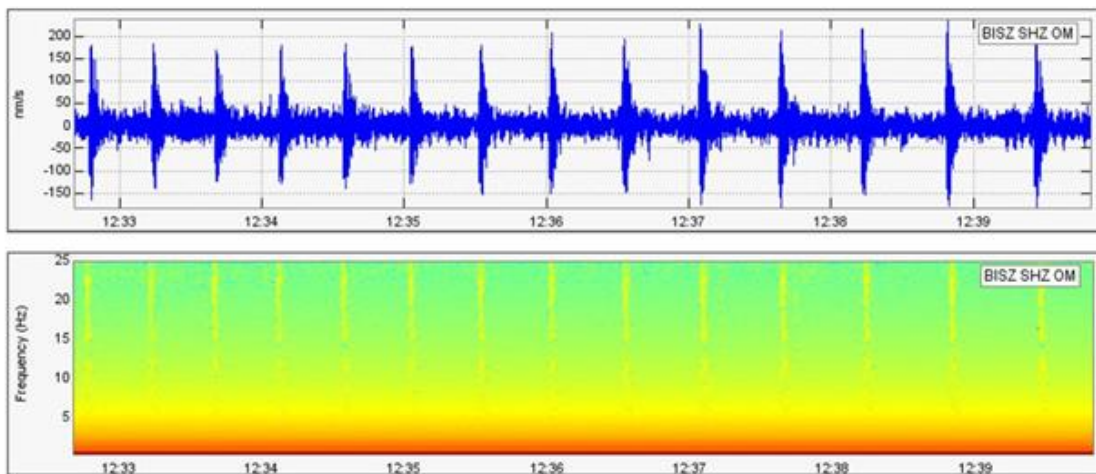


Figura 25. Registro sísmico del episodio tipo drumbeat del 16 de Julio de 2016, entre las 07:32 y 07:40 (Hora Local) en el VNR. Sismograma (arriba) y espectrograma (abajo) de la estación BIS, componente vertical. Periodicidad entre eventos 26 s.

Los episodios sísmicos tipo “drumbeat” pueden estar constituidos de una serie de sismos tipo VT así como también de sismos tipo LP o HB. Este tipo de episodios están relacionados con fenómenos generalmente asociados a la salida de domos de lava¹ a la superficie de la tierra a partir de magmas viscosos (Figura 26), siendo éstos una manifestación del mecanismo de ascenso del magma de alta viscosidad a través de un conducto volcánico cerca de la superficie de extrusión. Por tal razón, la sismicidad tipo “drumbeat” es considerada como un fuerte indicador de movimiento del magma a poca profundidad dentro del edificio volcánico y de la probable formación de un domo sobre el conducto de emisión (Power & Lalla, 2007).

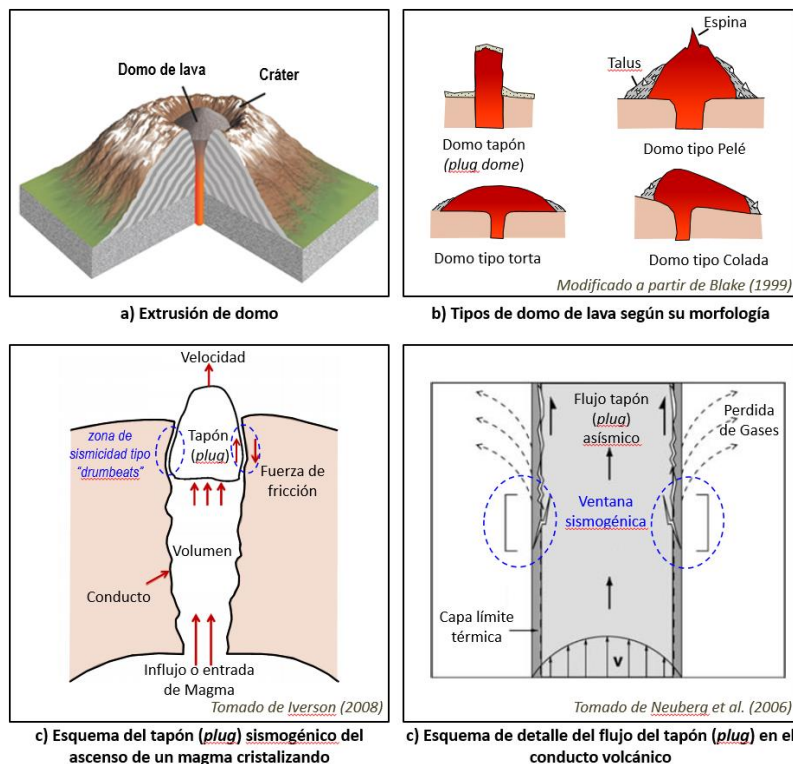


Figura 26. Domo de lava, características y proceso de formación. a) Esquema de la extrusión domo sobre el conducto de emisión de un volcán. b) Formas típicas de los domos de lava. c) y d) Esquema de la dinámica de flujo del magma-tapón (plug) y el conducto volcánico y sismicidad asociada.

En la mayoría de los casos documentados, la salida de domos de lava ha estado acompañada de episodios de sismicidad tipo drumbeat de niveles energéticos

¹ **Domo de lava:** es un montículo de lava (Roca Fundida) viscosa que se emplaza sobre el conducto de emisión de un volcán. La tasa de crecimiento de los domos puede variar de horas a días, años o cientos de años, y estos pueden alcanzar volúmenes de decenas de metros hasta varios kilómetros cúbicos.

importantes que ocurren en periodos de horas o días durante varias semanas, como por ejemplo en los volcanes colombianos Nevado del Huila (Ingeominas, Hoy Servicio Geológico Colombiano-Informe Interno 2008 y 2010, Cardona et al 2009) y Galeras (Ingeominas, Hoy Servicio Geológico Colombiano-Informe Interno 2006), en el Mount Saint Helens en Washington (Pierson et al 2007, Moran et al 2008, Waite et al 2008), Soufrière Hills en la Isla de Monserrat (Lockett et al 2007), Augustine en Alaska (Power & Lalla 2007, Syracuse et al 2011), entre otros. En el caso del volcán Nevado del Ruiz, aunque estos episodios fueron de muy corta duración y de niveles energéticos muy bajos (Tabla 2), continúan acompañando la salida de un domo de lava en la superficie del cráter Arenas, que ha podido ser confirmado a través de las imágenes de radar COSMO-SkyMed de la Agencia Italiana Espacial (ASI) mostradas en el trabajo de Lundgren et al, 2015 en coautoría con personal del Servicio Geológico Colombiano. A pesar de los esfuerzos realizados por el Servicio Geológico Colombiano para tener una observación directa del domo a través de varios sobrevuelos, las condiciones atmosféricas y la dinámica de columna de gases (densa) no ha permitido hasta el momento de elaboración de este informe la observación directa de dicho fenómeno. Es de anotar, que los eventos sísmicos de este tipo registrados en el Volcán Nevado del Ruiz son considerados de nivel energético muy bajo, lo cual hace suponer que estén asociados con ascenso de volúmenes muy pequeños de material magmático a la superficie.

1.2.3 Sismos híbridos (HB)

La actividad de tipo HB en el VNR durante el 2016 mostró un aumento significativo con respecto al año anterior en cuanto al número de eventos registrados y valores ligeramente mayores, en cuanto a la energía sísmica liberada (Figura 20 y Figura 21). Un total de 153 sismos tipo HB fueron registrados durante el 2016. Estos eventos sísmicos estuvieron localizados principalmente en el Cráter y en el sector Suroriente del edificio volcánico y en una menor proporción en los sectores Norte distal y Noroccidente de la estructura volcánica (Figura 27). Las profundidades oscilaron entre 0.2 y 6.4 km y las magnitudes locales (M_L) entre -0.2 y 1.7 M_L .

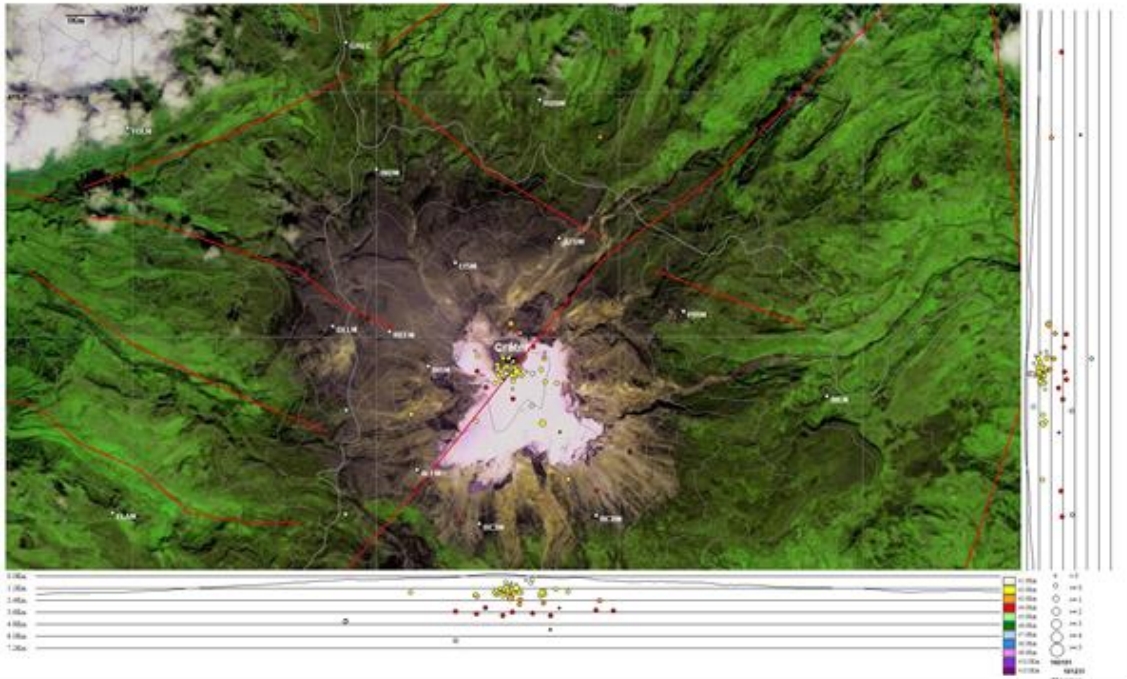


Figura 27. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo HB (círculos de colores) registrados en el área del VNR durante año 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas instaladas en el área.

El sismo tipo híbrido de mayor magnitud registrado durante el 2016, corresponde con el sismo registrado el día 07 de Noviembre de 2016 a las 05:03 (Hora Local) con una magnitud local de 1.7 M_L , localizado en el sector Suroriente con respecto al cráter Arenas a una profundidad de 1.3 km.

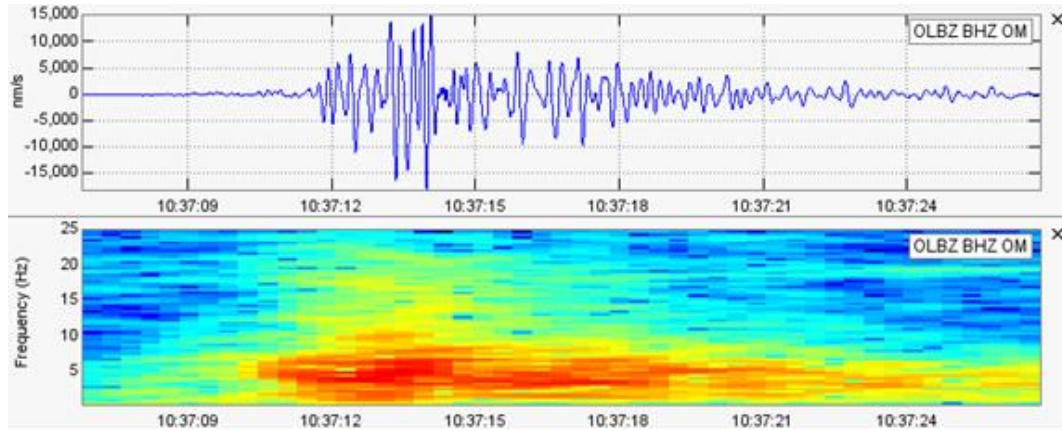
1.2.4 Sismos de largo periodo (LP y VLP)

Durante todo el año 2016 se registró sismicidad relacionada con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos, tipo LP y VLP, estos últimos caracterizados por tener una frecuencia dominante ≤ 0.7 Hz. Mostrando variaciones con relación a la tasa diaria de ocurrencia y a la forma de registro, ya que muchos de estos sismos se registraron de manera aislada, la mayoría de ellos hicieron parte de eventos múltiples de fluidos y/o fueron precursores de pulsos de tremor. Las tasas diarias de sismicidad para este tipo de sismos fueron en promedio de 26 eventos por día, se destaca la ocurrencia de un leve incremento en la actividad sísmica relacionada con la dinámica de fluidos entre las 18:00 (Hora Local) y las 20:00 (Hora Local) del 17 de

Octubre; si bien esta proporción se mantuvo muy estable a lo largo del año, los meses de Julio, Octubre y Diciembre muestran las mayores tasas diarias de sismicidad (Figura 20) mientras el mes de Enero las menores. En total se clasificaron dentro de esta categoría de sismos volcánicos 9521 eventos.

En cuanto a la energía sísmica liberada por los sismos tipo LP y VLP, medida a partir del desplazamiento reducido (D_r), mostró valores variables. Los D_r promedio de mayor energía sísmica liberados durante el año fueron de 26.7 cm^2 y 26.9 cm^2 correspondiente a los eventos registrados los días 28 de Julio y 03 de Octubre de 2016 a las 05:37 y 06:29 (Hora Local), respectivamente. Localizados por el método de atenuación de amplitudes, en el cráter Arenas y en el flanco Oriental del mismo, (Figura 28 a) y Figura 28 b). En la Tabla 3 se presenta un resumen de los sismos con mayor D_r promedio de cada mes del año 2016.

a)



b)

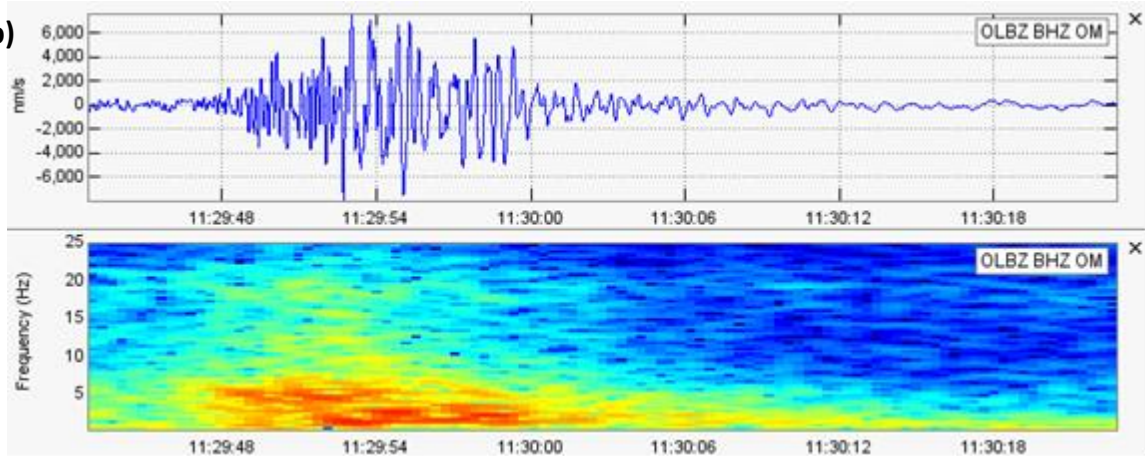


Figura 28. a) Registro sísmico y espectrograma de uno de los sismos tipo LP de mayor desplazamiento reducido registrado durante el año 2016 en el VNR, ocurrido el 28 de Julio a las 05:37 (Hora Local), con un D_r promedio de 26.7 cm^2 y una duración 34 s. Componente vertical, estación OLLETA. b) Registro sísmico y espectrograma de uno de los sismos tipo LP de mayor desplazamiento reducido registrado durante el año 2016 en el VNR, ocurrido el 03 de Octubre a las 06:29 (Hora Local), con un D_r promedio de 26.9 cm^2 y una duración 43 s. Componente vertical, estación OLLETA.

Tabla 3. Principales eventos tipo LP de cada mes del año 2016, registrados en el VNR.

Mes	Número total de eventos por mes	Fecha y hora	Desplazamiento Reducido (cm^2)	Frecuencia(s) dominante (Hz)
Enero	237	17/01/2016 21:43	6.7	0.6

Febrero	442	19/02/2016 16:37	22.3	0.5
Marzo	810	06/03/2016 22:18	15.6	0.7
Abril	681	01/04/2016 00:41	16.2	0.6
Mayo	589	04/05/2016 05:54	12.5	0.5
Junio	494	22/06/2016 06:15	15.4	0.5
Julio	1186	28/07/2016 05:37	26.7	4.1
Agosto	529	09/08/2016 11:04	14.5	1.3
Septiembre	577	18/09/2016 12:46	12.3	1.4
Octubre	1154	03/10/2016 06:29	26.9	1.7
Noviembre	852	11/11/2016 04:03	9.3	0.7
Diciembre	1687	17/12/2016 21:38	12.9	0.5

Mediante la aplicación del método de atenuación de las máximas amplitudes de onda con la distancia, fue posible realizar la localización de los eventos tipo LP y VLP. Estos se concentraron principalmente en el cráter Arenas y en sus alrededores, así como en los sectores Suroriente, Suroccidente y Noroccidente (Figura 29). De acuerdo a las curvas de atenuación la mayoría de eventos mostraron un carácter superficial.

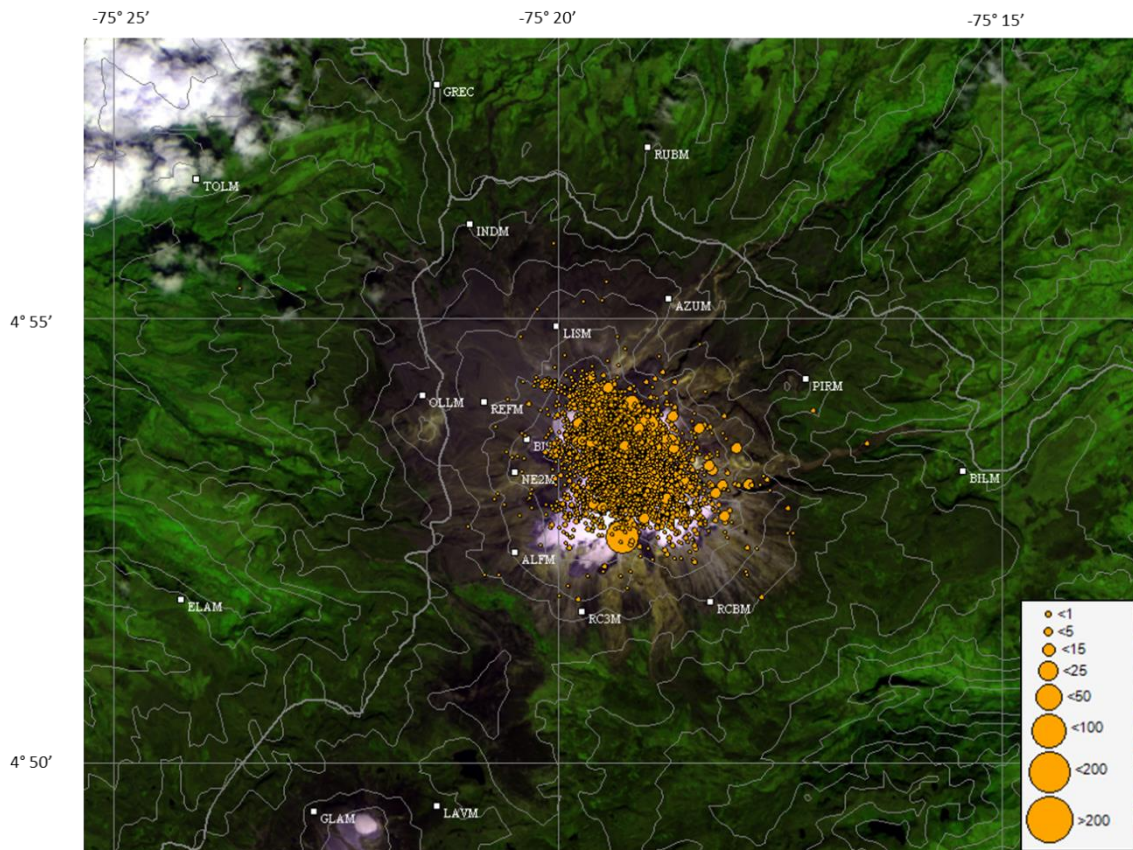
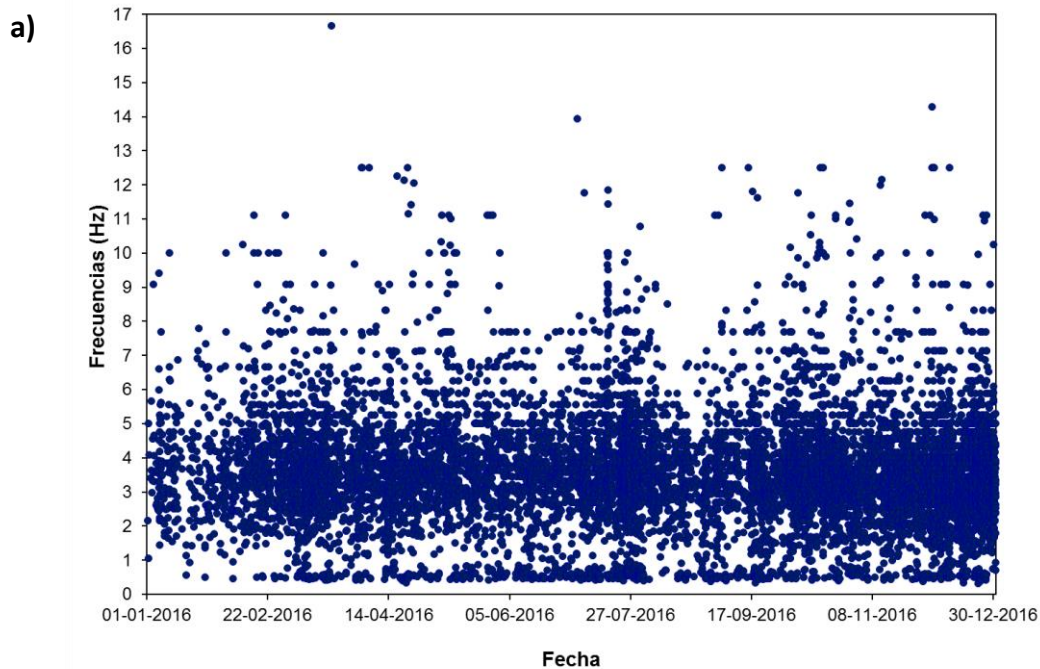


Figura 29. Mapa de localización epicentral de sismos tipo LP (Círculos naranja) registrados durante el año 2016 en el VNR. Los cuadros blancos representan las estaciones sismológicas.

Con relación a la duración de los eventos, éstas variaron entre 3 y 88 s, este último valor fue registrado el día 20 de Octubre de 2016 a las 18:40. A lo largo del año se notó que entre Abril y Octubre y también en Diciembre los eventos mostraron, en general, mayor duración y amplitud, la relación entre estos dos parámetros evidencia una correspondencia proporcional entre ellos, sin embargo durante el mes de Agosto es notorio que los sismos se atenúan rápidamente, presentando amplitudes considerables y codas (duración) cortas.

Las frecuencias asociadas a la máxima amplitud de los sismos tipo LP y VLP; oscilaron entre 0.3 y 0.7 Hz, con una frecuencia promedio 0.5 Hz, para los sismos VLP y, entre 0.8 y 16.6 Hz, con una frecuencia dominante promedio de 3.7 Hz, para los sismos LP. En la Figura 30a se puede observar que las frecuencias menores a 6.0 Hz y mayores a 1.0 Hz predominaron la mayor parte del año. Se destaca el registro de señales tipo LP y VLP con duraciones promedio hasta 20 segundos Figura 30b.

Algunos de estos eventos sísmicos relacionados con el movimiento de fluidos al interior de los conductos volcánicos, estuvieron asociados a emisiones menores de ceniza a la atmósfera, las cuales fueron confirmadas a través de las cámaras Web instaladas en el área del volcán y, por reportes tanto del personal técnico del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en campo como por información de los funcionarios del Parque Nacional Natural de los Nevados (PNNN) en el área de influencia del volcán.



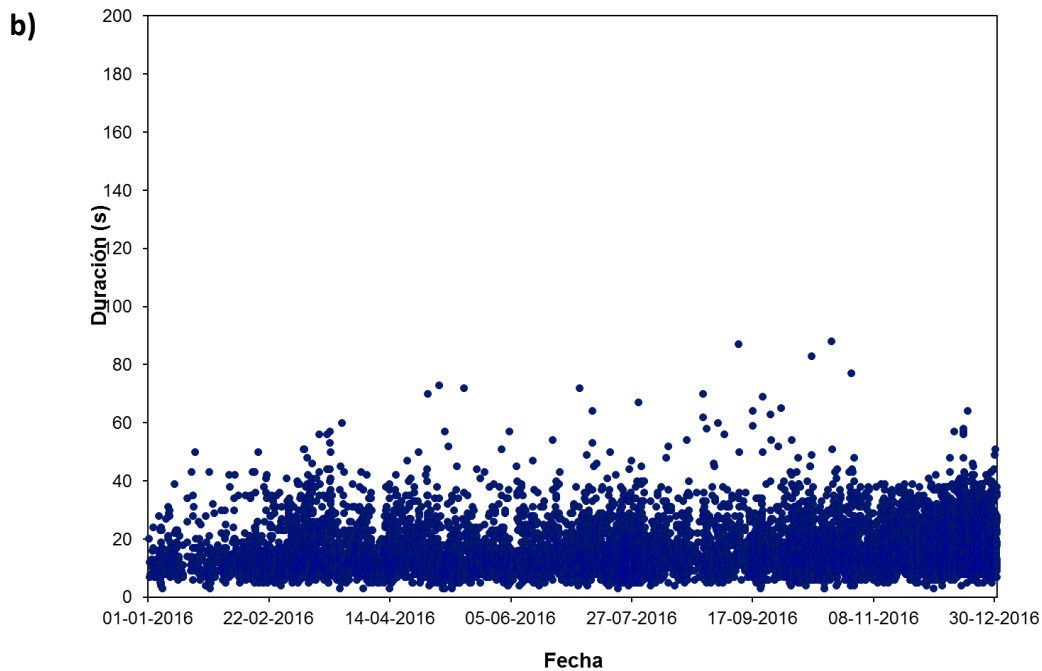


Figura 30. a) Gráfica de frecuencias asociadas a la máxima amplitud de los eventos sísmicos tipo LP y VLP registradas durante el año 2016 en el VNR. b) Gráfica de duración de los eventos tipo LP y VLP registradas durante el año 2016 en el VNR.

Las frecuencias complejas y el factor Q_r (factor de calidad debido a pérdidas por radiación de la energía) obtenidos a partir de la aplicación del método Sompi, muestran que los sismos LP analizados están en su mayoría en las zonas de líquido+burbuja y en menor proporción líquido+burbuja+gas y gas-gas (Figura 31), sin embargo para mediados de Febrero, Abril y en el mes de Diciembre se observa que varios sismos alcanzaron valores de Q_r dentro de la zona ceniza+gas. Este cambio en la gráfica es simultáneo con el cambio en la actividad del volcán, que presentó variaciones con relación a la forma de ocurrencia de las señales asociadas a movimiento de fluidos, y es coherente con las tasas de desgasificación del volcán y con las emisiones de ceniza, registradas durante 2016.

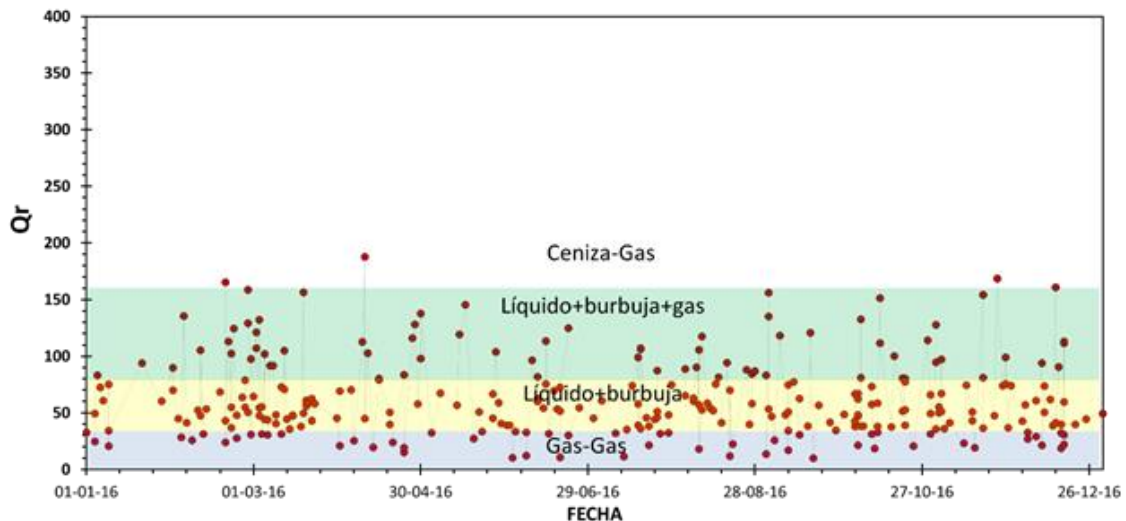


Figura 31. Qr del volcán Nevado del Ruiz obtenido mediante el método Sompi, Enero-Diciembre de 2016.

Durante 2016, continuaron presentándose de manera agrupada las señales sísmicas LP, VLP y pulsos de tremor (TR, sección 1.2.5). Este tipo de agrupación denominada eventos múltiples de fluidos (LP+TR, VLP+TR, LP+TR+TR, etc.), presentaron niveles energéticos variables, para el mes de Enero y Febrero, el tipo de evento múltiple de fluido que predominó fue el grupo cuyo evento principal o de mayor energía estuvo precedido por un evento. Seguido de este tipo, estuvieron los eventos múltiples precedidos por dos eventos, es decir cuyo evento principal se registra al inicio del grupo de señales (Figura 32). Para los eventos múltiples con un evento predecesor en Enero, la duración entre el evento predecesor y el evento principal osciló entre 5.5 y 85.2 s, con un promedio de 23.6 s. En cuanto a la energía sísmica liberada por este tipo de eventos múltiples, medida como desplazamiento reducido (Dr), el evento principal varió entre 0.12 y 10.9 cm^2 , con un promedio de 1.9 cm^2 (Figura 32).

Mientras que para el mes de Febrero los eventos múltiples con un evento predecesor, la duración entre el evento predecesor y el evento principal osciló entre 4.7 y 51.4 s, con un promedio de 25.6 s. En cuanto a la energía sísmica liberada por este tipo de eventos múltiples, medida como desplazamiento reducido (Dr), el evento principal varió entre 0.2 y 8.8 cm^2 , con un promedio de 1.3 cm^2 . (Figura 32).

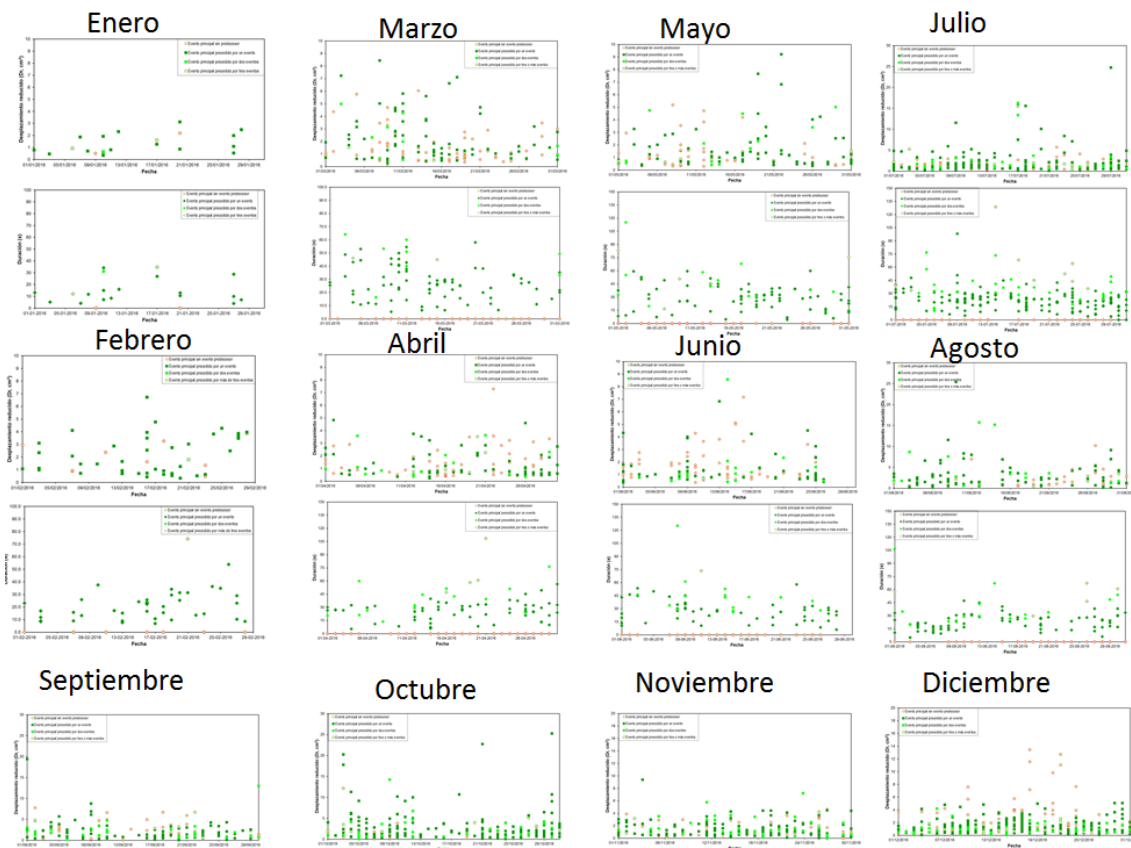


Figura 32. Gráficas de desplazamiento reducido y duración entre las señales sísmicas (LP + TR) de los sismos múltiples registrados durante el periodo Enero-Diciembre de 2016 en el VNR.

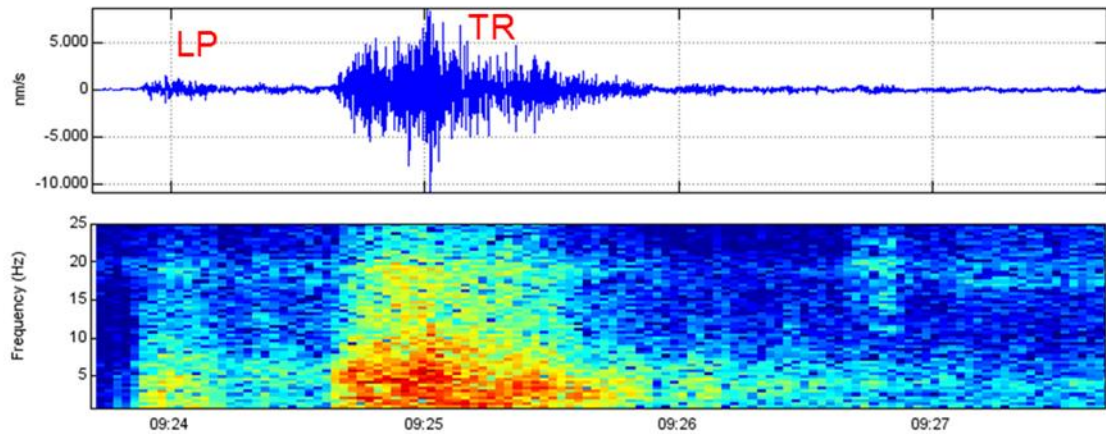
1.2.5 Pulsos de tremor y tremor volcánico continuo (TR y TC)

El tremor volcánico es otro tipo de señal sísmica volcánica asociada a dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos. Puede presentarse en forma de pulsos (TR) o de manera continua (TC). Durante el año 2016, en el VNR, continuó el registro de tremor tanto en pulsos como en registro continuo. El número de pulsos de tremor mostró un leve aumento con relación a la cifra alcanzada el año inmediatamente anterior, sin embargo es notoria una disminución en cuanto a sus niveles energéticos y en el número y duración de los episodios de tremor continuo. Algunas de estas señales estuvieron asociadas a emisiones de ceniza a la atmósfera, en ocasiones confirmadas a través de las cámaras web instaladas en el área y/o gracias a reportes del personal

técnico del Servicio Geológico Colombiano en campo y a funcionarios del Parque Nacional Natural de los Nevados (PNNN) en el área de influencia del volcán.

En el VNR se registraron 4277 pulsos de tremor volcánico, con desplazamientos reducidos promedio entre 0.03 y 18.79 cm^2 . El máximo desplazamiento reducido corresponde al pulso registrado el 03 de Marzo a las 09:24 (Hora Local), asociado con una emisión de ceniza confirmada a través de las cámaras web instaladas en el volcán (Figura 33), y la cual fue antecedida por un LP con un desplazamiento reducido promedio de 2.11 cm^2 . Las frecuencias de estos eventos fueron muy variables, oscilaron entre 0.4 y 14 Hz, sin embargo la mayoría de los pulsos presentaron frecuencias entre 2 y 5 Hz (Figura 34). Las duraciones de los pulsos de tremor fueron muy variables desde unos cuantos segundos hasta varios minutos. El pulso de mayor duración se registró el 10 de Marzo a las 14:50 (Hora Local) tuvo una duración de 1386 s y un desplazamiento reducido promedio de 4.7 cm^2 (Figura 35 y Figura 36). Se observa que en el primer semestre los eventos tuvieron mayores duraciones que en el segundo. Con relación a la localización de este tipo de tremor, mediante la atenuación de la amplitud con la distancia, se muestra que la mayoría de eventos se localizaron en el cráter Arenas y en los alrededores del cráter (Figura 37).

De Enero a Julio de 2016 fue característico el tremor continuo (TC), mostrando aumentos y disminuciones en la amplitud, y leves variaciones en las frecuencias dominantes dando lugar a una especie de bandas (Figura 38). Sin embargo no es aplicable el término “tremor bandeado”, ya que su distribución es irregular y no corresponde a cambios cíclicos del sistema como normalmente este término hace referencia. Las bandas observadas pueden reflejar la interacción entre el sistema magmático y el hidrotermal. Entre finales de Agosto y Septiembre se registró de nuevo tremor continuo y en Noviembre se presentaron los últimos episodios. A diferencia del año 2015 los episodios de tremor continuo espasmódico disminuyeron significativamente.



★ Localización epicentral

Figura 33. Sismograma y espectrograma del pulso de tremor (TR) de mayor nivel energético en el año 2016 en el VNR. La señal tuvo un D_r promedio de 18.79 cm^2 , con duración de 68 s, fue registrada el 03 de Marzo a las 09:24 (Hora Local) y fue antecedida por un LP de 2.11 cm^2 de D_r promedio. Estación Olleta banda ancha. La fotografía muestra la emisión de ceniza asociada a la señal y el mapa muestra la localización epicentral obtenida por atenuación de la amplitud con la distancia.

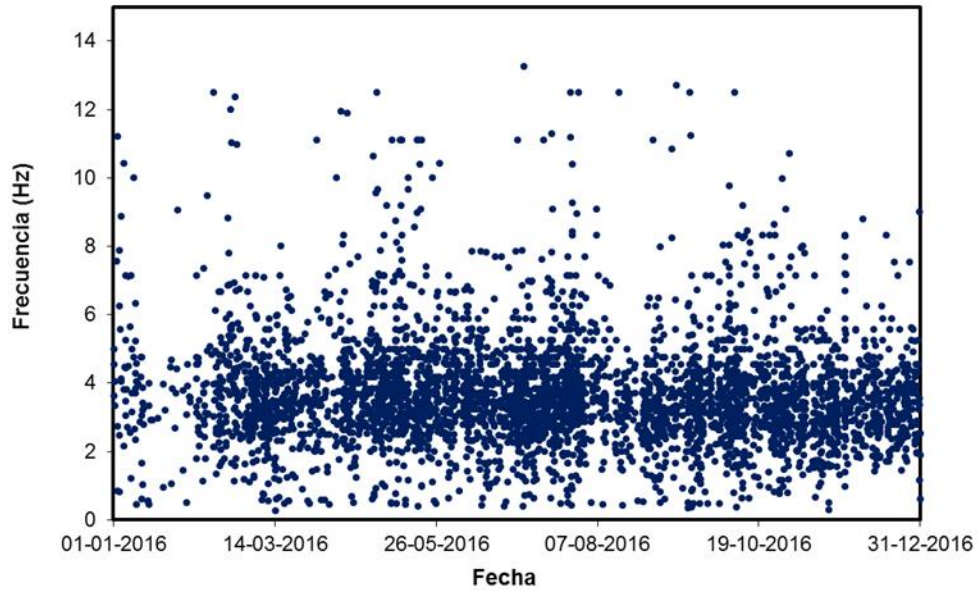


Figura 34. Gráfica de las frecuencias asociadas a la mayor amplitud registrada en cada pulso de tremor volcánico registrado en el VNR durante el año 2016.

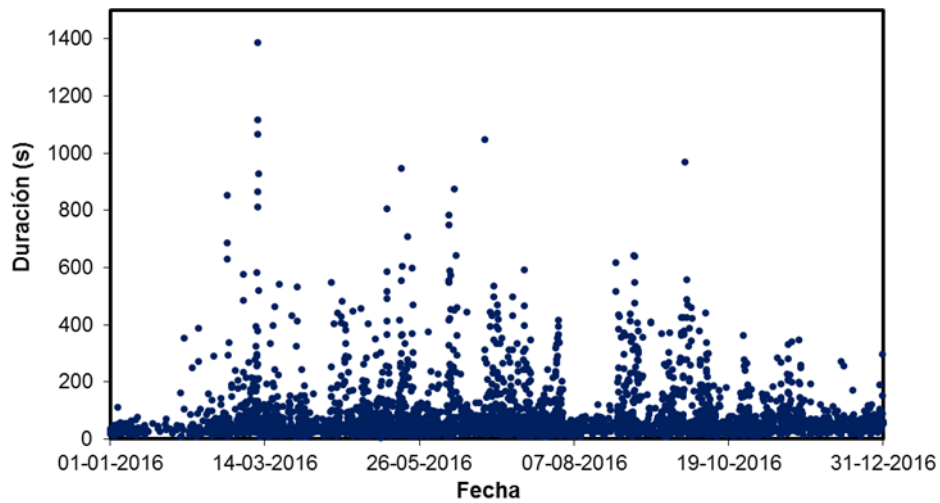


Figura 35. Gráfica de la duración de los pulsos de tremor volcánico (TR) registrados en el VNR durante el año 2016.

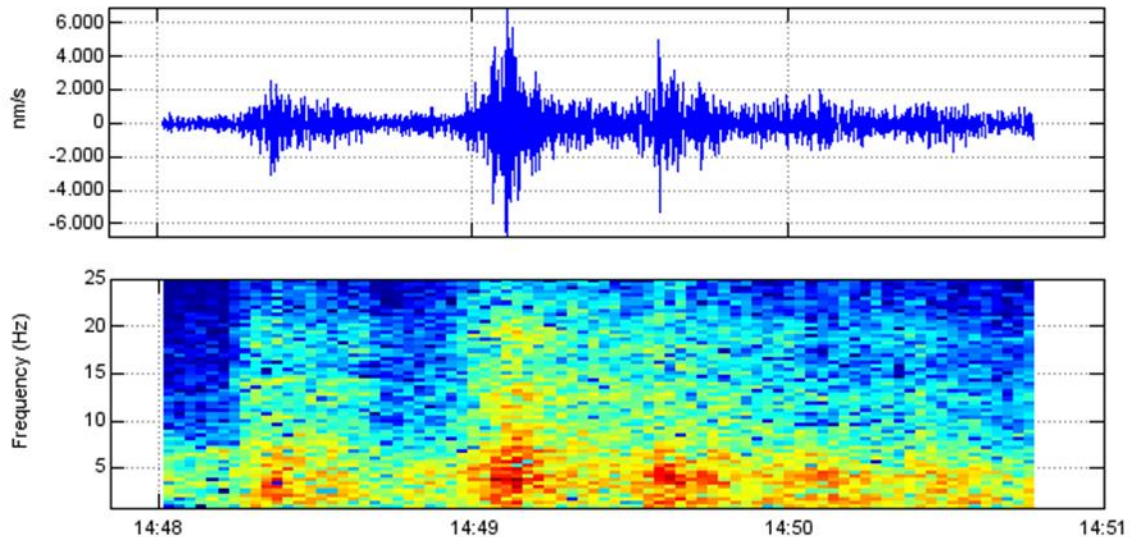


Figura 36. Sismograma y espectrograma del pulso de temblor (TR) de mayor duración (1386 s) en el año 2016 en el VNR. La señal tuvo un D_r promedio de 4.7 cm^2 , registrada el 14 de Marzo a las 14:50 (Hora Local), fue localizada en el cráter Arenas. Estación Olleta banda ancha.

Los desplazamientos reducidos de los episodios de temblor continuo variaron entre 0.03 y 2.0 cm^2 , medidos en la estación Olleta. Este último valor corresponde al episodio registrado el 10 de Marzo (Figura 38), la gráfica de RSAM lo muestra como el más energético en cuentas RSAM (Figura 39); este episodio comenzó con el registro de un pulso de temblor con desplazamiento reducido medido en la estación Olleta de 5.8 cm^2 a las 10:10 (Hora Local) y se prolongó por un tiempo de 14.8 horas. La mayoría de episodios fueron de tan baja energía que no son diferenciables en la gráfica de RSAM.

Las duraciones de los episodios de temblor continuo oscilaron entre 0.2 y 109.7 horas. El episodio de mayor duración se presentó el 14 de Marzo, comenzó con un pulso de temblor con desplazamiento reducido de 1.9 cm^2 , medido en la estación Olleta, energéticamente el temblor continuo tuvo un bajo nivel alcanzando un máximo de 0.2 cm^2 .

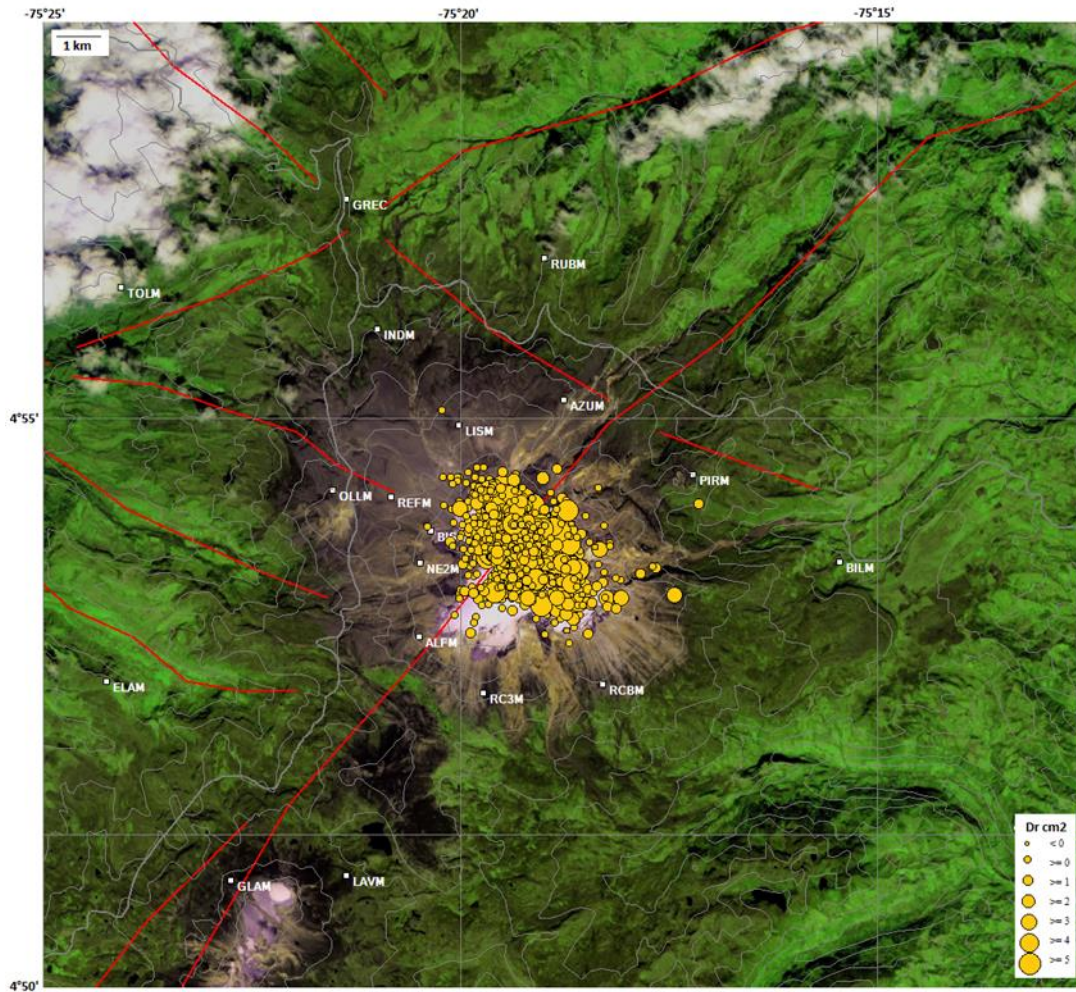


Figura 37. Mapa de localización epicentral de los pulsos de tremor registrados en el VNR durante el año 2016. Los círculos amarillos representan los eventos sísmicos y los cuadros blancos las estaciones sismológicas.

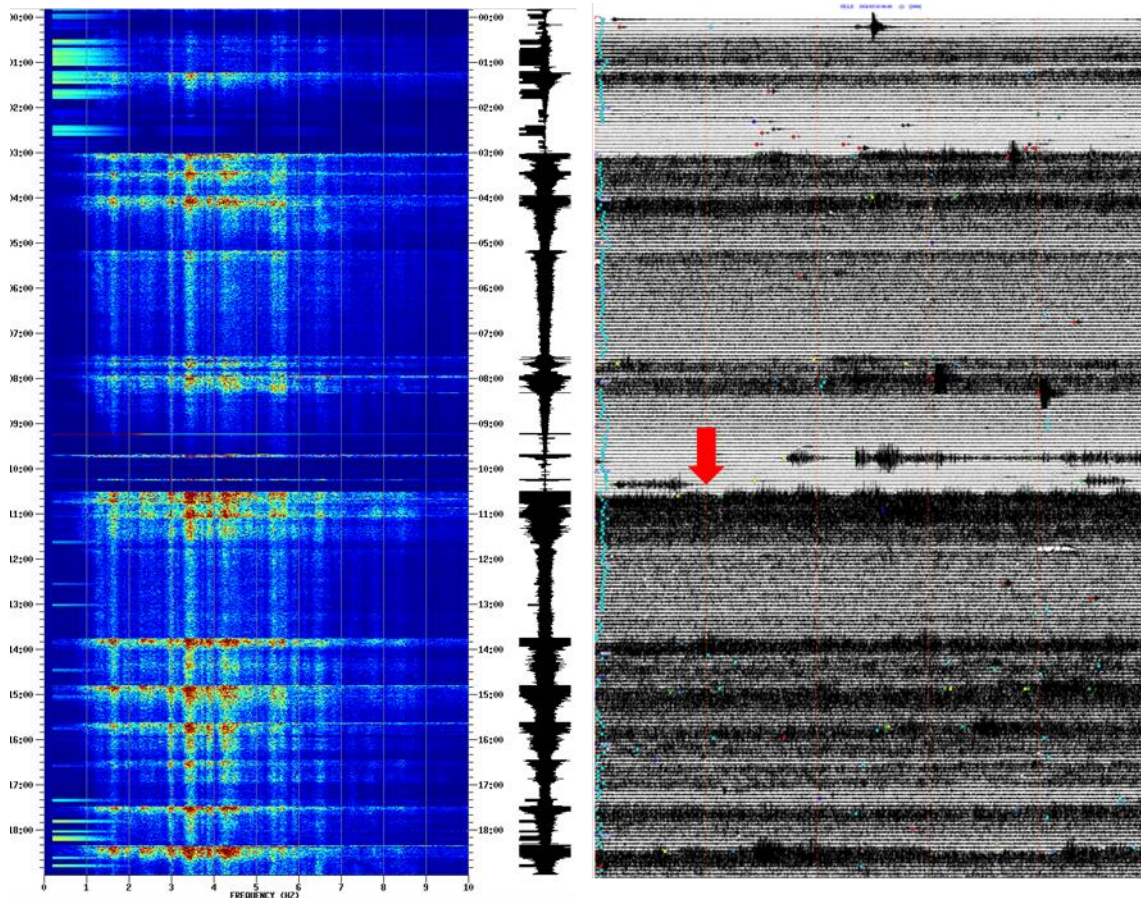


Figura 38. Espectrograma y sismograma del episodio de tremor continuo (TC) más energético registrado en el VNR en el año 2016. Este episodio se registró el 10 de Marzo. El mayor desplazamiento reducido alcanzado durante el episodio fue de 2.0 cm². Estación Bis, corto periodo, registro entre las 00:00 y las 19:00 (Hora Local). La flecha roja señala el periodo más energético del episodio.

Con relación a las frecuencias dominantes del tremor continuo, se observó que la mayoría de episodios presentaron frecuencias en las bandas entre 3 y 4 Hz y entre 4 y 5 Hz. Sin embargo se registraron frecuencias mayores a 1.1 Hz y hasta de 10 Hz (Figura 38).

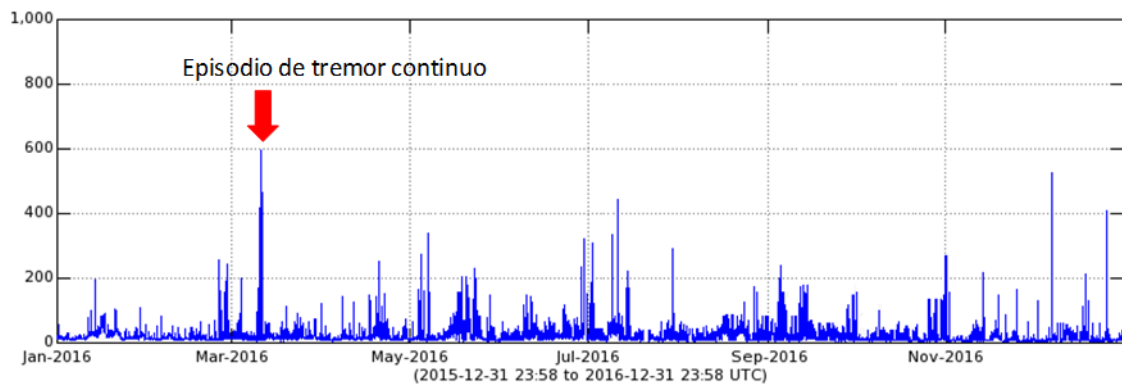


Figura 39. Gráfica del RSAM (Real-time Seismic Amplitude Measurement) para el año 2016 en el VNR. Estación de BIS, componente vertical. La flecha roja señala el episodio de tremor continuo más energético del 2016, registrado entre el 10 y el 11 de Marzo.

1.2.6 Actividad superficial (la columna de gas y señales sísmicas asociadas a la actividad glaciar)

Durante el año 2016 se registraron eventos relacionados con pequeñas avalanchas de rocas y/o hielo-nieve, generadas por el fenómeno de deshielo en la parte alta del volcán, así como por procesos asociados a la dinámica glaciar y a remoción del material volcánico depositado, el cual puede ser movilizado por lluvias y por deshielo del casquete glaciar.

La columna de gases relacionada con actividad fumarólica en el cráter Arenas tuvo una altura promedio de 845 m medidos desde la cima del cráter durante el 2016, mostrando una dirección de dispersión preferencial hacia el Noroccidente y Suroccidente y eventualmente hacia el Nororiente, Sur y Sureste. En general, la columna de gases mostró color blanco asociado a vapor de agua y, en ocasiones, tonalidades grises debido a la presencia de material particulado (ceniza volcánica), al igual que matices azules causados por las altas concentraciones de Dióxido de Azufre (SO₂). La altura máxima registrada fue de 3500 m el día 31 de Marzo de 2016 (Figura 40).

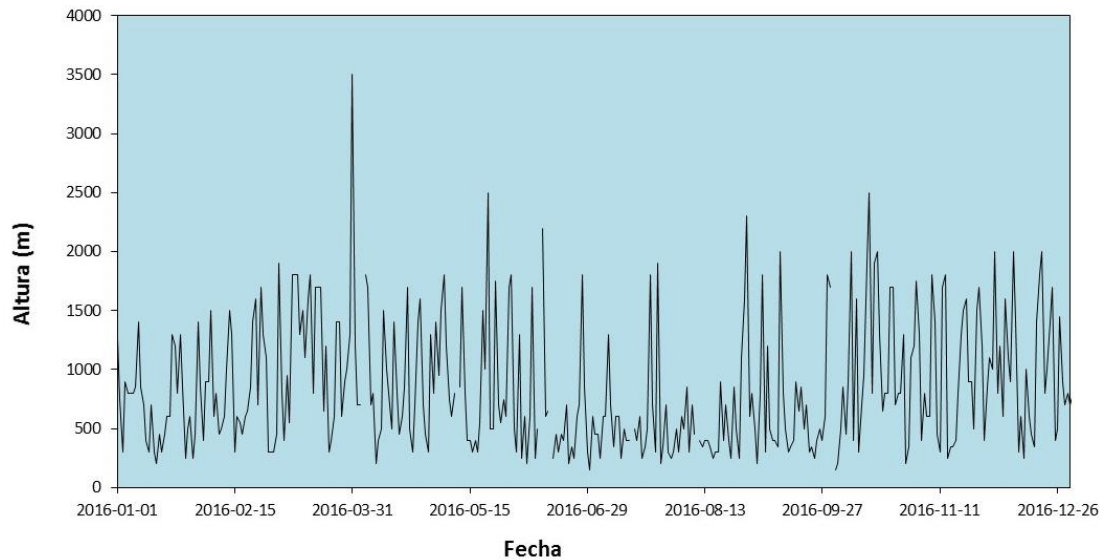


Figura 40. Altura de columna de gases y ceniza observada entre Enero-Diciembre de 2016 a partir de apreciaciones visuales desde el OVSM y de las cámaras instaladas en el área del volcán.

Los episodios de tremor generalmente estuvieron asociados a emisiones de ceniza y a alteración del sistema hidrotermal. Algunas de las emisiones de ceniza pudieron ser confirmadas a través de fotografías tomadas por las cámaras instaladas en el volcán (Figura 41), por funcionarios del SGC en labores de campo en el área de influencia de la estructura volcánica, por funcionarios del Parque Nacional Natural los Nevados, así como imágenes satelitales captadas por el sensor OLI, acoplado al satélite Landsat8 (Figura 42). Fotografías e imágenes satelitales permitieron observar la columna de vapor, gases y ceniza, tendida la mayor parte del tiempo hacia el sector Noroccidental y Suroccidental del edificio volcánico, por acción de los vientos imperantes en la zona. Estas observaciones confirman y son evidencia en superficie de los cambios en el comportamiento de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz.



Figura 41. Columna de gases del cráter Arenas, Volcán Nevado del Ruiz. Fotografías capturadas durante el año de 2016, desde las cámaras ubicadas en inmediaciones de la estructura volcánica del VNR -Sector de Piraña - Azufrado y sector del Cerro Gualí y desde las instalaciones del SGC sede Manizales.

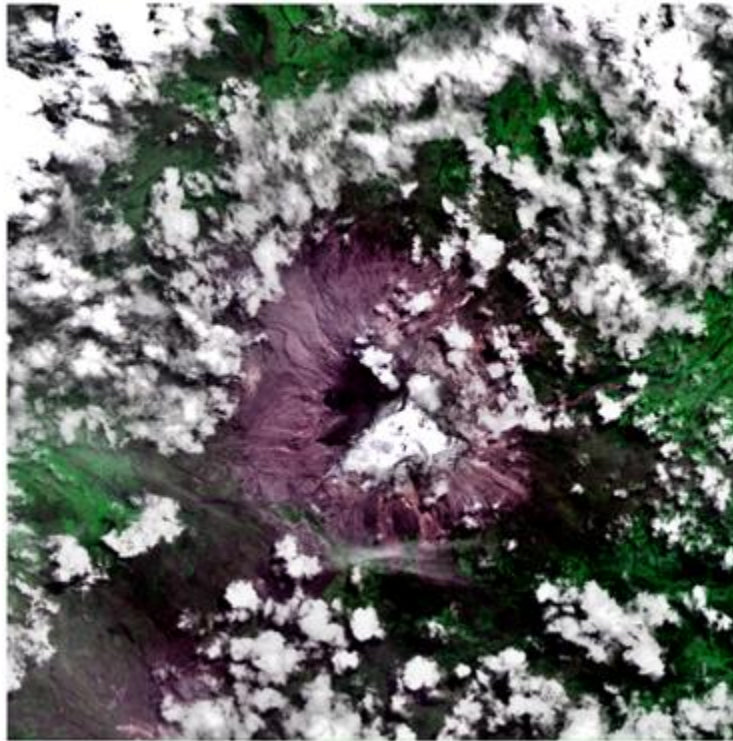


Figura 42. Imágenes ASTER del Sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, captada el 22 de Mayo del año 2016.

Durante el año 2016 fue posible realizar el seguimiento a las anomalías térmicas (otra característica típica de volcanes activos), a partir del índice llamado Volcanic Radiative Power (VRP), medido en Vatios. Se trata de una medida del calor irradiado o emitido por un volcán, la cual puede ser estimada a través de imágenes satelitales suministradas por diferentes agencias como por ejemplo el portal MIROVA de las universidades italianas de Turín y Florencia, en Italia. Las "alertas" se dan cuando el índice VRP supera los 1×10^6 vatios, que equivalen en temperatura a $600 \text{ }^\circ\text{K}$ ($327 \text{ }^\circ\text{C}$). Durante el año se presentaron varias anomalías térmicas importantes con valores que iban desde bajos hasta moderados, se destaca el valor reportado el día 01 de Febrero a las 01:45 a.m. (Hora Local), con un valor de 27 MW siendo este valor el más alto reportado durante el año (Figura 43).

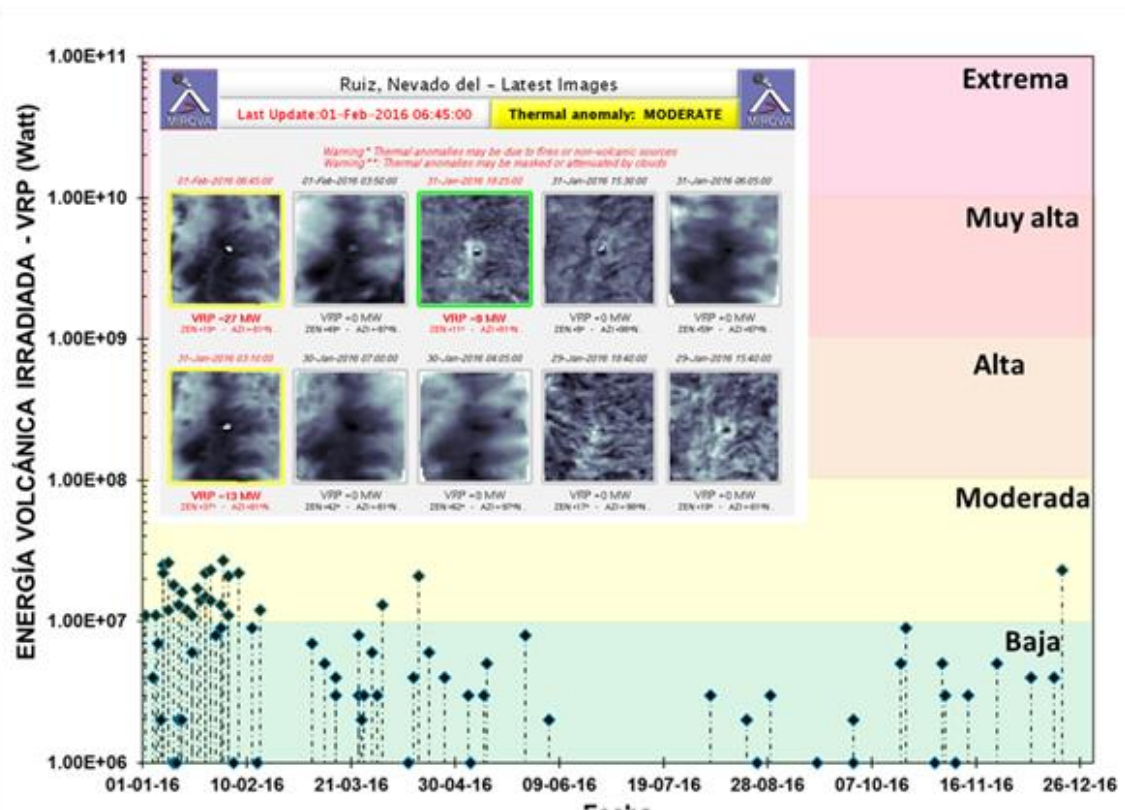


Figura 43. Anomalías térmicas registradas por el Proyecto MIROVA, en el VNR desde Enero hasta Diciembre de 2016.

1.3 DEFORMACIÓN

Durante el 2016 operaron correctamente las siete estaciones GPS permanentes, así como los siete inclinómetros electrónicos. Durante este año se realizó una adecuación y expansión de la red con la instalación de los inclinómetros digitales AZUF2 y LISA2. La Figura 44 muestra la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz.

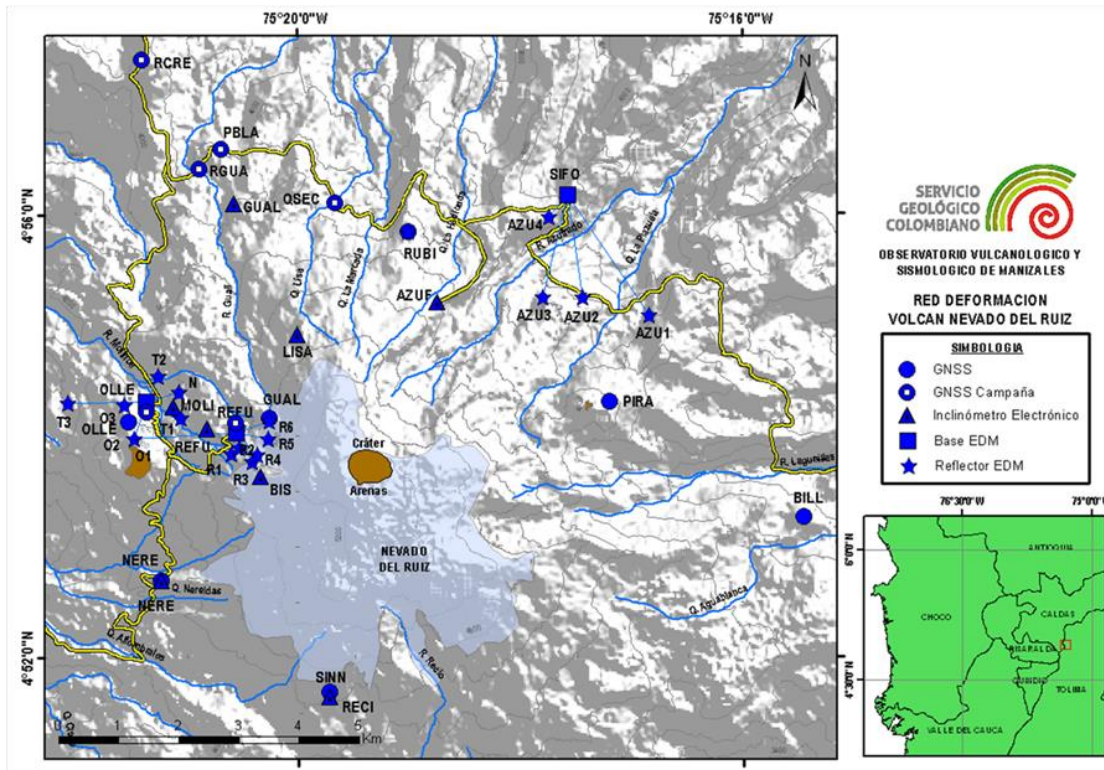


Figura 44. Red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz.

1.3.1 Inclínometría electrónica

La Figura 45 muestra el comportamiento de los inclinómetros electrónicos instalados en el Volcán Nevado del Ruiz que operaron en 2016. En general todos los inclinómetros mostraron pequeñas fluctuaciones asociadas a los cambios de temperatura, las cuales evidencian el correcto funcionamiento y operación.

Los inclinómetros electrónicos AZUF y LISA no registraron cambios significativos, mostrando en general estabilidad en sus dos componentes. Los inclinómetros electrónicos GUAL, NERE, RECI y REFU se caracterizaron por registrar pequeñas fluctuaciones (menores a $\pm 5 \mu\text{rad}$), evidenciando claramente el proceso deformativo de 2012-2016. (Figura 46 a, b, c y d). El comportamiento del inclinómetro BIS se caracterizó por registrar una clara tendencia inflacionaria lineal y sobre esta se registraron grandes picos inflacionarios desde 300 a 2100 μrad .

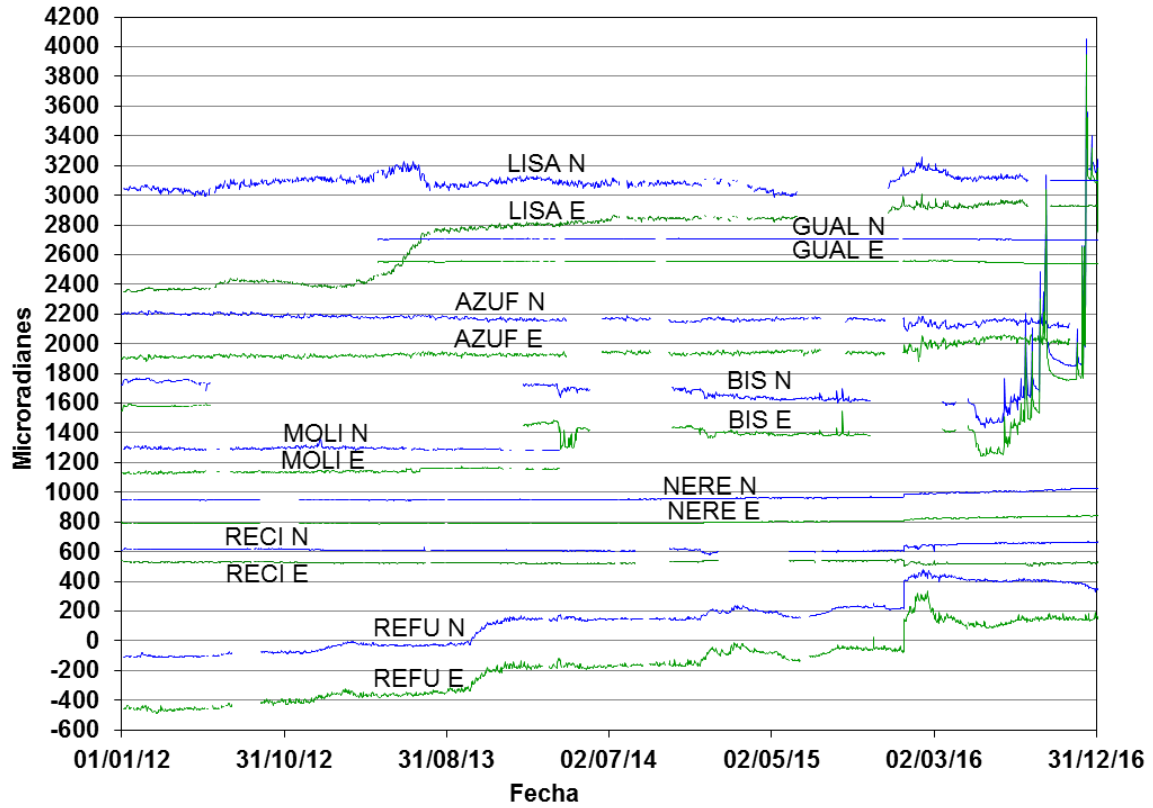


Figura 45. Comportamiento de las componentes Norte (N) (Azul) y Este (E) (Verde) de los inclinómetros electrónicos AZUF, BIS, GUAL, LISA, MOLI, NERE, RECI y REFU de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz desde Enero de 2012 hasta Diciembre de 2016.

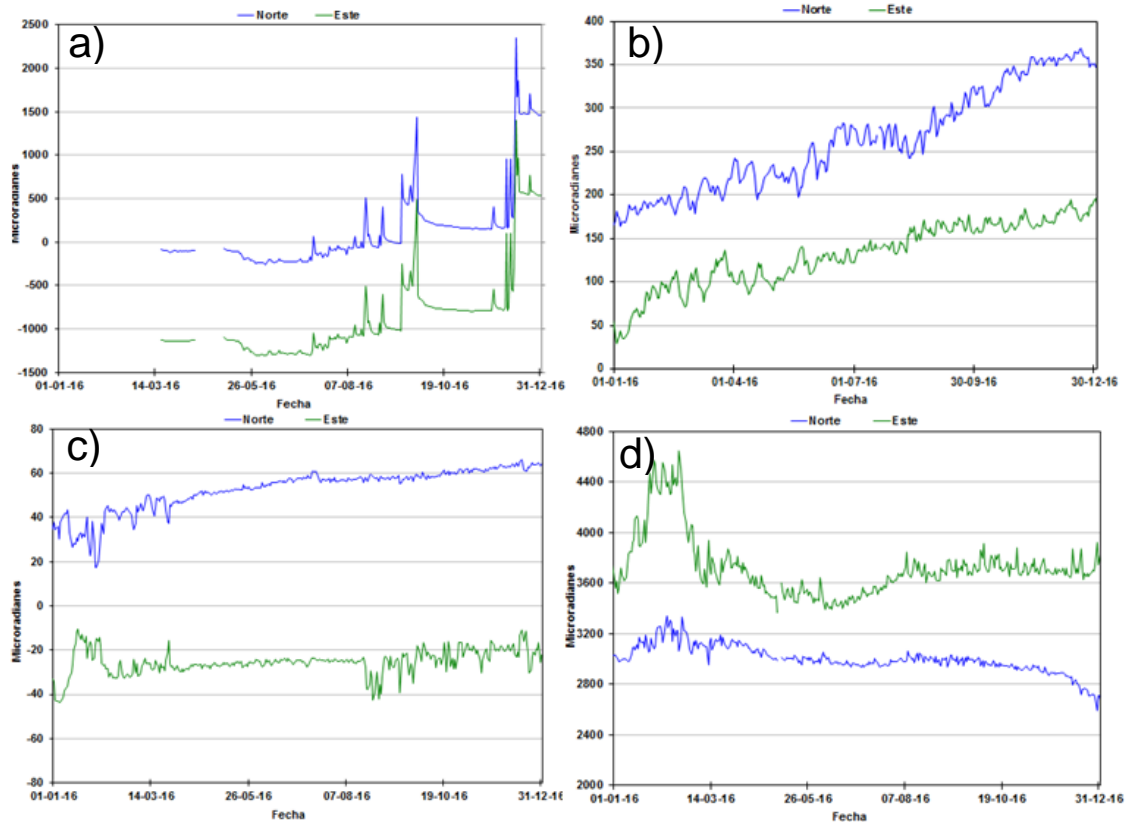


Figura 46. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Verde) de los inclinómetros electrónicos BIS (a), NERE (b), RECI (c) y REFU (d) de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz durante 2016.

1.3.2 Estaciones GNSS permanentes

Los datos de las estaciones GPS permanentes BLLR, GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI y SINN, al igual que la estación de referencia MZAL fueron procesados de manera diferencial con el programa Trimble 4DControl y de manera absoluta por medio del servidor internacional CSRS (Sistema Canadiense de Referencia Espacial) y con el programa Gamit/Globk.

Todas las estaciones evidenciaron una correcta operación y un comportamiento de estabilidad en las componentes Norte, Este y Vertical (Figura 47 a, b, c y d).

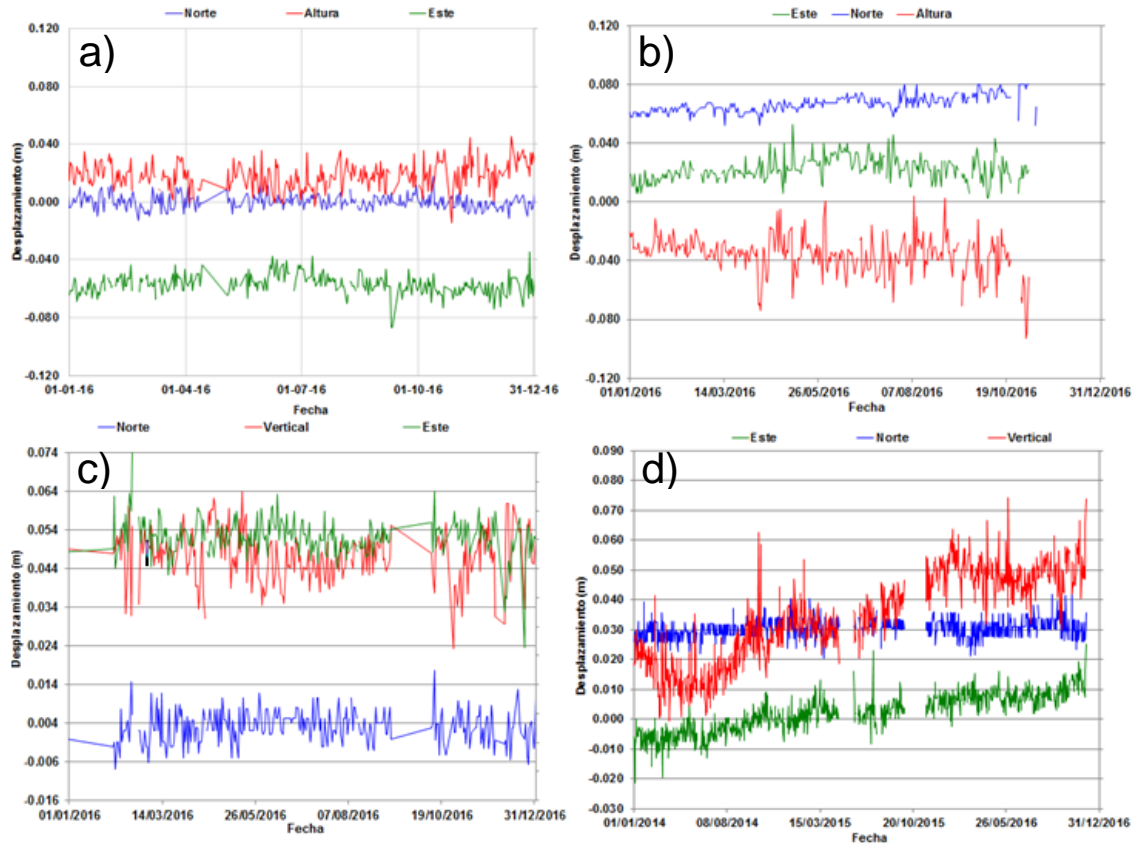


Figura 47. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Verde) y Vertical (Rojo) de los GPS permanentes OLLE (a), NERE (b), RUBI (c) y SINN (d) de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz durante 2016.

1.4 GEOQUÍMICA

Durante el año 2016 el grupo de Geoquímica del OVSM realizó muestreos, análisis in situ y en el laboratorio de los nacimientos termales ubicados en los sectores SW, NW, NNW, NE del Volcán Nevado del Ruiz. También se realizó monitoreo permanente de las estaciones de Gas Radón difuso en suelo: AZUFRADO y GUALI. El monitoreo de las emisiones a la atmósfera del SO_2 se realizó mediante las estaciones telemétricas SCAN DOAS: OLLETA, ALFOMBRALES y EL CAMIÓN. En la Figura 48 se presenta la Red de estaciones de monitoreo geoquímico ubicadas en el VNR.

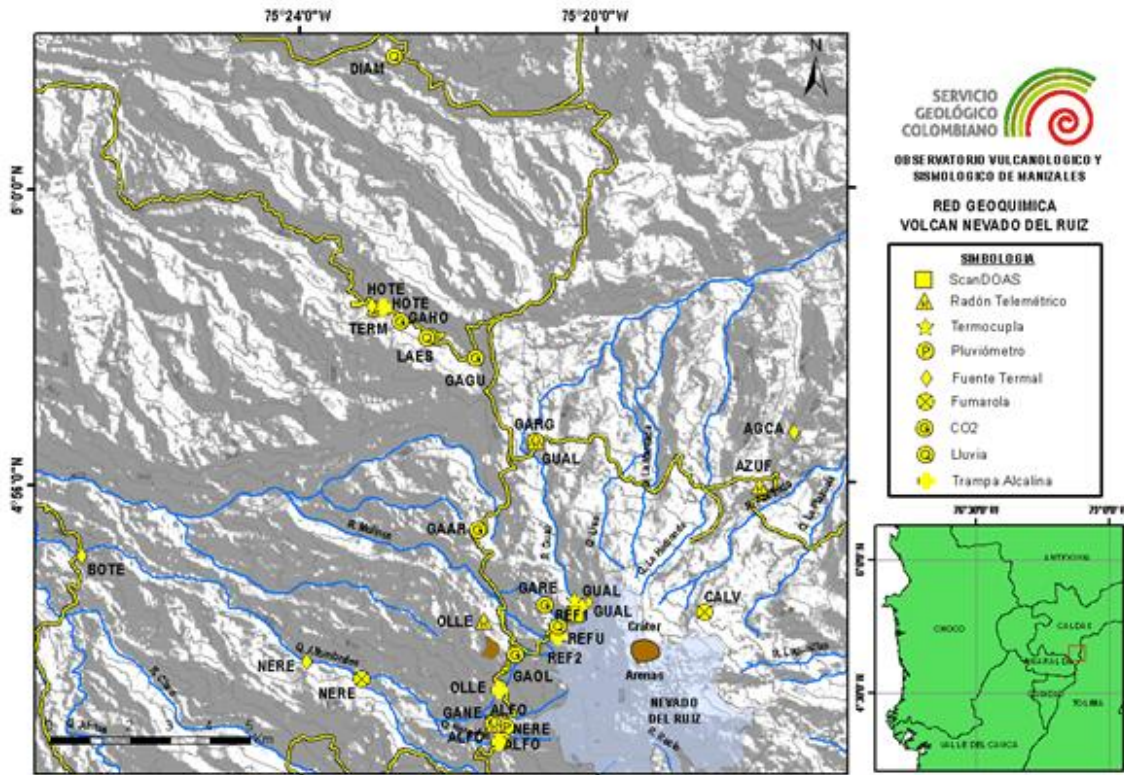


Figura 48. Red Geoquímica del Volcán Nevado del Ruiz.

1.4.1 Estimación de las emisiones de SO₂ con estaciones ScanDOAS

Durante el año 2016 se contó con el funcionamiento de las estaciones SCAN DOAS ALFOMBRALES, OLLETA y EL CAMIÓN, ésta última se instaló en el mes de Enero y entró en óptimo funcionamiento el día 26 de Enero.

En la Figura 49 se aprecia el mapa con la ubicación de las estaciones SCAN DOAS que operaron en el 2016 en el Volcán Nevado del Ruiz.



Figura 49. Ubicación de las Estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz.

Durante el año 2016 se presentaron fluctuaciones en las tasas de emisión de SO_2 a la atmósfera, se cuantificaron flujos promedios entre las 1600 y 2800 T/d. Se cuantificaron flujos máximos por encima de 15000 T/d. Siendo el mes de Julio el que presentó el mayor incremento en la desgasificación, alcanzando flujos de 21000 T/d. A continuación en la Tabla 4 se aprecian las medias de los flujos máximos y promedios registrados durante el año 2016.

Tabla 4. Flujos de SO_2 estimados de las estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz.

Mes	Media de los Flujos Promedios SO_2 (T/d)	Media de los Flujos Máximos SO_2 (T/d)	Flujos Máximos SO_2 (T/d)
Enero	2249	5050	20162
Febrero	2216	5539	11390
Marzo	2289	6552	15717
Abril	2178	6381	20012
Mayo	1678	4617	14303
Junio	2892	7642	20676
Julio	2839	8270	21571
Agosto	1934	5825	14828
Septiembre	2594	7266	16723

Octubre	1718	5205	15492
Noviembre	1705	4272	15472
Diciembre	1754	4717	15405

De acuerdo a las mediciones realizadas en el 2016, las descargas de SO₂ provenientes del VNR se han mantenido estables en magnitud respecto a los años anteriores, en la Figura 50 se aprecia como en el 2012 los flujos de SO₂ alcanzaron valores por encima de las 30000 T/d, para el año 2013 se observa un decrecimiento y los máximos no superaron las 25000 T/d, en el año 2014 y 2015 los valores máximos son mucho menores respecto al 2012 y 2013, en el año 2016 los flujos se mantuvieron estables respecto a los años inmediatamente anteriores.

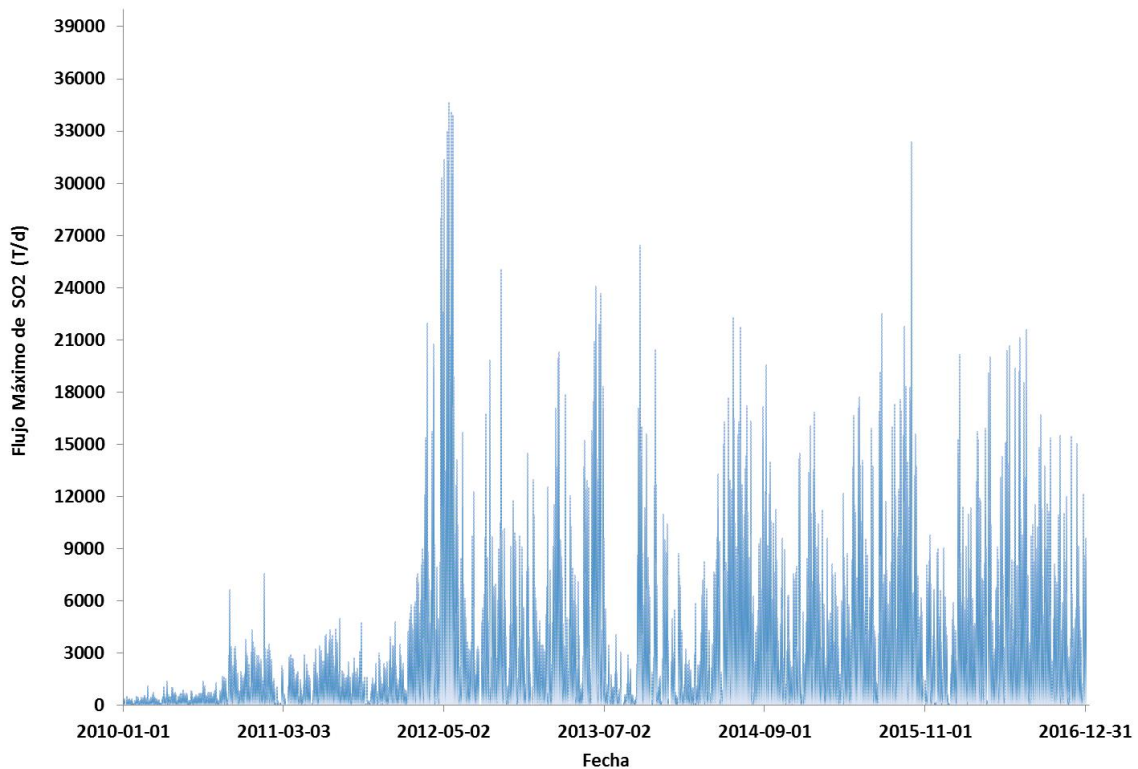


Figura 50. Flujos Máximos de SO₂ estimados en el Volcán Nevado del Ruiz entre los años 2010-2016.

En la Figura 51 se aprecia el comportamiento con el tiempo los promedios y máximos de SO₂ registrados en las estaciones SCAN DOAS ubicadas en el VNR durante el 2016.

Se evidencian fluctuaciones durante todo el año, no obstante, entre los meses de Junio a Septiembre se presentan los mayores flujos de SO₂, los cuales alcanzaron máximos por encima de las 15000 T/d.

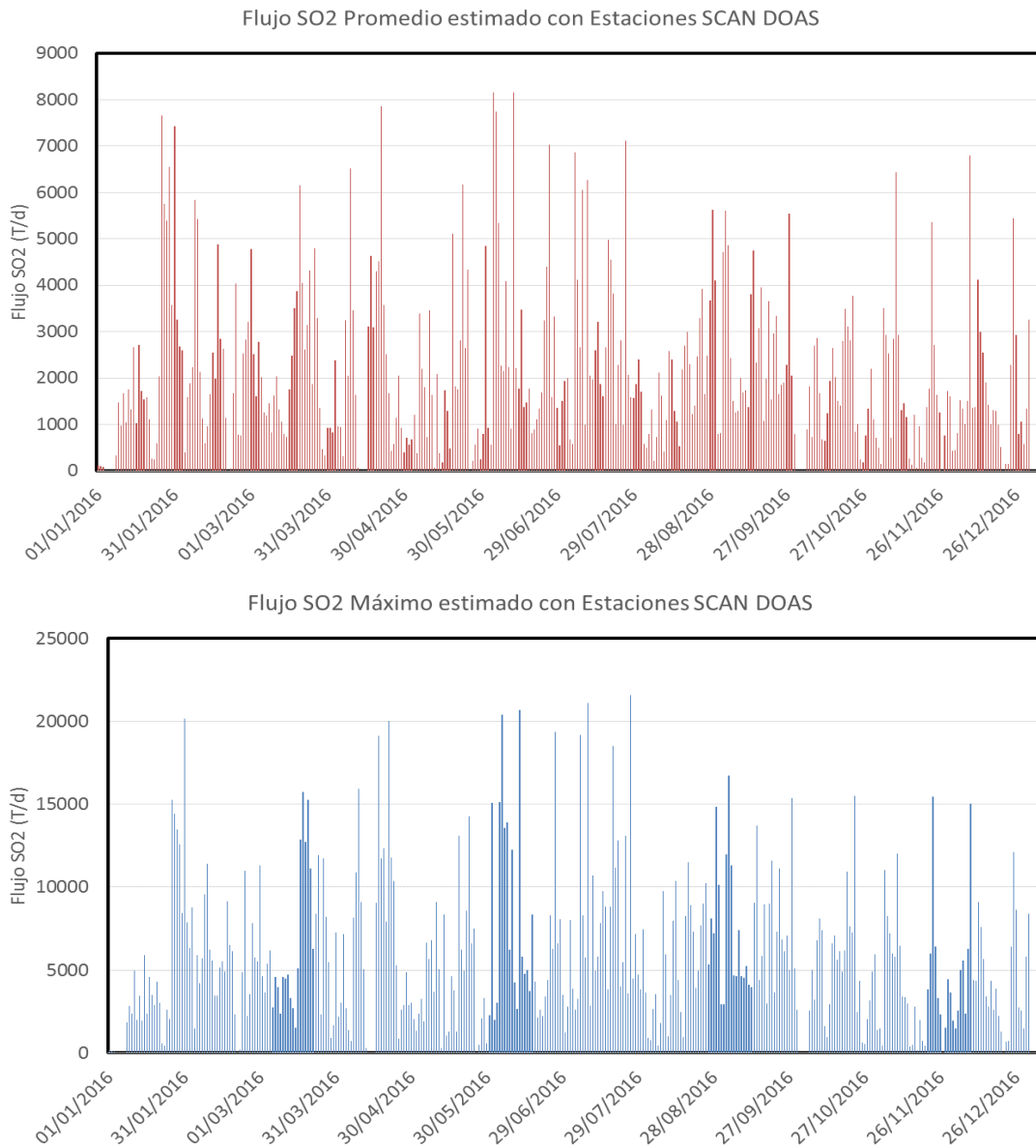


Figura 51. Flujos de SO₂: Promedio y Máximo estimado desde estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

Las descargas de SO₂ acumuladas desde Enero de 2012 hasta Diciembre de 2016 se presentan en la Figura 52, en la gráfica se observa que la pendiente de la curva en el año 2016 no presentó incrementos importantes, las descargas de SO₂ emitidas a la atmósfera se mantienen constantes aunque continúan siendo altas, a Diciembre de 2016 se han emitido a la atmósfera más de 9.740.000 Toneladas de SO₂.

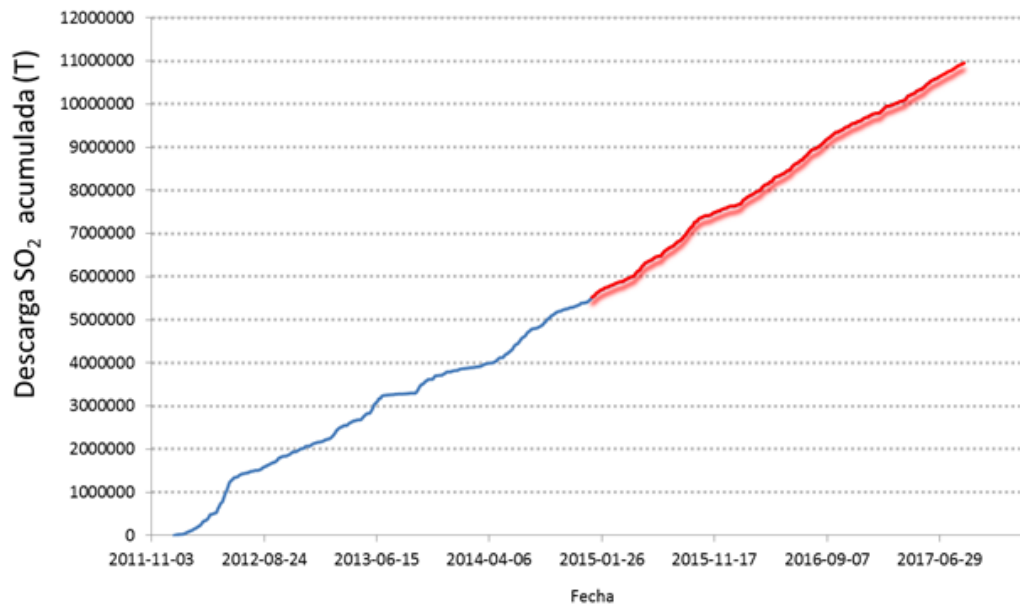


Figura 52. Descarga de SO₂ acumulada a 2012-2016. Volcán Nevado del Ruiz.

Desde el inicio de la etapa eruptiva en el Volcán Nevado del Ruiz en el año 2012 y hasta el año 2016, las descargas de SO₂ emitidas a la atmósfera se mantienen en niveles altos (mayores a 1.500.000 T), lo cual ha permitido establecer que el sistema volcánico continúa inestable (Figura 53).



Flujo SO₂ Acumulado año 2016

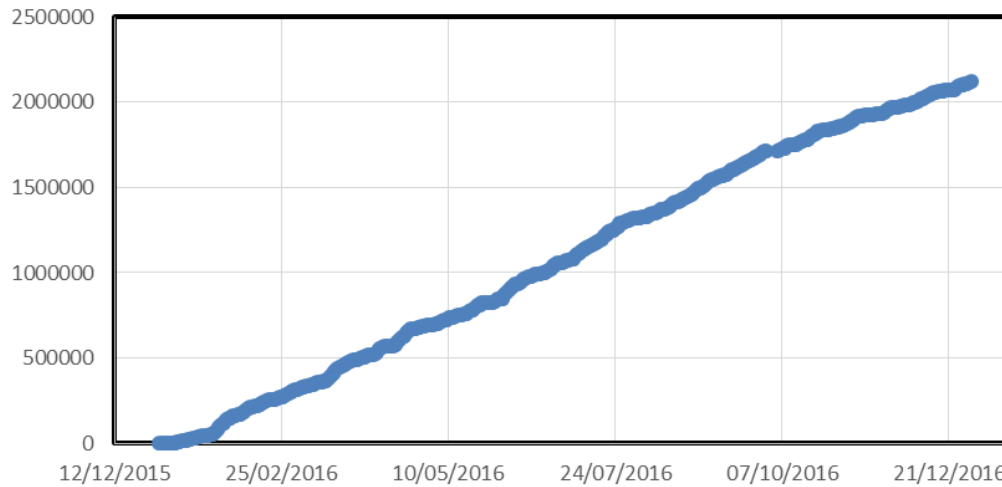


Figura 53. Descarga de SO₂ emitida a la atmósfera en el año 2016. Volcán Nevado del Ruiz.

Los cálculos de flujo de SO₂ se realizaron teniendo en cuenta las condiciones de viento (dirección y velocidad) que genera el IDEAM mediante el modelo WRF. En la Figura 54 se aprecia las gráficas de frecuencia de la velocidad y dirección del viento predominantes para el año 2016. La dirección predominante del viento fluctuó entre Sur-Occidente y Nor-Occidente, favoreciendo los escaneos de las estaciones OLLETA, ALFOMBRALES y EL CAMION.

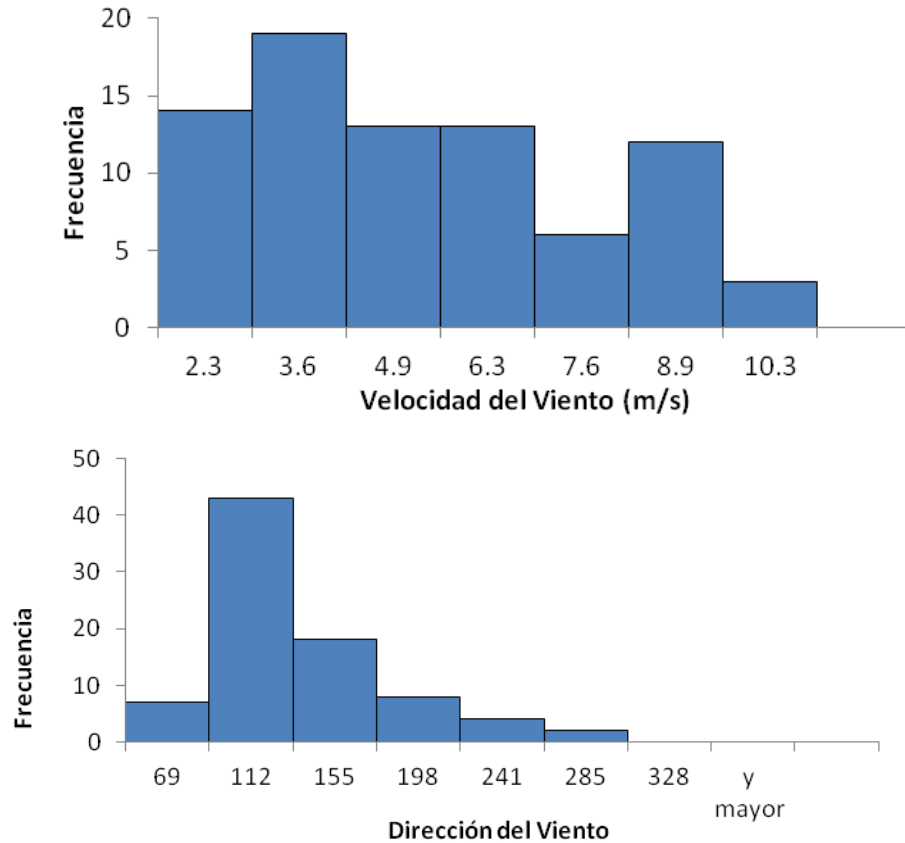


Figura 54. Frecuencia de la Velocidad y Dirección del Viento predominantes para el año 2016.

1.4.2 Imágenes satelitales descargas de SO₂

Las descargas de SO₂ originadas en el Volcán Nevado del Ruiz se lograron observar en el satélite AURA-OMI durante gran parte del 2016. En la Figura 55 se aprecian algunas imágenes satelitales generadas por la NASA que evidencian una constante desgasificación del VNR, en las imágenes se aprecia la descarga de SO₂ y la dirección de dispersión de acuerdo al régimen de vientos dominante.

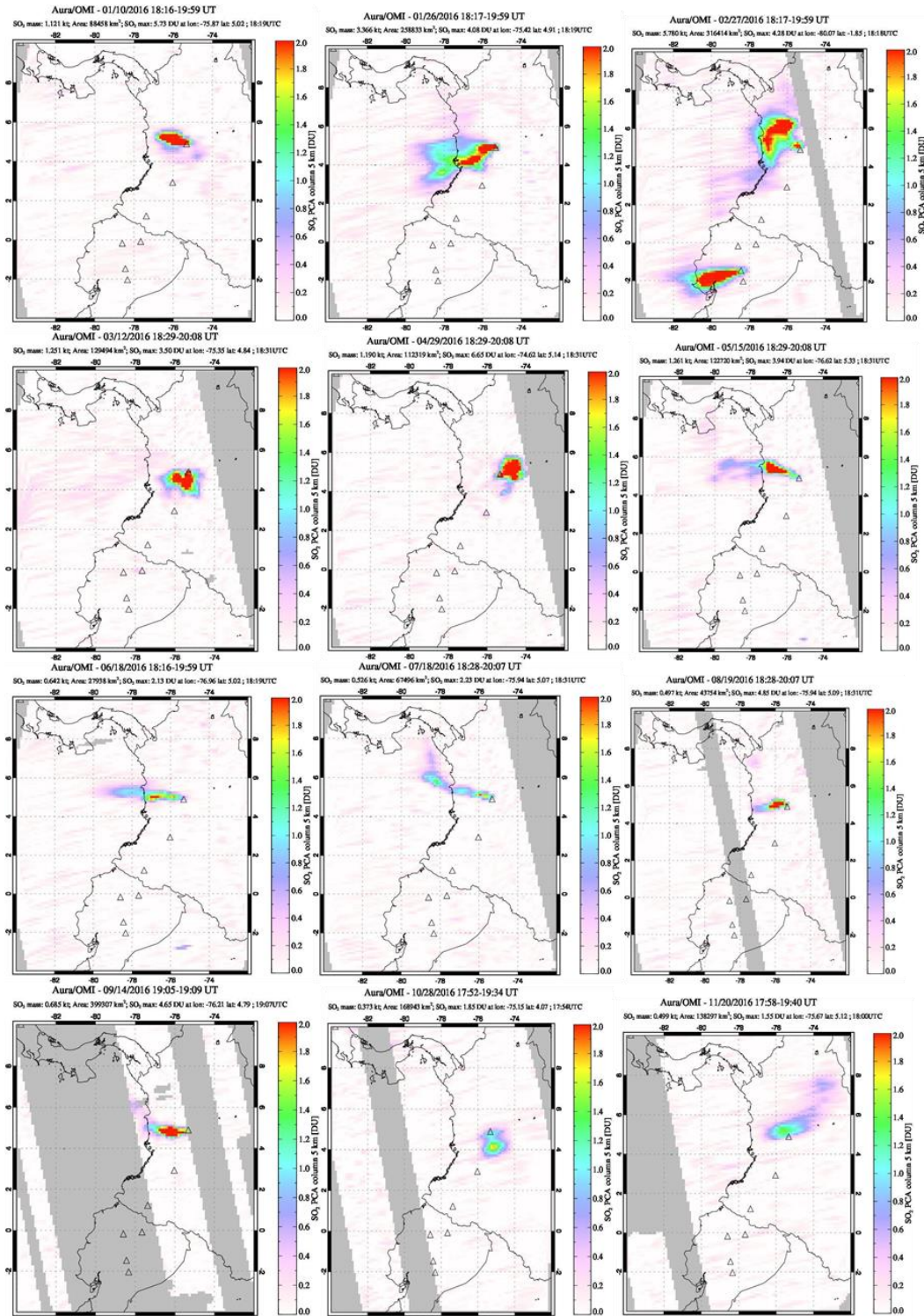


Figura 55. Imágenes OMI desgasificación SO₂ en el Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

1.4.3 Medidas móviles de SO₂

En el 2016 se realizaron de manera periódica medidas móviles para estimar los niveles de desgasificación del VNR con el equipo MobileDOAS, en la Tabla 5 se presentan las rutas y datos de viento usados por el cálculo del flujo de SO₂. Los flujos medidos durante el año corroboran la constante desgasificación del volcán. En promedio los flujos medidos estuvieron por encima de las 3500 T/d.

Tabla 5. Parámetros de viento y rutas usadas para medidas móviles de SO₂. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

Fecha	Punto inicial	Punto Final	Velocidad viento (m/s)	Dirección viento (m/s)	Flujo Máximo SO ₂ (T/d)
2016-01-28	Olleta	Esperanza	6,0	155	875
2016-02-09	Esperanza	Piraña	6,0	147	2273
2016-04-22	Alfombrales	Arbolito	8,0	128	18945
2016-07-01	Olleta	Brisas	9,0	117	6351
2016-07-21	Cerro Gualí	Alfombrales	10,1	98	3597
2016-07-28	Esperanza	Alfombrales	10,0	132	5360
2016-08-03	Alfombrales	Brisas	8,0	133	2920
2016-09-29	Brisas	Quebrada Alfombrales	6,5	109	4377
2016-10-11	Alfombrales	Esperanza	7,0	130	3577
2016-10-11	Esperanza	Alfombrales	7,0	230	1800
2016-10-25	Esperanza	Caballote Olleta	6,0	161	10676
2016-10-28	Arenales	Sector Cabaña cisne	6,0	48	1434
2016-10-31	Peaje Tarapaca 2	Peaje Armenia	6,0	83	4600
2016-11-18	Gualí	Alfombrales	4,0	94	1188
2016-11-22	Laguna Negra	Sifón	3,0	157	2166
2016-11-22	Sifón	La Violeta (Manizales)	3,0	154	5474
2016-11-23	Q. Hedionda	Olleta	4,0	130	3146
2016-12-02	Cerro Gualí	Alfombrales	5,0	120	2585
2016-12-06	Cerro Gualí	Río Azufrado	5,0	166	3432
2016-12-08	Aguacerales	Vía Cabaña Cisne	4,8	90	7245

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia el comportamiento con el tiempo de los flujos medidos con sistema móvil, allí se aprecia que en el 2016 no se estimaron flujos de SO₂ muy altos con el sistema móvil, no obstante el volcán mantuvo su nivel de actividad, los valores estimados en el 2016 fueron superiores respecto a los medidos en el 2015.

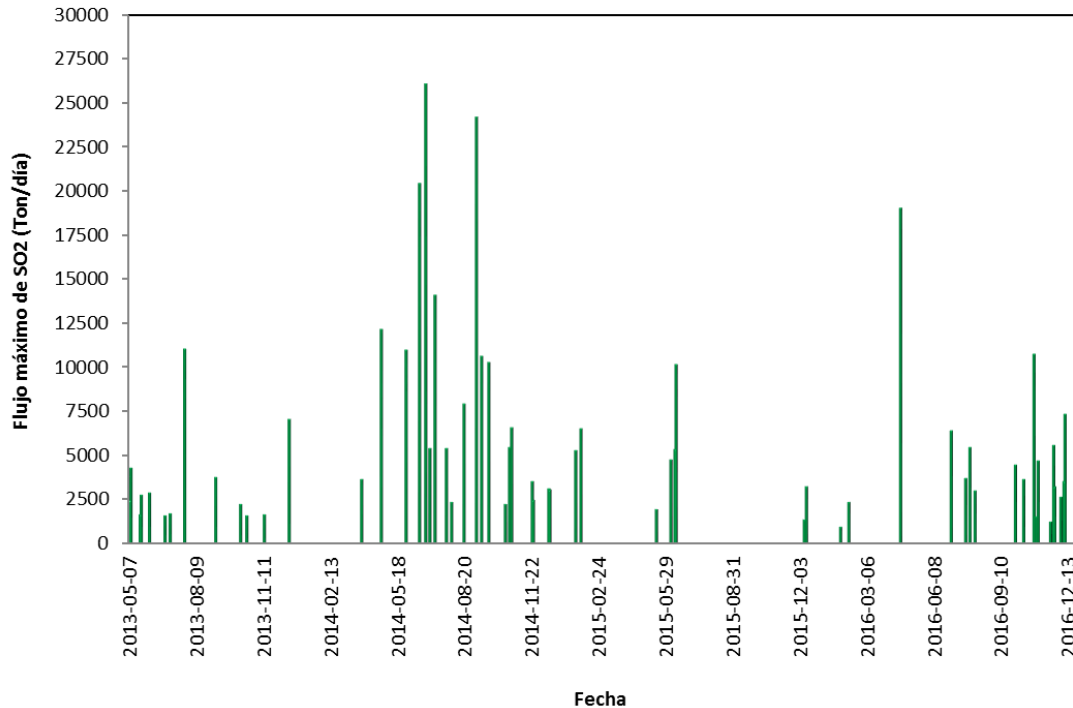


Figura 56. Flujos de SO₂ estimados con equipo MobileDOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

A continuación, se presenta el mapa con la ruta más frecuente que se toma para realizar las medidas del flujo de SO₂, allí se muestra que la concentración de la pluma (color rojo) se presenta en dirección hacia el Noroccidente del VNR. Esta dirección es predominante durante todo el año (Figura 57).



Figura 57. Ruta de medida de SO₂ con equipo MobileDOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

1.4.4 Emisiones de Gas Radón

Durante el año 2016 se monitorearon las estaciones telemétricas: AZUFRADO y GUALI, las estaciones OLLETA y ALFOMBRALES no operaron durante el año. Los resultados del monitoreo muestran que se presentaron algunas variaciones en la concentración de Radón en suelo especialmente entre los meses de Octubre y Noviembre, los incrementos que se registraron en la concentración de gas radón pueden estar relacionados con la sismicidad volcano-tectónica registrada en el VNR durante estos meses. Todas las estaciones registraron concentraciones de radón en diferentes magnitudes, las estación de GUALI registró niveles por encima de los 5000 Beq/m³, mientras que AZUFRADO registró concentraciones de más de 10000 Beq/m³. (Figura 58).

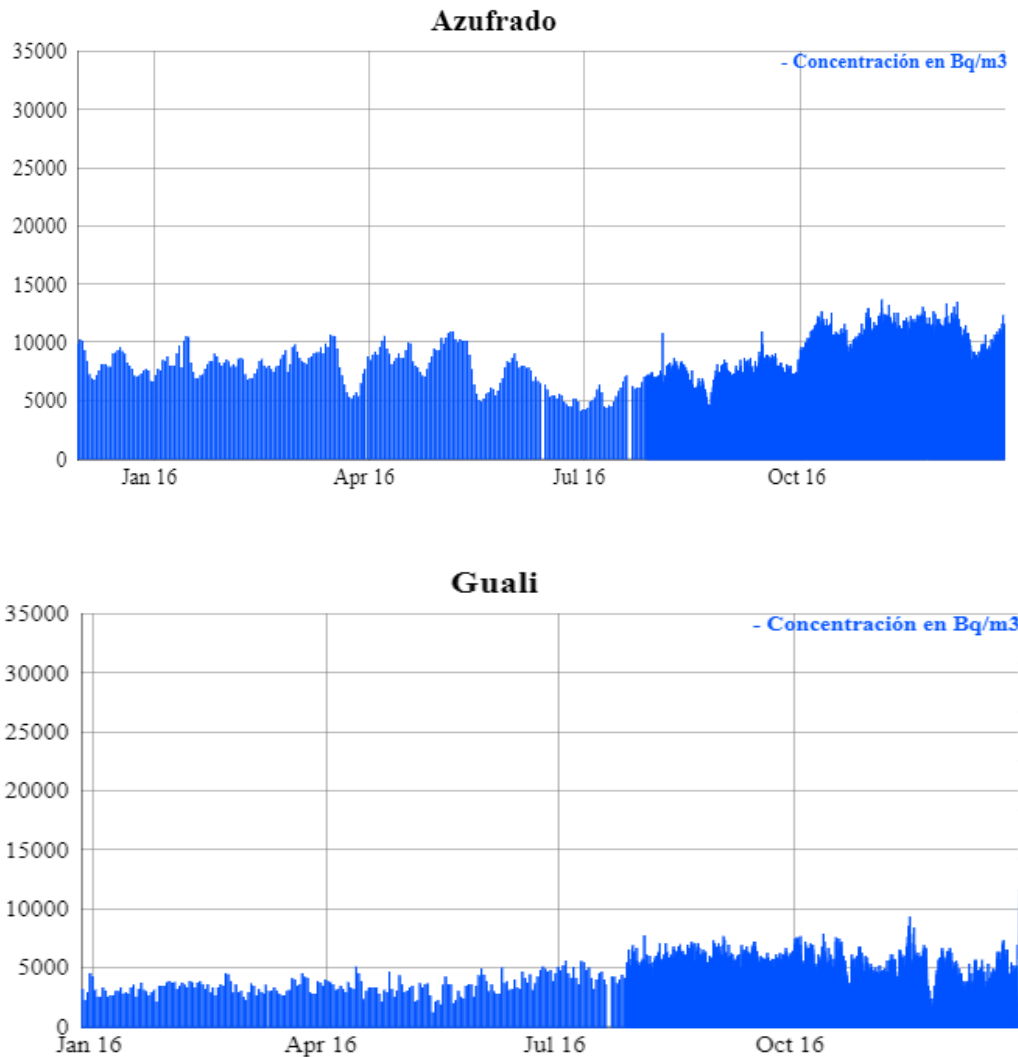


Figura 58. Variación de los niveles de Radón en suelo estaciones AZUFRADO y GUALI. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

1.4.5 Fuentes Termales

En el año 2016 se realizó monitoreo periódico en las fuentes termales: HOTEL, AGUAS CALIENTES, LA GRUTA, GUALÍ, BOTERO LONDOÑO y NEREIDAS. Los valores en los parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales durante todo el año presentaron algunas variaciones. En la Figura 59 se aprecia el comportamiento de la temperatura en el tiempo para las FT, no se presentaron variaciones importantes en los valores

registrados, excepto en la FT GUALÍ, que debido a los diferentes puntos donde se toma la temperatura se observan cambios, los puntos de muestreo dependen del sitio donde esté fluendo agua termal al momento de la toma in situ.

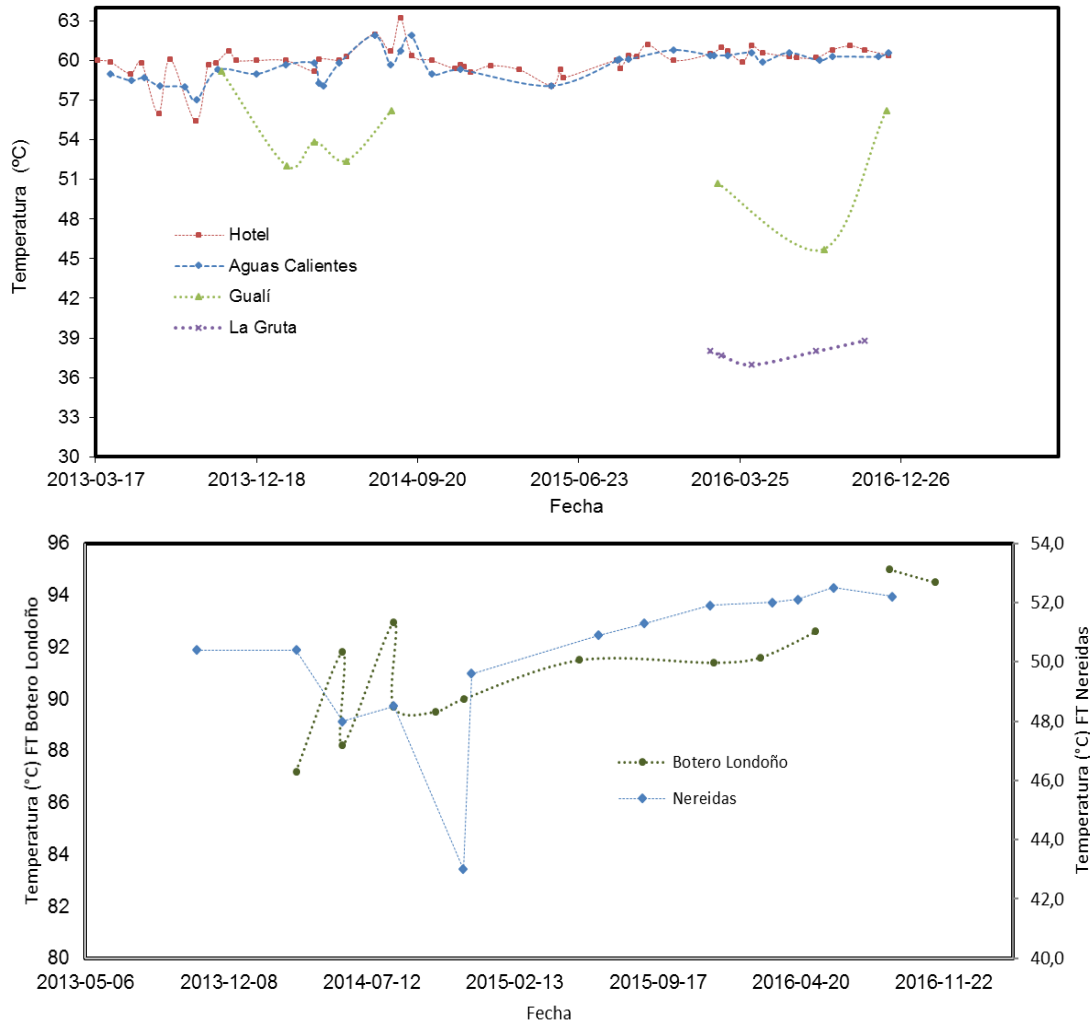


Figura 59. Variación de la Temperatura en Fuentes Termales: HOTEL, AGUAS CALIENTES, GUALI, LA GRUTA, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

La temperatura de las FT AGUAS CALIENTES y HOTEL durante el 2016 fluctuó entre 58 y 60°C, en la FT NEREIDAS la temperatura se mantuvo estable con un promedio de 52°C.

Para el nacimiento termal BOTERO LONDOÑO las medidas realizadas mostraron estabilidad con una temperatura 91.4°C.

En lo referente al pH, durante el 2016 se presentaron algunas variaciones que pueden estar relacionadas con posibles mezclas con agua meteórica, no obstante en general los valores de pH para el año 2016 se mantuvieron dentro de sus líneas base, estas variaciones se aprecian en la Figura 60.

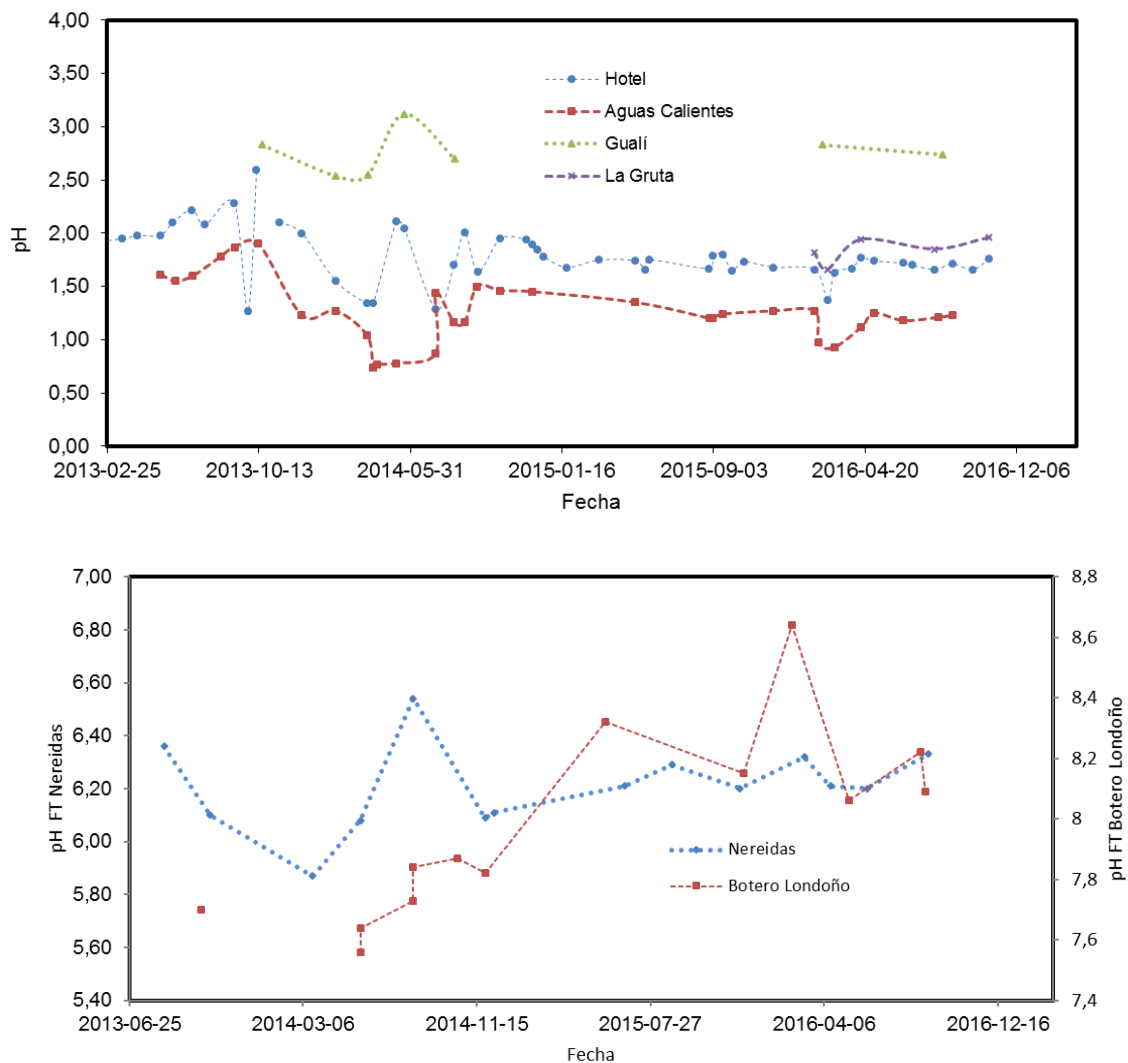


Figura 60. Variación del pH en Fuentes Termales HOTEL, AGUAS CALIENTES, GUALÍ, LA GRUTA, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

Las medidas de conductividad eléctrica de las fuentes termales registradas en el año 2016 se mantuvieron estables, se presentaron fluctuaciones debidas a posibles mezclas con agua meteórica que hacen que se presente una carga iónica más fuerte en el agua. (Figura 61).

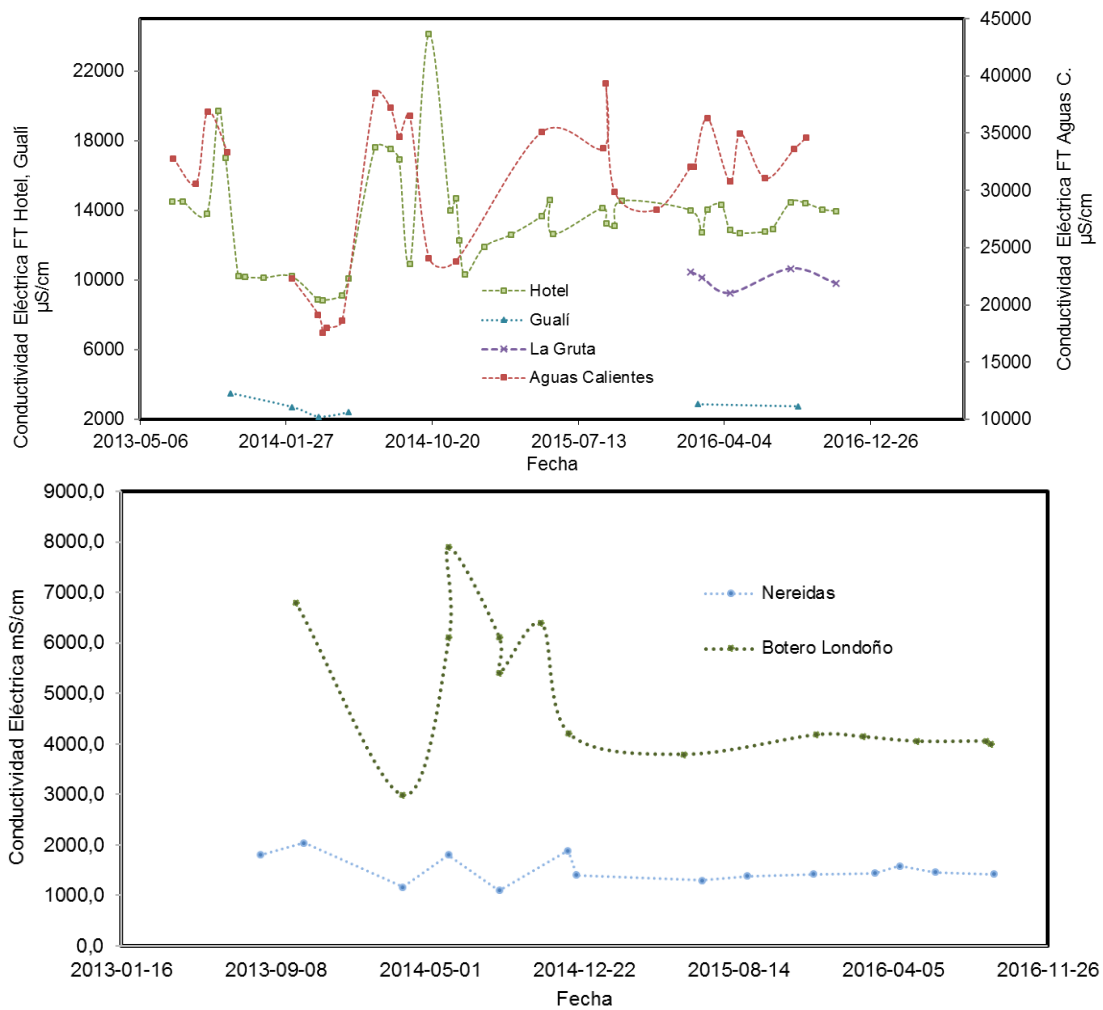





Figura 61. Variación de la conductividad eléctrica en Fuentes Termales HOTEL, AGUAS CALIENTES, GUALÍ, LA GRUTA, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

Respecto al contenido de iones mayoritarios, no se presentaron variaciones importantes en la concentración de Cloruros, Sulfatos, Calcio, Sodio y Silicio durante las

medidas realizadas en el 2016. El resumen del contenido iónico y parámetros fisicoquímicos de las FT monitoreadas periódicamente en el VNR se presenta en la Tabla 6. En esta tabla también se presentan algunos manantiales termales ubicados en el sector NE del Volcán Nevado del Ruiz que fueron monitoreados al menos una vez en el año 2016: La Yuca, La Cabaña, Campanita y Canaán.

Tabla 6. Contenido iónico y parámetros Fisicoquímicos Fuentes Termales. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

Fuente Termal	pH	T(°C)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	Cationes Mayores (mg/L)	Aniones Mayores (mg/L)
 Hotel	1,73	60,1°C	13124	Na ⁺ (460); Ca ⁺² (237); Si ⁺⁴ (84,4)	Cl ⁻ (700); SO ₄ ⁻² (4863)
 Aguas Calientes	1,19	60°C	31420	Na ⁺ (362); Ca ⁺² (231); Si ⁺⁴ (66,4)	Cl ⁻ (1846); SO ₄ ⁻² (10322)
 La Gruta	1,94	36.9°C	9350	Na ⁺ (377); Ca ⁺² (187); Si ⁺⁴ (72,71)	Cl ⁻ (540); SO ₄ ⁻² (3661)

 <p>Gualí</p>	2,76	53,6°C	2780	Na ⁺ (44) ; Ca ⁺² (272) ; Si ⁺⁴ (89,1)	Cl ⁻ (92) ; SO ₄ ⁻² (1600)
 <p>Nereidas</p>	6,20	50.2°C	1460	Na ⁺ (105) ; Ca ⁺² (120) ; Si ⁺⁴ (70)	Cl ⁻ (16,08) ; SO ₄ ⁻² (241)
 <p>Botero Londoño</p>	8.22	90°C -93°C	4050	Na ⁺ (580) ; Ca ⁺² (46) ; Si ⁺⁴ (70)	Cl ⁻ (1040) ; HCO ₃ ⁻ (170) ; SO ₄ ⁻² (50)
 <p>La Yuca</p>	9,55	39,9°C	238,4	Na ⁺ (50) ; Ca ⁺² (1,80) ; Si ⁺⁴ (33)	Cl (14,44) ; SO ₄ ⁻² (10,65)

 <p>La Cabaña</p>	3,12	29,7°C	2687	Na ⁺ (44,5) ; Ca ⁺² (402)	Cl (53.81); SO ₄ ⁻² (1679,40)
 <p>Campanita</p>	7,30	34,5°C	3336	Na ⁺ (540) ; Ca ⁺² (103)	Cl (933); SO ₄ ⁻² (126)
 <p>Canaán</p>	9,56	36,8	259,6	Na ⁺ (54) ; Ca ⁺² (0,9)	Cl (42); SO ₄ ⁻² (68)

1.4.6 Gases en botellas de Giggenbach

En el año 2016 el monitoreo y toma de muestras en la Fumarola NEREIDAS se realizó en los meses de Abril, Junio y Septiembre, los datos obtenidos muestran que el mayor porcentaje de gases secos se tiene en CO₂, en el mes de Septiembre, se registró un mayor aporte en Azufre, alcanzando un porcentaje de SO₂ del 31%. En la Figura 62 se aprecia el contenido de gases expresado en %, los números 1,2 y 3 corresponden a las medidas realizadas en los meses de Abril, Junio y Septiembre respectivamente. En la Tabla 7 se aprecian los valores de la concentración de gases secos de la Fumarola NEREIDAS.

Campo Fumarólico Nereidas (%Molar en Base Seca)

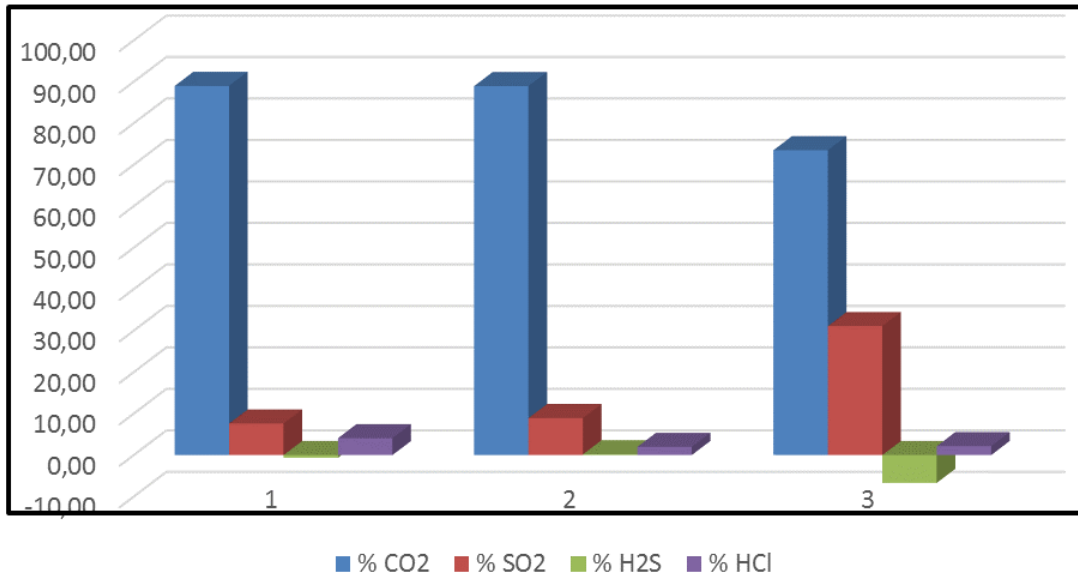


Figura 62. Variación del contenido de gases en la Fumarola Nereidas. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

Tabla 7. Datos de Gases en la Fumarola NEREIDAS (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Nevado del Ruiz. 2016.

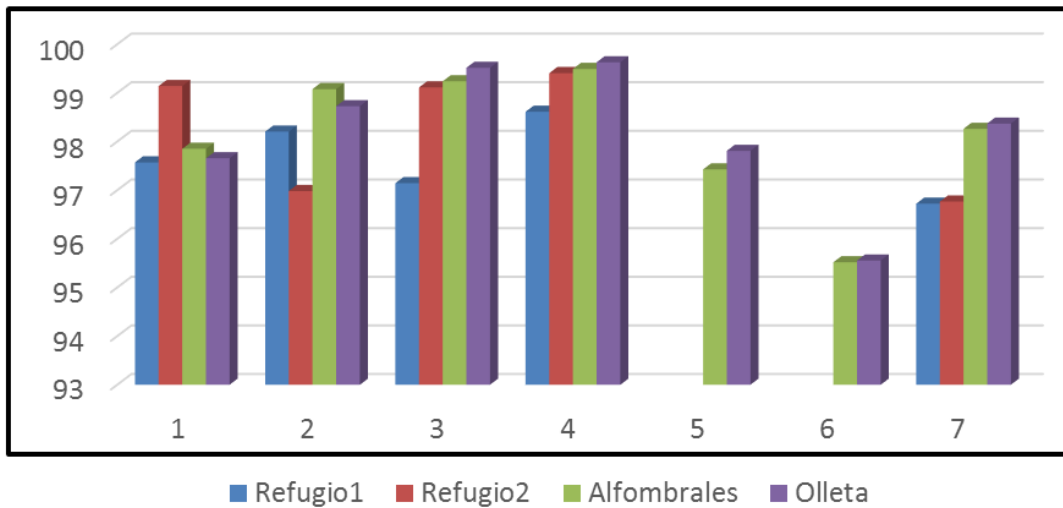
Fecha	% CO ₂	% SO ₂	% H ₂ S	% HCl	St/HCl
15/04/2016	88,98	7,60	-0,65	4,07	1,50
08/06/2016	88,94	8,92	0,18	1,97	4,05
05/09/2016	73,49	31,08	-6,72	2,15	9,95

1.4.7 Gases en Trampas Alcalinas (TA)

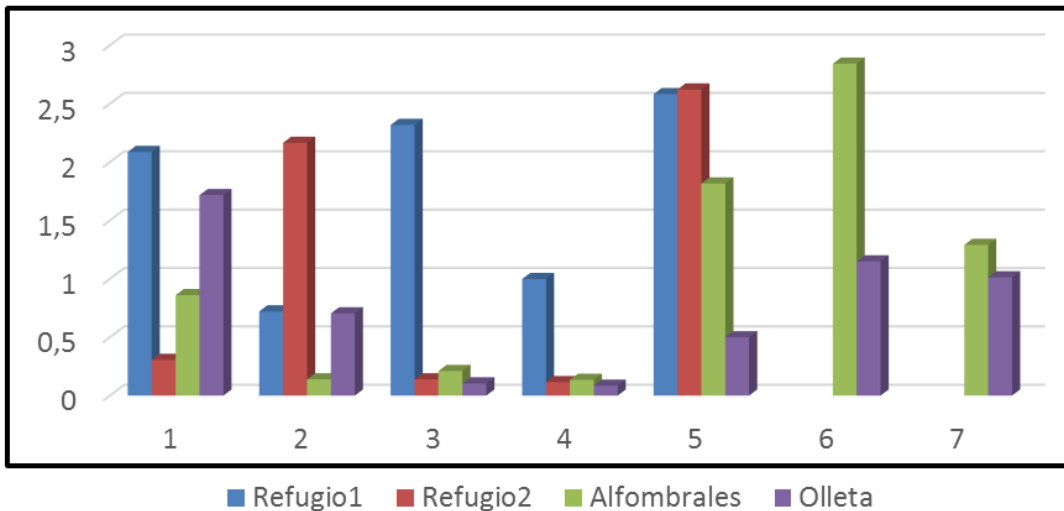
Para el monitoreo de gases emitidos en fumarola se tienen estaciones fijas denominadas trampas alcalinas, las cuales constan de un recipiente que contiene una solución altamente alcalina (KOH 6N), en la cual se atrapan los gases CO₂, St y HCl. La red de estaciones de Trampas Alcalinas que se encuentran ubicadas en el Sur y Suroccidente del Volcán son: REFUGIO 1, REFUGIO 2, OLLETA y ALFOMBRALES. Durante el 2016 se realizó monitoreo de las estaciones de TA en los meses de Marzo,

Abril, Junio, Agosto, Septiembre y Octubre, se observaron algunos incrementos en el contenido de azufre total (St) y HCl, debidos a la constante actividad del volcán. En la Figura 63, se observan los contenidos en % Molar en Base Seca de CO₂, HCl y St para las estaciones de TA. (Los números 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 en la figura corresponden a los meses mencionados anteriormente, los datos de Marzo corresponden a los números 1 y 3).

CO₂ (%Molar en Base Seca)



St (% Molar en Base Seca)



HCl (% Molar en Base Seca)

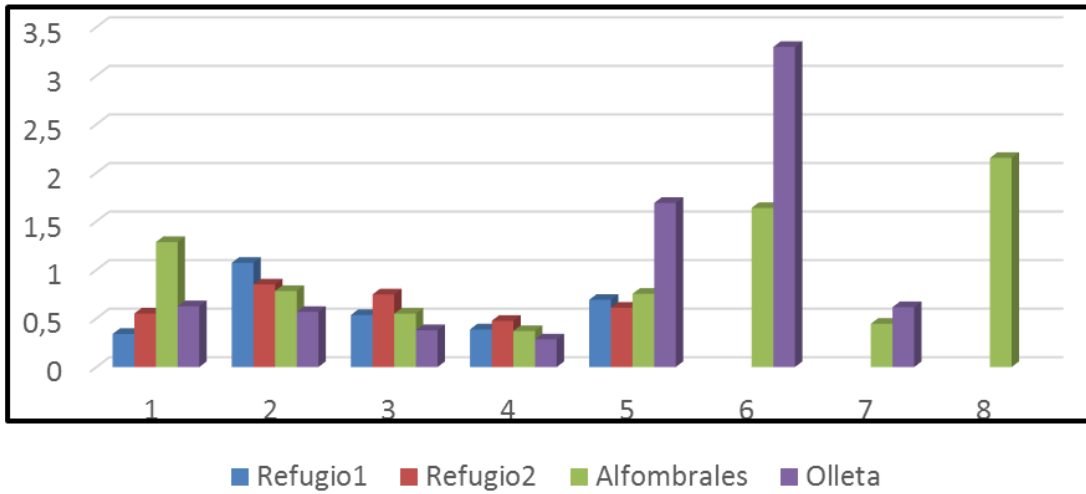


Figura 63. Variación del contenido de gases en estaciones de Trampas Alcalinas: refugio1, refugio 2, Olleta y Alfombrales. Volcán Nevado del Ruiz. 2016.



2. VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA (VNT)

2.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año 2016 fue del **90.2%**.

En el mes de Enero se destaca la visita a la estación sismológica NIDO DE AGUILA (Figura 64) donde se instaló un sistema de control de energía y reseteo remoto que permite que la estación se recupere de manera autónoma de problemas de bloqueo en su equipo de comunicaciones.

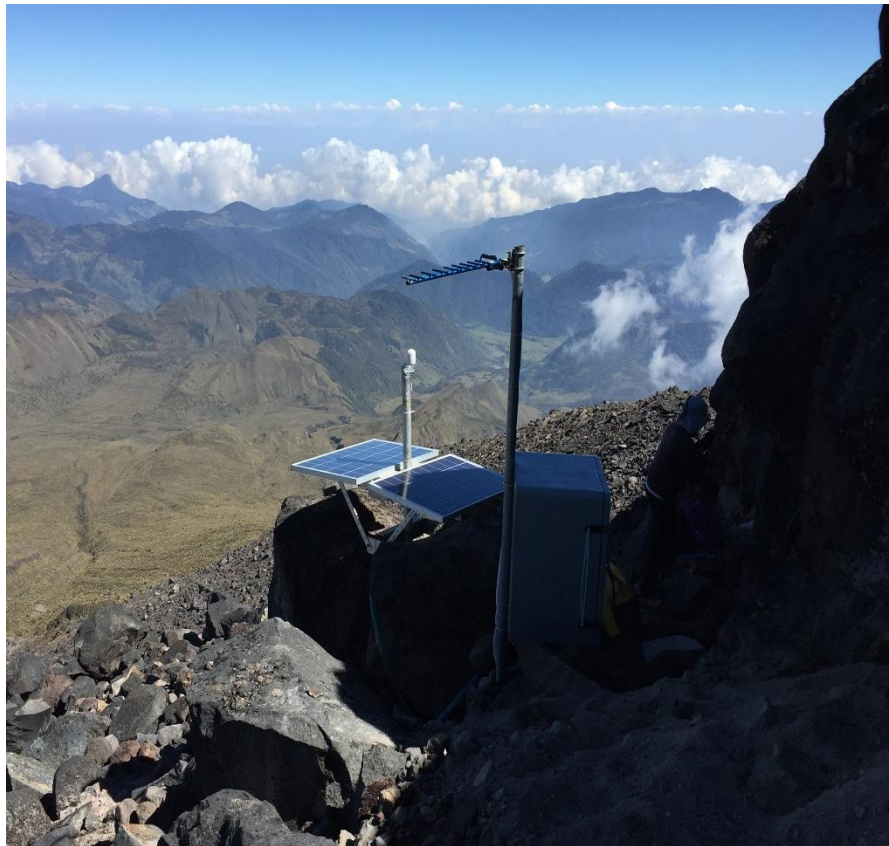


Figura 64. Estación NIDO DE AGUILA.

En el mes de Agosto se realizaron mantenimientos preventivos en las estaciones multiparamétricas ESMERALDA y LAS MARIAS.

No se realizaron más trabajos sobre la red de estaciones de este volcán durante el año.

2.2 SISMOLOGÍA

El Volcán Nevado del Tolima mantuvo un nivel similar de actividad sísmica durante el 2016 con respecto al año anterior. La red de monitoreo sismológico (Figura 65), registró sismos asociados al fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico y eventos asociados a fluidos dentro de los conductos volcánicos (Figura 66 y Figura 67). El sismo de mayor magnitud registrado en el año corresponde al evento ocurrido el 05 de Abril a las 22:06 (Hora Local), el cual alcanzó una magnitud de 1.2 M_L (Magnitud Local) y estuvo localizado en el sector Nororiente con respecto al cráter a una profundidad de 1.3 km. En general, estos eventos se localizaron alrededor del cráter, Norte, Noroccidente, Occidente, Suroccidente y Sur del edificio volcánico a profundidades entre 1.3 y 8.0 km (Figura 68).

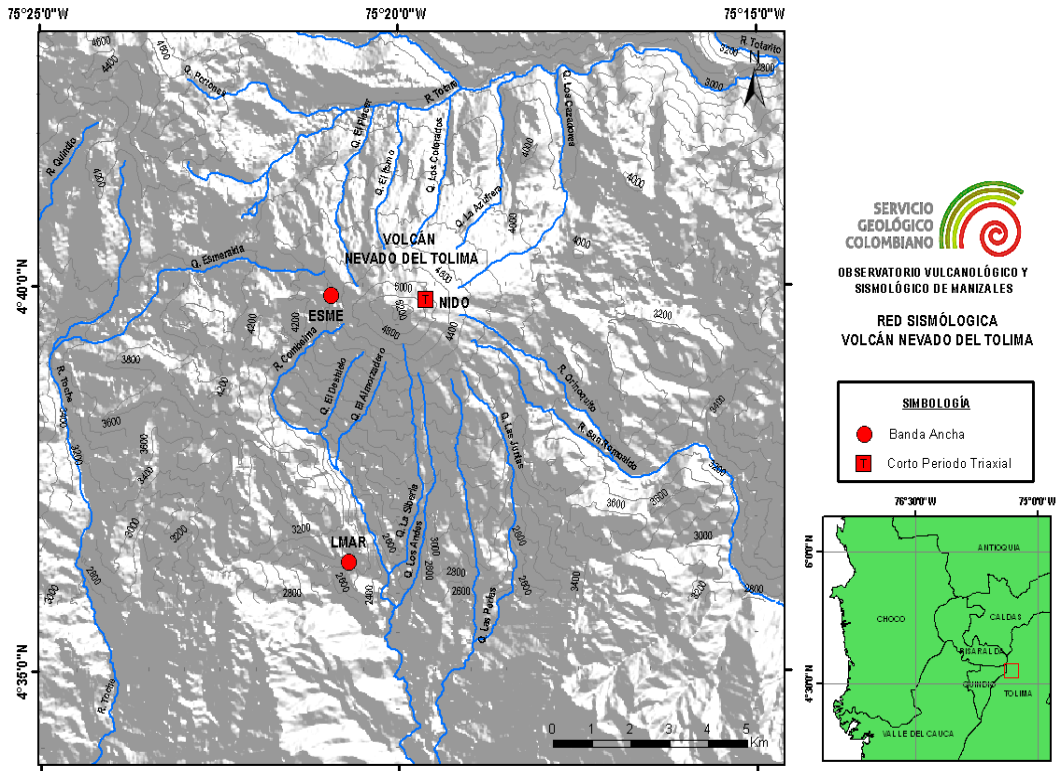


Figura 65. Red Sismológica. Volcán Nevado del Tolima.

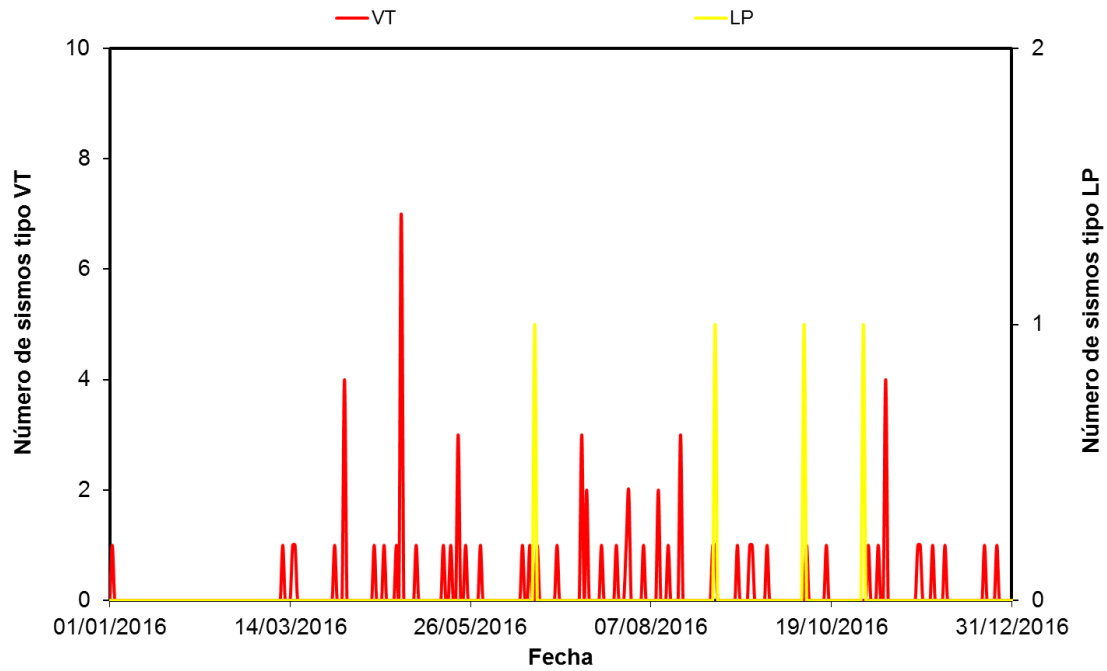


Figura 66. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Nevado del Tolima durante el año 2016.

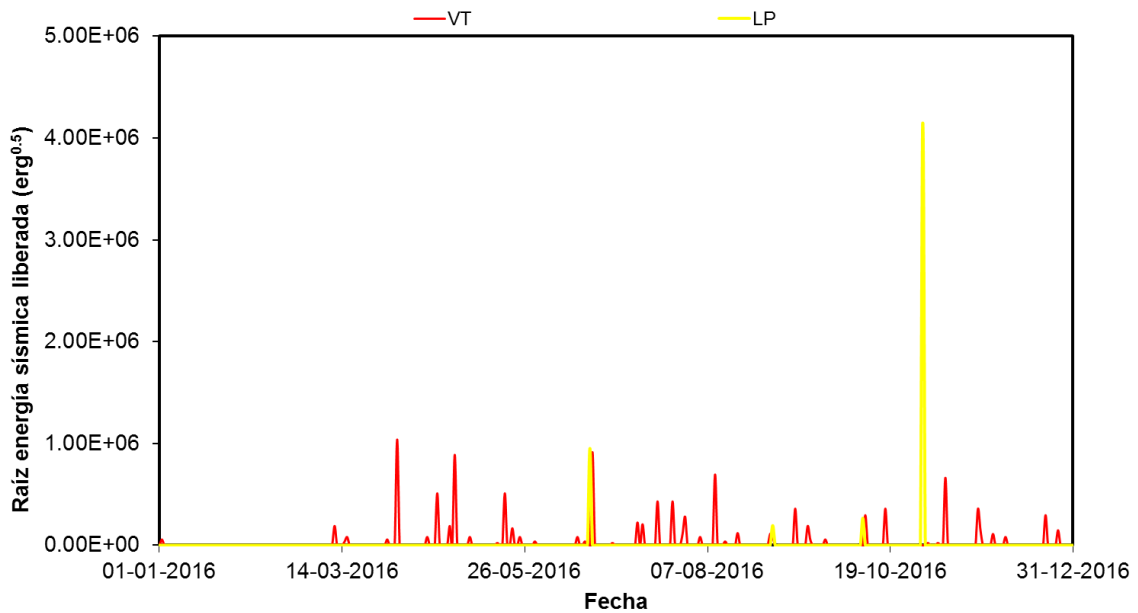


Figura 67. Raíz de la energía diaria liberada en el Volcán Nevado del Tolima durante el año 2016.

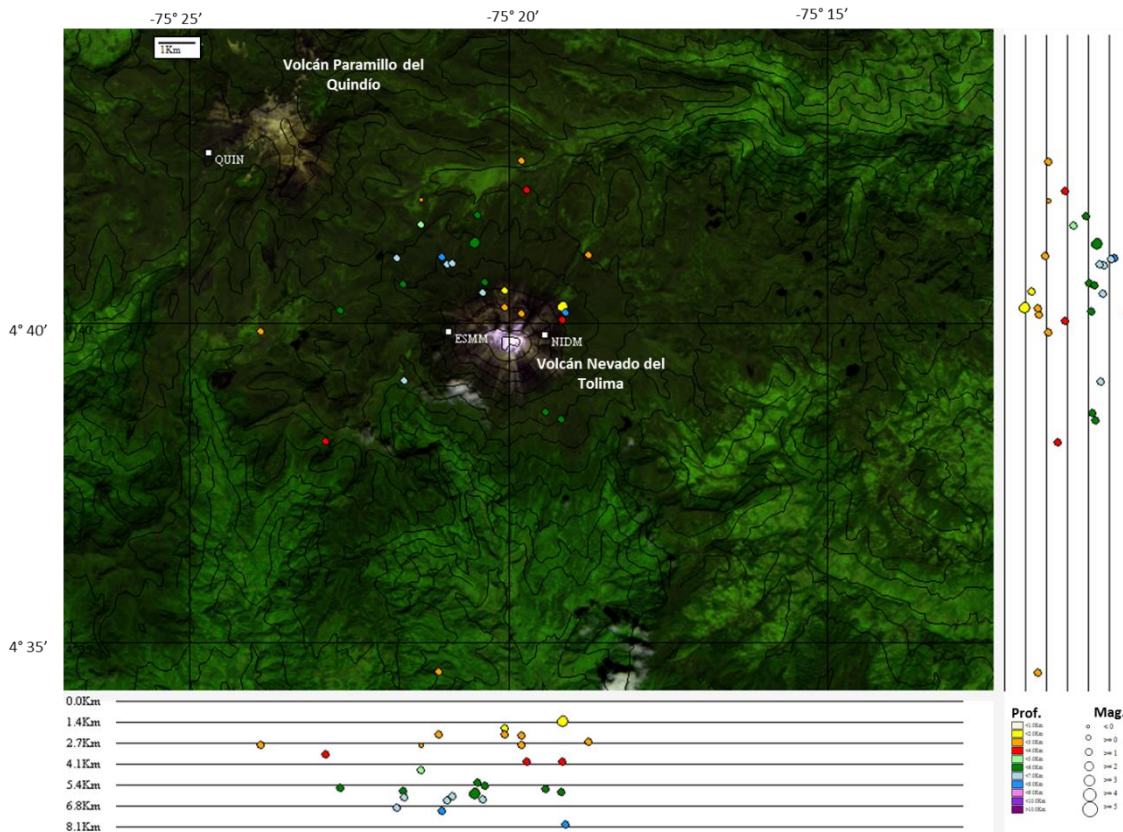


Figura 68. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores), registrados en el VNT durante el año 2016. Los cuadros negros representan las estaciones sismológicas.

2.2.1 Sismos de Largo Periodo (LP)

Durante el 2016 en el VNT se presentaron 10 eventos tipo LP, relacionados con la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos. Estas señales presentaron bajo nivel energético durante el 2016 (Figura 101). El LP de mayor energía sísmica liberada se registró el 10 de Abril a las 15:33 (Hora Local) con una duración de 8 s.

2.2.2 Señales asociadas a la actividad glaciar

Durante todo el año se registraron señales asociadas a pequeñas avalanchas de roca y/o hielo-nieve, producidas por el fenómeno de deshielo en la parte alta del volcán, debido a la dinámica natural del casquete glaciar y a las variaciones en las temperaturas y al régimen pluviométrico en la zona.

2.3 DEFORMACIÓN

Durante el 2016 funcionó correctamente el inclinómetro electrónico ESME. El inclinómetro electrónico LMAR estuvo fuera de operación. La Figura 69 muestra la red de deformación del VNT.

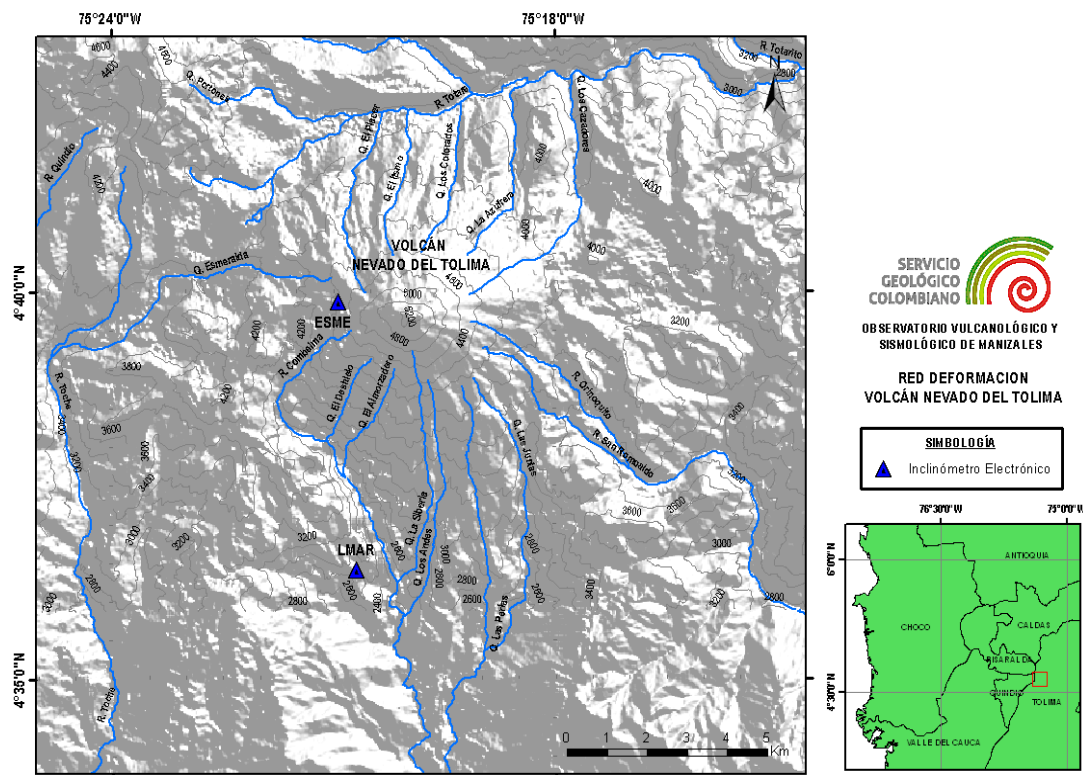


Figura 69. Red de deformación del Volcán Nevado del Tolima.

2.3.1 Inclinometría electrónica

El inclinómetro electrónico ESME registró en la componente Norte un proceso deformativo durante Febrero de 2016, el cual retornó a su nivel anterior en Julio de 2016 y desde entonces mantuvo estabilidad (Figura 70).

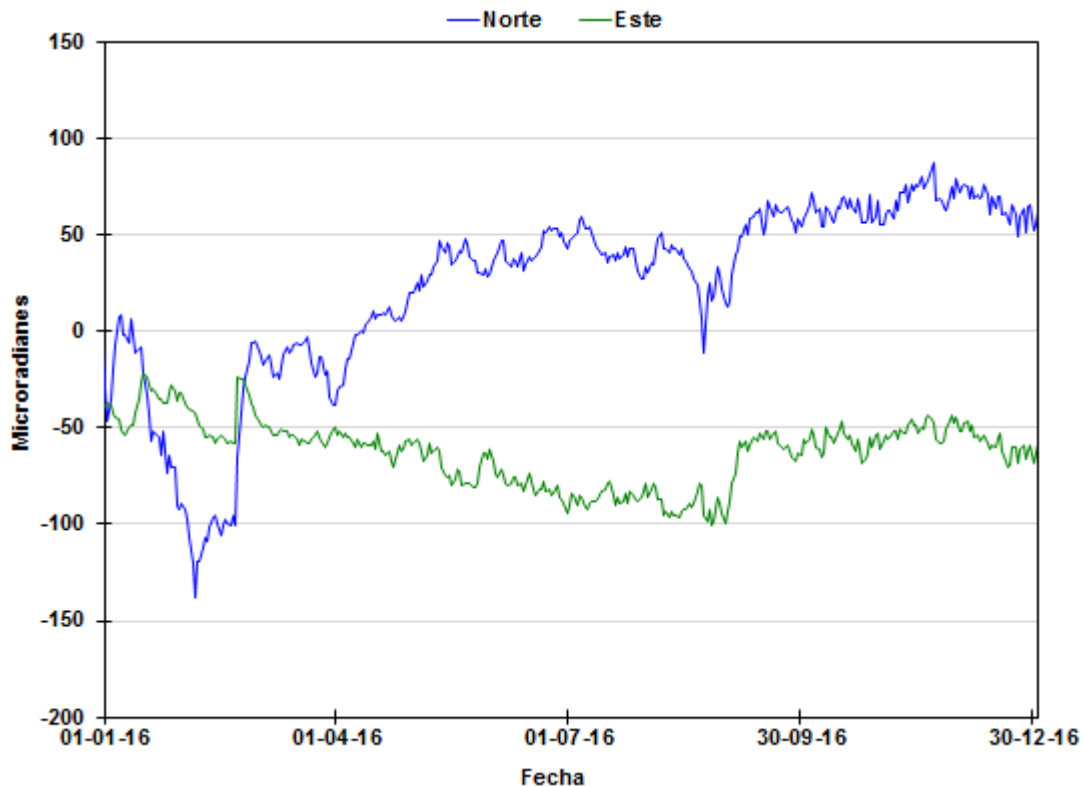





Figura 70. Comportamiento de las componentes Norte y Este del inclinómetro electrónico ESME, de la red de deformación del VNT durante 2016.

2.4 GEOQUÍMICA

Los días 23 y 24 de Agosto del 2016 se realizó una comisión al Volcán Nevado del Tolima, con el fin de realizar reconocimiento, medidas in situ y muestreo de los manantiales termales aledaños al Volcán. Los parámetros Físicoquímicos fueron medidos con un equipo Multiparamétrico Thermo Scientific Orion star A325. En la Tabla 8 se presentan los valores de parámetros físicoquímicos y del contenido de iones mayoritarios en los manantiales termales.

Tabla 8. Parámetros Físicoquímicos y composición iónica manantiales termales Volcán Nevado del Tolima. 2016.

Fuente Termal	pH	T(°C)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	Cationes Mayores (mg/L)	Aniones Mayores (mg/L)

 <p>Cañón</p>	6,40	44,9	1820	Na^+ (151); Ca^{+2} (93,8) Si^{+4} (50,2)	Cl^- (35,1) ; SO_4^{-2} (629)
 <p>Tibio</p>	6,35	34,5	1520	Na^+ (87,9); Ca^{+2} (103 ; Si^{+4} (61,6)	Cl^- (34,5) SO_4^{-2} (4,81)
 <p>Aquilino</p>	6,44	27,1	1470	Na^+ (59,8); Ca^{+2} (131) Si^{+4} (47,6)	Cl^- (35) ; SO_4^{-2} (122)



3. VOLCÁN CERRO MACHÍN (VCM)

3.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año de 2016 fue del **71.4%**.

En el mes de Febrero se realizó mantenimiento general en la estación multiparamétrica CIMA (Figura 71) donde además se desinstaló el sensor de concentración de gas radón.



Figura 71. Estación multiparamétrica CIMA.

En el mes de Mayo se destaca la actualización instrumental de la estación sismológica de corto periodo SAN LORENZO (Figura 72), donde se retiraron los equipos de monitoreo analógicos y se reemplazaron por equipos digitales modernos.



Figura 72. Nuevo sismómetro de la estación SAN LORENZO.

En el mes de Junio se destacan la modernización de las telemetrías de varias estaciones, pasando de tecnologías digitales seriales a digitales IP. En la estación sismológica LAJAS se cambió el sensor de banda ancha por uno de corto periodo, se recuperó la telemetría de la estación sismológica de corto periodo SILENCIO (Figura 73) y se reubicó el sismómetro de la estación multiparamétrica CIMA (Figura 74).



Figura 73. Estación sismológica SILENCIO.



Figura 74. Nueva ubicación del sismómetro de CIMA.

En el mes de Julio se reinstaló la estación de medición de temperatura de aguas termales ESTATUAS (Figura 75).



Figura 75. Estación de medición de temperatura de aguas termales ESTATUAS.

En el mes de Agosto se realizaron mantenimientos correctivos, se recuperaron las telemetrías de las estaciones sismológicas SAN JUAN y ALEJANDRIA.

En el mes de Septiembre se destaca el mejoramiento de la instalación de los sensores de las estaciones sismológicas SANTA MARTA (Figura 76) y SILENCIO (Figura 77), donde se profundizo el nicho del sensor hasta 1.2 m. En el repetidor de CIELO ROTO (Figura 78) se instalaron sistemas de recepción para una estación de monitoreo del Volcán Paramillo del Quindío.



Figura 76. Mejoramiento de la instalación del sismómetro en la estación SANTA MARTA.



Figura 77. Mejoramiento de la instalación del sismómetro en la estación SILENCIO.

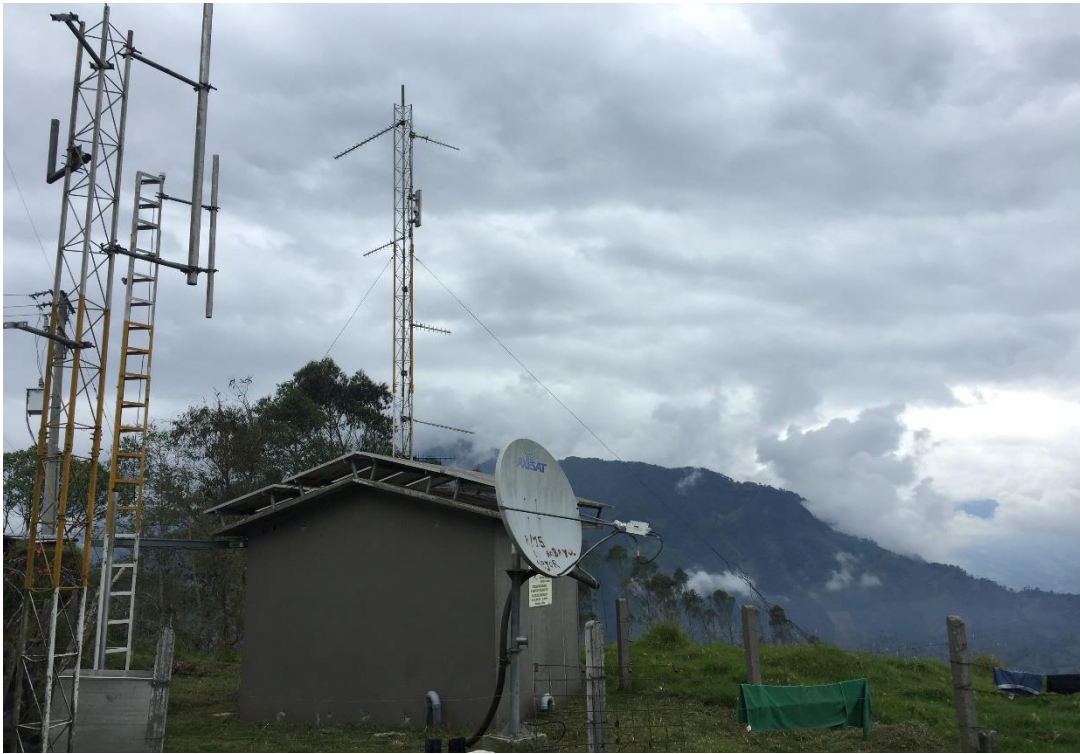


Figura 78. Estación repetidora CIELO ROTO.

3.2 SISMOLOGÍA

3.2.1 Sismos volcano-tectónicos

Durante el año 2016 la actividad sísmica del Volcán Cerro Machín fue principalmente de tipo volcano-tectónica, asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico; la red de estaciones sismológicas (Figura 79), registró un total de 1479 eventos de carácter volcano-tectónico (VT) (Figura 80). En general estos eventos sísmicos presentaron niveles bajos de energía (Figura 81); la actividad sísmica se localizó principalmente en el domo principal y al Suroccidente del mismo a profundidades que variaron entre 2.0 y 7.5 km, y en menor proporción hacia el sector Sur y Sureste a profundidades entre 2.5 y 13 km (Figura 82).

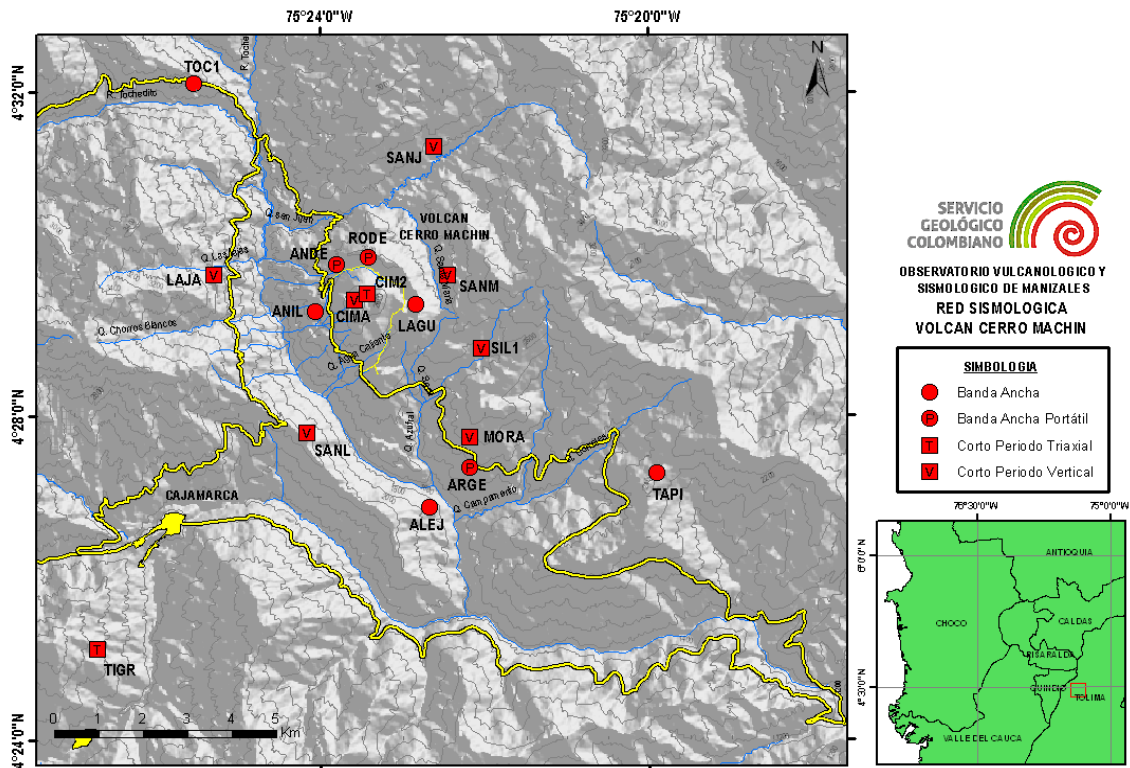


Figura 79. Red Sismológica. Volcán Cerro Machín.

La máxima magnitud registrada durante el año fue de 2.4 M_L (Magnitud Local), asociada a un sismo ocurrido el 09 de Junio (Figura 83) a las 19:47 (Hora Local), localizado al Sur-suroccidente del domo principal a 7.6 km de profundidad.

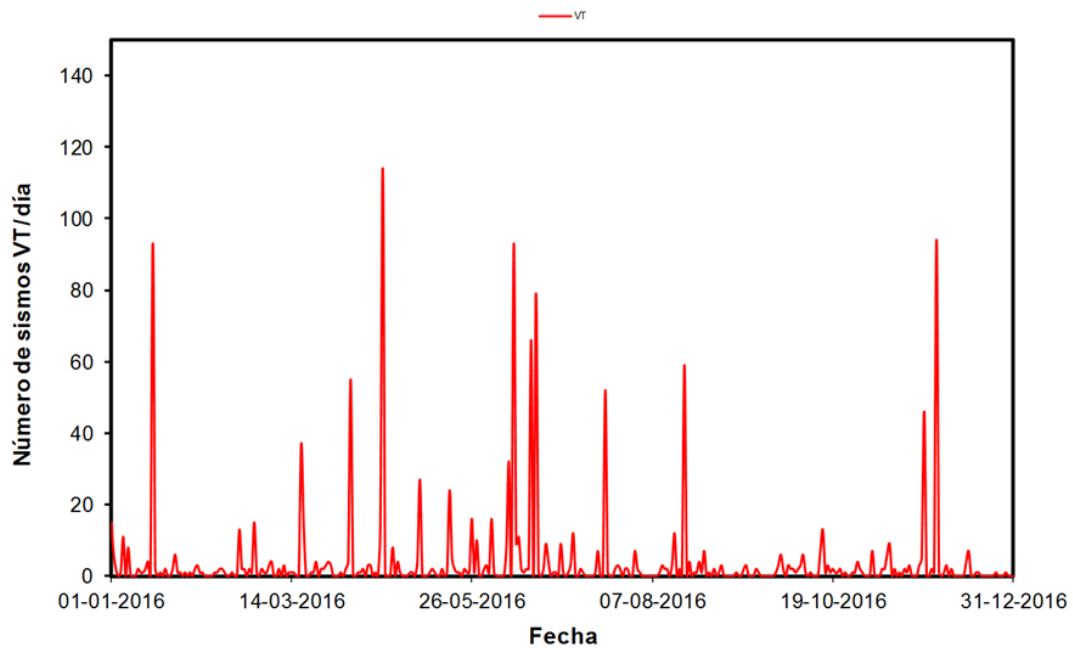


Figura 80. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Cerro Machín, Enero a Diciembre de 2016.

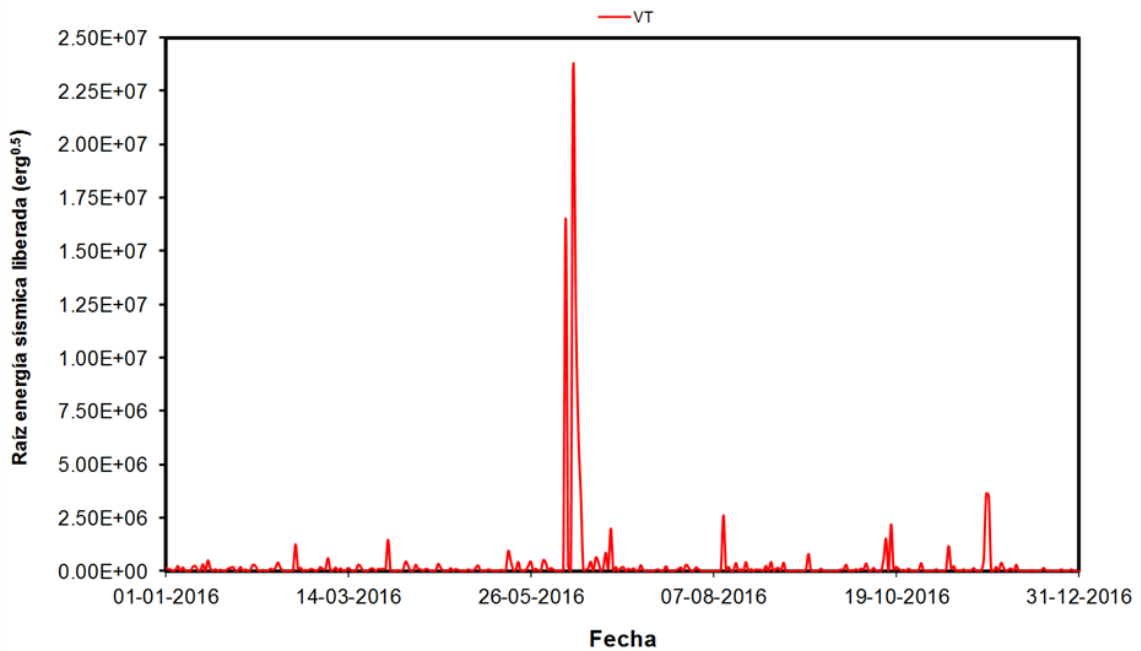


Figura 81. Raíz de la energía sísmica diaria liberada por el Volcán Cerro Machín, Enero a Diciembre de 2016.

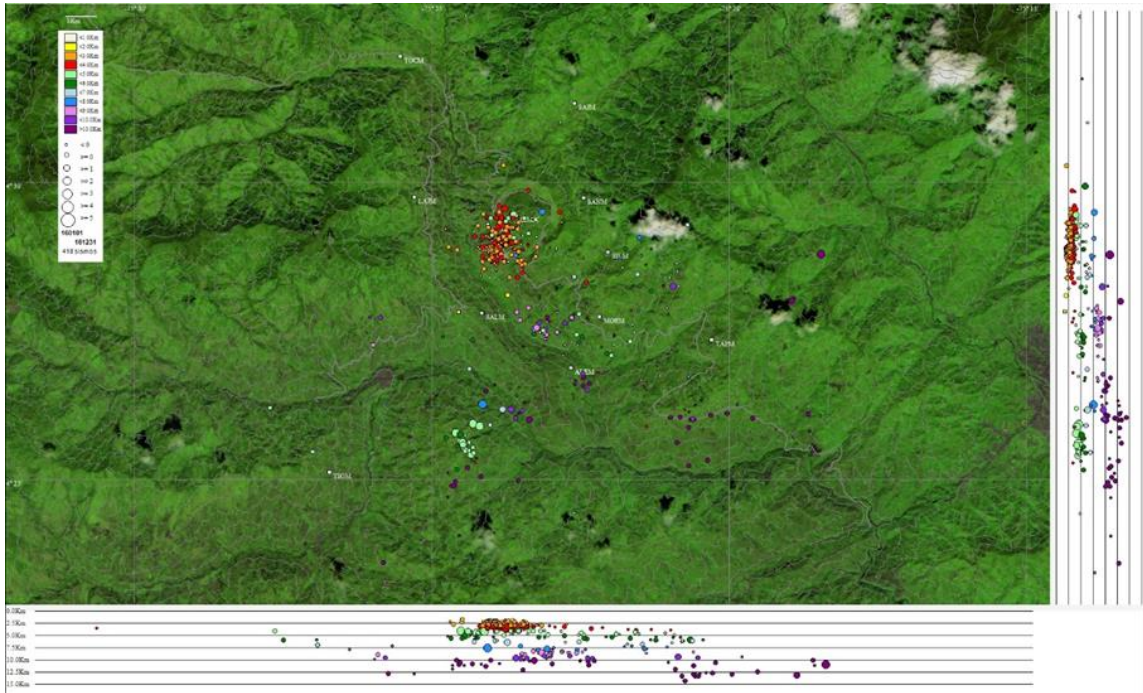


Figura 82. Localización hipocentral de sismos volcano-tectónicos en el Volcán Cerro Machín, año 2016, los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.

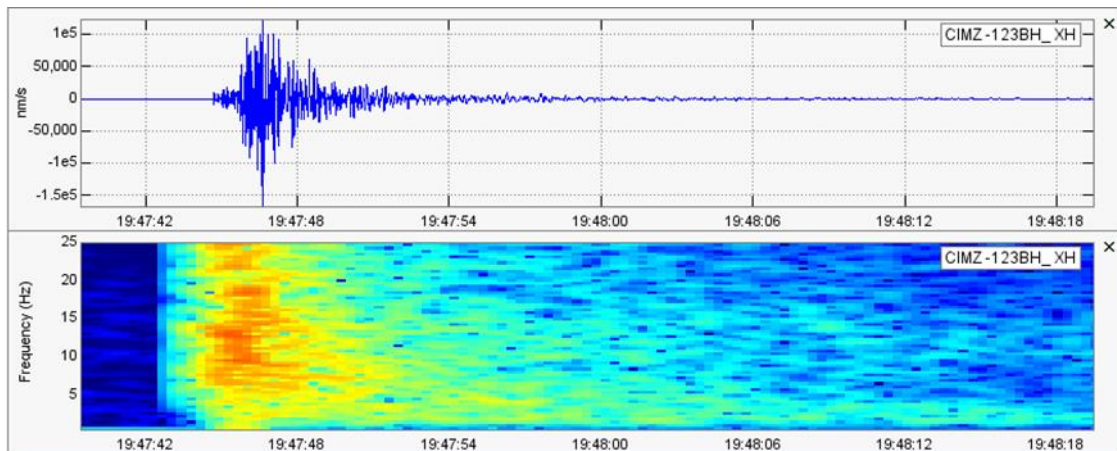


Figura 83. Registro sísmico y espectro asociado al sismo volcano-tectónico de mayor energía durante el año, registrado el día 09 de Junio a las 19:47 (Hora Local) en el VCM. El eje horizontal de la imagen es el tiempo (s) y el eje vertical es la amplitud en manómetros nm/s y la frecuencia (Hz).

3.3 OTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.3.1 Magnetometría

Durante el año 2016, el magnetómetro de la estación DOMO del Volcán Cerro Machín, continuó mostrando una tendencia hacia valores bajos con cambios periódicos en sus componentes, algunas de estas variaciones estuvieron asociadas con tormentas solares y alteraciones del campo magnético regional (Figura 84).

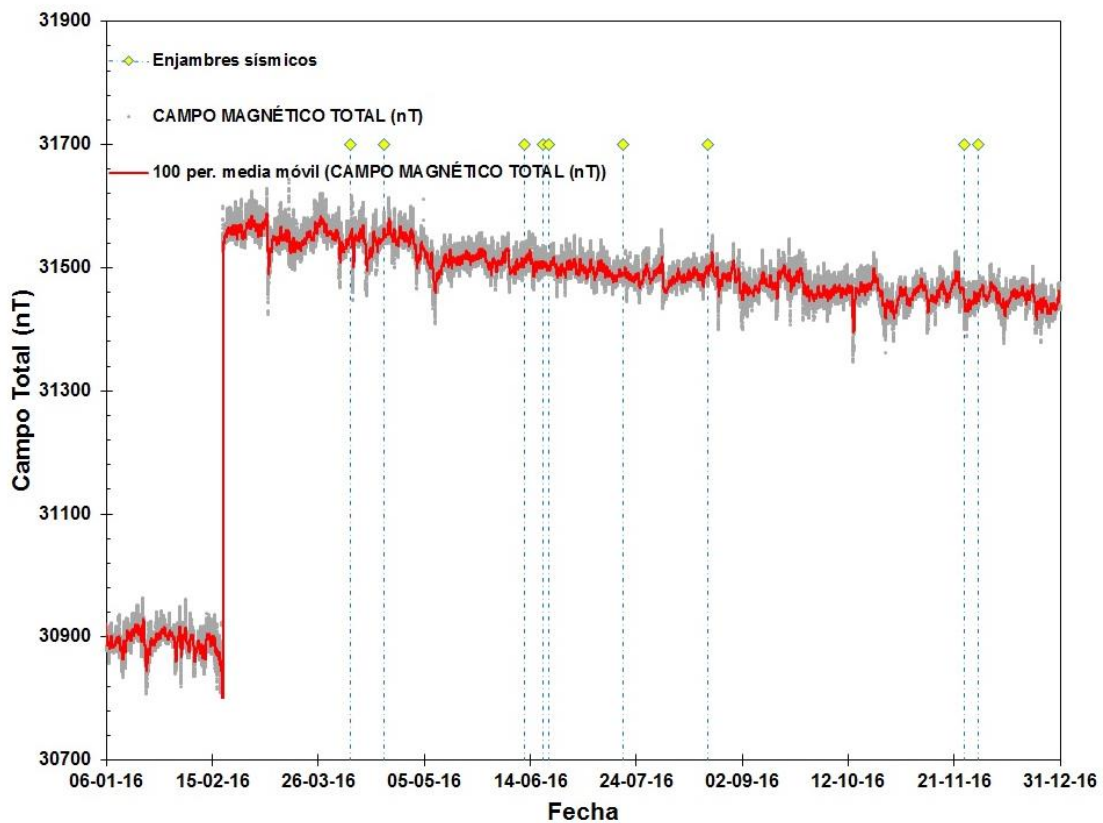


Figura 84. Variaciones del campo magnético en el Volcán Cerro Machín, Enero-Diciembre de 2016, Estación DOMO.

3.4 DEFORMACIÓN

Durante 2016 operaron correctamente las cinco estaciones GPS permanentes y los cinco inclinómetros electrónicos instalados en el volcán. La Figura 85 muestra la red de deformación del Volcán Cerro Machín.

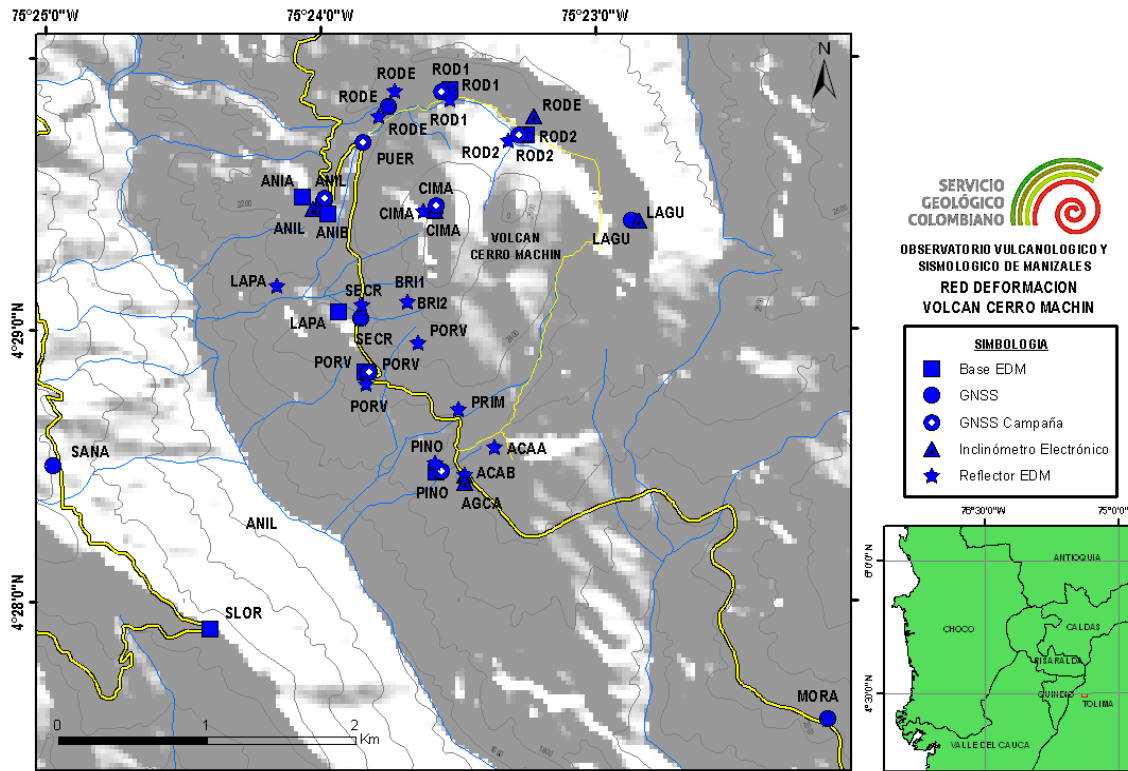


Figura 85. Red de deformación. Volcán Cerro Machín.

3.4.1 Inclínometría electrónica

El comportamiento de los inclinómetros electrónicos ANIL y RODE se caracterizaron por registrar pequeñas fluctuaciones (menores a $\pm 10 \mu\text{rad}$) y mostrar en general estabilidad en sus dos componentes. El inclinómetro CIMA registró un constante ascenso principalmente en la componente Norte y en menor proporción para la componente Este, registrando un cambio acumulado de 660 y 400 μrad para las componentes Norte y Este respectivamente desde Enero de 2012 hasta Mayo de 2016, fecha a partir de la cual mostró estabilidad (Figura 86). El inclinómetro LAGU registró varios picos

ascendentes y descendentes en la componente Norte de $\pm 40 \mu\text{rad}$ mientras que en la componente Este presentó aumentos graduales de $\pm 10 \mu\text{rad}$ (Figura 87). Este cambio puede estar relacionado con un proceso deformativo local.

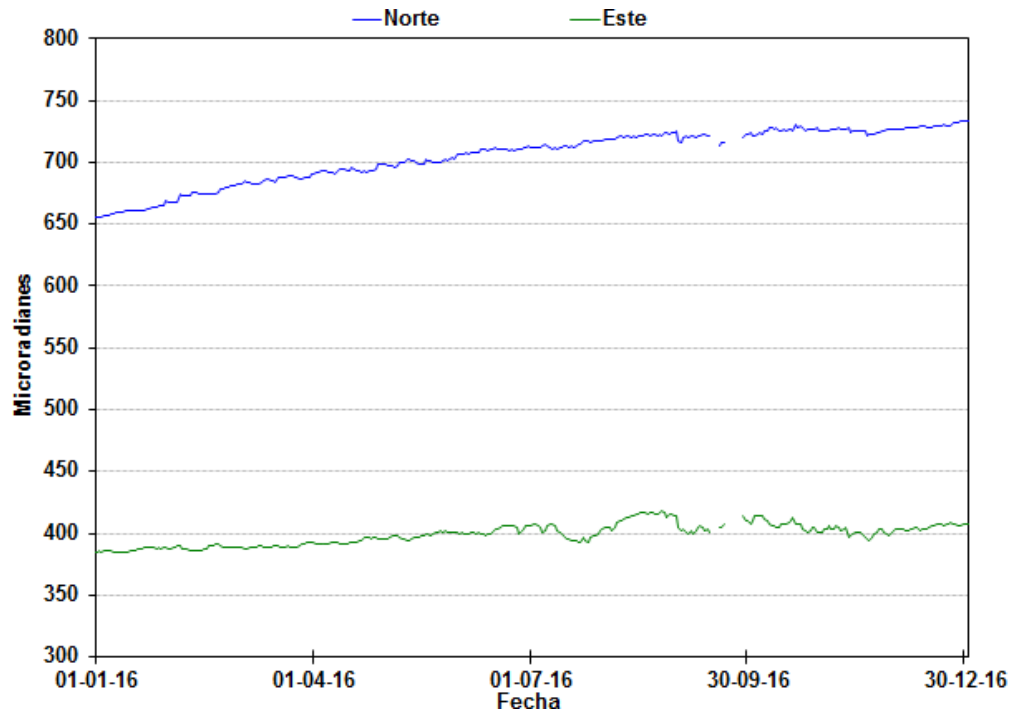


Figura 86. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Verde) del inclinómetro electrónico CIMA, de la red de deformación del VCM durante 2016.

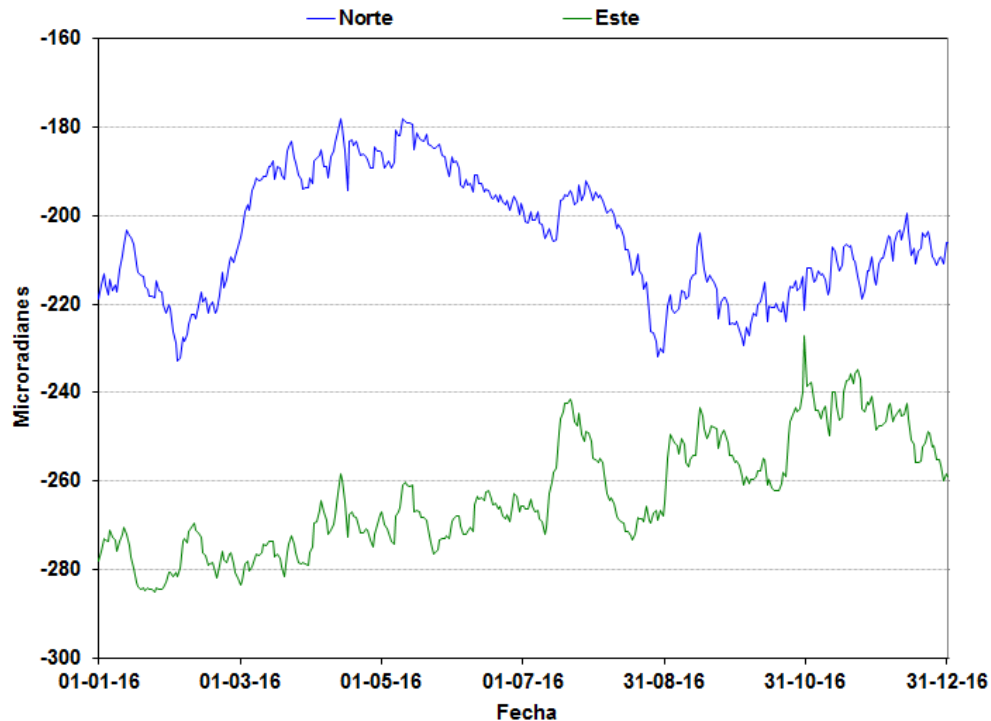


Figura 87. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Verde) del inclinómetro electrónico LAGU, de la red de deformación del VCM durante 2016.

3.4.2 Estaciones GNSS permanentes

Los datos de las estaciones GPS permanentes LAGU, MRAL, RODE, SANA y SECR fueron procesados con los programas Trimble 4DControl, fueron procesados de manera diferencial con el programa Trimble 4DControl y de manera absoluta por medio del servidor internacional CSRS (Sistema Canadiense de Referencia Espacial) y con el programa Gamit/Globk.

Todas las estaciones evidenciaron una correcta operación y un comportamiento de estabilidad en las componentes Norte, Este y Vertical (Figura 88 a y b).

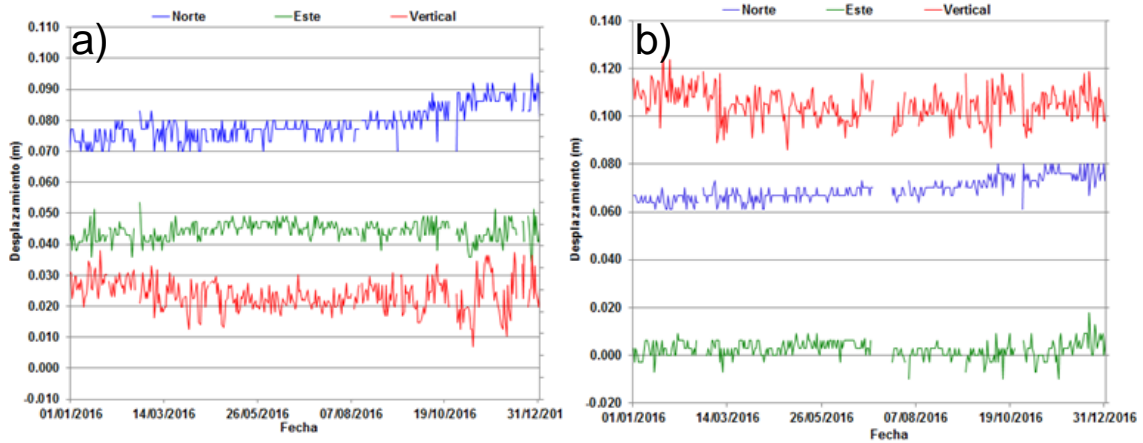


Figura 88. Comportamiento de las componentes Norte, Este y Vertical de la estación GNSS LAGU hasta Agosto de 2017.

3.5 GEOQUÍMICA

Durante el año 2016 el grupo de Geoquímica del OVSM realizó muestreos y análisis in situ de los nacimientos termales PISCINA, ESTATUAS, TOCHE y LAS DELICIAS. También se realizó monitoreo permanente de las estaciones de Gas Radón LAGUNA y ALEJANDRÍA, las otras dos estaciones AGUAS CALIENTES y CIMA presentaron problemas en su operatividad, por lo tanto no se presentan datos en este informe. En la Figura 89 se presenta el mapa con las estaciones de monitoreo geoquímico en el VNR.

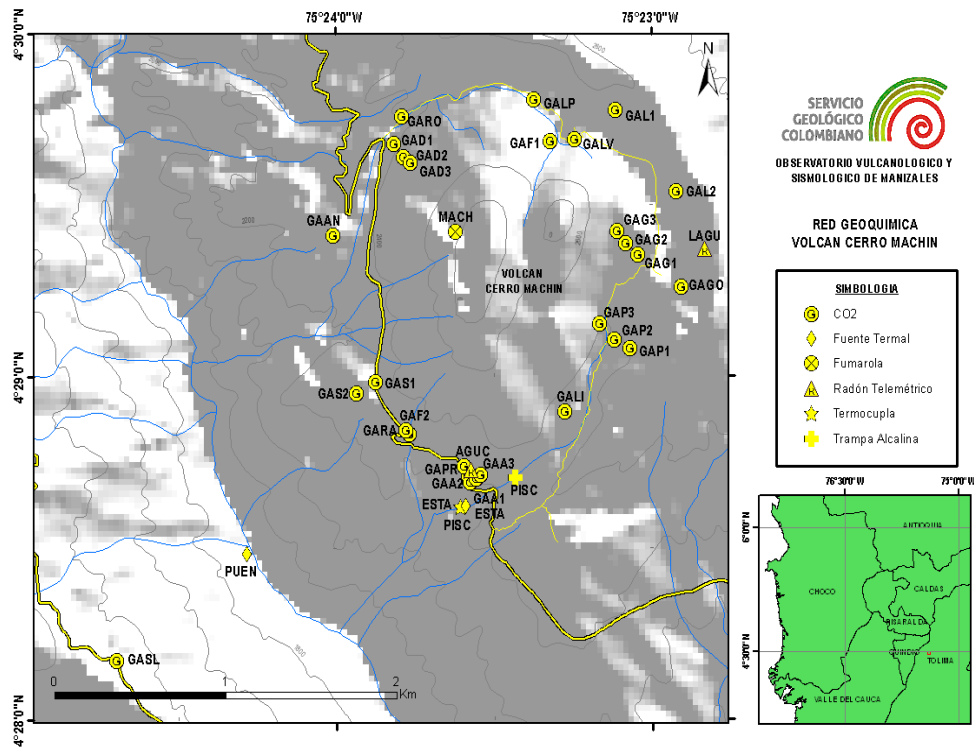


Figura 89. Red Geoquímica. Volcán Cerro Machín.

3.5.1 Fuentes Termales (FT)

Durante el 2016, se realizaron dos visitas al VCM para toma de muestras y datos fisicoquímicos in situ. De acuerdo a los datos obtenidos en campo se pudo establecer que la temperatura de los nacimientos termales mostró incremento respecto a los valores que se registraron en el 2015, la temperatura promedio medida en la FT PISCINA en los meses de Junio y Agosto fue de 77°C, en ESTATUAS fue de 92°C. Las FT LAS DELICIAS y TOCHE registraron menores valores en su temperatura, esto pudo ser debido a contacto con agua meteórica dado que están más expuestas a mezclas con aguas frías. Las variaciones mencionadas se pueden apreciar en la Figura 90.

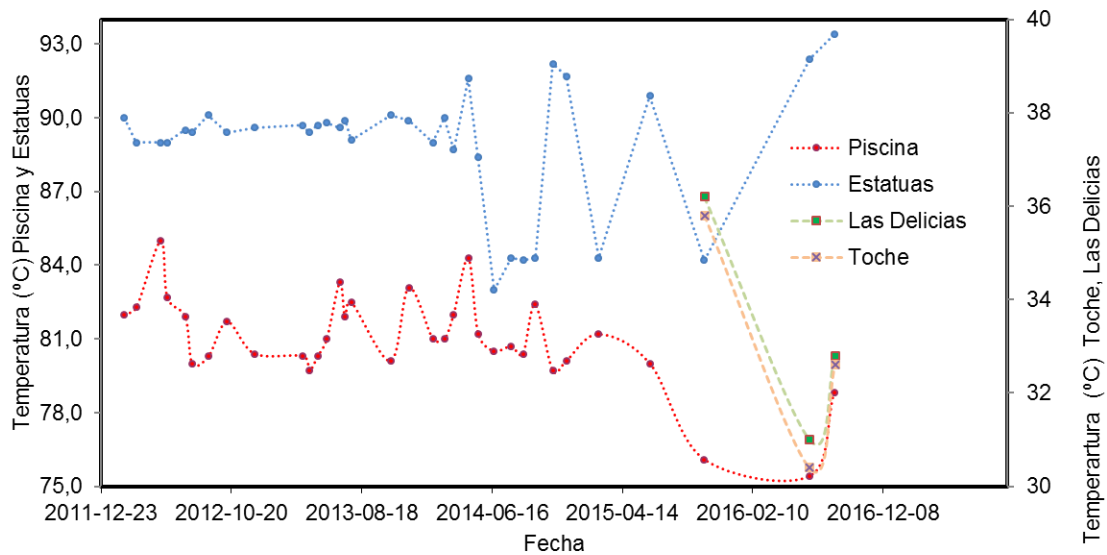


Figura 90. Variación de la Temperatura en Fuentes Termales: PISCINA, ESTATUAS, TOCHE, LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín. 2016.

En cuanto al potencial de Hidrógeno, los nacimientos termales presentaron estabilidad en su pH, el promedio de pH para PISCINA fue de 7.42 y para ESTATUAS 7.4. TOCHE y LAS DELICIAS presentaron pH de 6.5. En la Figura 91 se aprecia la variación con el tiempo del potencial de hidrógeno para éstos manantiales termales.

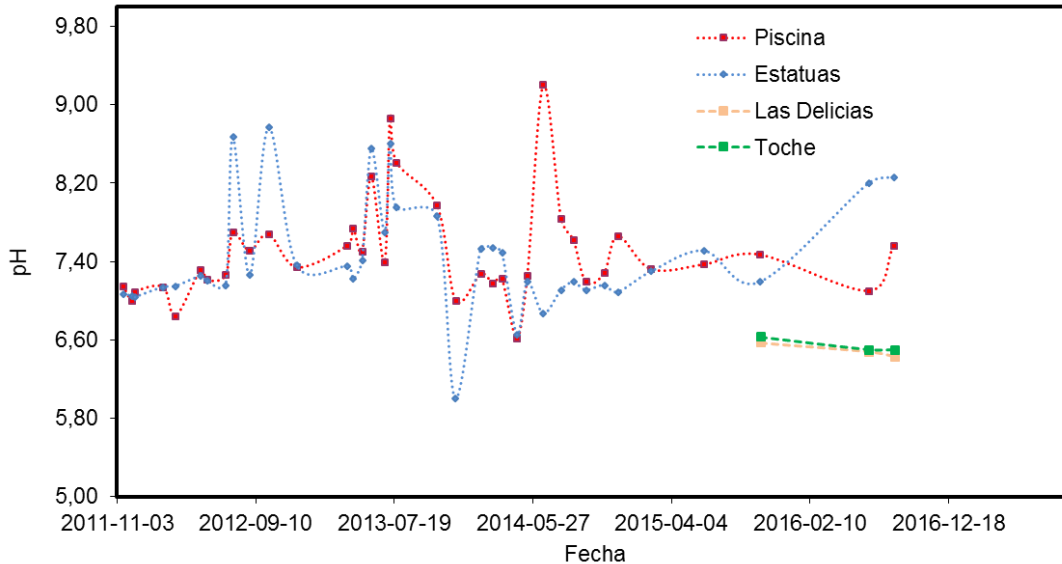


Figura 91. Variación del pH en Fuentes Termales: PISCINA, ESTATUAS, TOCHE, LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín. 2016.

La Conductividad Eléctrica de los manantiales termales se mantuvo estable en las medidas realizadas en el 2016, respecto a las medidas del año 2015. En la Figura 92 se aprecia el comportamiento de la conductividad eléctrica con el tiempo.

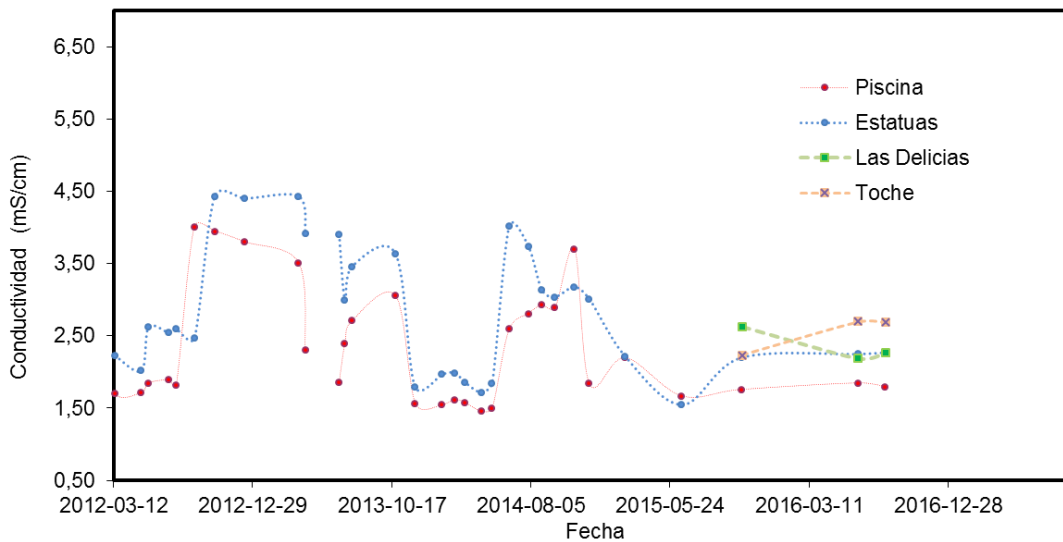


Figura 92. Variación del Conductividad Eléctrica en Fuentes Termales: PISCINA y ESTATUAS TOCHE, LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín. 2016.

3.5.2 Gas Radón

Durante el 2016 se realizó un monitoreo continuo de la desgasificación difusa de Gas Radón mediante las estaciones ALEJANDRÍA y LAGUNA (Figura 93), las dos estaciones mostraron estabilidad en sus datos durante todo el año.

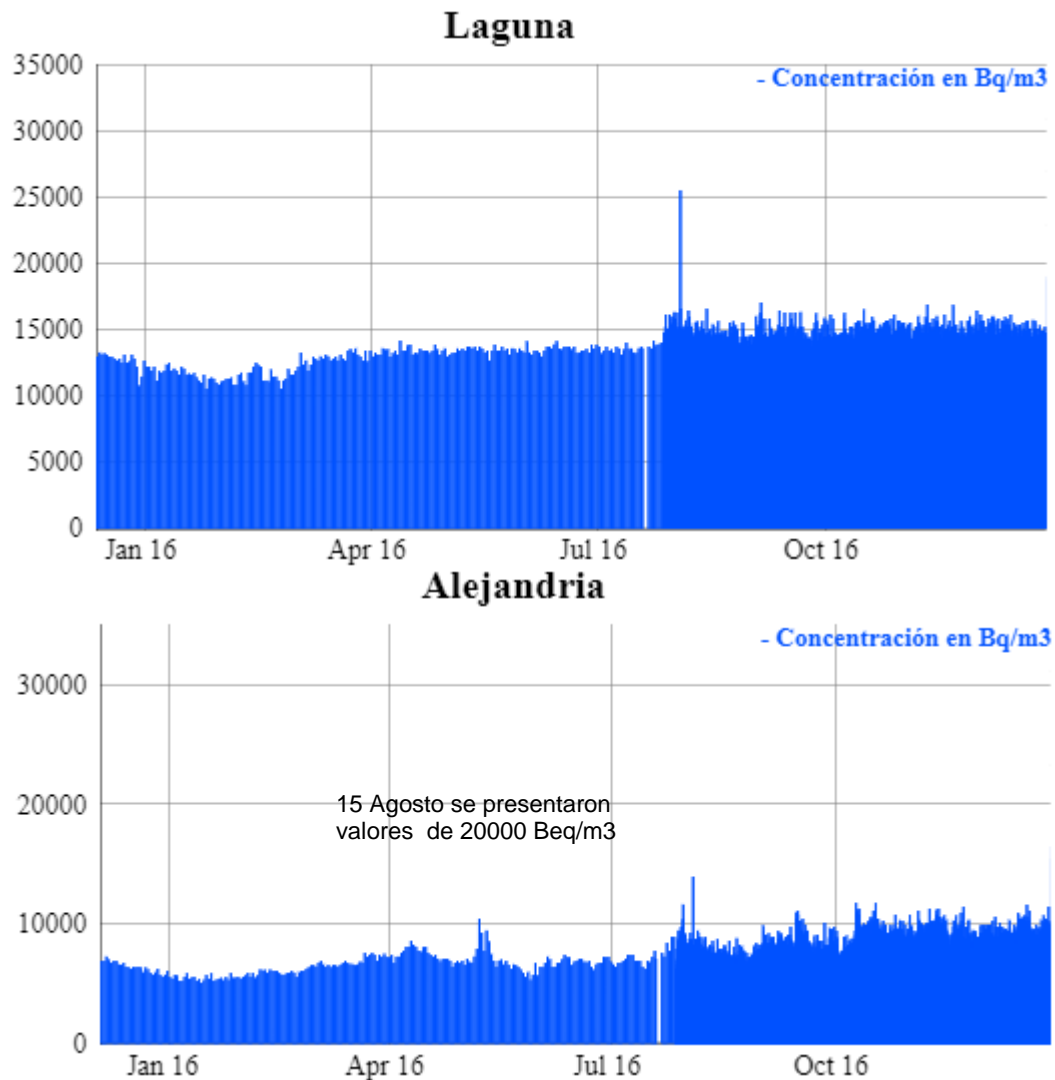


Figura 93. Comportamiento de las estaciones de Gas Radón ALEJANDRÍA y LAGUNA. Volcán Cerro Machín. 2016.

3.5.3 Termocupla FT ESTATUAS

El monitoreo continuo de la temperatura en la FT ESTATUAS se realizó mediante una termocupla instalada directamente en el manantial termal, en la Figura 94 se aprecia que la variación de la temperatura en el manantial termal en los meses de Abril y Mayo fue muy altas, se registraron temperaturas 20°C por debajo de la temperatura habitual del termal, esto fue debido a que la termocupla estuvo en contacto con la Quebrada Aguas Calientes, por ello se decidió desinstalarla desde el 5 de Mayo hasta el 23 de Junio para realizar mantenimiento. En general los valores de temperatura oscilaron entre 84 y 86°C.

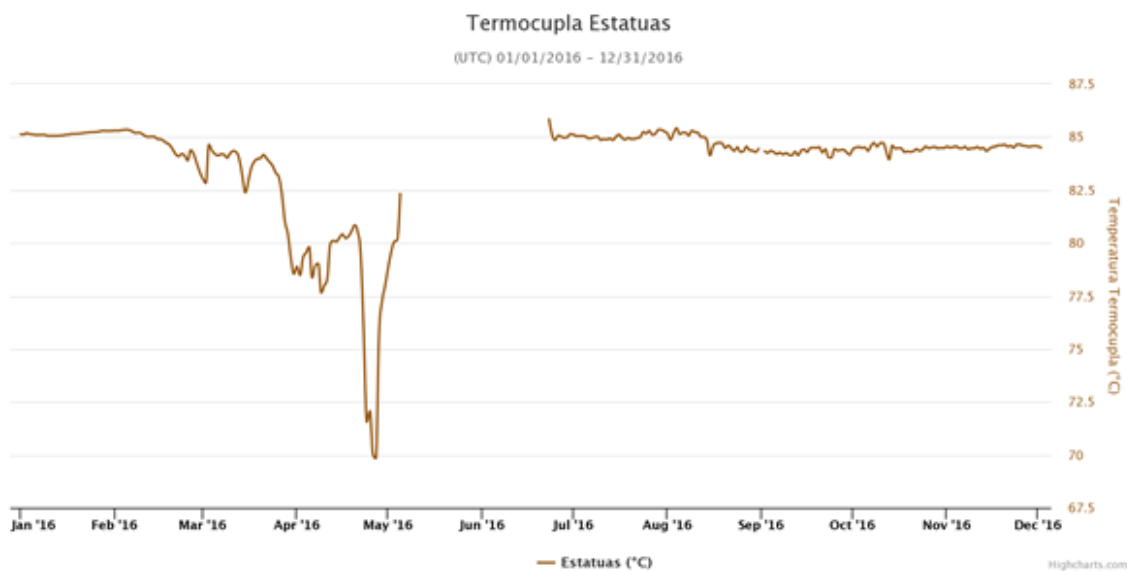


Figura 94. Monitoreo Telemétrico de la Temperatura en la Fuente Termal ESTATUAS. Volcán Cerro Machín. 2016.

3.5.4 Gases en botellas de Giggenbach

En el 2016 se realizó monitoreo de gases en la Fumarola LA MACHA, en la Tabla 9 se presentan las fechas y contenido de gases secos de las muestras analizadas, en la Figura 95 se aprecia que el gas es altamente rico en especies de CO₂, no se presenta contenido de especies azufradas (los números 1 y 2 corresponden a los meses de monitoreo, Junio y Agosto respectivamente).

Tabla 9. Datos de Gases en Fumarola LA MACHA (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Cerro Machín. 2016.

Fecha	% CO ₂	% SO ₂	% H ₂ S	% HCl	s _t /HCl
22/06/2016	98,47	0,48	-0,22	1,26	0,18
18/08/2016	97,55	0,68	-0,35	2,12	0,14

Fumarola La Macha (%Molar en Base Seca)

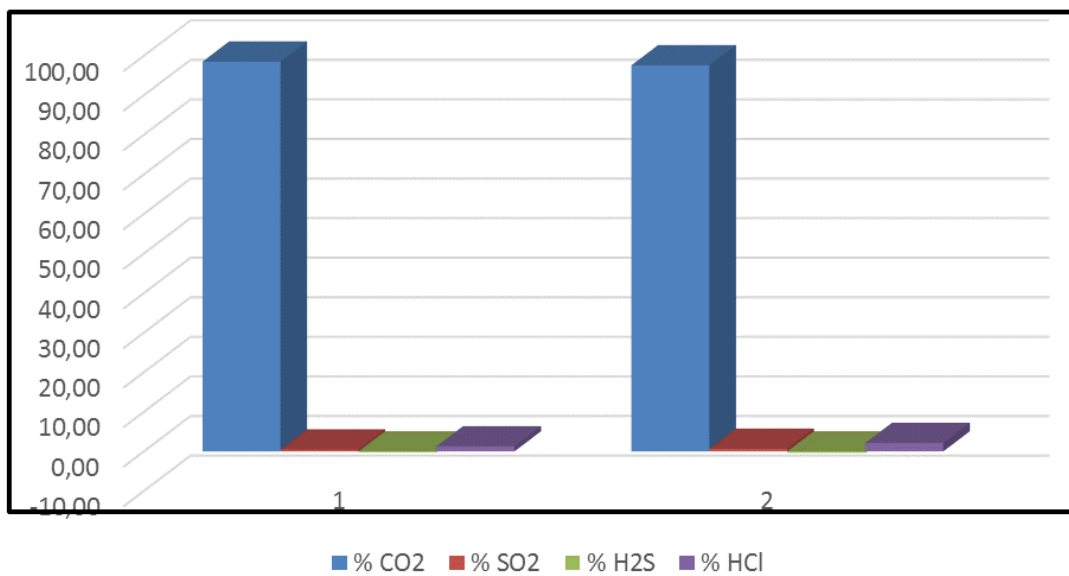


Figura 95. Variación del contenido de gases en Fumarola LA MACHA. Volcán Cerro Machín. 2016.



4. VOLCÁN CERRO BRAVO (VCB)

4.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año 2016 fue del **73.5%**.

En el mes de Enero se destaca la re-instalación de la estación multiparamétrica CERRO BRAVO (Figura 96), la cual además fue modernizada con un digitalizador moderno de 24 bits. Los equipos analógicos fueron desinstalados.



Figura 96. Estación multiparamétrica CERRO BRAVO.

En el mes de Marzo se realizaron mantenimientos preventivos y correctivos, donde se destaca la instalación de un sistema automático de reseteo desarrollado internamente

(Figura 97) en la estación sismológica BRASIL, la función del sistema es detectar cuando una estación ha perdido su telemetría para intentar recuperarla mediante el reinicio de su transmisor.



Figura 97. Circuito de Control Automático de Encendido.

Durante el mes de Abril se realizó la actualización instrumental de la estación sismológica SIBERIA, la cual ahora cuenta con un digitalizador de 24 bits y telemetría digital IP.

En el mes de Junio se destaca el cambio de sismómetro en la estación LA SIBERIA (Figura 98) debido a que dos de sus componentes no registraban de manera correcta.



Figura 98. Nuevo sismómetro de la estación LA SIBERIA.

En el mes de Octubre se destaca la actualización instrumental de la estación multiparamétrica CERRO BRAVO (Figura 99), donde se cambió el sismómetro de corto periodo pasivo por uno activo con una mejor curva de respuesta para el rango de frecuencias de interés.



Figura 99. Sismómetro de corto periodo pasivo (izquierda) y sismómetro de corto periodo activo (derecha) en la estación multiparamétrica CERRO BRAVO.

4.2 SISMOLOGÍA

En el año 2016, el Volcán Cerro Bravo presentó un nivel de actividad bajo. La red de estaciones sismológicas instalada en el volcán (Figura 100), registró un total de 36 señales sísmicas asociadas a procesos volcánicos y a eventos de movimientos en masa.

4.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

Con respecto a la actividad sísmica relacionada con el fracturamiento de roca al interior de la estructura volcánica, se registraron un total de 9 sismos tipo VT de baja magnitud (Figura 101 y Figura 102). El evento de mayor magnitud se presentó el 22 de Agosto a las 23:10 (Hora Local), con una magnitud de 0.7 M_L (Magnitud Local), localizado a ~3.0 km al Suroccidente de la cima del volcán, a una profundidad de 3.8 km.

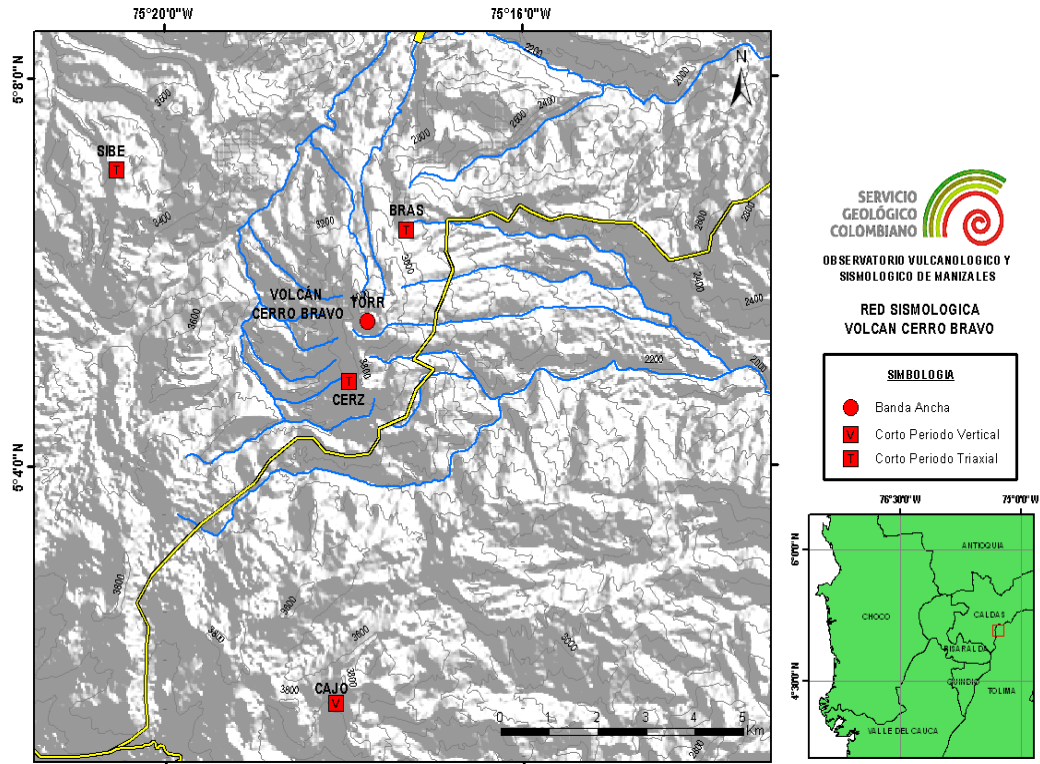


Figura 100. Red Sismológica. Volcán Cerro Bravo.

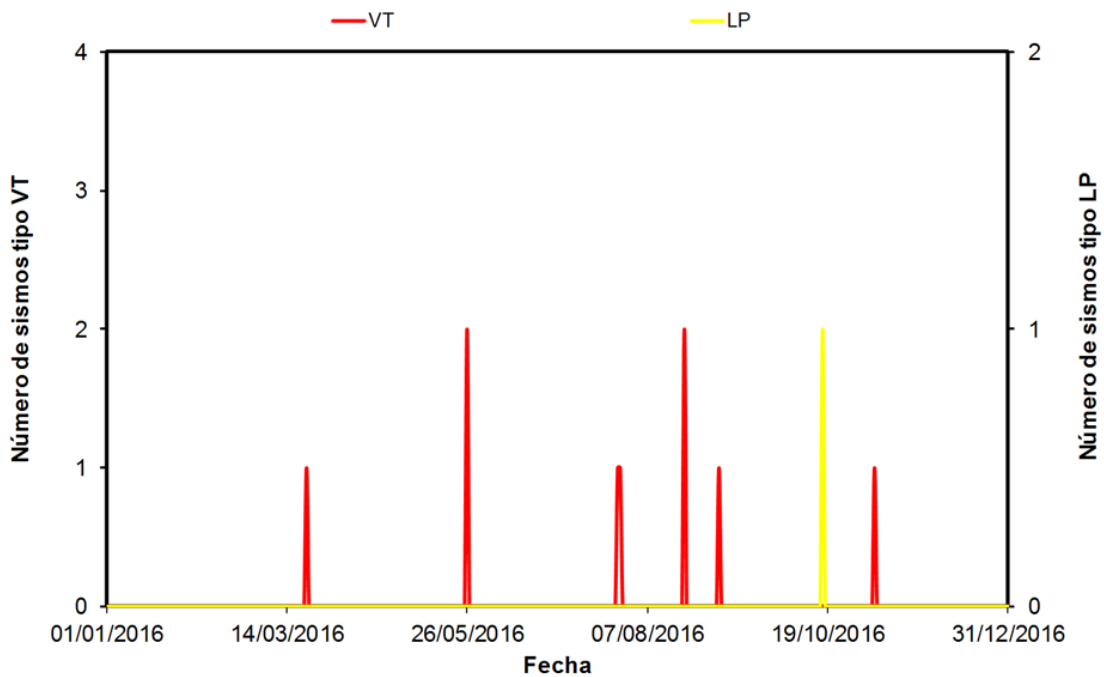


Figura 101. Número diario de eventos sísmicos registrados en el Volcán Cerro Bravo, durante el año 2016.

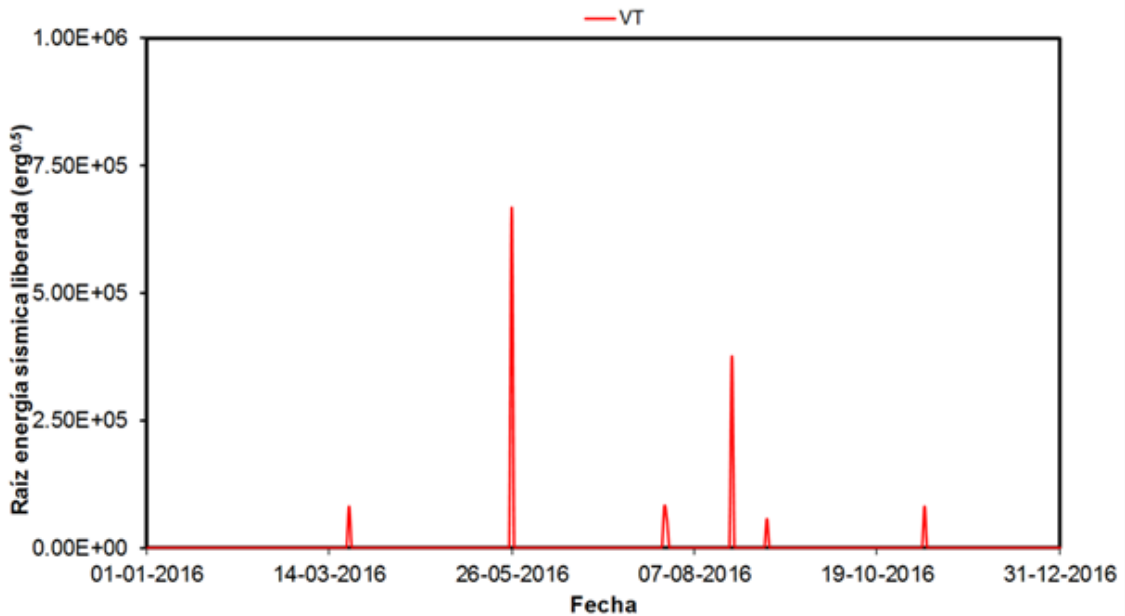


Figura 102. Número diario de eventos sísmicos registrados en el Volcán Cerro Bravo, durante el año 2016.

4.2.2 Sismos de Largo Período (LP)

Durante el 2016 en el VCB se presentó un único evento tipo LP, relacionado con la dinámica de fluidos al interior de las cavidades y conductos volcánicos (Figura 101). Esta señal tuvo un bajo nivel energético y se registró el 17 de Octubre a las 22:36 (Hora Local) con una duración de 58 s.

4.2.3 Señales asociadas con una actividad superficial

Se registraron 26 señales sísmicas asociadas a pequeñas avalanchas y desprendimientos de bloques y rocas en el área del volcán, siendo la más energética la ocurrida el 11 de Julio con una duración fue de 83 s.

4.3 DEFORMACIÓN

Durante 2016 operó correctamente el inclinómetro electrónico CBRA. La Figura 103 muestra la red de deformación del Volcán Cerro Bravo.

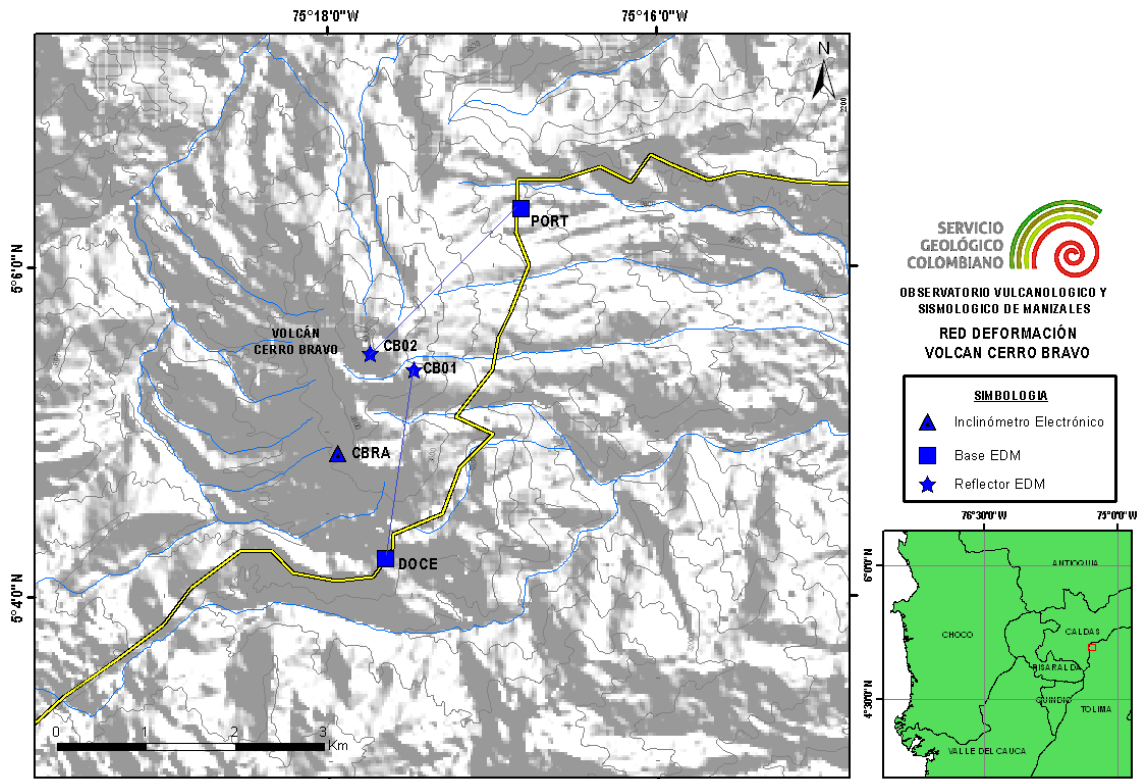


Figura 103. Red de deformación del Volcán Cerro Bravo.

4.3.1 Inclinometría electrónica

El comportamiento del inclinómetro electrónico CBRA se caracterizó por mostrar estabilidad. (Figura 104).

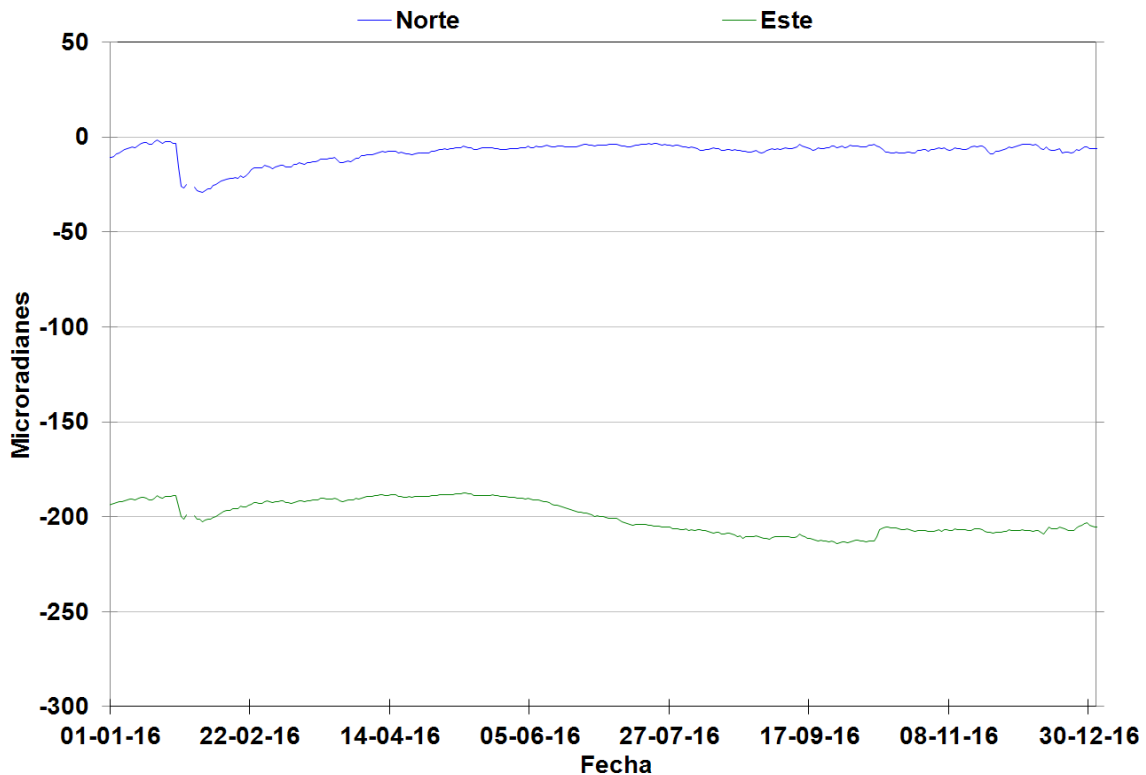


Figura 104. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Verde) del inclinómetro electrónico CBRA, de la red de deformación del Volcán Cerro Bravo durante 2016.

5. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA (VPSR)

5.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año de 2016 fue del **71.6%**.

En el mes de Marzo se cambió la topología de la red de monitoreo conformada por las estaciones sismológica AFRICA (Figura 105), GPS de OTUN y sismológica PARAMILLO, las cuales ahora cuentan con telemetría digital IP.



Figura 105. Estación de banda ancha AFRICA.

En el mes de Junio se llevó a cabo la instalación de un receptor GNSS en la estación sísmológica EL AGUILA (Figura 106), la cual pasó a ser multiparamétrica.



Figura 106. Estación multiparamétrica EL AGUILA.

Julio, No se realizaron tareas de mantenimiento preventivo ni correctivo en este periodo.

En el mes de Agosto se realizó la instalación de un receptor GNSS en la estación sismológica PARAMILLO.

En el mes de Noviembre se destaca la caída de una descarga eléctrica en la estación multiparamétrica PARAMILLO (Figura 107) que dañó el recientemente instalado equipo GNSS. Solo se restableció la funcionalidad de la estación como repetidora de la estación sismológica AFRICA.



Figura 107. Estación multiparamétrica PARAMILLO.

5.2 SISMOLOGÍA

Durante el año 2016, el Volcán Paramillo de Santa Rosa (VPSR) presentó actividad sísmica de baja energía asociada a fracturamiento de roca. La sismicidad, mostró un incremento en el número y energía de los sismos registrados a lo largo del año 2016.

5.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

La red de estaciones sismológicas (Figura 108) registró 534 eventos sísmicos tipo VT en el VPSR, la mayoría de ellos de baja energía (Figura 109 y Figura 110). Este número representa un aumento importante con respecto al total registrado durante el año 2015. Esta sismicidad se localizó principalmente en el sector Norte a Nororiente del edificio volcánico. Las profundidades de estos eventos oscilaron entre 1.8 y 10 km.

La tasa diaria de sismicidad, en general, se mantuvo muy baja. La mayor liberación de energía, se produjo el día 10 de Febrero de 2016, con el registro de un VT de magnitud 2.7 M_L (Magnitud Local) a las 00:58 (Hora Local) y profundidad de 6.7 km; catalogado como el de mayor magnitud durante el año 2016. No se presentaron enjambres sísmicos.

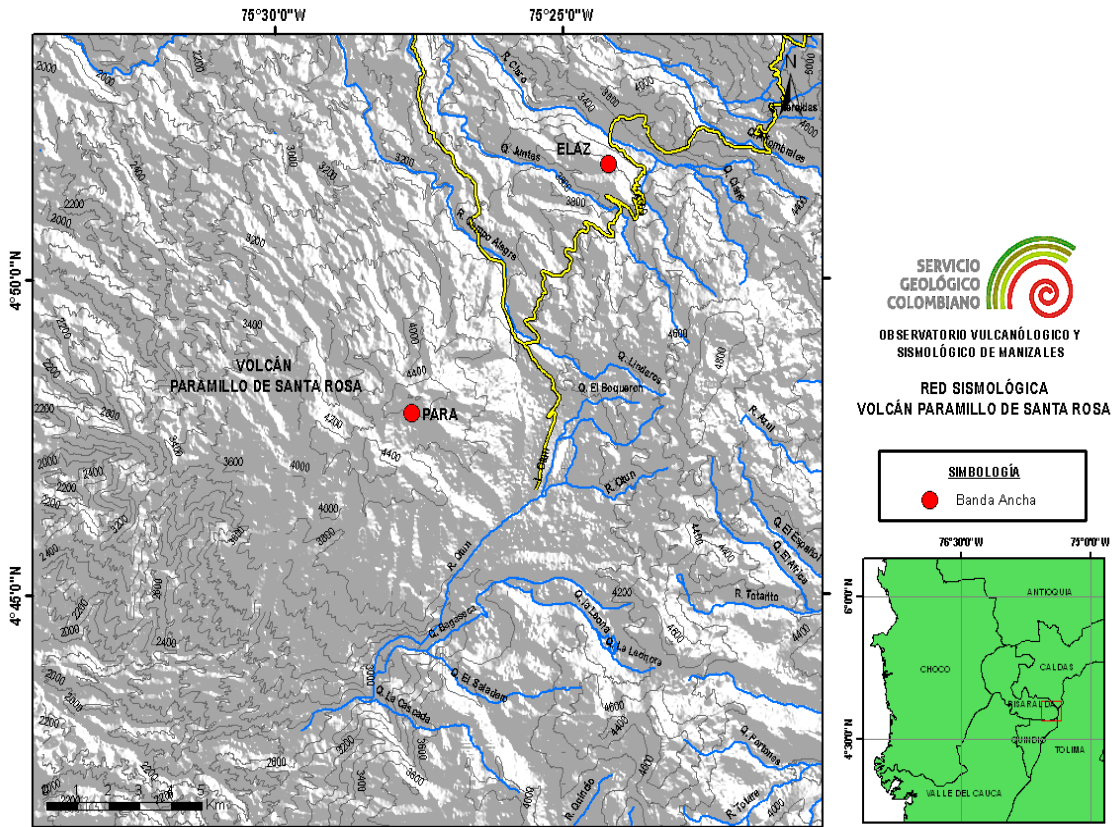


Figura 108. Red Sismológica. Volcán Paramillo de Santa Rosa.

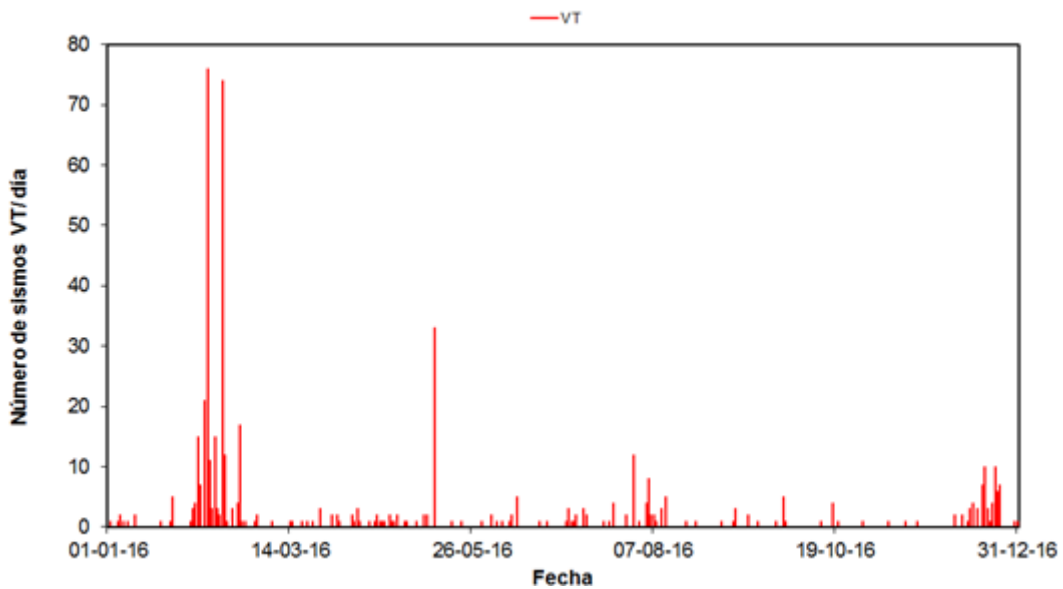


Figura 109. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el año 2016 en el VPSR.

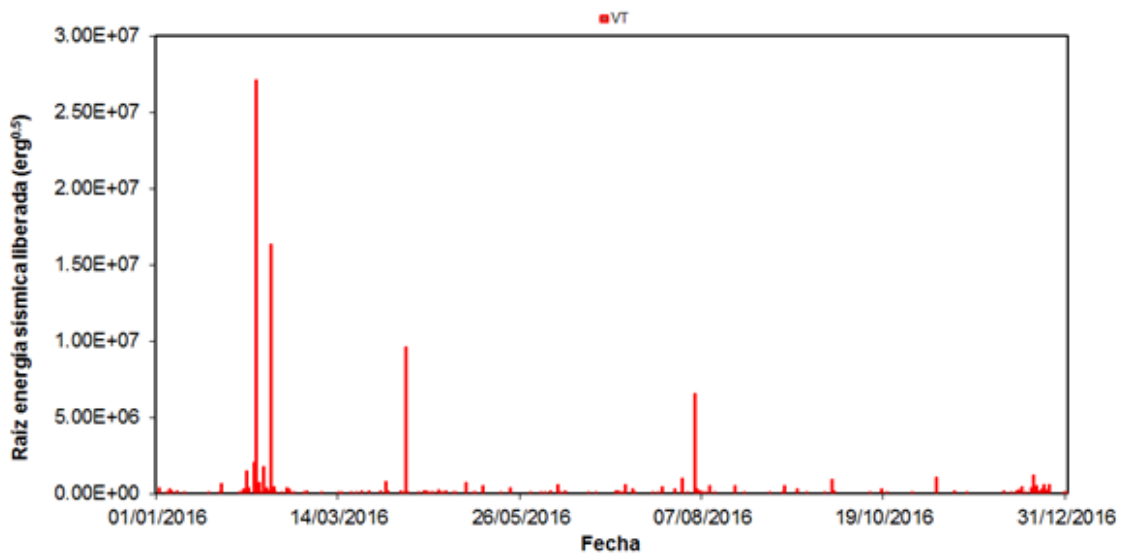


Figura 110. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el año 2016, en el VPSR.

Estos sismos se localizaron principalmente al Norte y Noroccidente del edificio volcánico. Las profundidades de estos eventos oscilaron entre 2.0 y 10 km (Figura 111).

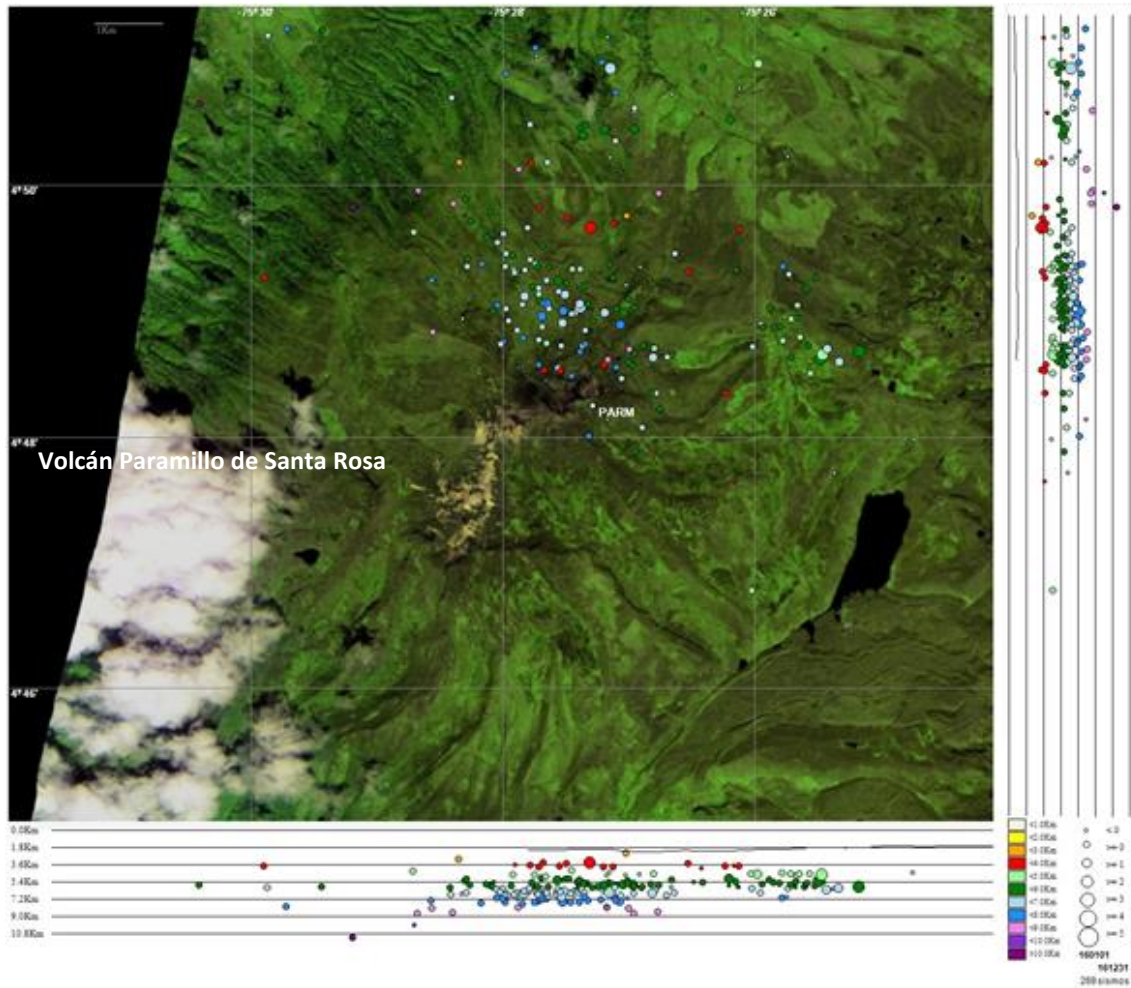


Figura 111. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPSR, durante el año 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.

5.3 GEOQUÍMICA

En los meses de Mayo y Octubre del 2016 se realizó una visita a los manantiales termales aledaños a los Balnearios SAN VICENTE (SV), SANTA ROSA (SR) y SANTA ELENA (SE) pertenecientes al Volcán Paramillo de Santa Rosa.

5.3.1 Manantiales termales SAN VICENTE

En el Balneario SAN VICENTE se realizó monitoreo de 5 nacimientos termales (SVP5, SVP7, SVP8, SVP9 y SVP10), en general el comportamiento fisicoquímico de las aguas provenientes de los manantiales termales fue estable respecto a la última medida del 2015. En la Figura 112 se aprecia como la temperatura varió en ± 2 grados, excepto para el punto SVP10 en donde la variación fue de más de 10°C , esto pudo ser debido a que el punto de monitoreo en la medida del mes de Mayo tuvo que cambiar debido a que no se tuvo acceso, para el mes de Octubre se logró medir en el antiguo punto.

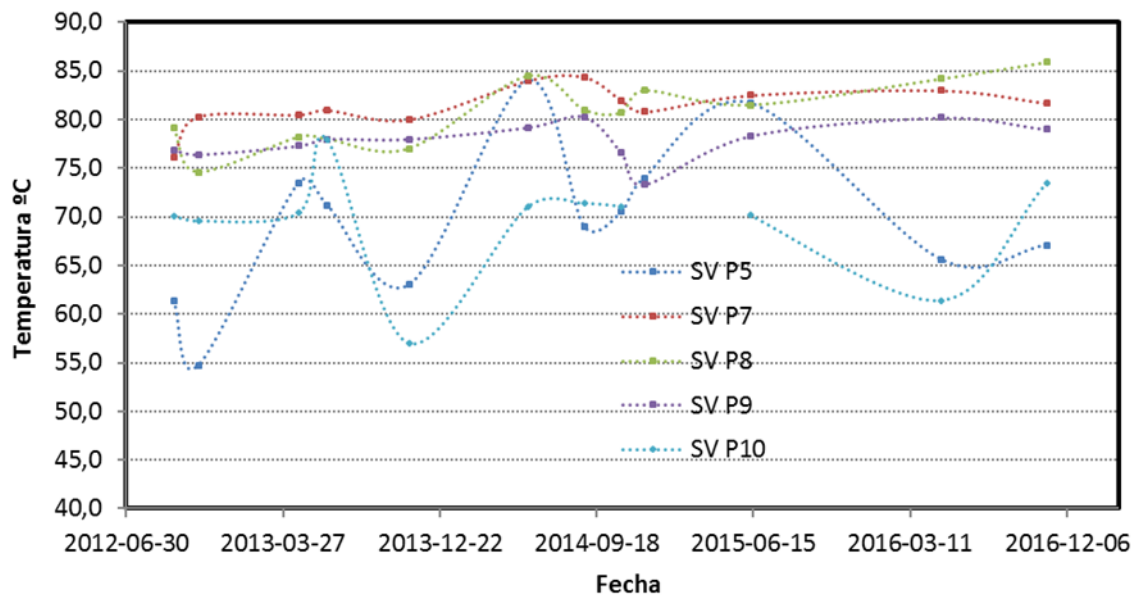


Figura 112. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

Respecto al potencial de hidrógeno, no se presentaron variaciones importantes respecto a las medidas del año anterior, los pH se mantienen dentro de la línea de la neutralidad. En la Figura 113 se presenta la variación del pH con el tiempo para los nacimientos termales.

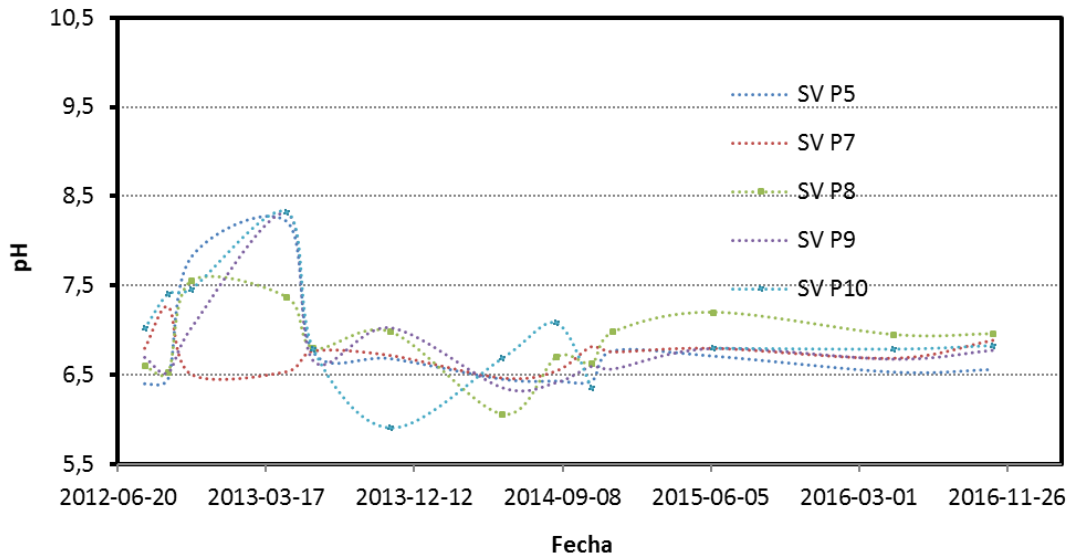


Figura 113. Variación del pH en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

El otro parámetro fisicoquímico medido fue la conductividad eléctrica, de acuerdo a las últimas medidas no se registran cambios importantes, no obstante la CE es un parámetro que puede verse afectado por contribución de agua meteórica, por ello se aprecian algunos picos en años anteriores (Figura 114).

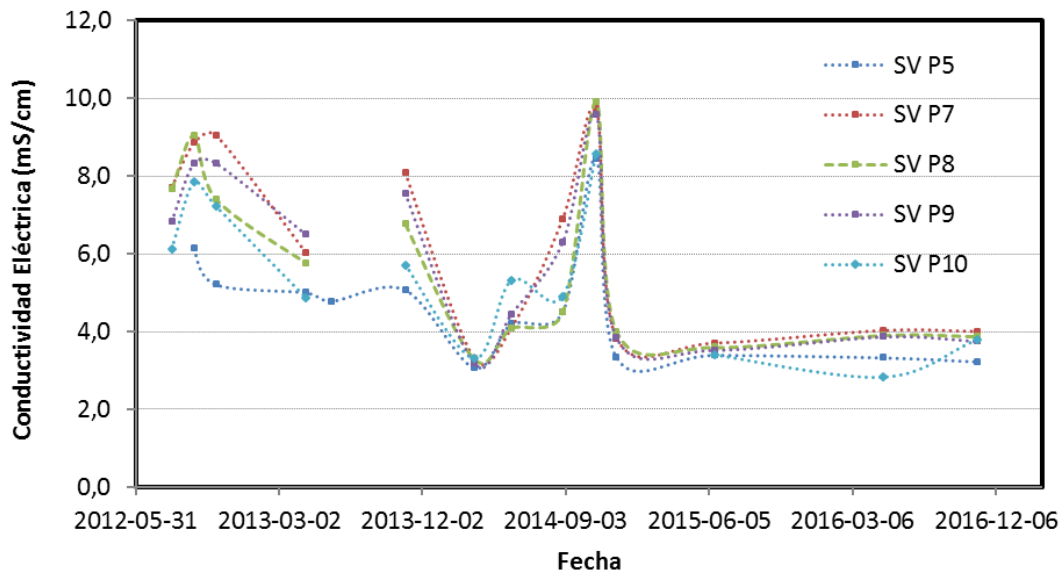


Figura 114. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

5.3.2 Manantiales termales SANTA ELENA

En el Balneario SANTA ELENA se realizó monitoreo de 4 nacimientos termales denominados: SEP1, SEP2, SEP3 y SEP4. Durante las medidas realizadas no se presentaron cambios importantes en los parámetros fisicoquímicos de los manantiales. En la Figura 115 se presenta la variación de la temperatura con el tiempo, allí se aprecia una variación entre 1 y 2°C respecto a los datos medidos en el año anterior.

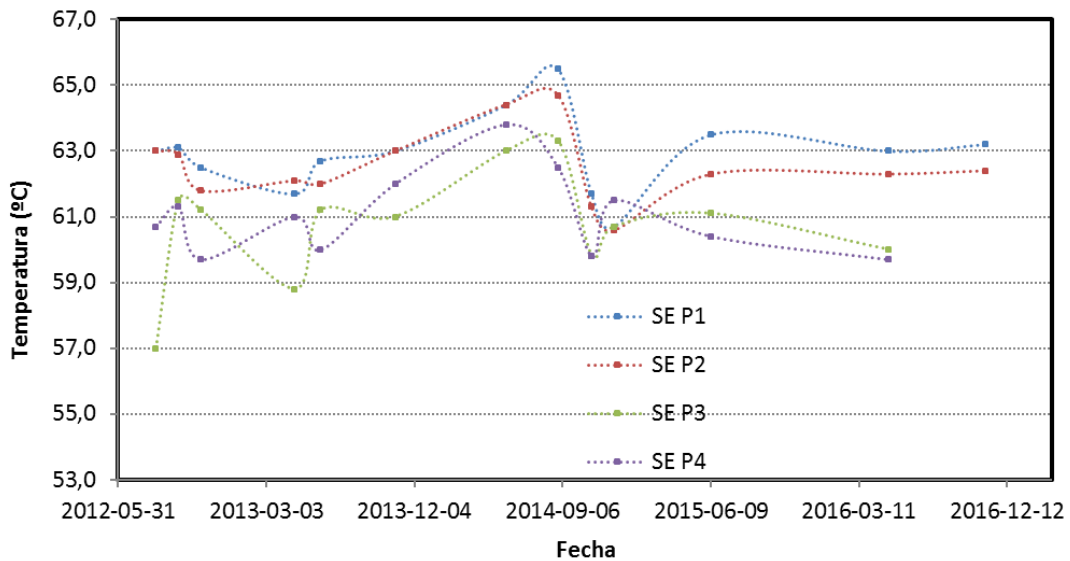


Figura 115. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

El Potencial de Hidrógeno y la Conductividad Eléctrica medidos en los nacimientos termales aledaños a SANTA ELENA se mantuvieron constantes respecto a las medidas anteriores, el pH sigue considerándose dentro de la línea de neutralidad (Figura 116) y no ha tenido cambios importantes en los últimos años. La conductividad eléctrica registrada en los nacimientos al igual que el pH se mantuvo estable muy cercana a las 2.2 mS/cm, la variación de la conductividad eléctrica con el tiempo se presenta en la Figura 117.

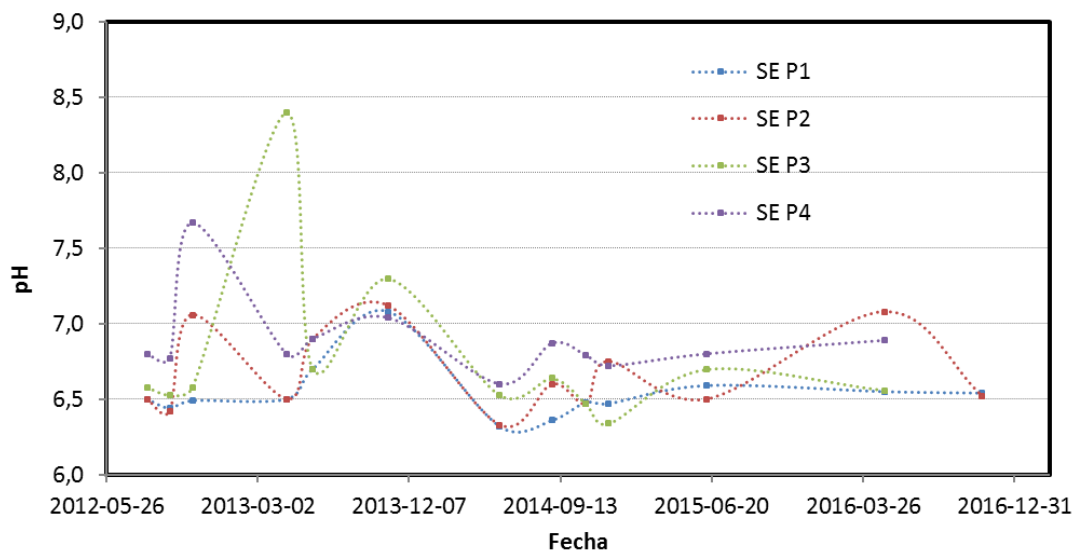


Figura 116. Variación del pH en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

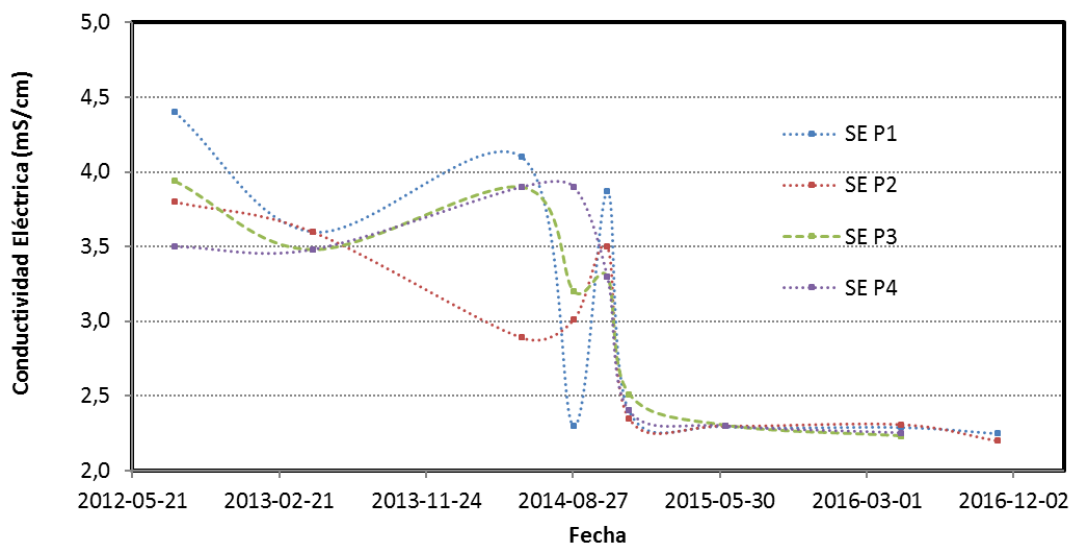


Figura 117. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

5.3.3 Manantiales termales SANTA ROSA

El monitoreo de los nacimientos termales aledaños al Balneario SANTA ROSA se realizó en los sitios denominados: CALDERO DIABLO, POZO DESEOS y LA CUEVA. Los parámetros fisicoquímicos medidos en los manantiales no presentaron variaciones importantes respecto a las variables medidas en el año anterior. La variación de la temperatura que se presenta en la Figura 118 mostró una variación de 1 °C respecto a la última lectura registrada en el 2015 en los 3 nacimientos.

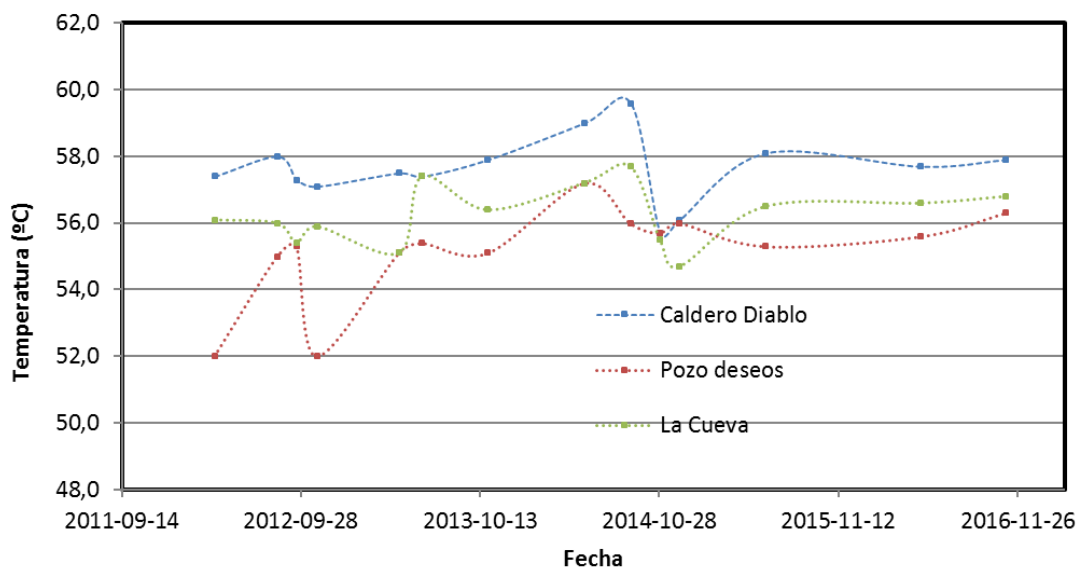


Figura 118. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

La variación del Potencial de Hidrógeno con el tiempo para los nacimientos termales de SANTA ROSA se presenta en la Figura 119, allí se aprecia que el pH para los 3 nacimientos se mantuvo entre 6.3 – 6.5. La conductividad eléctrica presentó estabilidad respecto a las medidas del año 2015 (Figura 120).

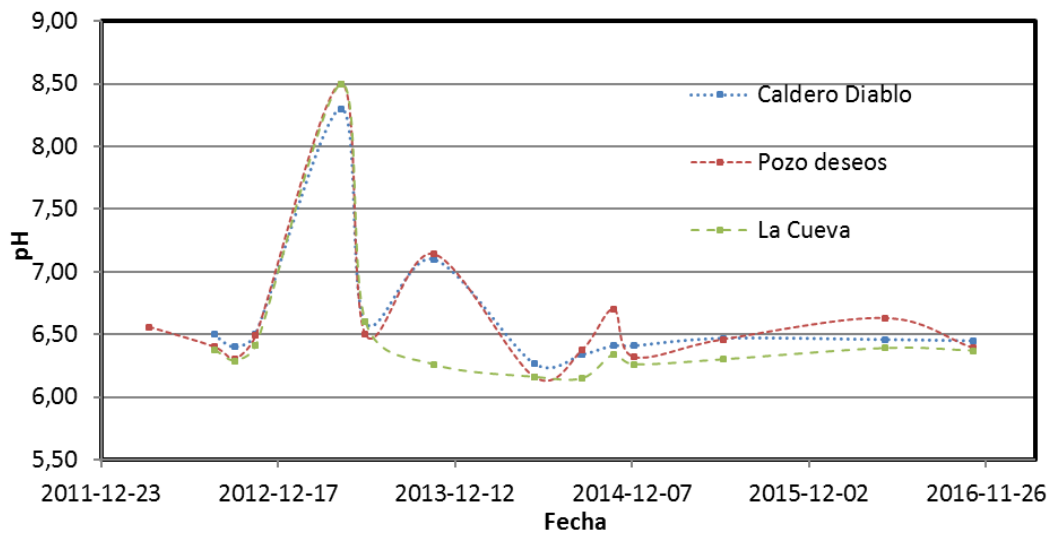


Figura 119. Variación del pH en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.

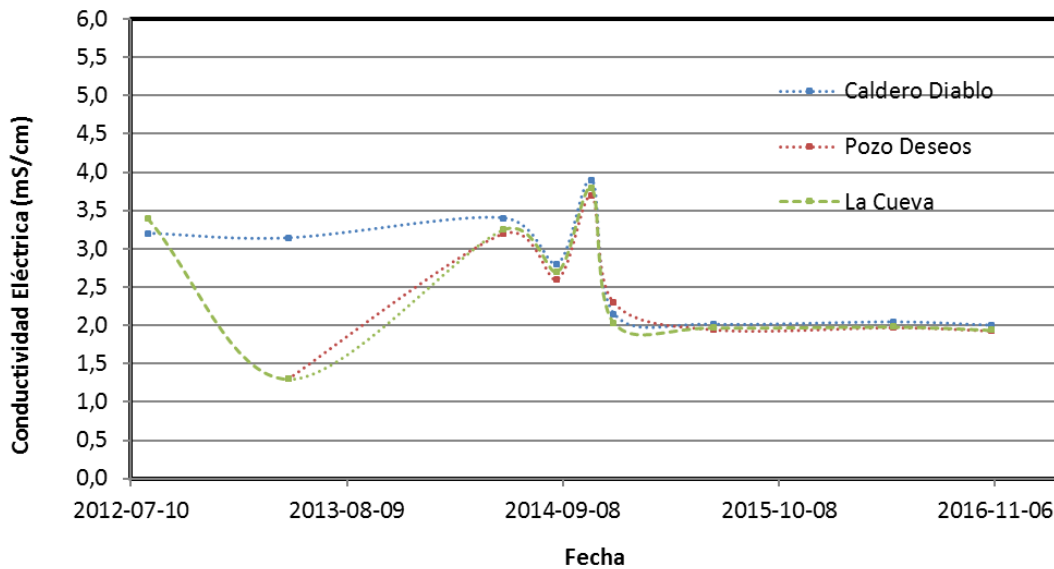


Figura 120. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2016.



6. VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL (VNSI)

6.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red de vigilancia telemétrica para este volcán durante el año 2016 fue del **95.0%**.

En el mes de Febrero fue necesario reemplazar el sismómetro de banda ancha de la estación LAGUNA VERDE (Figura 121) debido a que presentaba una señal permanente de ultra baja frecuencia.



Figura 121. Estación LAGUNA VERDE.

Junio, Durante este periodo se realizó un mantenimiento correctivo en la estación banda ancha LAGUNA VERDE, donde se cambió la memoria de almacenamiento del digitalizador RefTek, la antena y el cable coaxial de la antena para restablecer la telemetría de la estación.

En los meses de Agosto, Septiembre y Noviembre se realizaron trabajos de mantenimiento general en las estaciones multiparamétrica LAGUNA VERDE, sismológica GLACIAR y multiparamétrica EL AGUILA.

6.2 SISMOLOGÍA

Durante el año 2016 el Volcán Nevado de Santa Isabel (VNSI) continuó presentando actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, mostrando un aumento en la actividad con respecto al año anterior.

6.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

La red de estaciones sismológicas (Figura 122), registró un total de 1029 eventos sísmicos tipo VT (Figura 123 y Figura 124). Los sismos se localizaron principalmente en el flanco Noroccidente, al Suroccidente, al Occidente, y en menor medida al Norte y al Oriente cercano y distal de la estructura volcánica, a profundidades entre 2.0 y 7.0 km (Figura 125).

La máxima magnitud fue de 3.3 M_L (Magnitud Local), correspondiente a dos sismos registrados los días 13 de Junio y 17 de Noviembre a las 02:52 y 01:59 (Hora Local), en el sector Suroriental de la estructura volcánica a una profundidad de 4.3 y 3.8 km. Se destaca en el año un incremento de más de 400 sismos, como se observa en la gráfica de número de eventos por día (Figura 123) el día 20 de Febrero de 2016. Este de incremento también marcó el pico importante de energía liberada como se observa en la gráfica de Energía (Figura 124).

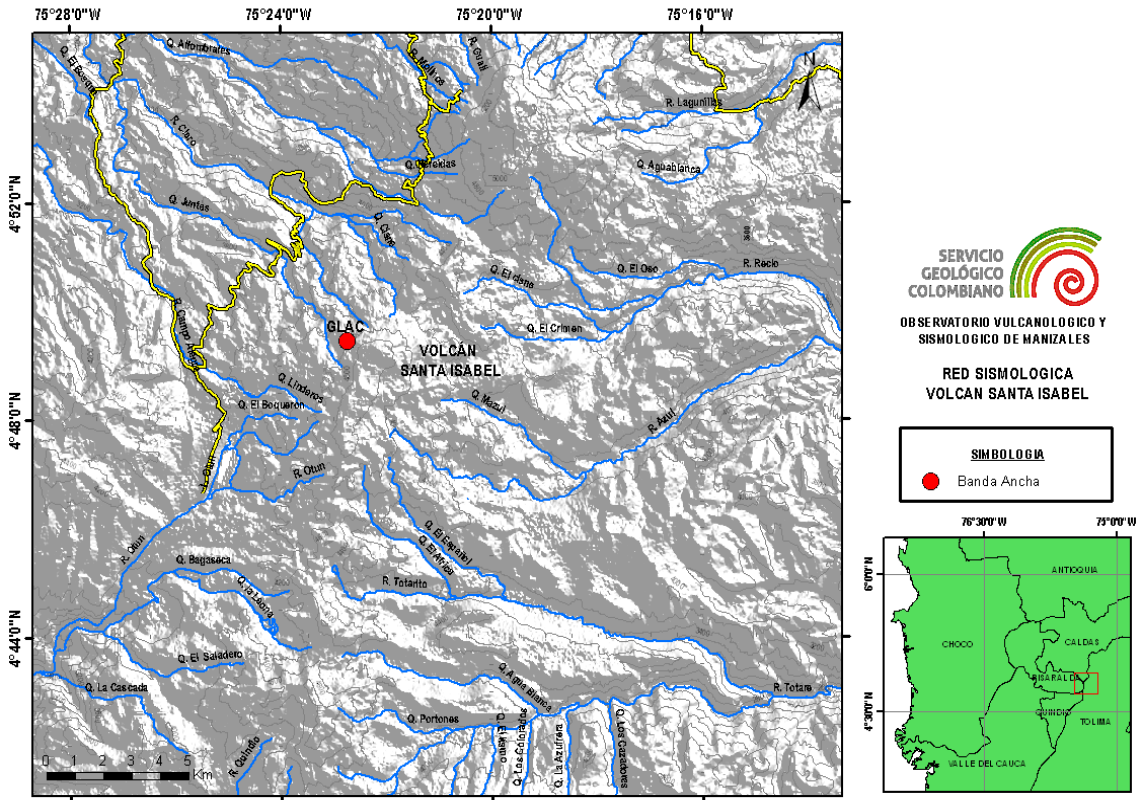


Figura 122. Red Sismológica. Volcán Nevado de Santa Isabel.

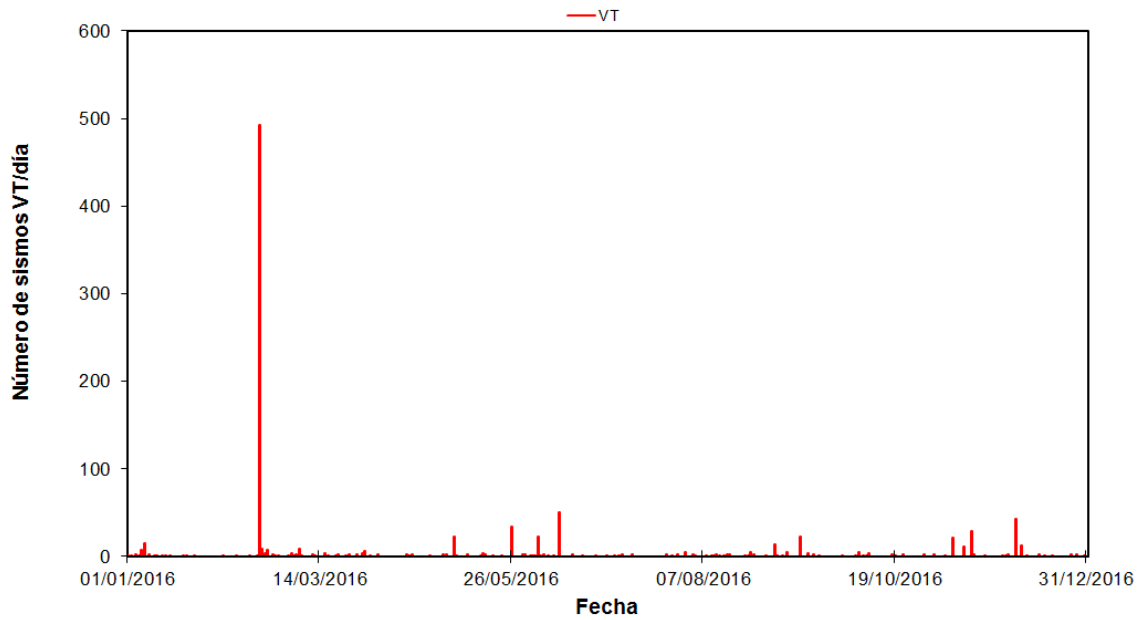


Figura 123. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el 2016 en el VNSI.

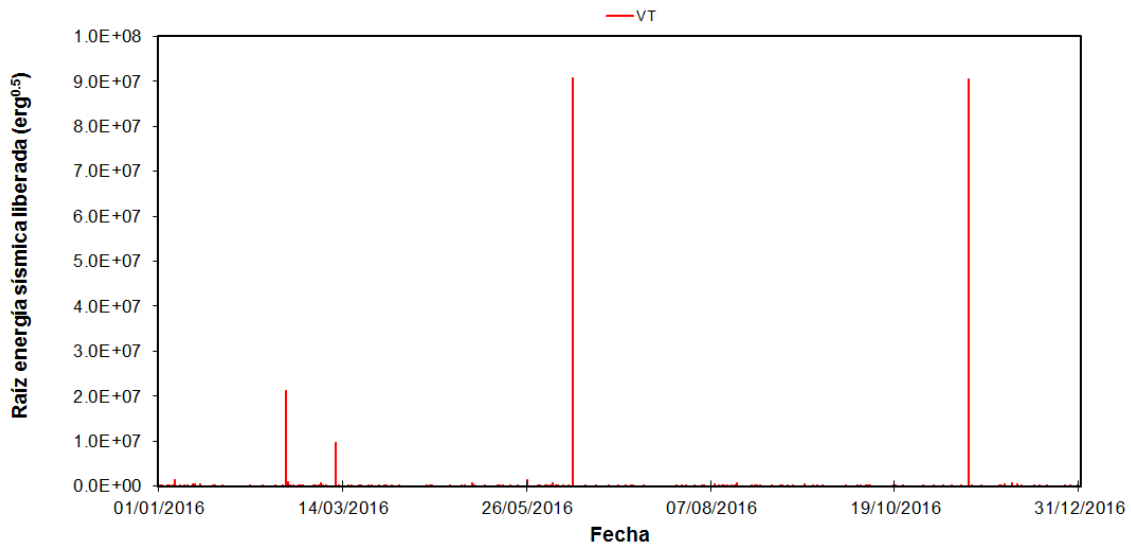


Figura 124. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2016, en el VNSI.

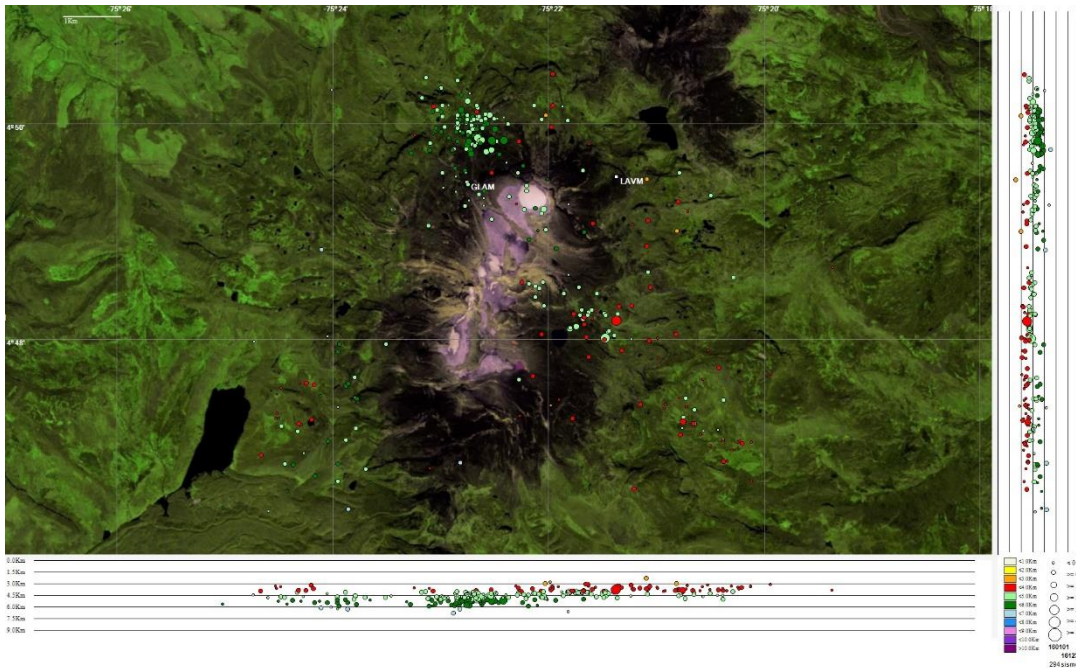


Figura 125. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VNSI, durante el 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.

En la zona Sur del Volcán Nevado de Santa Isabel, en el sector conocido como Cerro España se registró actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca, alcanzándose una cantidad de 543 eventos registrados (Figura 126 y Figura 127). Los eventos sísmicos estuvieron localizados principalmente al Oriente, Nororiente, Sur y Sureste y en menor proporción al Occidente de la estructura, entre 2.0 y 7.0 km de profundidad (Figura 128). La máxima magnitud registrada fue de 2.0 M_L (Magnitud Local), correspondiente al sismo del día 25 de Enero a las 01:13 (Hora Local) localizado al Oriente de la estructura, a una profundidad de 3.8 km.

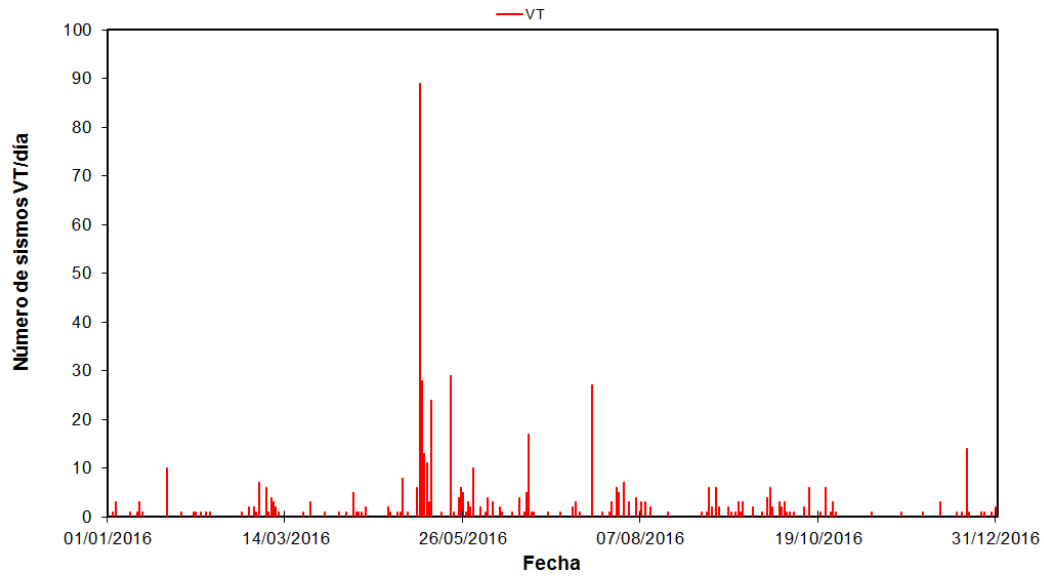


Figura 126. Número diario de eventos sísmicos tipo VT ocurridos durante el 2016 en el Cerro España.

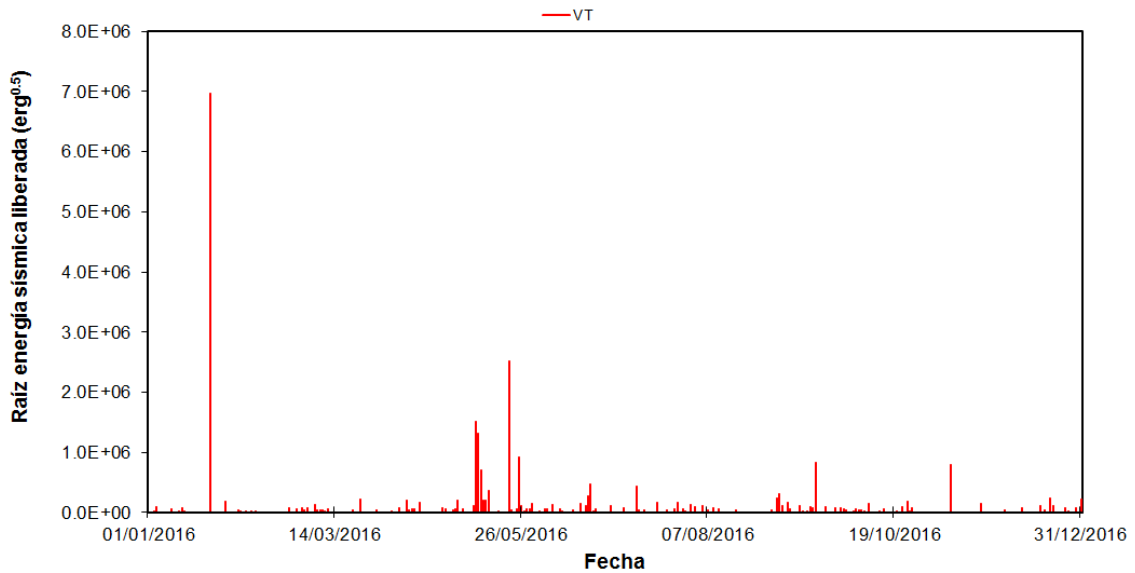


Figura 127. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2016, en el Cerro España.

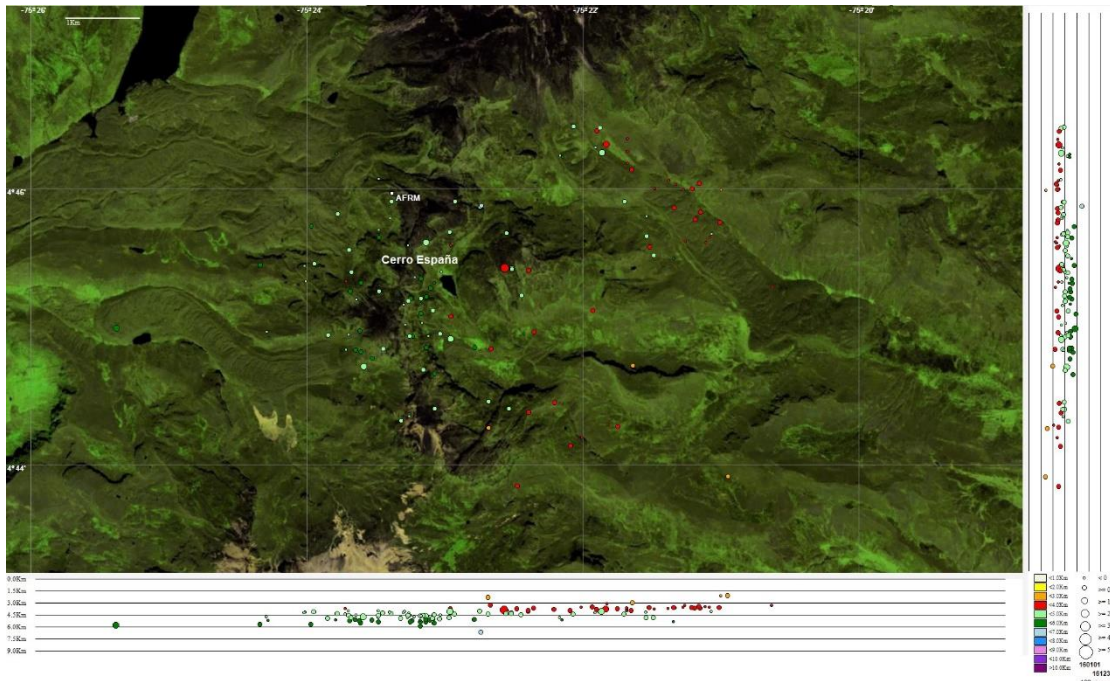


Figura 128. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del Cerro España, durante el 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.

6.2.2 Señales asociadas a la actividad glaciár

Adicionalmente, a la actividad sísmica de origen volcánico en el Volcán Nevado de Santa Isabel, la red de estaciones del volcán registró señales sísmicas asociadas a la dinámica del glaciar y pequeñas avalanchas de hielo y roca. A lo largo del año 2016, el número de estos eventos presentó un aumento significativo, respecto al 2015, debido al cambio en las condiciones meteorológicas de zona.

6.3 DEFORMACIÓN

Durante 2016 se contó con la operación de los dos inclinómetros electrónicos CHAV y GLAC instalados al Noroccidente y Occidente del volcán respectivamente y una estación GNSS permanente localizada en la Laguna del Otún. La red de deformación fue ampliada y optimizada con la instalación de la estación GPS permanente LVER

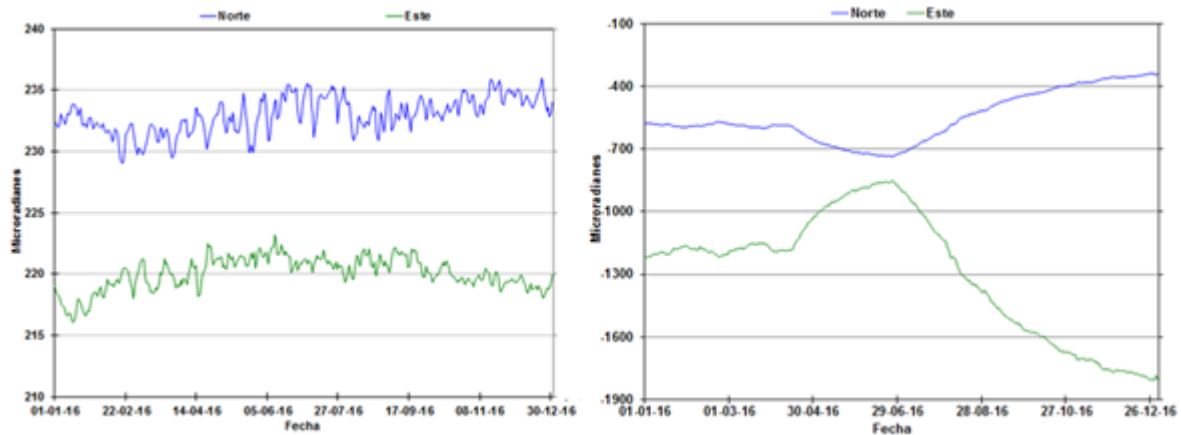


Figura 130. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Verde) de los inclinómetros electrónicos CHAV a) y GLAC b) durante 2016.

6.3.2 Estaciones GNSS permanentes

Para el 2016 se realizó la instalación de 2 estaciones GNSS OTUN y LVER que debido a su ubicación no posee telemetría para procesar en tiempo real.

6.4 GEOQUÍMICA

El monitoreo geoquímico en el Volcán Santa Isabel consistió en el análisis de muestras de agua de la Laguna del Otún y del campo fumarólico LA AZUFREIRA. En la Figura 131 y en la Tabla 10 se presentan las fechas y los contenidos de gases secos de las muestras colectadas. Los números 1, 2, 3 en la Figura 131 corresponden a los meses de toma de muestra (Marzo 1 y 2 y el mes de Agosto corresponde al número 3).

Tabla 10. Datos de Gases en campo fumarólico LA AZUFREIRA (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Nevado Santa Isabel. 2016.

Fecha	% CO ₂	% SO ₂	% H ₂ S	% HCl	St/HCl
16/03/2016	44,96	65,99	-16,38	5,43	8,00
16/03/2016	60,99	44,86	-11,19	5,34	5,52
29/08/2016	93,86	7,19	-1,78	0,73	6,46

Campo Fumarólico Azufrera (%Molar en Base Seca)

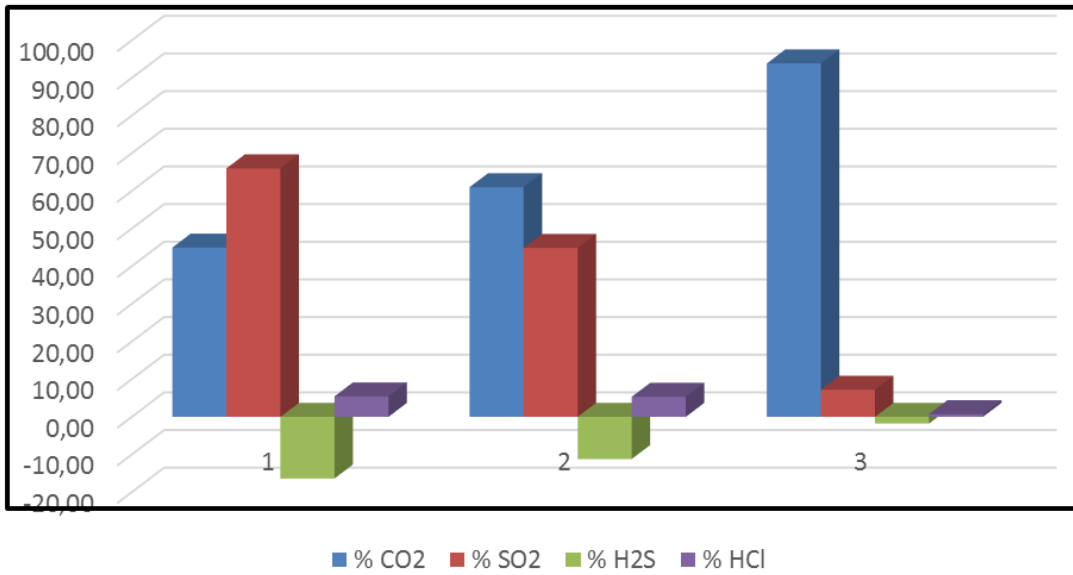


Figura 131. Variación del contenido de gases en campo fumarólico La Azufrera. Volcán Nevado Santa Isabel. 2016.

7. VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE (VPC)

7.1 SISMOLOGÍA

El Volcán Paramillo del Cisne (VPC), en el año 2016, presentó actividad sísmica asociada principalmente a fracturamiento de roca en la estructura volcánica (tipo VT e HB), mostrando una leve disminución con respecto al año inmediatamente anterior tanto en número como en energía sísmica liberada.

7.1.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

Durante el año 2016, en el VPC se registraron 1249 sismos tipo VT, asociados a fracturamiento de roca en la estructura volcánica (Figura 132). La mayoría de eventos sísmicos presentaron magnitudes bajas y por lo tanto bajos niveles de energía sísmica (Figura 133). Esta sismicidad mostró una leve disminución en número y energía sísmica liberada en comparación con la registrada en el año 2015. La actividad sísmica estuvo localizada alrededor de la estructura volcánica, principalmente en los flancos Noroccidental, Nororiental y Sur, a profundidades que oscilaron entre 1.3 y 5.6 km (Figura 134).

La tasa de sismicidad promedio fue 4 sismos por día. Se destacan dos incrementos de actividad sísmica tipo VT, en el VPC, durante 2016. El primero se ocurrió el 21 de Marzo, con el registro de 100 eventos, localizados en sector Nororiental del volcán, a profundidades entre 3.1 y 4.4 km (Figura 135). El sismo de mayor magnitud fue de 2.9 M_L (Magnitud Local) correspondiente al sismo registrado el 21 de Marzo a las 04:45 (Hora Local), el cual fue reportado como sentido en las inmediaciones del volcán, por funcionarios de PNNN. Este sismo es el de mayor magnitud de todo el año, y marca el pico de mayor energía del 2016, y el segundo valor mayor en energía liberada en los últimos siete años.

El segundo incremento importante de actividad sísmica en el VPC, se registró el 18 de Septiembre, cuando la tasa de sismicidad alcanzó los 143 sismos/día. Los eventos fueron en su mayoría de magnitudes muy bajas, siendo 1.4 M_L (Magnitud Local) el valor máximo, correspondiente al sismo registrado a las 05:16 (Hora Local). Si bien, este incremento es el de mayor número de eventos, no lo es en relación a la energía sísmica

liberada. Los sismos se localizaron en el sector Nororiental de la estructura volcánica y en menor proporción en el cráter, entre 2.8 y 4.0 km de profundidad.

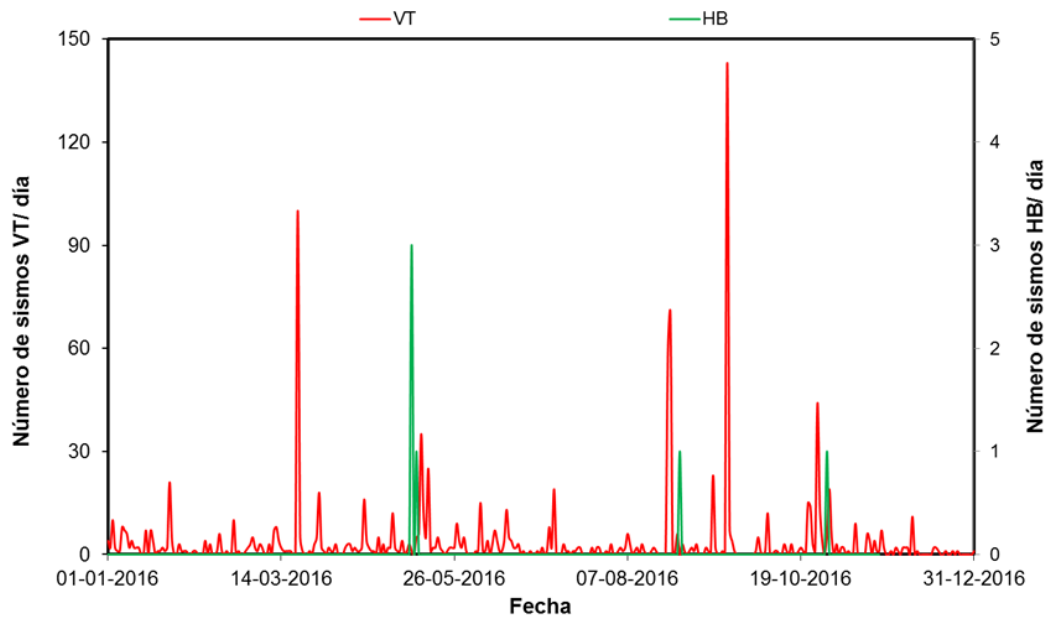


Figura 132. Número de eventos sísmicos tipo VT e HB diarios, registrados durante 2016, en el VPC.

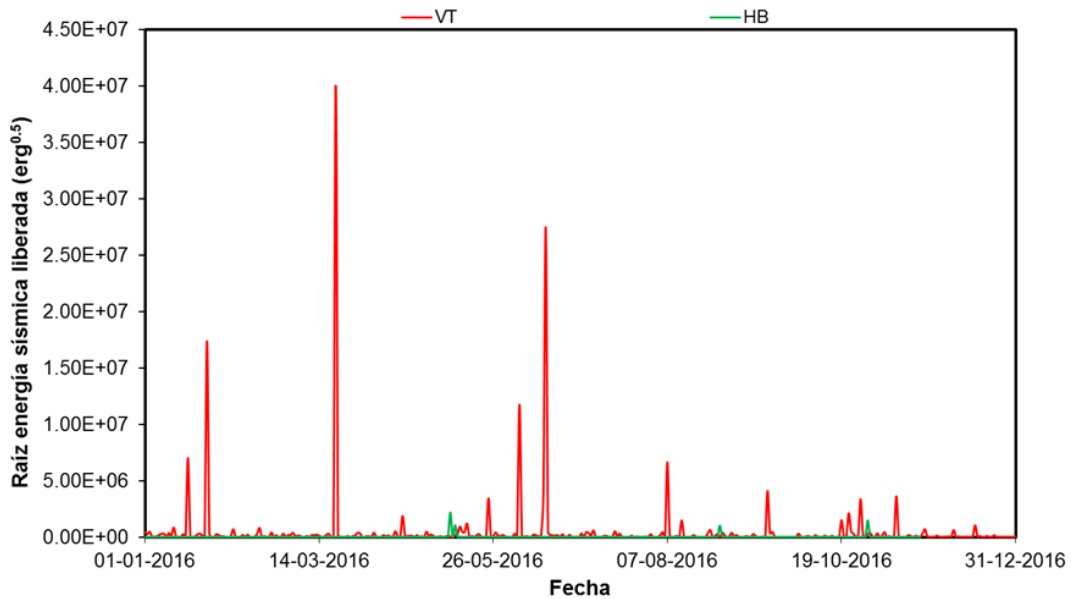


Figura 133. Raíz de la energía sísmica liberada diaria por eventos tipo VT e HB registrados durante 2016, en el VPC.

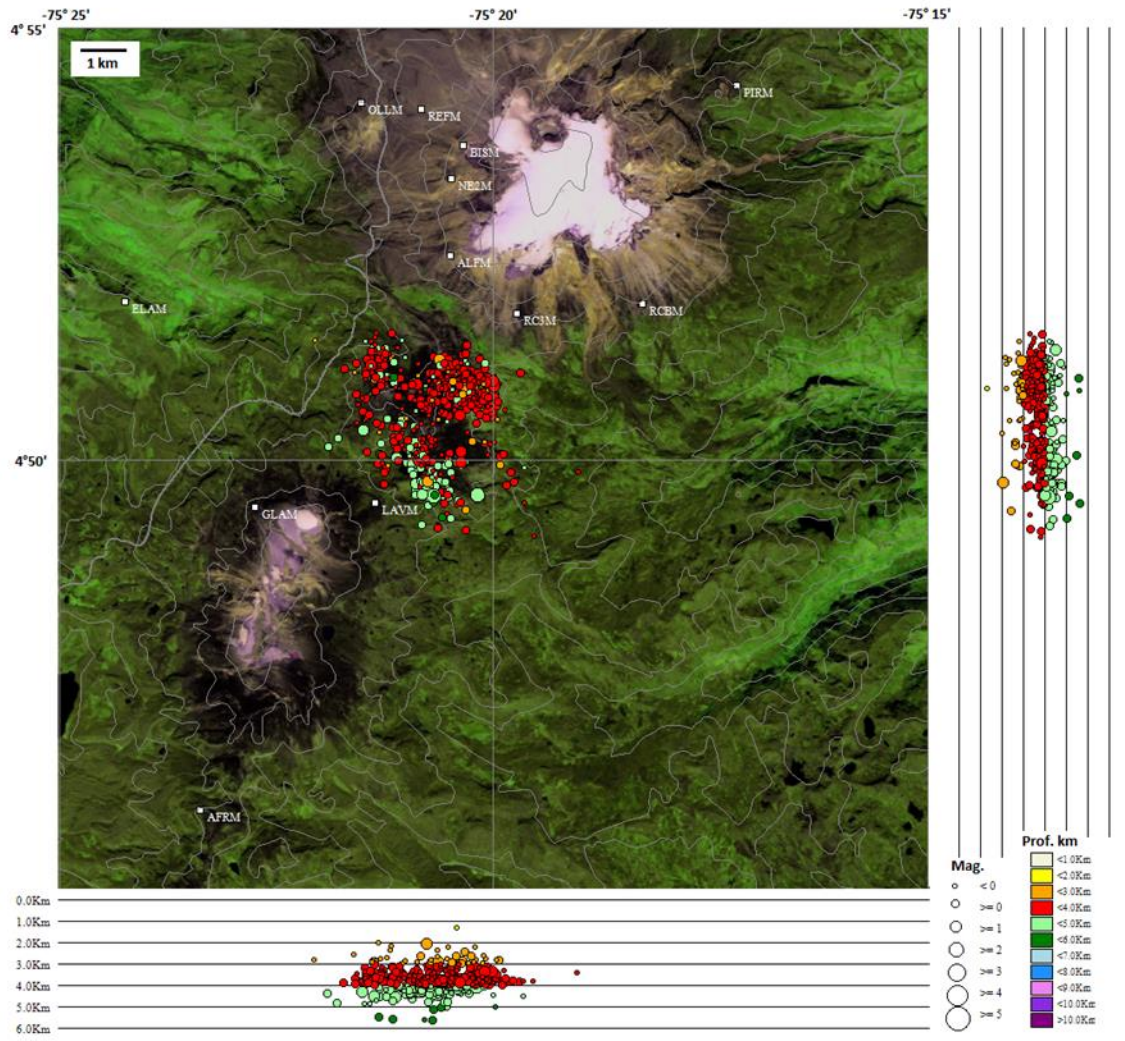


Figura 134. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPC, durante el año 2016. Los cuadros blancos representan las estaciones sismológicas.

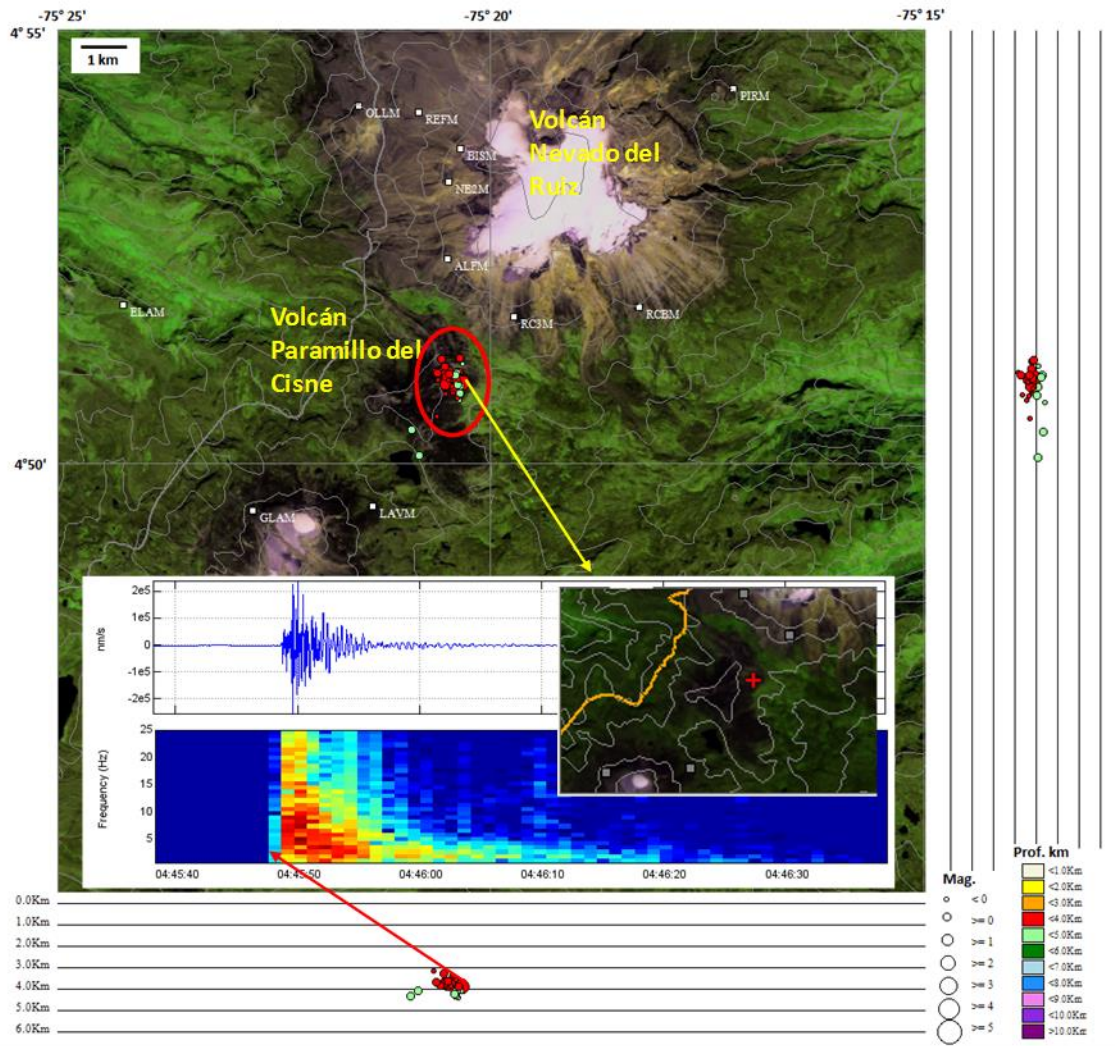


Figura 135. Mapa de localización hipocentral incremento sísmico de mayor energía registrado en el VPC en el año 2016, el 21 de Marzo. Los círculos de colores representan los eventos sísmicos y los cuadros blancos las estaciones sismológicas. El recuadro de la parte inferior muestra el sismograma y el espectrograma en la estación Laguna Verde (LAVM) y un detalle de la localización del sismo de mayor magnitud, 2.9 M_L (Magnitud Local).

7.1.2 Sismos Híbridos (HB)

En el VPC se registraron 6 sismos tipo HB durante el año 2016. Las magnitudes de estos eventos fueron bajas. Se destaca el evento híbrido del 08 de Mayo, ocurrido a las

12:28 (Hora Local), el cual alcanzó una magnitud 1.5 M_L (Magnitud Local). Este sismo fue localizado a 1.2 km al Suroriente del cráter, a 2.4 km de profundidad. Los demás eventos se localizaron al Oriente y Suroriente de la estructura volcánica (Figura 136).

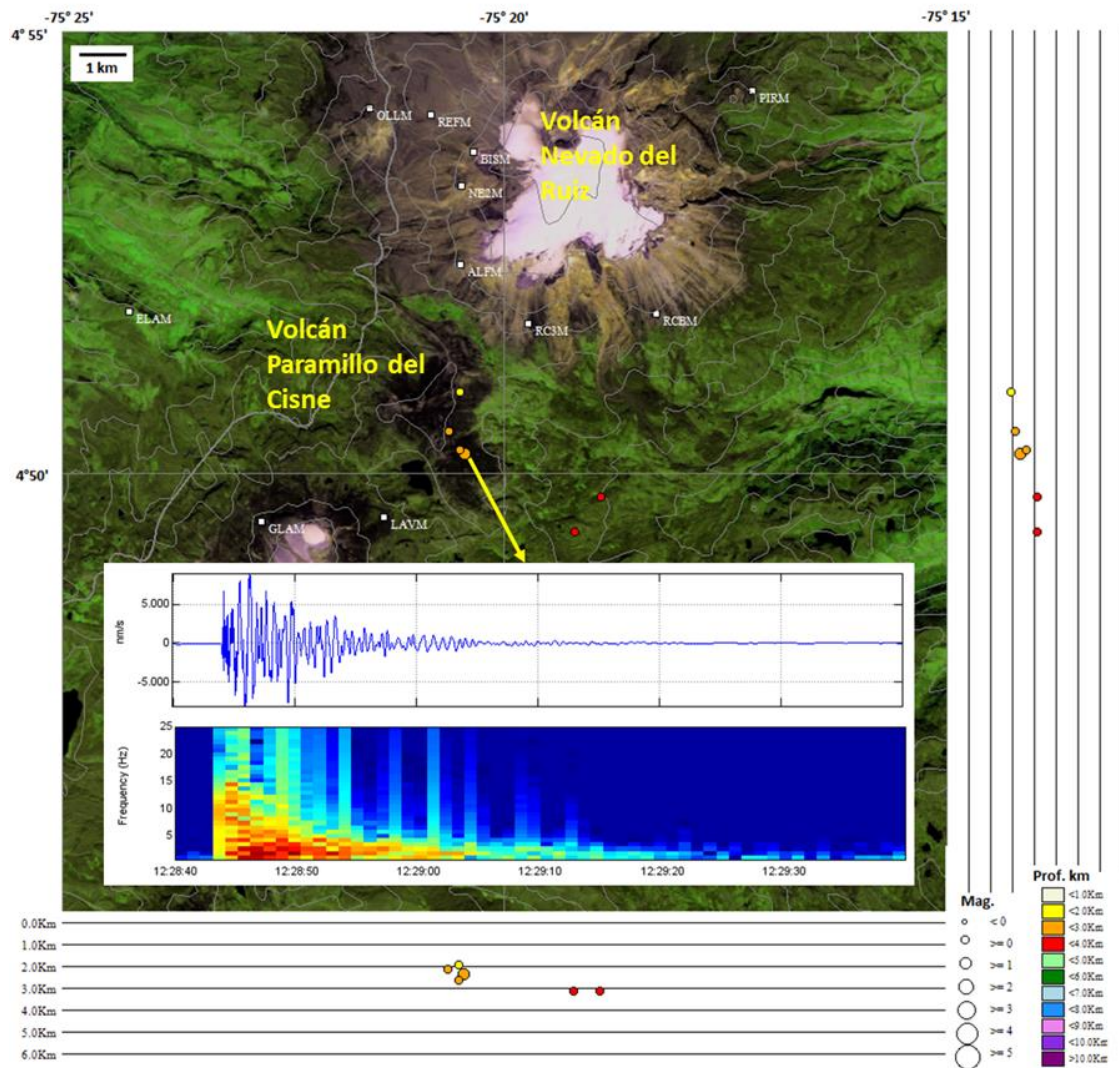


Figura 136. Mapa de localización hipocentral de los sismos híbridos (círculos de colores) registrados en el área del VPC, durante el año 2016. Los cuadros blancos representan las estaciones sismológicas. El recuadro de la parte inferior muestra el sismograma y el espectrograma en la estación Laguna Verde (LAVM) del sismo híbrido de mayor magnitud, 1.8 M_L (Magnitud Local) registrado el 08 de Mayo a las 12:28 (Hora Local).



8. VOLCÁN PARAMILLO DEL QUINDÍO (VPQ)

8.1 RED DE VIGILANCIA

En el mes de Septiembre se realizó la instalación de la estación sismológica denominada QUINDIO. Esta estación cuenta con un sismómetro de banda ancha activo con un digitalizador de 24 bits. La telemetría de esta estación se realiza a través del repetidor CIELO ROTO, lo cual permite contar con un camino principal de radio y uno secundario satelital hasta Manizales.



Figura 137. Estación QUINDIO.

8.2 SISMOLOGÍA

En el volcán Paramillo del Quindío, durante el 2016, la actividad sísmica aumentó respecto al 2015, tanto en número como energía sísmica liberada. Se presentaron 466 señales sísmicas asociadas con el fracturamiento de roca al interior del edificio volcánico (Figura 138 y Figura 139). Los sismos se localizaron principalmente al Noroccidente y en cercanías del edificio volcánico, y en menor proporción al Sur del mismo, a profundidades entre 1.6 y 7.7 km (Figura 140). La mayor magnitud registrada fue de 2.3 M_L (Magnitud Local) correspondiente al sismo del 29 de Febrero a las 23:32, localizado al Noroccidente de la estructura volcánica a una profundidad de 3.8 km.

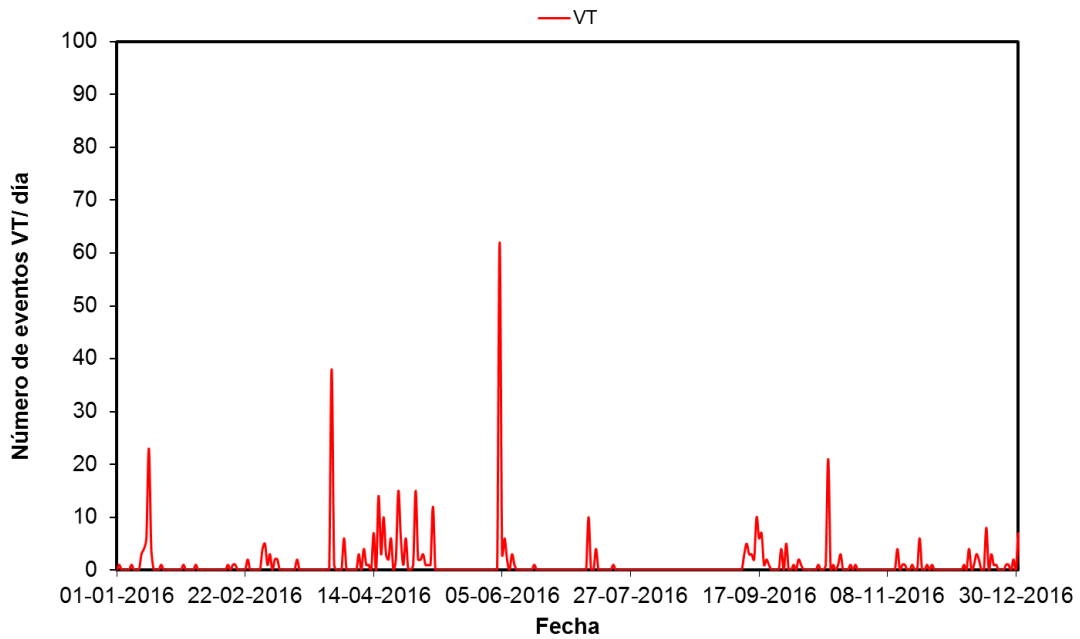


Figura 138. Número de eventos sísmicos diarios tipo VT, ocurridos durante el 2016 en el VPQ.

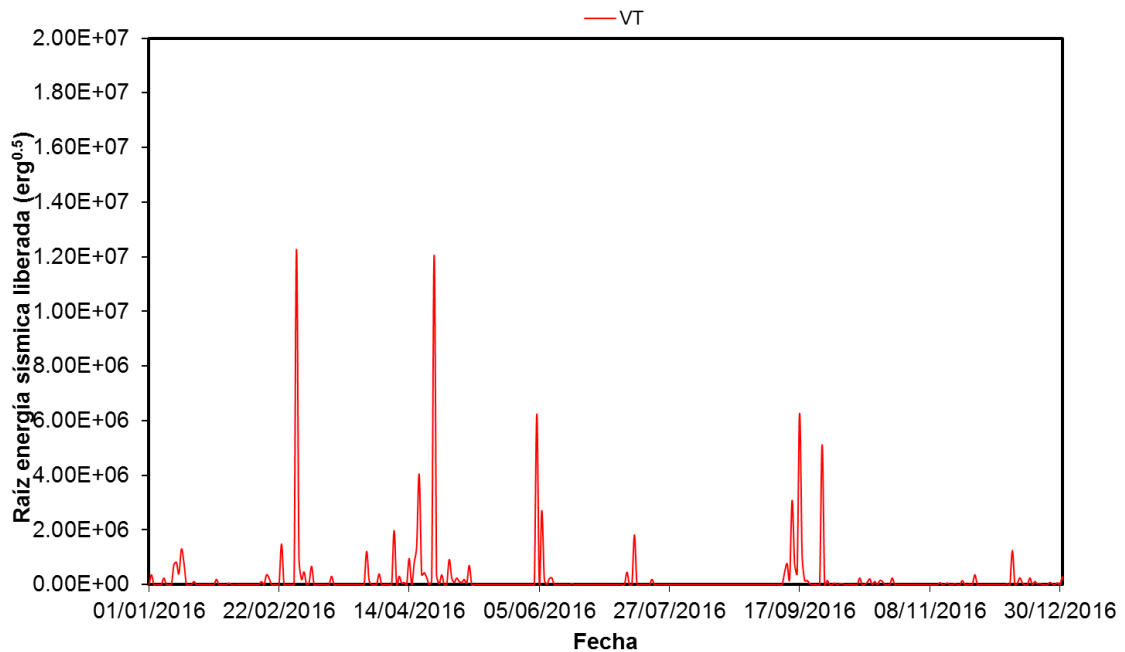


Figura 139. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2016 en el VPQ.

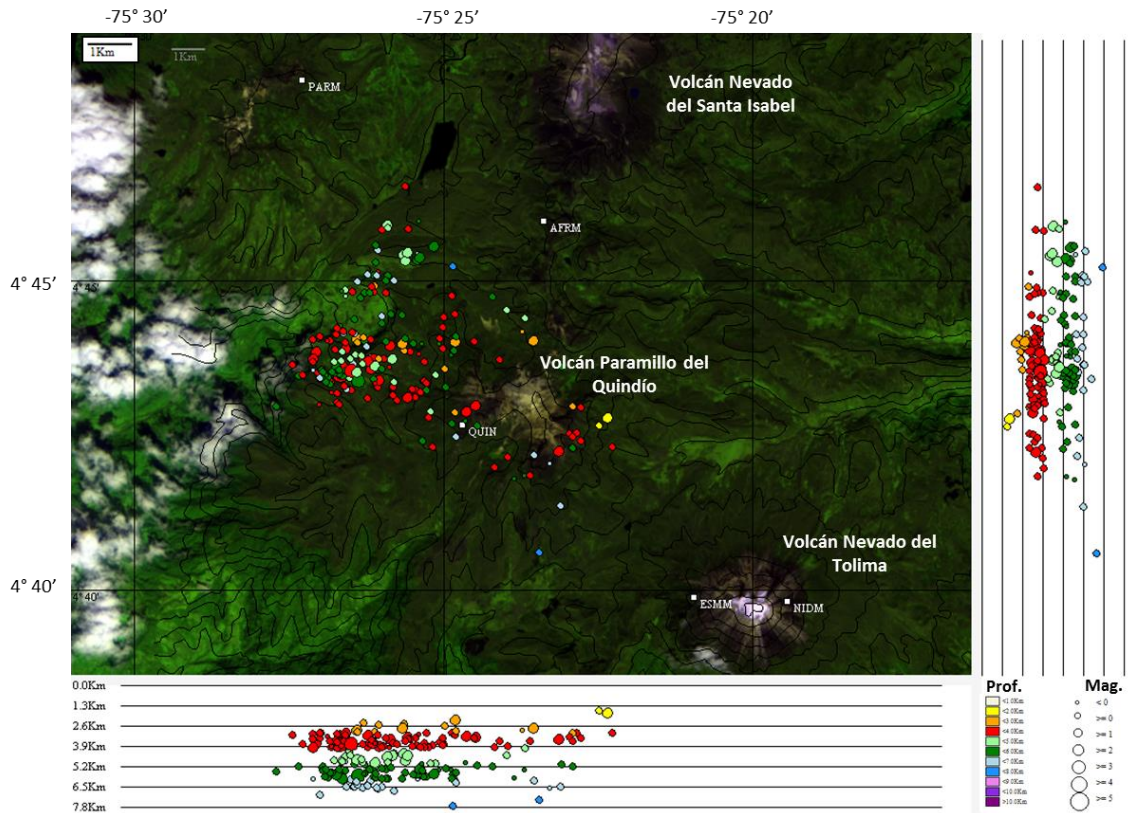


Figura 140. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPQ, durante el 2016. Los cuadrados blancos representan las estaciones sismológicas.

9. VOLCÁN SAN DIEGO (VSD)

9.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red de vigilancia telemétrica para este volcán durante el año 2016 fue del **0%**. Esta red continúa por fuera de operación debido a que aún no se reinstala la estación de repetición que fue hurtada en el municipio de SAMANA.


9.2 SISMOLOGÍA


Durante el año 2016 no fue posible hacer seguimiento a la actividad sísmica del volcán San Diego debido al hurto de la estación.

9.3 GEOQUÍMICA

El 20 de Abril del 2016 se realizó una comisión al Volcán San Diego, con el fin de realizar reconocimiento, medidas in situ y muestreo de los manantiales termales aledaños al Volcán. Los parámetros Físicoquímicos fueron medidos con un equipo Multiparamétrico Thermo Scientific Orion star A325. En la Tabla 11 se presentan los valores de parámetros físicoquímicos y del contenido de iones mayoritarios en los manantiales termales.

Tabla 11. Parámetros Físicoquímicos y composición iónica manantiales termales Volcán San Diego. 2016.

Fuente Termal	pH	T(°C)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Cationes Mayores (mg/L)	Aniones Mayores (mg/L)
 La calera	6,53	32,8	4220	Na ⁺ (647) ; Ca ⁺² (210) Si ⁺⁴ (38)	Cl ⁻ (786) ; SO ₄ ⁻² (5,92)

 Laguna	6,06	32,0	2660	Na^+ (318) ; Ca^{+2} 148); Si^{+4} (48)	Cl^- (332) ; SO_4^{-2} (1,02)
---------------------------------------------------------------------------------------------	------	------	------	--------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------

De acuerdo a los resultados de los parámetros Fisicoquímicos medidos in situ y de los análisis de aniones para cada una de las muestras recolectadas, las aguas se pueden clasificar como cloruradas neutras.

10.VOLCÁN ROMERAL (VR)

10.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red de vigilancia telemétrica para este volcán durante el año 2016 fue del **100%**. El monitoreo se realiza con una estación de tipo regional operada por la Red Sismológica Nacional.

10.2 SISMOLOGÍA

El Volcán Romeral no presentó actividad sísmica durante el año 2016.

11.VOLCÁN EL ESCONDIDO (VE)

11.1 SISMOLOGÍA

El Volcán El Escondido no presentó actividad sísmica en el transcurso del año 2016.

CONCLUSIONES

- El volcán Nevado del Ruiz (VNR) durante el año 2016 continuo mostrando inestabilidad en su comportamiento con respecto al 2015, se registraron señales sísmicas relacionadas con el fracturamiento de rocas que conforman el volcán, señales relacionadas con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos. Sismicidad tipo drumbeats asociada a salida de un volumen de material magmático o domo de lava a la superficie del cráter Arenas.
- Durante el 2016 se registró sismicidad relacionada con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos, tipo LP y VLP, estos últimos caracterizados por tener una frecuencia dominante ≤ 0.7 Hz. Mostrando variaciones con relación a la tasa diaria de ocurrencia y a la forma de registro, ya que muchos de estos sismos se registraron de manera aislada, la mayoría de ellos hicieron parte de eventos múltiples de fluidos y/o fueron precursores de pulsos de tremor. Las tasas diarias de sismicidad para este tipo de sismos fueron en promedio de 26 eventos por día.
- La actividad sísmica de los volcanes del complejo volcánico, mantuvieron, durante el 2016, niveles estables. Adicionalmente, no se reportaron cambios en los demás parámetros monitoreados.
- Durante 2016, se destaca la actividad relacionada con sismicidad tipo drumbeat o “golpes de tambor”. Estos episodios fueron discretos, de muy corta duración, y de niveles energéticos bajos (con algunas señales localizables) a muy bajos (sin señales localizables), los cuales siguen evidenciando la salida de un domo de lava a la superficie. El episodio de sismicidad tipo drumbeat más destacado en el año 2016, ocurrió el día de 06 de Julio de 2016 por su nivel energético mayor que los demás eventos de este tipo.
- La columna de gases relacionada con actividad fumarólica en el cráter Arenas registró una altura máxima de 3500 m medidos desde la cima del cráter durante el 2016. La mayor parte del tiempo la columna de gases mostró una dirección de dispersión preferencial hacia el Noroccidente y Suroccidente y eventualmente hacia el Nororiente, Sur y Sureste. En general, se caracterizó por presentar un color blanco asociado a vapor de agua, al igual que matices azules causados por las altas concentraciones de Dióxido de Azufre (SO_2) y en numerosas ocasiones, tonalidades grises debido a la presencia de material

particulado (ceniza volcánica).

- Las diversas emisiones de ceniza a la atmósfera asociadas a la actividad de fluido en el VNR, fueron confirmadas a través de fotografías tomadas por las cámaras web instaladas en el área del volcán, reportes de funcionarios del SGC en labores de campo, funcionarios del Parque Nacional Natural los Nevado y habitantes de las poblaciones, así como de imágenes de sensores remotos. Este material, permitió no tener una observación y apreciación de la columna gases y ceniza, sino también evidenciar las zonas de afectación debido a la caída de ceniza y verificar en superficie los cambios en el comportamiento de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz.
- Durante el año 2016 fue posible realizar el seguimiento continuo del calor irradiado o emitido en el área de la anomalía térmica del VNR. De acuerdo con los datos suministrados a través del portal de MIROVA de las universidades italianas de Turín y Florencia, (en Italia), se presentaron varias anomalías térmicas importantes con valores bajos a moderados. El valor más alto reportado durante el año, fue de 27 MW.
- Durante el 2016 el Volcán Paramillo de Santa Rosa mostró un aumento importante en su actividad sísmica con respecto al año 2015. La actividad sísmica estuvo asociada a fracturamiento de roca de baja energía. Esta se localizó principalmente en el sector Norte a Nororiente del edificio volcánico. Las profundidades de estos eventos oscilaron entre 1.8 y 10 km.
- El Volcán Nevado de Santa Isabel (VNSI) durante el año 2016 continuó presentando actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, mostrando un aumento en la actividad y energía sísmica, con respecto al año anterior. Los sismos se localizaron principalmente al Noroccidente, Suroriente y en menor proporción al Suroccidente de la estructura volcánica, entre 2.0 y 7.0 km de profundidad. Se destaca en el año, un incremento de más de 400 sismos, el día 20 de Febrero de 2016.
- Algunas de las estaciones de la red de deformación del VNR continúan evidenciando cambios deformativos, claramente correlacionados con la actividad sísmica y geoquímica dado el actual estado de actividad del volcán. Los inclinómetros electrónicos AZUF y LISA no registraron cambios significativos, mostrando en general estabilidad en sus dos componentes. Los inclinómetros electrónicos GUAL, NERE, RECI y REFU se caracterizaron por registrar pequeñas

fluctuaciones (menores a $\pm 5 \mu\text{rad}$), evidenciando claramente el proceso deformativo de 2012-2016.

- Los inclinómetros electrónicos de la red de deformación del VCM mantienen en general estabilidad, a excepción del inclinómetro electrónico CIMA ubicado en el domo principal, el cual viene presentando cambios acumulados, probablemente asociados a procesos de origen local.
- Las estaciones GPS instaladas en los volcanes NR y CM operaron de manera óptima y los datos recolectados presentan buena calidad, mostrando buena correlación con los procesos deformativos mostrados en el volcán Nevado del Ruiz, durante los últimos años, al igual que con la estabilidad del volcán Cerro Machín.
- Algunos de los inclinómetros electrónicos instalados en los volcanes Nevado de Santa Isabel registraron cambios importantes, lo cual indica que están ocurriendo procesos deformativos importantes en estas estructuras.
- El inclinómetro electrónico instalado en el volcán Cerro bravo mantiene estabilidad, comportamiento acorde con el estado de actividad de este volcán.
- Durante el 2016 se instaló una estación GNSS en el VNSI con el objetivo de ampliar su red de deformación.
- Las descargas de SO_2 acumuladas desde Enero de 2012 hasta Diciembre de 2016 se observa que la pendiente de la curva en el año 2016 no presentó incrementos importantes, las descargas de SO_2 emitidas a la atmósfera se mantienen constantes aunque continúan siendo altas, Desde el inicio de la etapa eruptiva en el Volcán Nevado del Ruiz en el año 2012 y hasta el año 2016, las descargas de SO_2 emitidas a la atmósfera se mantienen en niveles altos (mayores a 1.500.000 T), lo cual ha permitido establecer que el sistema volcánico continúa inestable.
- Las estaciones telemétricas de Gas Radón ubicadas en el Volcán Nevado del Ruiz registraron algunas variaciones, no obstante no se observa un comportamiento relacionado entre todas las estaciones que se tienen en funcionamiento que indique que haya correlaciones directas con la actividad tipo volcano-tectónica.
- Los parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales en el VNR presentaron

estabilidad, lo cual muestra que no se ven afectados por el estado actual de actividad del Ruiz, cuando se han manifestado cambios en los parámetros fisicoquímicos especialmente en el potencial de Hidrógeno los cambios en el comportamiento del volcán se evidencian en el largo plazo, lo cual hace que no haya una relación directa con los episodios de actividad y la actividad tipo hidrotermal que permita que se generen cambios en temperatura y pH.

- La concentración de gas radón en el Volcán Cerro Machín se mantuvo constante, no se registraron variaciones importantes. Los manantiales termales en el VCM aunque presentaron algunas variaciones, éstas no tuvieron relación con la actividad volcánica, la influencia de factores externos como: precipitaciones, mezclas e infiltraciones hizo que se presentaran algunos cambios fisicoquímicos.
- Los manantiales termales de los Balnearios aledaños al Volcán Paramillo de Santa Rosa no presentaron variaciones importantes durante las medidas del año 2016.
- En el 2016 se realizó reconocimiento de los manantiales termales aledaños al Volcán San Diego, los resultados de los análisis muestran que son aguas tipo neutras cloruradas.