



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**
República de Colombia



**BOLETÍN SEMESTRAL DE ACTIVIDAD DE VOLCANES DE NARIÑO
ENERO A JUNIO DE 2010**

Edición:

GRUPO DE TRABAJO OBSERVATORIO PASTO

San Juan de Pasto, diciembre de 2010

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**
República de Colombia

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS**

**BOLETÍN SEMESTRAL DE ACTIVIDAD DE VOLCANES DE NARIÑO
ENERO A JUNIO DE 2010**

Edición:

GRUPO DE TRABAJO OBSERVATORIO PASTO

San Juan de Pasto, diciembre de 2010



CONTENIDO

		Pág.
INTRODUCCIÓN		1
RESUMEN		2
2.	VOLCANES DE NARIÑO	4
2.1.	VOLCÁN GALERAS	5
2.1.1.	Red de vigilancia	5
2.1.2.	Sismología	12
2.1.2.1.	Evento eruptivo del 2 de enero de 2010	33
2.1.3.	Deformación	57
2.1.3.1.	Inclinometría Electrónica	57
2.1.3.2.	Medición Electrónica de Distancias E.D.M.	61
2.1.4.	Fisicoquímica	62
2.1.4.1.	Mediciones de Dióxido de Azufre SO ₂	63
2.1.4.2.	Muestreo de aguas termales del Volcán Galeras	64
2.1.4.2.1.	Ubicación de las fuentes termales	64
2.1.4.2.1.1.	Fuente Termal: CEHANI	65
2.1.4.2.1.2.	Fuente Termal: Río Pasto	65
2.1.4.2.1.3.	Fuente Termal: Aguas Agrias	66
2.1.4.2.1.4.	Fuente Termal: Fuente Blanca	66
2.1.4.2.1.5.	Fuente Termal: Licamancha	67
2.1.4.2.2.	Toma de muestra	67
2.1.4.2.3.	Medición de Parámetros Fisicoquímicos	68
2.1.4.2.4.	Análisis de Bicarbonatos, Cloruros y Sulfuros en las Fuentes Termales	69
2.1.4.2.5.	Análisis de Cationes en las Fuentes Termales del Volcán Galeras	71
2.1.4.3.	Gas RADÓN en el suelo	72
2.1.4.3.1.	Instalación de estaciones de gas Radón en la Línea Galeras	72
2.1.4.3.2.	Mediciones de gas Radón en el suelo	74
2.1.5.	Geología	76
2.1.6.	Actividad superficial y cambios geomorfológicos	81
2.1.6.1.	Reconocimiento de la cima de Galeras, debido a los efectos de la erupción del 2 de enero de 2010	99
2.1.6.1.1.	Estado de la carretera	99
2.1.6.1.2.	Efectos generales de la erupción del 2 de enero de 2010	101
2.1.6.1.3.	Condiciones de los equipos de monitoreo volcánico	104
2.1.7.	Imágenes térmicas	106
2.1.8.	Conclusiones	109
2.2.	VOLCÁN DOÑA JUANA	117
2.2.1.	Red de vigilancia	118
2.2.2.	Sismología	121
2.2.3.	Deformación	126
2.2.4.	Actividad superficial	127
2.2.5.	Conclusiones	128
2.3.	VOLCÁN AZUFRAL	131
2.3.1.	Red de vigilancia	131
2.3.2.	Sismología	134
2.3.3.	Deformación	137
2.3.3.1.	Inclinometría Electrónica	137
2.3.3.2.	Medición Eléctrica de Distancias – E.D.M.	138
2.3.4.	Fisicoquímica	139
2.3.4.1.	Muestreo de aguas termales en la Laguna Verde del Volcán Azufral	139
2.3.4.1.1.	Medición de Parámetros Fisicoquímicos	140
2.3.4.1.2.	Análisis de Cloruros y Sulfatos en la Laguna Verde	143
2.3.4.1.3.	Análisis de cationes en la Laguna Verde del Volcán Azufral	144



2.3.4.2.	Muestreo de las fuentes termales del Volcán Azufral	144
2.3.4.2.1.	Ubicación de las fuentes termales	144
2.3.4.2.1.1	Fuente Termal: El Salado de Malaver	144
2.3.4.2.1.2.	Fuente Termal: La Cabaña	145
2.3.4.2.1.3.	Fuente Termal: Quebrada Blanca (Chimangual)	146
2.3.4.2.1.4.	Fuente Termal: San Ramón	146
2.3.4.2.2.	Toma de la muestra	147
2.3.4.2.3.	Mediciones de los Parámetros Fisicoquímicos	148
2.3.4.2.4.	Análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos	148
2.3.4.2.5.	Análisis de Cationes	149
2.3.4.3.	Muestro de gases de origen volcánico	150
2.3.4.4.	Mediciones de gas Radón	151
2.3.4.4.1.	Instalación de la estación de gas Radón en el suelo	151
2.3.4.4.2.	Instalación de la estación de gas Radón en el agua	152
2.3.4.5.	Mediciones de dióxido de azufre	153
2.3.4.6.	Aspectos geométricos	155
2.3.5.	Actividad superficial	157
2.3.6.	Conclusiones	164
2.4.	VOLCÁN CUMBAL	165
2.4.1.	Red de vigilancia	165
2.4.2.	Sismología	168
2.4.3.	Deformación	168
2.4.4.	Fisicoquímica	168
2.4.4.1.	Muestreo de aguas termales en el complejo volcánico de Cumbal	168
2.4.4.1.1.	Ubicación de las fuentes termales	168
2.4.4.1.1.1.	Fuente Termal: El Salado	169
2.4.4.1.1.2.	Fuente Termal: El Zapatero	169
2.4.4.1.1.3.	Fuente Termal: El Cuetial	170
2.4.4.1.1.4.	Fuente Termal: Hueco Grande	171
2.4.4.1.2.	Mediciones de Parámetros Fisicoquímicos en las fuentes del Volcán Cumbal	171
2.4.4.1.3.	Análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos	172
2.4.4.1.4.	Análisis de Cationes	173
2.4.5.	Actividad superficial	174
2.4.6.	Conclusiones	175
2.5.	BIBLIOGRAFÍA	176
2.6.	PERSONAL PARTICIPANTE	176

TABLAS

		Pág.
Tabla 2.1.1.	Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad sísmica del volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.	7
Tabla 2.1.2.	Inclinómetros electrónicos telemétricos que conformaron la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.	5
Tabla 2.1.3.	Características de las estaciones que conforman la red de instrumentos ScanDOAS del proyecto NOVAC en el volcán Galeras, las cuales funcionaron durante el Primer Semestre de 2010.	8
Tabla 2.1.4.	Características de la estación EM-Frailejón que monitorea las variaciones del campo eléctrico y del campo magnético ocasionadas por la actividad del volcán Galeras, instalada en el Primer Semestre de 2010.	9
Tabla 2.1.5.	Principales aspectos relacionados con el funcionamiento y cambio de equipos en la red de Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.	11



Tabla 2.1.6.	Número de sismos volcánicos por tipo, registrados en los periodos indicados.	13
Tabla 2.1.7.	Energía sísmica liberada para cada tipo de evento, en los periodos indicados.	14
Tabla 2.1.8.	Parámetros de localización y energía de los sismos tipo VT ocurridos entre el 6 y el 8 de enero de 2010.	26
Tabla 2.1.9.	Parámetros de localización de los sismos tipo VT ocurridos en el Primer Semestre de 2010, los cuales fueron reportados como sentidos desde varios sectores de la zona de influencia del volcán Galeras.	27
Tabla 2.1.10.	Coordenadas WGS84 de los puntos materializados sobre la superficie del volcán Galeras, donde se ubican reflectores EDM.	61
Tabla 2.1.11.	Emisiones de SO ₂ del volcán Galeras (cuantificadas en términos de flujo de emisión) registradas en el Primer Semestre de 2010, por las estaciones ScanDOAS y el instrumento MoviDOAS (Proyecto NOVAC).	63
Tabla 2.1.12.	Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del Volcán Galeras.	68
Tabla 2.1.13.	Concentraciones de los aniones presentes en las fuentes termales del Volcán Galeras.	69
Tabla 2.1.14.	Clasificación de las fuentes termales del Volcán Galeras.	70
Tabla 2.1.15.	Concentraciones de cationes en aguas termales del Volcán Galeras.	71
Tabla 2.1.16.	Características de las estaciones instaladas para el monitoreo de gas Radón en el volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.	72
Tabla 2.1.17.	Volúmenes de material emitido, calculados para las erupciones explosivas de Galeras, registradas entre el 14 de febrero de 2009 y el 2 de enero de 2010.	80
Tabla 2.1.18.	Puntos de referencia donde se identificaron las rocas de mayor tamaño expulsadas por el evento eruptivo del 2 de enero de 2010.	101
Tabla 2.1.19.	Sobrevuelos realizados con las temperaturas máximas obtenidas en ellos, en el Primer Semestre de 2010.	106
Tabla 2.2.1.	Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Doña Juana durante el primer semestre de 2010.	119
Tabla 2.3.1.	Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia volcánica, del volcán Azufral durante el Primer Semestre de 2010.	132
Tabla 2.3.2.	Coordenadas WGS84 de los puntos de prismas reflectores materializados en el volcán Azufral.	138
Tabla 2.3.3.	Datos de mediciones <i>in situ</i> realizadas en Laguna Verde del volcán Azufral.	140
Tabla 2.3.4.	Concentraciones de cloruros y sulfatos en aguas de la Laguna Verde del volcán Azufral.	143
Tabla 2.3.5.	Concentraciones de cationes en aguas de la Laguna Verde del volcán Azufral.	144
Tabla 2.3.6.	Parámetros fisicoquímicos medidos en las fuentes termales del Volcán Azufral.	148
Tabla 2.3.7.	Concentraciones de los aniones y clasificación de las fuentes termales del Volcán Azufral.	149
Tabla 2.3.8.	Concentraciones de los aniones presentes en las fuentes termales del Volcán Azufral.	149
Tabla 2.3.9.	Concentraciones de los gases CO ₂ Y HCl medidos en la fumarola Mallama, del volcán Azufral.	151
Tabla 2.3.10.	Características de instalación y medición de las dos estaciones de Gas Radón, instaladas en la Laguna Verde del Volcán Azufral.	153
Tabla 2.4.1.	Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Cumbal, durante el Primer Semestre de 2010.	167
Tabla 2.4.2.	Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del Volcán Cumbal.	173
Tabla 2.4.3.	Concentraciones de los aniones y clasificación de las fuentes termales del Volcán Cumbal.	174
Tabla 2.4.4.	Concentraciones de los aniones presentes en las fuentes termales del Volcán Cumbal.	175

FIGURAS

Pág.

Figura 2.1.1.	Mapa de localización de algunas de las estaciones (sismómetros de corto periodo-CP y banda ancha-BA, acústico, campo EM y repetidoras) que conformaron la red de monitoreo de Galeras durante el primer semestre de 2010.	6
Figura 2.1.2.	Red para el monitoreo de la deformación volcánica del Galeras, conformada por cinco inclinómetros electrónicos, que funcionaron en el Primer Semestre de 2010.	7



Figura 2.1.3.	Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS del proyecto NOVAC para el monitoreo de emisiones de Dióxido de Azufre (SO ₂), que funcionaron durante el Primer Semestre de 2010.	8
Figura 2.1.4.	Mapa de localización de la cámara web que funcionó durante el Primer Semestre de 2010. Esta cámara se encuentra instalada en la sede del OVS en Pasto.	9
Figura 2.1.5.	Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el Primer Semestre de 2010 (enero a junio de 2010), de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo del volcán Galeras.	10
Figura 2.1.6.	Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde julio de 2009 a junio de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.	12
Figura 2.1.7.	Histograma de energía liberada diaria, en términos de su raíz cuadrática, de eventos volcánicos por tipo, desde julio de 2009 a junio de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.	13
Figura 2.1.8.	Relaciones porcentuales de la variación de la sismicidad del segundo semestre del 2009 en comparación con el Primer Semestre de 2010. Izquierda, en cuanto a número de sismos y derecha, energía sísmica liberada.	13
Figura 2.1.9.	Relaciones porcentuales de conteo (arriba) y energía sísmica liberada (abajo) por tipo de sismos para el segundo semestre de 2009 (izquierda) y el Primer Semestre de 2010 (derecha).	14
Figura 2.1.10.	Histograma de número diario de sismos LP (arriba) y acumulado de sismos LP (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	15
Figura 2.1.11.	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos LP (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	16
Figura 2.1.12.	Histograma de número diario de episodios TRE (arriba) y acumulado de episodios TRE (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	17
Figura 2.1.13.	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos TRE (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	18
Figura 2.1.14.	Histograma de número diario de sismos HYB (arriba) y acumulado de sismos HYB (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	19
Figura 2.1.15.	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos HYB (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	20
Figura 2.1.16.	Histograma de número diario de sismos VT (arriba) y acumulado de sismos VT (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	21
Figura 2.1.17.	Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos VT (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.	22
Figura 2.1.18.	Hipocentros de sismos VT en la zona de influencia de Galeras durante el Primer Semestre de 2010. En los cortes norte-sur (derecha) y este-oeste (abajo) cada división equivale a 2 Km.	23
Figura 2.1.19.	Relaciones porcentuales por rangos de profundidad (izquierda) y por rangos de magnitud local (derecha) para los sismos VT localizados durante el Primer Semestre de 2010. A la derecha de cada diagrama se presentan sus convenciones.	23
Figura 2.1.20.	Evolución espacio temporal de sismos VT durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. En la gráfica superior se muestra las Latitudes y en la inferior las Longitudes.	24
Figura 2.1.21.	Evolución espacio temporal de sismos VT durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. En la gráfica superior se muestra las profundidades y en la inferior las magnitudes.	25
Figura 2.1.22.	Localización de los eventos tipo VT registrados entre el 6 y 8 de enero de 2010.	26
Figura 2.1.23.	Evolución temporal de la frecuencia fundamental de los eventos tipo tornillo registrados por la estación Anganoy entre el 9 de diciembre de 2009 y el 1 de enero de 2010. En la gráfica inferior se muestra un detalle de los eventos presentados desde el 18 de diciembre ya que el cambio en sus frecuencias es sutil.	29
Figura 2.1.24.	Evolución temporal de la duración de los eventos tipo tornillo, registrados por la estación Anganoy, entre el 9 de diciembre de 2009 y el 1 de enero de 2010.	30
Figura 2.1.25.	Evolución temporal de la duración de los eventos tipo pseudo-Tornillo, registrados por la estación Anganoy, entre el 9 de diciembre de 2009 y el 1 de enero de 2010.	30



Figura 2.1.26.	Sismograma, espectrograma y espectro del evento tipo Tornillo ocurrido el 29 de diciembre de 2009 a las 11:45 p.m., el cual registra una fase inicial con pulsos o eventos pequeños mayores que las ondas de coda.	31
Figura 2.1.27.	Sismograma, espectrograma y espectro del evento tipo Tornillo ocurrido el 1 de enero de 2010, a las 12:37 a.m. Este evento tuvo una duración de poco más de cinco minutos y correspondió al último de este tipo, registrado antes del evento eruptivo.	31
Figura 2.1.28.	Sismogramas, espectros y espectrogramas del evento tipo tremor ocurrido el 4 de diciembre a las 9:06 p.m., el cual presenta características armónicas en la parte final del evento.	32
Figura 2.1.29.	Sismogramas para las estaciones (de arriba abajo) Cráter-2, Cobanegra, Obonuco y Calabozo (componentes verticales), asociados al evento eruptivo de Galeras registrado el 2 de enero de 2010, a las 7:43 p.m. El alto nivel energético de la señal sísmica superó el rango de detección de la instrumentación de las estaciones Cobanegra y Obonuco, alcanzando su nivel de saturación.	33
Figura 2.1.30.	Sismograma registrado por la estación Cráter entre la 1:30 p.m. del 1 de enero hasta las 1:00 a.m. del 3 de enero de 2010. El tipo de digitalizador utilizado en esta estación impide la saturación de la señal, por tanto es posible observar hasta cuando esta alcanza su máxima amplitud (color rojo).	34
Figura 2.1.31.	Comparación de los niveles energéticos de las señales sísmicas asociadas a las erupciones de Galeras, registradas entre marzo de 2009 y enero de 2010.	34
Figura 2.1.32.	Sismogramas de las señales sísmicas asociadas a las erupciones desde el 13 de marzo de 2009 hasta el 2 de enero de 2010. Las trazas corresponden a los registros de la estación Cráter (que tiene un sismómetro de componente vertical) y están separadas por pequeños intervalos de tiempo para hacer posible su comparación.	35
Figura 2.1.33.	Registros del evento eruptivo del 2 de enero a las 7:43 p.m. para los sensores en la estación Calabozo, componente vertical de la estación Cráter, sensor acústico en Cráter, acústico EENTEC SA-4, acústico ISLA14. El desfase de las acústicas de Calabozo respecto a la señal sísmica de Cráter es mucho mayor, esto se debe a la distancia que hay entre el cráter y estos sensores teniendo en cuenta que la velocidad de propagación del sonido es aproximadamente de 340 m/s.	35
Figura 2.1.34.	Sismograma, espectro y espectrograma del evento tipo Tornillo, registrado el día 17 de enero de 2010, a las 6:21 p.m.	36
Figura 2.1.35.	Sismograma, espectro y espectrograma del evento tipo Tornillo, registrado el día 18 de enero a las 7:56 p.m.	36
Figura 2.1.36.	Frecuencia dominante evaluadas en la estación sismológica de corto período Urcunina, de los eventos tipo Tornillo (círculo negro) y Pseudo - tornillo (rombo azul) y LP monocromático (cuadrado amarillo), registrados entre el 8 y el 18 de enero de 2010, para la estación sismológica Urcunina.	37
Figura 2.1.37.	Sismograma del 18 al 25 de enero del 2010 de la estación Urcunina - componente vertical (ubicada a 2.3 km., al ESE del volcán), se resalta enjambre de eventos registrado la madrugada del 19 de enero de 2010.	38
Figura 2.1.38.	Evento tipo Tornillo registrado el 1 de febrero de 2010 a las 06:52 a.m.	39
Figura 2.1.39.	Evento tipo LP, registrado el 3 de febrero de 2010, a las 01:51 a.m.	39
Figura 2.1.40.	Espectro de Fourier de los eventos tipo Tornillo (rojo), Pseudo-Tornillo (azul) y LP (negro) registrados entre el 1 y el 5 de febrero de 2010.	40
Figura 2.1.41.	Sismograma del 6 al 7 de febrero del 2010 de la estación Urcunina - componente vertical (ubicada a 2.3 km., al ESE del volcán Galeras).	41
Figura 2.1.42.	Sismograma del 14 al 15 de febrero de 2010 de la estación Urcunina - componente vertical (ubicada a 2.3 Km al ESE del volcán). El ovalo rojo resalta la ocurrencia de eventos sísmicos clasificables y no clasificables registrados durante el 15 de febrero de 2010.	42
Figura 2.1.43.	Evento tipo LP registrado el 21 de febrero de 2010, a las 10:50 a.m.	42
Figura 2.1.44.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 23 de febrero a la 1:49 p.m., el cual presenta características de lenta atenuación en la parte final del evento.	43
Figura 2.1.45.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 25 de febrero a la 6:27 a.m., el cual presenta características de lenta atenuación en la parte final del evento.	43
Figura 2.1.46.	Evento tipo TRE registrado el 10 de febrero de 2010 a las 10:39 p.m. Al lado izquierdo se muestra la traza sísmica del evento en las estaciones CR2R, URCR, COB3 y NAR2, a la derecha se muestra el espectro de frecuencias.	44
Figura 2.1.47.	Evento tipo TRE registrado el 20 de febrero de 2010, a las 10:28 a.m.	44
Figura 2.1.48.	Sismograma del 17 al 18 de abril de 2010 de la estación Anganoy - componente vertical (ubicada a 0,84 km., al ESE del cráter principal). El ovalo rojo resalta la ocurrencia de eventos sísmicos clasificables y no clasificables registrados durante el 18 de abril de 2010.	45



Figura 2.1.49.	Sismograma de la estación Anganoy (ANGV) de la red de vigilancia de Galeras, entre el 1 y el 3 de mayo de 2010. El óvalo rojo resalta el enjambre sísmico, registrado entre el 2 y el 3 de mayo de 2010.	46
Figura 2.1.50.	Sismogramas y espectros en frecuencia de los eventos tipo TRE armónico ocurridos el 18 de mayo de 2010, registrados en la estación Anganoy, de la red de vigilancia de Galeras.	47
Figura 2.1.51.	Sismograma y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado en la estación Anganoy, de la red de vigilancia de Galeras, el 29 de mayo de 2010 a las 10:59 p.m.	48
Figura 2.1.52.	Evento tipo LP registrado por algunas estaciones de la red de monitoreo de Galeras, el 16 de mayo a las 5:48 p.m. Izquierda: Sismograma digital, derecha: espectro de Fourier.	48
Figura 2.1.53.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 23 de mayo a la 9:37 p.m., registrado por algunas de las estaciones de monitoreo del volcán Galeras.	49
Figura 2.1.54.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Tornillo registrado el 7 de junio de 2010, a las 11:32 a.m.	50
Figura 2.1.55.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR registrado el 23 de junio de 2010, a las 7:22 p.m.	50
Figura 2.1.56.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR registrado el 24 de junio de 2010, a la 1:24 a.m.	51
Figura 2.1.57.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Pseudo-Tornillo (PST) registrado el 21 de junio, a las 5:17 a.m.	51
Figura 2.1.58.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Pseudo-Tornillo registrado el 23 de junio de 2010, a las 11:34 p.m.	52
Figura 2.1.59.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP con coda no clasificable registrado el 12 de junio a las 4:38 p.m.	52
Figura 2.1.60.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 23 de junio de 2010, a las 9:26 a.m.	53
Figura 2.1.61.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado el 23 de junio de 2010, a las 10:35 p.m.	53
Figura 2.1.62.	Sismogramas y espectros en frecuencia del Episodio de temblor espasmódico registrado el 9 de junio a las 9:21 p.m.	54
Figura 2.1.63.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 24 de junio de 2010, a la 1:29 a.m.	54
Figura 2.1.64.	Sismograma y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 28 de junio de 2010, a las 9:21 p.m.	55
Figura 2.1.65.	Sismograma y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 28 de junio de 2010, a las 9:28 p.m.	56
Figura 2.1.66.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Cráter, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.	58
Figura 2.1.67.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Peladitos, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.	59
Figura 2.1.68.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Huairatola, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.	59
Figura 2.1.69.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Calabozo, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.	60
Figura 2.1.70.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Cobanegra, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.	60
Figura 2.1.71.	Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Galeras. Las figuras de color violeta indican la ubicación de las Base 1 y 2, las figuras de color verde (oscuro y claro) indican la ubicación de los prismas.	62
Figura 2.1.72.	Flujo de emisión de SO ₂ registrado entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010, por los instrumentos ScanDOAS y MovilDOAS en Galeras. Se resalta en gris el mes evaluado.	64
Figura 2.1.73.	Imagen de la fuente termal: CEHANI, del volcán Galeras.	65
Figura 2.1.74.	Imagen de la fuente termal: Río Pasto, del volcán Galeras.	65



Figura 2.1.75.	Imágenes de la fuente termal: Aguas Agrias, del volcán Galeras.	66
Figura 2.1.76.	Imagen de la fuente termal: Fuente Blanca, del volcán Galeras.	66
Figura 2.1.77.	Imagen de la fuente termal: Licamancha, del volcán Galeras.	67
Figura 2.1.78.	Imágenes en las cuales se observa el muestreo en las aguas termales del Volcán Galeras.	68
Figura 2.1.79.	Fotografía del análisis de carbonatos y bicarbonatos de las fuentes termales del Volcán Galeras.	69
Figura 2.1.80.	Diagrama triangular Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₄ ²⁻ para las fuentes termales del Volcán Galeras.	70
Figura 2.1.81.	Diagrama triangular Na ⁺ - K ⁺ - Mg ⁺ , para las fuentes termales del Volcán Galeras.	72
Figura 2.1.82.	Mapa de localización de las estaciones no telemétricas para el monitoreo de gas Radón en el volcán Galeras, que funcionaron durante el Primer Semestre de 2010.	73
Figura 2.1.83.	Emisiones de gas Radón (Rn ₂₂₂) en las estaciones de la línea Galeras, entre marzo y junio de 2010.	74
Figura 2.1.84.	Imagen térmica de la columna de material asociada a la erupción explosiva de Galeras, registrada el 2 de enero de 2010 a las 7:43 p.m. En la imagen (tomada empleando la cámara térmica FLIR ThermaCAM PM595PAL, convenio INGEOMINAS - BGR de Alemania), los colores más claros representan temperaturas más altas. La altura de columna en el momento de la captura de la imagen fue de 12 Km aproximadamente.	76
Figura 2.1.85.	Mapa de dispersión de cenizas de la erupción de Galeras ocurrida el 2 de enero de 2010, a las 7:43 p.m., elaborado por VAAC con base en las imágenes del sensor satelital GOES-12. Las altitudes máximas de columna se expresan en unidades FL (Flight Lines: Líneas de Vuelo). Una FL equivale a aproximadamente 100 pies sobre la superficie terrestre. Las horas se expresan en UT (Universal Time, Tiempo Local menos 5 horas).	77
Figura 2.1.86.	Secuencia de imágenes del satélite GOES-12 (canal infrarrojo, resolución de 4 Km., por píxel) en las que se observa la evolución entre las 7:45 p.m. hasta las 8:45 p.m., de la columna de gases y cenizas asociada al episodio eruptivo del volcán Galeras, registrado a las 7:43 p.m., del 2 de enero de 2010.	77
Figura 2.1.87.	Imágenes de algunos de los sectores y poblaciones donde se realizó muestreo de la ceniza emitida en la erupción del 2 de enero de 2010 y depositada en la vía circunvalar al Galeras (superior izquierda), Ancuya (superior derecha), Ricaurte (inferior izquierda), Linares (inferior derecha).	78
Figura 2.1.88.	Mapa de isópacas para la erupción de Galeras registrada el 2 de enero de 2010. La tabla en la parte inferior izquierda indica las áreas efectivas, los volúmenes calculados para las isópacas de cada espesor estimado y el volumen total estimado.	79
Figura 2.1.89.	Aspecto de la muestra de ceniza bajo la lupa binocular (aumento X 10). Correspondiente a una muestra vítrea, tomada en la localidad de Consacá, en la cual se aprecian algunos fragmentos de cristales y roca.	80
Figura 2.1.90.	Fotogramas captados por la cámara web ubicada en la sede del OVSP de las manifestaciones en superficie del evento eruptivo registrado el 2 de enero de 2010.	82
Figura 2.1.91.	Fotografía capturada desde la sede del Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, el 3 de enero de 2010.	82
Figura 2.1.92.	Fotografías registradas desde diferentes sectores del municipio de Pasto. La fotografía de la izquierda fue tomada por el señor Luis Ponce M. desde el Estadio de la Pastusidad, minutos después de la erupción, se observa como la columna adquiere una forma especial debido a las diferencias en las direcciones del viento con la altura. La fotografía de la derecha fue registrada desde el sector de Pinasaco.	83
Figura 2.1.93.	Registros fotográficos tomados durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras – 3 de enero de 2010.	83
Figura 2.1.94.	A la izquierda, se observa la emisión de Galeras, registrada el 7 de febrero a las 10:07 am., y a la derecha, se observa la emisión, registrada el 22 de febrero a las 06:15 p.m. Las imágenes fueron capturadas desde el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto.	84
Figura 2.1.95.	Registro fotográfico tomado durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras, del 15 de febrero de 2010.	84
Figura 2.1.96.	Imágenes de Galeras tomada por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 24 de febrero de 2010.	85
Figura 2.1.97.	Imagen de Galeras capturada desde el municipio de Consacá, el día 4 de marzo de 2010.	85
Figura 2.1.98.	Registro fotográfico del cono activo de Galeras, tomado el día 8 de marzo de 2010.	86
Figura 2.1.99.	Imagen de Galeras tomada por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 12 de marzo de 2010.	86
Figura 2.1.100.	Imagen de Galeras tomada por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 15 de marzo de 2010.	87
Figura 2.1.101.	Imagen de Galeras tomada en sobrevuelo con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana, efectuado el 22 de marzo de 2010.	87



Figura 2.1.102.	Imagen de Galeras tomada desde la sede del OVSP, el 23 marzo de 2010, a las 6:21 a.m.	88
Figura 2.1.103.	Imágenes de Galeras tomadas por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 15 de marzo de 2010.	88
Figura 2.1.104.	Emisión de gases vista desde la sede del OVSP, el 2 de abril de 2010, en horas de la mañana (entre las 6:05 a.m. y las 6:40 a.m.).	89
Figura 2.1.105.	Emisión de gases vista desde la sede del OVSP, el 7 de abril de 2010, en horas de la tarde (3:20 p.m.).	89
Figura 2.1.106.	Emisión de gases vista desde la sede del OVSP, el 10 de abril de 2010, en horas de la tarde (5:03 p.m.).	90
Figura 2.1.107.	Emisiones de gases vistas desde la sede del OVSP el 12 de abril de 2010. Izquierda: Emisión a las 6:00 a.m. Derecha: Emisión a las 7:59 a.m.	90
Figura 2.1.108.	Imágenes de Galeras tomadas desde la sede del OVSP, el 14 de abril de 2010. Capturadas a las 7:49 a.m. (izquierda) y a las 7:56 a.m. (derecha). En las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca y dirección norte.	91
Figura 2.1.109.	Imagen de Galeras tomada desde la sede del OVSP, el 22 de abril de 2010, a las 12:21 p.m.	91
Figura 2.1.110.	Imagen del cono activo de Galeras, tomada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 30 de abril de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.	92
Figura 2.1.111.	Imágenes de Galeras capturadas el 4 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 4:20 p.m. (izquierda) y a las 4:17 p.m. (derecha).	93
Figura 2.1.112.	Imágenes de Galeras capturadas el 6 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 6:43 a.m. (izquierda) y a las 6:44 a.m. (derecha). En las fotografías se observa emisión de gas de coloración blanca a manera de pulsos.	93
Figura 2.1.113.	Imágenes de Galeras capturadas el 23 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 4:35 p.m. (izquierda) y a las 4:37 p.m. (derecha). En las fotografías se observa emisión de gas de coloración blanca.	94
Figura 2.1.114.	Imagen de Galeras capturada el 24 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP. En la fotografía se observa emisión de gas de coloración blanca.	94
Figura 2.1.115.	Imágenes de Galeras capturadas el 28 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 7:33 a.m. (izquierda) y a las 7:34 a.m. (derecha). En las fotografías se observa emisión de gas de coloración gris, a manera de pulsos.	95
Figura 2.1.116.	Imagen de Galeras capturada el 28 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, entre las 3:37 p.m. y las 4:28 p.m.	95
Figura 2.1.117.	Imagen de Galeras capturada el 28 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, entre las 4:29 p.m. y las 5:00 p.m.	96
Figura 2.1.118.	Imagen de Galeras, en la cual se observa emisión de gases, vista desde la sede del OVSP, el 1 de junio de 2010, entre las 2:48 p.m. y las 2:56 p.m.	96
Figura 2.1.119.	Emisión de gases del campo de fumarolas Las Deformes y el cráter secundario el Paisita, reportado por la comisión de deformación el día 2 de junio de 2010.	97
Figura 2.1.120.	Imagen de Galeras, en la cual se observa emisión de gases, vista desde la sede del OVSP, el 21 de junio de 2010, a las 3:27 p.m.	98
Figura 2.1.121.	Imagen de Galeras, en la cual se observa emisión de gases, vista desde la sede del OVSP, el 21 de junio de 2010 a las 6:09 p.m.	98
Figura 2.1.122.	Efectos de los impactos de roca en la parte externa de las instalaciones de la empresa de telecomunicaciones.	99
Figura 2.1.123.	Efectos identificados en la carretera, en la vía a la cima de Galeras, generados por la erupción del 2 de enero de 2010.	100
Figura 2.1.124.	Efectos en el sector externo de la empresa de telecomunicaciones debido a impactos de roca por la erupción del 2 de enero de 2010.	100
Figura 2.1.125.	Efectos de los impactos de roca en la parte externa de las instalaciones, así como en la parte interna de las instalaciones de la empresa de telecomunicaciones.	100
Figura 2.1.126.	Ubicación en el mapa de sombras elaborado por la NASA con un modelo de elevación del terreno de 1 m, de los puntos muestreados.	102
Figura 2.1.127.	Imagen de la roca descrita en el punto A04 (izquierda). Imagen del Cráter de impacto descrito en el punto A09 (derecha).	102
Figura 2.1.128.	Imagen del Cráter de impacto descrito en el punto A10 (izquierda). Imagen del Cráter de impacto descrito en el punto A12 (derecha), el de mayor diámetro (4.5 m) observado para este evento eruptivo.	103
Figura 2.1.129.	Imágenes del reflector ubicado a pocos metros de la base militar, afectado por el material emitido por el evento eruptivo del 2 de enero.	103
Figura 2.1.130.	Efectos de los procesos eruptivos en el sector de la base militar ubicada en la cima de Galeras.	104



Figura 2.1.131.	Daño de paneles solares (izquierda). Impacto de roca sobre el cable de la antena de la estación de Anganoy (derecha).	104
Figura 2.1.132.	Daño de panel solar (izquierda). Daño en la antena de transmisión de datos del inclinómetro electrónico Cráter (derecha).	105
Figura 2.1.133.	Estado de los paneles solares de la repetidora de la estación Calabozo (izquierda). Condiciones de funcionamiento de la repetidora de la estación de corto período Calabozo (derecha).	105
Figura 2.1.134.	Estado de los paneles solares en la estación de Cráter (izquierda). Distribución de material volcánico de menor tamaño en el sector de la estación Cráter (derecha).	106
Figura 2.1.135.	Imagen térmica de la columna de material asociada a la erupción explosiva de Galeras, registrada el 2 de enero de 2010 a las 7:43 p.m.	107
Figura 2.1.136.	Imagen térmica del cono activo de Galeras, registrada el 15 de febrero de 2010.	108
Figura 2.1.137.	Imagen térmica del cono activo de Galeras tomada el 30 de abril, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.	108
Figura 2.2.1.	Imagen tomada de Google Earth en donde se observan algunos volcanes del sur de Colombia y del norte del Ecuador, entre ellos están Doña Juana, Galeras, Azufral y Cumbal, monitoreados por el OVSP - INGEOMINAS.	117
Figura 2.2.2.	Imagen de la cima del volcán Doña Juana.	117
Figura 2.2.3.	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el Primer Semestre de 2010.	119
Figura 2.2.4.	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el primer semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos. Los triángulos rojos representan estaciones sísmicas de corto período; el triángulo magenta, una estación sísmica de corto período de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC); el hexágono naranja, una estación sísmica de banda ancha; los círculos verdes, inclinómetros electrónicos; y los cuadros verdes, estaciones repetidoras.	120
Figura 2.2.5.	Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el primer semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana.	120
Figura 2.2.6.	Histograma del número de eventos volcánicos por tipo, ocurridos entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010, para el volcán Doña Juana. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en el presente informe.	121
Figura 2.2.7.	Registro del episodio de pulsos, en las estaciones Florida y Lavas, en la componente vertical, registrado entre las 11:29 a.m. y las 11:33 a.m., del 16 de abril de 2010.	122
Figura 2.2.8.	Sismogramas y espectros en frecuencia de los pulsos registrados el 16 de abril de 2010, registrado entre las 11:29 a.m. y las 11:33 a.m.	122
Figura 2.2.9.	Registro del episodio de pulsos, en las estaciones Florida y Lavas, en la componente vertical, registrado entre las 11:44 a.m. y las 11:54 a.m., del 16 de abril de 2010.	122
Figura 2.2.10.	Sismogramas y espectros en frecuencia de los pulsos registrados el 16 de abril de 2010, registrado entre las 11:44 a.m. y las 11:54 a.m.	123
Figura 2.2.11.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, registrado el 12 de marzo a las 12:28 p.m. Estos registros en algunas estaciones de monitoreo de Doña Juana, se encuentran saturados, lo que significa que el nivel energético del evento sísmico sobrepasa el rango de amplitud que la estación puede tolerar.	123
Figura 2.2.12.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 13 de marzo a las 6:45 p.m., en las estaciones de monitoreo del volcán Doña Juana.	124
Figura 2.2.13.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VC, ocurrido el 11 de mayo de 2010, a las 6:39 p.m., registrado en las estaciones de monitoreo del volcán Doña Juana.	124
Figura 2.2.14.	Sismogramas del evento tipo VT, registrado el 25 de junio de 2010 a las 7:02 a.m., por las componentes vertical de la estación Lavas, Florida, Páramo y la Cruz.	124
Figura 2.2.15.	Localización epicentral e hipocentral de los sismos de fractura registrados por algunas estaciones de la red de monitoreo de Doña Juana, en el mes de septiembre de 2010, con sus respectivos cortes N-S (derecha) y E-W (abajo). En los cortes cada línea representa 2 km., de profundidad con respecto a la cima volcánica, el color de los círculos depende de su profundidad.	125
Figura 2.2.16.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Florida, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.	126
Figura 2.2.17.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Paramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 julio de	127



	2009 y el 7 de abril de 2010 (fecha en la cual se retiró el equipo para revisión en sede). El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.	
Figura 2.2.18.	Registro fotográfico tomados durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Doña Juana, el cual se realizó en horas de la mañana del 3 de enero de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.	128
Figura 2.3.1.	Panorámica de la laguna cratérica del volcán Azufzal. Nótese el domo pequeño de color claro en la parte izquierda de la imagen y detrás de la laguna, los grandes domos. Septiembre 4 de 2008, 12:10 p.m.	131
Figura 2.3.2.	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufzal, durante el primer semestre de 2010.	132
Figura 2.3.3.	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufzal, durante el primer semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.	133
Figura 2.3.4.	Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el primer semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufzal.	133
Figura 2.3.5.	Histograma del número de eventos volcánicos por tipo, ocurridos entre el 1 de julio del 2009 y el 30 de junio de 2010, para el volcán Azufzal. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en el presente informe.	134
Figura 2.3.6.	Sismograma en la estación Chaitán (instalada en Azufzal) del enjambre de eventos sísmicos registrados el 5 de febrero a las 09:35 a.m.	135
Figura 2.3.7.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 1 de marzo a las 9:44 p.m., en la estación sísmica Chaitán instalada en el volcán Azufzal.	135
Figura 2.3.8.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, registrado el 6 de marzo a las 4:01 p.m., en la estación sísmica Chaitán instalada en el volcán Azufzal.	136
Figura 2.3.9.	Sismograma (arriba) y espectro (abajo) en la estación Chaitán (componente vertical) de uno de los eventos relacionados movimiento de fluidos de fuente persistente tipo TRE registrado el 6 de abril de 2010 a las 1:26 p.m.	136
Figura 2.3.10.	Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VC, ocurrido en Azufzal, registrado el 18 de mayo a las 7:23 p.m., en la estación sísmica Chaitán.	136
Figura 2.3.11.	Sismograma en la estación Chaitán (componente vertical) de uno de los eventos relacionados fracturamiento de material cortical registrado el 2 de junio de 2010 a las 12:41 a.m.	137
Figura 2.3.12.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Chaitán, instalado en el volcán Azufzal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.	137
Figura 2.3.13.	Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro La Roca, instalado en el volcán Azufzal, para el periodo comprendido entre el 1 de noviembre de 2009 y el 30 de junio de 2010. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.	138
Figura 2.3.14.	Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Azufzal. Las figuras de color verde indican la ubicación de las Base 1 y 2, las figuras de color amarillo indican la ubicación de los prismas.	139
Figura 2.3.15.	Imagen del muestreo de aguas ejecutado en la Laguna Verde del volcán Azufzal.	140
Figura 2.3.16.	Temperaturas del agua en Laguna Verde y mofeta del volcán Azufzal.	142
Figura 2.3.17.	Potenciales de Hidrógeno del agua en Laguna Verde del volcán Azufzal.	142
Figura 2.3.18.	Diagrama triangular Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₂ ²⁻ , de las muestras tomadas en la Laguna Verde del volcán Azufzal.	143
Figura 2.3.19.	Fotografía de la Fuente Termal el Salado de Malaver, del volcán Azufzal.	145
Figura 2.3.20.	Fotografía de la Fuente Termal La Cabaña, del volcán Azufzal.	145
Figura 2.3.21.	Fotografía de la Fuente Termal Quebrada Blanca (Chimangual), del volcán Azufzal.	146
Figura 2.3.22.	Fotografía de la Fuente Termal San Ramón, del volcán Azufzal.	147
Figura 2.3.23.	Fotografía de la toma de muestra de aguas de las fuentes termales del Volcán Azufzal.	147
Figura 2.3.24.	Diagrama triangular Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₂ ²⁻ para las fuentes termales del Volcán Azufzal.	149
Figura 2.3.25.	Diagrama triangular Na ⁺ - K ⁺ - Mg ⁺ , para las fuentes termales del Volcán Azufzal.	149
Figura 2.3.26.	Imágenes de la toma de muestra de gases en la fumarola Mallama del Volcán Azufzal.	150
Figura 2.3.27.	Fotografía de la instalación de la estación de gas Radón en el Volcán Azufzal.	152
Figura 2.3.28.	Fotografía de la instalación de la estación de gas Radón en el agua, de la Laguna Verde del Volcán Azufzal.	153
Figura 2.3.29.	Ruta de medición registrada con el GPS del MovilDOAS de NOVAC, en el domo activo del Volcán Azufzal.	154
Figura 2.3.30.	Espectro de la medición con MovilDOAS, caminando alrededor del domo activo del Volcán Azufzal, el día 25 de Marzo de 2010.	154
Figura 2.3.31.	Distancias a lo ancho en la Laguna Verde del Volcán Azufzal.	155



Figura 2.3.32.	Distancias a lo largo en la Laguna Verde del Volcán Azufral.	156
Figura 2.3.33.	Distancias máximas en la Laguna Verde del Volcán Azufral.	156
Figura 2.3.34.	Registros fotográficos tomados durante el sobrevuelo a la cima del volcán Azufral, el cual se realizó en horas de la mañana del 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.	157
Figura 2.3.35.	Imagen de Azufral capturada en sobrevuelo el 2 de mayo de 2010, a las 7:12:52 a.m. En la fotografía se observa emisión de gas desde el campo fumarólico del domo pequeño.	158
Figura 2.3.36.	Imagen térmica de Azufral, tomada en sobrevuelo de mayo 2 de 2010. En la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes.	158
Figura 2.3.37.	Instalación de torre en la orilla de la Laguna Verde del Volcán Azufral.	159
Figura 2.3.38.	Comparación de la variación de nivel del agua en Laguna Verde del volcán Azufral.	160
Figura 2.3.39.	Comparación del color del agua de Laguna Barrosa del volcán Azufral.	160
Figura 2.3.40.	Imagen de un sector de la Laguna Verde- Azufral. En la fotografía, se resalta el descenso en el nivel del agua, además, se instaló dos medidores artesanales de nivel, con el fin de realizar un seguimiento de este.	161
Figura 2.3.41.	Comparación de nivel del agua de la Laguna de Azufral, con medidores artesanales. A) 2 de mayo de 2010; B) 13 de mayo de 2010.	161
Figura 2.3.42.	Imagen de la Laguna de Azufral, en la cual se aprecia la ubicación de los medidores artesanales de nivel de agua y una tabla que el 2 de mayo de 2010 fue utilizada como puente.	162
Figura 2.3.43.	Imagen de la Laguna Verde, en la cual se observa la ubicación de las líneas blancas en la superficie de la Laguna.	162
Figura 2.3.44.	Imágenes de la Laguna Verde, capturadas entre el 13 y 14 de mayo de 2010, en las fotografías se observa una de las líneas blancas que atraviesa la superficie de la Laguna.	163
Figura 2.3.45.	Imágenes de la Laguna Verde, capturadas entre el 13 y 14 de mayo de 2010, en las fotografías se observa el cambio de textura en la superficie de la Laguna.	163
Figura 2.3.46.	Imágenes de Azufral capturadas el 13 de mayo de 2010. En las fotografías se observa emisión de gas desde el campo fumarólico del domo pequeño.	163
Figura 2.4.1.	Imagen del complejo volcánico Cumbal.	165
Figura 2.4.2.	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal, durante el Primer Semestre de 2010.	166
Figura 2.4.3.	Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal, durante el Primer Semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.	167
Figura 2.4.4.	Histograma del porcentaje de funcionamiento, durante el Primer Semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal.	167
Figura 2.4.5.	Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro La Mesa, instalado en el complejo volcánico Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010.	168
Figura 2.4.6.	Fotografía de la Fuente Termal El Salado, del Complejo volcánico de Cumbal.	169
Figura 2.4.7.	Fotografía de la Fuente Termal El Zapatero, del Complejo volcánico de Cumbal.	170
Figura 2.4.8.	Fotografía de la Fuente Termal Cuetial, del Complejo volcánico de Cumbal.	170
Figura 2.4.9.	Fotografía de la Fuente Termal Hueco Grande, del Complejo volcánico de Cumbal.	171
Figura 2.4.10.	Fotografía de la medición de pH en la Fuente termal el Salado, del Volcán Cumbal.	172
Figura 2.4.11.	Diagrama triangular Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₄ ²⁻ para las fuentes termales del Volcán Cumbal.	173
Figura 2.4.12.	Diagrama triangular Na ⁺ - K ⁺ - Mg ⁺ , para las fuentes termales del Volcán Cumbal.	174
Figura 2.4.13.	Registros fotográficos capturados durante el sobrevuelo a la zona de influencia del volcán Cumbal, el cual se realizó en horas de la mañana del 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.	175



ANEXOS

		Pág.
Anexo 1.	Parámetros de las localizaciones obtenidos (empleando el método de Geiger, implementado por el programa HYPO71) a partir de los registros sísmicos de los principales eventos Vulcano-tectónicos e híbridos registrados durante el Primer Semestre de 2010, en Galeras, se resalta los eventos reportados como sentidos.	110
Anexo 2.	Parámetros de las localizaciones obtenidos (empleando el método de Geiger, implementado por el programa HYPO71) a partir de los registros sísmicos de los principales eventos Vulcano-tectónicos registrados durante el Primer Semestre de 2010, en Doña Juana.	129



INTRODUCCIÓN

A lo largo del Primer Semestre de 2010, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto -INGEOMINAS, continuó con la tarea institucional de vigilar la actividad del volcán Galeras, monitoreando en forma continua durante las 24 horas del día y en tiempo real, los diferentes parámetros de estudio que permiten la evaluación de la actividad volcánica. De igual manera se continuó con la vigilancia de los volcanes Doña Juana, Azufral y Cumbal con sensores sísmicos, de deformación cortical y muestreos periódicos de Geoquímica.

Existen varios métodos científicos a los que se recurre para vigilar un volcán; en este informe se resaltan principalmente los resultados obtenidos en el Primer Semestre de 2010, en las diferentes áreas de monitoreo, mediante el procesamiento primario de los datos instrumentales y apreciables de la actividad volcánica, tanto para Galeras, como para los volcanes del Suroccidente de Colombia. El nivel de actividad de un volcán es el producto de la combinación de varios factores, tanto mesurables, como los apreciables de la actividad volcánica, los cuales pueden variar en intensidad, duración y frecuencia. Se destacan aspectos del seguimiento de la actividad superficial y de cambios geomorfológicos, para lo cual se contó nuevamente con la valiosa cooperación de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). INGEOMINAS expresa a la FAC su total agradecimiento.

Los trabajos de monitoreo, análisis y evaluación de la actividad de los volcanes activos de Nariño, han permitido mantener informada a la comunidad, a las entidades del Sistema Nacional de Atención y Prevención de Desastres y a las autoridades locales y regionales, sobre la evolución del fenómeno volcánico en el periodo mencionado.

Este informe técnico de la actividad de Galeras y de los volcanes Doña Juana, Azufral y Cumbal puede ser consultado por personas con diferentes niveles académicos y puede ser usado como guía informativa, de consulta ó como una base para el desarrollo de estudios posteriores que requieran mayor detalle y nivel de análisis, siempre y cuando se respete y se cite la fuente primaria.



RESUMEN

A partir del ocho de diciembre de 2009, empezaron a presentarse variaciones en el sistema volcánico de Galeras los cuales se reflejaron en el cambio en la ocurrencia de la sismicidad, pasando de unos bajos niveles de ocurrencia a un número considerable de eventos, predominando aquellos relacionados con la dinámica de fluidos de fuente transitoria (LP) y la ocurrencia de eventos tipo Tornillo y pseudo-Tornillo. Este comportamiento conllevó a que el 9 de diciembre de 2009, el OVSP cambiara el nivel de actividad a II y el proceso evolucionó hasta desencadenar en el evento eruptivo del dos de enero de 2010 fecha en la cual la actividad de Galeras cambia a Nivel I (ERUPCIÓN INMINENTE O EN CURSO).

Una vez ocurrido el evento eruptivo, la actividad sísmica se caracterizó por el predominio de silencio sísmico. Entre el 6 y 8 de enero se registraron eventos relacionados al fracturamiento de material cortical (VT) de nivel energético importante, cuatro de los cuales fueron reportados como sentidos por personas en el área de influencia de Galeras. A partir del 9 de enero, empiezan a registrarse sismos LP de bajo nivel energético, algunos de estos eventos mostraron características espectrales especiales, presentándose eventos tipo pseudo-Tornillo y Tornillo. Esta actividad continuo hasta el 19 de enero, día en el que se registró un enjambre de eventos de nivel energético importante, la mayoría de tipo LP, después de ocurrido el enjambre predominó el silencio sísmico hasta el 31 de enero. A partir del 1 de febrero, nuevamente se registraron eventos de características especiales, presentándose eventos tipo Tornillo y pseudo-Tornillo. Tras la evaluación de los diferentes parámetros de Galeras, el 9 de febrero, el Ingeominas decide cambiar el nivel II de actividad a nivel III o amarillo (III: "Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica"), el cual se mantuvo hasta el 23 de agosto, tras un incremento significativo de sismicidad.

Luego del episodio eruptivo registrado el 2 de enero, si bien se presentaron fluctuaciones, la actividad de Galeras mantuvo niveles bajos de sismicidad, la actividad sísmica de Galeras se caracterizó principalmente por el predominio en ocurrencia de eventos relacionados con la dinámica de fluidos al interior del sistema volcánico (LPS), seguido por eventos asociados con fracturamiento de material cortical y posterior movimiento de fluido (HYB), y en menor cuantía por eventos asociados con movimiento de fluidos, cuya fuente es más persistente en el tiempo (TRE), estos eventos se registraron en la segunda mitad del mes de mayo, el último registro que se tiene de este tipo de eventos fue el 6 de marzo de 2010. En cuanto a los eventos relacionados a la dinámica de fluidos, se destacan algunos de ellos, porque mostraron una frecuencia dominante en su registro y otros un decaimiento lento de su amplitud, de igual manera, se resaltan los registros de eventos tipo TRE, clasificados como armónicos por mostrar frecuencias dominantes en su espectro.

Se destaca que algunos de los eventos relacionados con fracturamiento de material cortical (Vulcano-tectónicos, VT), mostraron un incremento a nivel energético, algunos de estos eventos, que se localizaron hacia el sector noreste y este-noreste, fueron reportados como sentidos por algunos habitantes de la zona de influencia de Galeras.

El descenso tanto de la ocurrencia, como de la energía sísmica asociada con fluidos, se pudo correlacionar de cierta forma con los valores del flujo de dióxido de Azufre - SO₂ proveniente de Galeras, que igualmente se mostraron en rangos bajos. Por otro lado, las componentes de los inclinómetros electrónicos instalados en Galeras, presentaron tendencias algunas de estabilidad y otras en descenso pero con cambios mínimos.

En cuanto a la actividad superficial, en sobrevuelos y a imágenes capturadas por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, se evidenció la salida de gases de coloración blanca, en poca cantidad



Libertad y Orden

**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**

República de Colombia

provenientes del cráter principal y de los cráteres secundarios de Galeras. En algunas imágenes se observó en el sector del borde de la caldera, en la parte sur, hacia el sitio donde se ubica el consorcio de las antenas y en dirección hacia la estación Cráter, grietas posiblemente provocadas por las últimas erupciones. Adicionalmente, personal del OVSP, en trabajos en campo, en sectores de la zona de influencia de Galeras, reportaron sentir fuertes olores a gases azufrados.

Por otro lado, las redes de vigilancia sísmica y de deformación instaladas en los volcanes Doña Juana, Cumbal y Azufral, durante el Primer Semestre de 2010, han funcionado con algunos problemas, relacionados principalmente con los sistemas de transmisión de datos; a pesar de esto ha sido posible detectar sismicidad volcánica en Doña Juana y Azufral. Con base en el análisis de la información de los volcanes Doña Juana y Azufral, el nivel de actividad se considera en **NIVEL VERDE ● (IV): “Volcán activo y comportamiento estable”**. Para el volcán Cumbal no fue posible realizar la evaluación de la actividad volcánica debido a que no se cuenta con información instrumental de la actividad volcánica del mismo ya que se recuerda que en el mes de diciembre de 2009, fue hurtada una estación sismológica de banda ancha.

En cuanto a la actividad del volcán Doña Juana, se observó en este periodo, que la actividad sísmica estuvo dominada por eventos asociados a fracturamiento de material cortical, cuyas profundidades se concentran en los 7 km., respecto a la cima y dirección hacia el sector noreste a distancias epicentrales entre 8 y 10 km., respecto al cono activo. En relación al volcán Azufral, se observó en sismicidad, un predominio, en este periodo de eventos clasificados como volcánicos, sismos que se registran en la zona de influencia del edificio volcánico, cuya fuente puede estar asociada con procesos volcánicos, que por sus características no es fácil clasificar. Además se destacan los cambios observados en relación a la actividad superficial, principalmente salida de gases, descenso en el nivel del agua de la Laguna Verde y zonas de burbujeo.



2. VOLCANES DE NARIÑO



2.1. VOLCÁN GALERAS

2.1.1. Red de vigilancia

Durante el primer semestre de 2010, la red instalada para la vigilancia y monitoreo del volcán Galeras estuvo conformada por las siguientes estaciones:

- Nueve estaciones sismológicas telemétricas de las cuales ocho son de corto periodo (3 triaxiales y 5 de componente vertical) (Figura 2.1.1, Tabla 2.1.1). Para recibir la información que detectan estas estaciones en la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP), se cuenta con una red telemétrica tipo punto a punto, con tres repetidoras instaladas en sitios estratégicos. Las estaciones que usan repetidora para el enlace son: Cóndor (repite por Cruz de Amarillo); Calabozo (repite por Cráter2); y Nariño-2 (repite por Morasurco). En la figura 2.1.1 se muestran los enlaces de radio entre las diferentes estaciones con las tres repetidoras y la sede del OVSP. Se reinstaló la estación sismológica telemétrica de banda ancha triaxial Cufiño, el día 27 de mayo del presente año (Figura 2.1.1, Tabla 2.1.1).
- Cinco inclinómetros electrónicos telemétricos (Figura 2.1.2, Tabla 2.1.2). La transmisión de los datos para cuatro de estos inclinómetros (Cráter, Peladitos, Huairatola, y Cobanegra) se realizó a través de una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para todos los inclinómetros instalados en el departamento de Nariño, exceptuando el inclinómetro Calabozo, que emplea el mismo radio-enlace de la estación sísmica y el sensor acústico.
- Una red de tres estaciones telemétricas para la detección de emisiones de dióxido de azufre (SO₂) a la atmosfera, que se encuentran localizadas en el cuadrante noroccidental del edificio volcánico. Para recibir la información de estas estaciones en el OVSP se cuenta con una red telemétrica punto a punto conmutable (*switchable*), con dos repetidoras en los cerros Alto de la Palma y Morasurco (Figura 2.1.3, Tabla 2.1.3). Adicionalmente, se dispone de un equipo portátil MiniDOAS para hacer seguimientos de las emisiones de SO₂, a través de mediciones efectuadas recorriendo la vía circunvalar al volcán Galeras.
- Una estación telemétrica de Campo eléctrico y Campo magnético (Frailejones) que se instaló la el día 22 de febrero del presente año (Figura 2.1.1, Tabla 2.1.4).
- Dos sensores acústicos, uno ubicado en el sector occidental, en el sitio de la estación sismológica de corto periodo Calabozo, y otro ubicado en el sitio de la estación sismológica de corto periodo Cráter-2 (Figura 2.1.1).
- Una cámara de video para observación y seguimiento de la actividad superficial, instalada en la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (Figura 2.1.4).
- Una cámara térmica FLIR para el monitoreo de anomalías térmicas en la roca, en el área del cono activo, utilizada por el personal del OVSP durante reconocimientos aéreos que se realizan con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

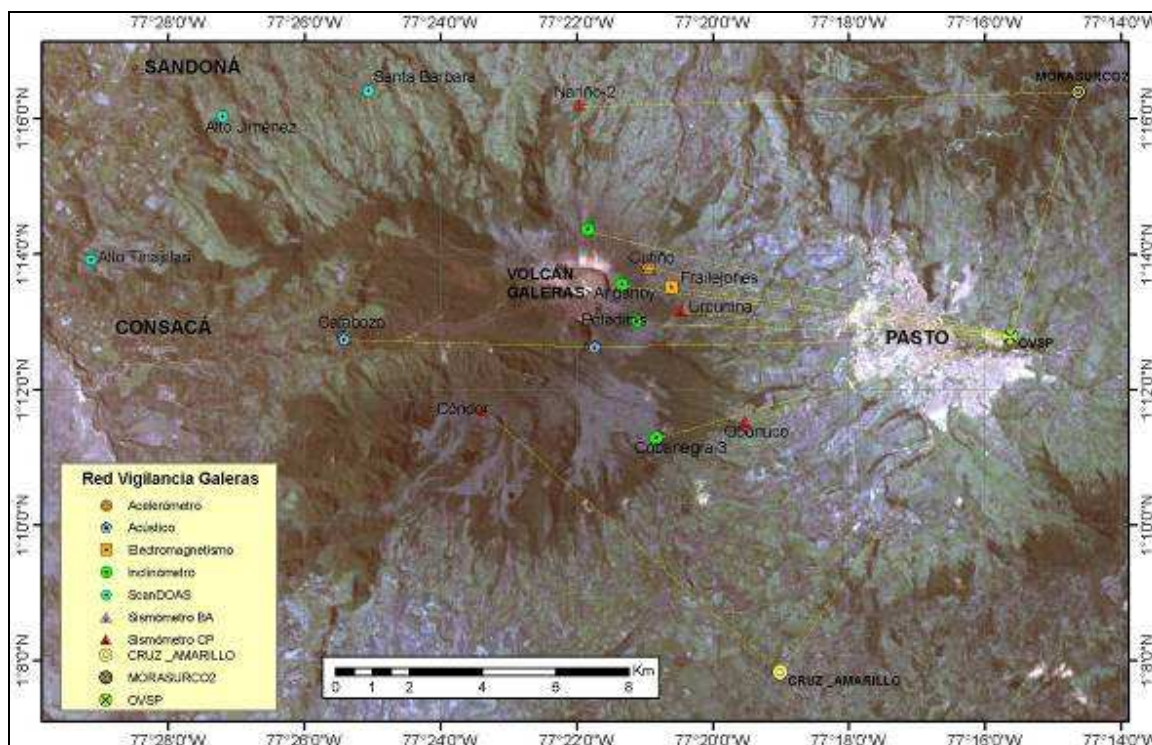


Figura 2.1.1. Mapa de localización de algunas de las estaciones (sismómetros de corto periodo-CP y banda ancha-BA, acústico, campo EM y repetidoras) que conformaron la red de monitoreo de Galeras durante el primer semestre de 2010.

En este semestre se realizaron en campo los mantenimientos preventivos y correctivos de las estaciones que conforman las redes de monitoreo volcánico de Galeras; adicionalmente, se hicieron mantenimientos en las repetidoras y equipos de recepción en la sede del Observatorio. La operatividad de la red instrumental de Galeras fue del 85%, con un registro de calidad, lo que permitió garantizar una información confiable para la apropiada evaluación de la actividad volcánica. La figura 2.1.5 muestra el histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que conformaron la red de monitoreo sísmico, Campo EM, inclinometría electrónica, mediciones de gas SO₂ de Galeras, acústica y video, durante el primer semestre de 2010. Hay que resaltar que los porcentajes bajos de funcionamiento de las estaciones de campo EM Frailejón y sismológica de Banda ancha de Cufiño se deben a que fueron instaladas en febrero y mayo respectivamente.

Tabla 2.1.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad sísmica del volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia al cráter (km)	Dirección respecto al cráter	Altitud (msnm)
Anganoy	Analógica	Sismómetro Corto Período	Vertical	0.84	ESE	4170
Cráter-2	Digital	Sismómetro Corto Período	Vertical	1.48	S	4048
Cufiño-BB	Digital	Sismómetro Banda Ancha	Triaxial	1.90	ENE	3800
Urcunina	Analógica	Sismómetro Corto Período	Triaxial	2.26	ESE	3494
Cobanegra-3	Analógica	Sismómetro Corto Período	Vertical	3.94	SSE	3625
Condor	Analógica	Sismómetro Corto Período	Vertical	4.86	SW	3985
Obonuco	Analógica	Sismómetro Corto Período	Triaxial	4.94	SE	3010
Nariño-2	Analógica	Sismómetro Corto Período	Vertical	5.00	NNW	2870
Calabozo	Digital	Sismómetro Corto Período	Triaxial	6.83	SSW	2353
Cami	Digital	Micrófono	Unidireccional	6.83	SSW	2353
Caac	Digital	Micrófono	Unidireccional	1.48	S	4048

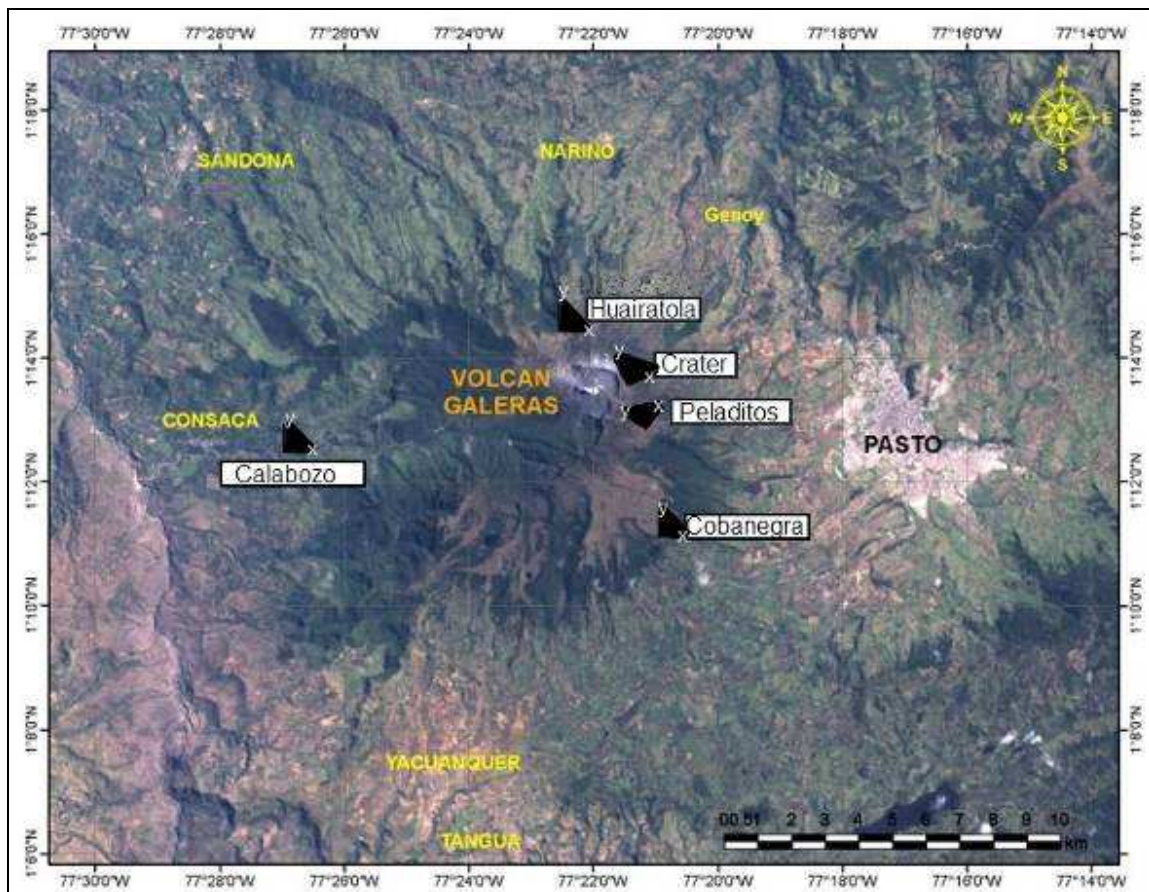


Figura 2.1.2. Red para el monitoreo de la deformación volcánica del Galeras, conformada por cinco inclinómetros electrónicos, que funcionaron en el Primer Semestre de 2010.

Tabla 2.1.2. Inclinómetros electrónicos telemétricos que conformaron la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.

Inclinómetros Electrónicos	Distancia al cráter (km)	Ubicación respecto al cráter principal	Altitud (msnm)
Cráter	0.8	ENE	4060
Peladitos	1.4	SE	3850
Huairatola	1.7	N	3745
Calabozo	7.1	WSW	2350
Cobanegra	3.94	SSE	3625

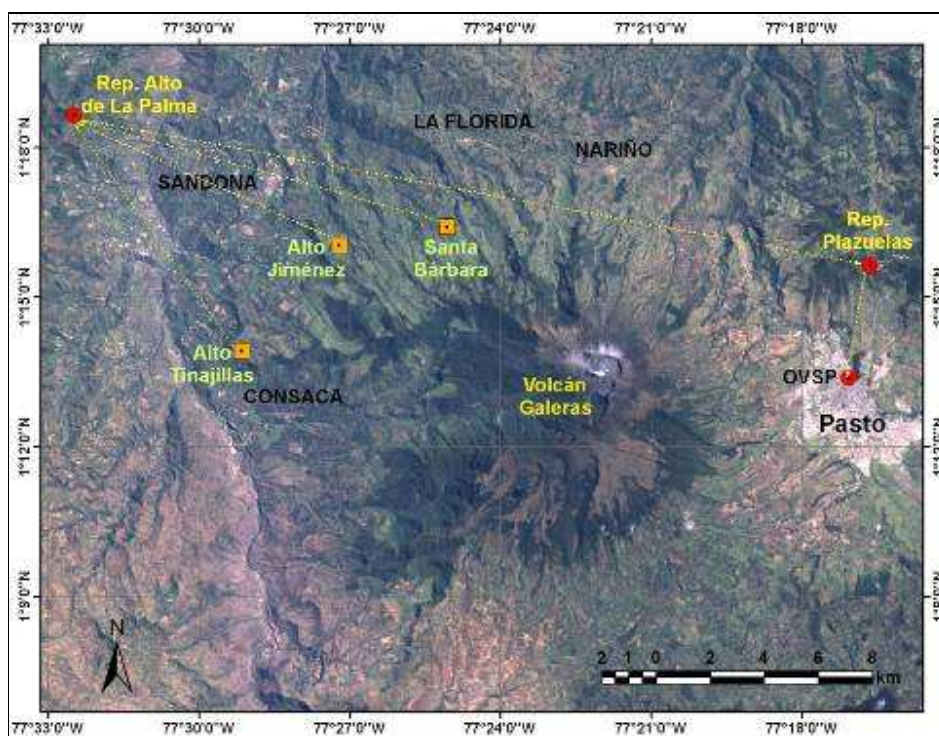


Figura 2.1.3. Mapa de localización de las estaciones telemétricas ScanDOAS del proyecto NOVAC para el monitoreo de emisiones de Dióxido de Azufre (SO_2), que funcionaron durante el Primer Semestre de 2010.

Tabla 2.1.3. Características de las estaciones que conforman la red de instrumentos ScanDOAS del proyecto NOVAC en el volcán Galeras, las cuales funcionaron durante el Primer Semestre de 2010.

Estación	Distancia al cráter (km)	ángulo del scan ($^\circ$)	Altura de referencia de la pluma* (m)	Dirección compás ($^\circ$ contra-azimut)	Ubicación respecto al cráter	Altitud (msnm)
Santa Bárbara	7.9	60	1800	131	NNW	2600
Alto Jiménez	10.8	90	1800	115	NW	2400
Alto Tinajillas	13.3	60	2100	94	W	2100

* Altura de referencia de la pluma respecto a la cima de Galeras (aproximadamente 4200 msnm).



Tabla 2.1.4. Características de la estación EM-Frailejón que monitorea las variaciones del campo eléctrico y del campo magnético ocasionadas por la actividad del volcán Galeras, instalada en el Primer Semestre de 2010.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia al cráter (km)	Dirección respecto al cráter	Altitud (msnm)
Frailejón	Digital	Eléctrico	Biaxial	2.7	E	3727
Frailejón	Digital	Magnético	Triaxial	2.7	E	3727

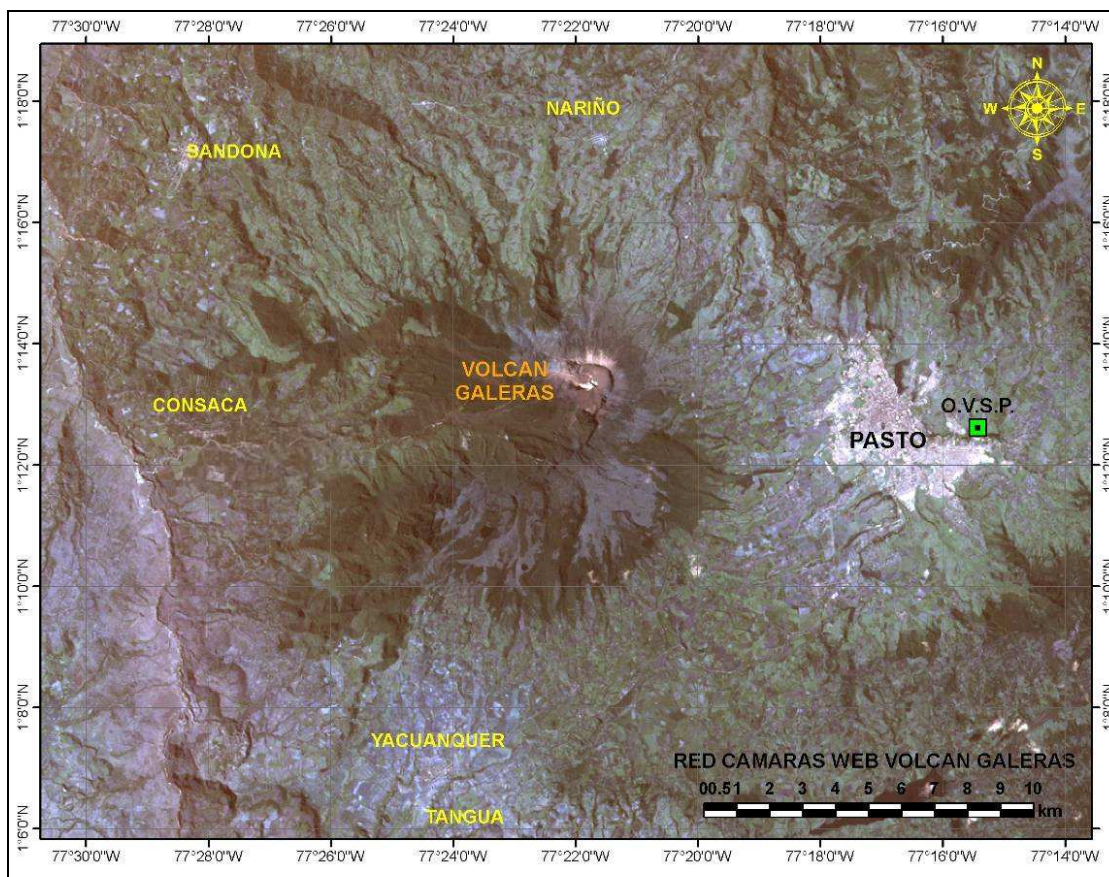


Figura 2.1.4. Mapa de localización de la cámara web que funcionó durante el Primer Semestre de 2010. Esta cámara se encuentra instalada en la sede del OVS en Pasto.



Libertad y Orden

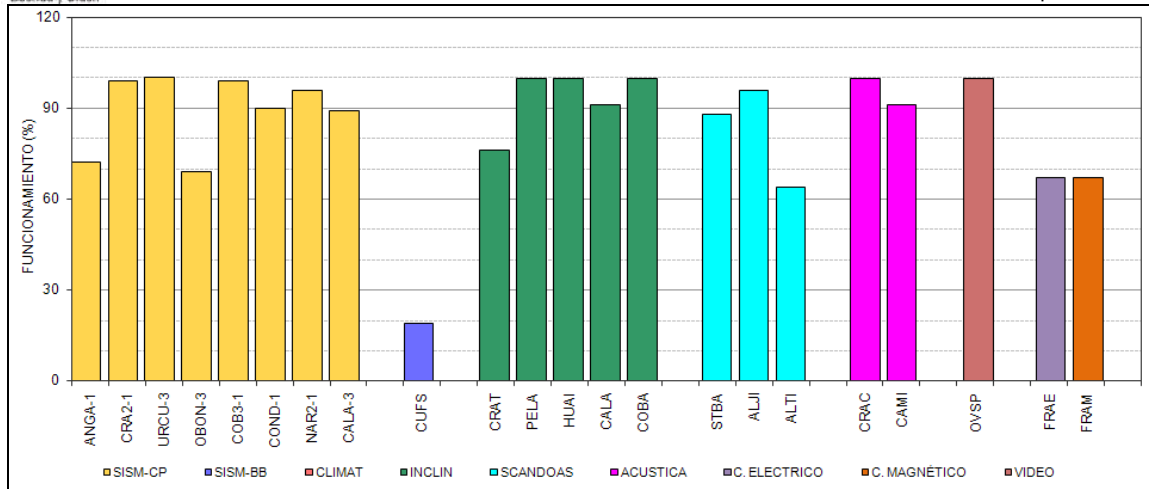


Figura 2.1.5. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el Primer Semestre de 2010 (enero a junio de 2010), de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo del volcán Galeras.

Durante el Primer Semestre de 2010, se realizaron mantenimientos preventivos y correctivos tendientes a mejorar la calidad de la información. Los principales problemas presentados estuvieron relacionados con: interferencias en las estaciones de corto periodo debido a bajo voltaje en las baterías, desacople en la multiplexación de las señales y dificultades en el radio enlace, en las estaciones de transmisión digital, hubo momentos en que no llegaron datos por baterías, con bajo voltaje, dificultades en el enlace y daño en algún sensor. En este periodo se hicieron cambios de equipos y nuevas instalaciones en la red de vigilancia del volcán Galeras, los cuales se relacionan en la tabla 2.1.5.



Tabla 2.1.5. Principales aspectos relacionados con el funcionamiento y cambio de equipos en la red de Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.

FECHA	ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN
Enero	ANGANROY	La estación sale de funcionamiento debido a destrucción de equipos por la erupción presentada el 2 de enero. No se puede evaluar los daños por el nivel de actividad del volcán ya que la estación se encuentra en zona de amenaza alta.
Enero	CRATER	El inclinómetro CRATER dejó de enviar datos desde el 17 de enero de 2010 a las 9:00 p.m. aproximadamente. Es muy probable que la batería esté sin carga, por daño en los paneles solares ocasionados durante la erupción. No se puede evaluar los daños por el nivel de actividad del volcán ya que la estación se encuentra en zona de amenaza alta.
Febrero	ANGANROY	Una vez establecidos los daños a la estación, esta es reinstalada el 17 de este mes.
Febrero	CRATER	Es restablecida la señal del inclinómetro Cráter el 16 de Febrero.
Febrero	FRAILEJON	Se instala la estación EM-Frailejón que monitorea las variaciones del campo eléctrico y del campo magnético ocasionadas por la actividad del volcán Galeras el día 22 de febrero.
Marzo	ANGANROY	La estación Anganoy presentó inconsistencias en la respuesta instrumental; por lo tanto, se decidió cambiar VCO y radio transmisor. Después de este cambio de equipo, la estación siguió trabajando adecuadamente.
Mayo	CUFIÑO	Se reinstala la estación sismológica triaxial de Banda ancha Cufiño, el día 27 de mayo.
Mayo	CRATER 2	Se trasladan los equipos de la estación repetidora de Bruma a la estación Cráter 2, quedando esta como repetidora y la estación repetidora de Bruma desaparece.
Junio	NARIÑO 2	La estación Nariño-2 dejó de funcionar el 7 de junio debido a un daño en el cable del sensor ocasionado por animales de la zona. Entró en funcionamiento el 11 de junio.
Junio	CALABOZO	En la estación Calabozo (sismológica, inclinómetro y sensor de acústica) se presentaron problemas en el radio enlace; por lo tanto, a comienzos del mes fue necesario hacer mantenimientos correctivos tanto en la estación como en la repetidora.
Junio	FRAILEJON	Las estaciones de campo eléctrico y magnético presentaron bloques con pérdida de información debido a problemas de radio enlace y en el sistema de adquisición. En la actualidad se está probando dos sensores elaborados por profesores de la Universidad del Valle y el fisicoquímico Gustavo Garzón.



2.1.2 Sismología

El Primer Semestre de 2010 se destacó por el registro de una erupción explosiva ocurrida el 2 de enero. Con esta erupción se completan once en el periodo 2009 – 2010. El Primer Semestre de 2010, se caracterizó por presentar bajas tasas de ocurrencia y energía sísmica de los diferentes tipos de sismos, esto después de la primera mitad de enero (Figura 2.1.6 y 2.1.7). Los mayores niveles de ocurrencia y energía de sismos de Largo Período, tipo LP (movimiento de fluidos de carácter transitorio) se dieron en los primeros 15 días del semestre, este comportamiento se debió a la actividad pre y post-eruptiva que acompañó el evento explosivo del 2 de enero (Figura 2.1.6 y 2.1.7). Otro aspecto relevante en la ausencia de episodios de tremor, TRE (movimiento de fluidos de fuente persistente), entre los meses de marzo y mayo, y en general la presencia de este tipo de sismicidad ha sido insipiente (Figura 2.1.6 y 2.1.7).

En cuanto a la sismicidad cuya génesis es el fracturamiento de material cortical, VT o Volcano-Tectónicos se resaltan once eventos que fueron reportados como sentidos por personas en la zona de influencia de Galeras. Los sismos que involucran tanto fractura como movimiento de fluido, tipo Híbrido o HYB se registraron a lo largo del semestre en niveles bajos de ocurrencia y energía, y sin presentar variaciones importantes (Figura 2.1.6 y 2.1.7).

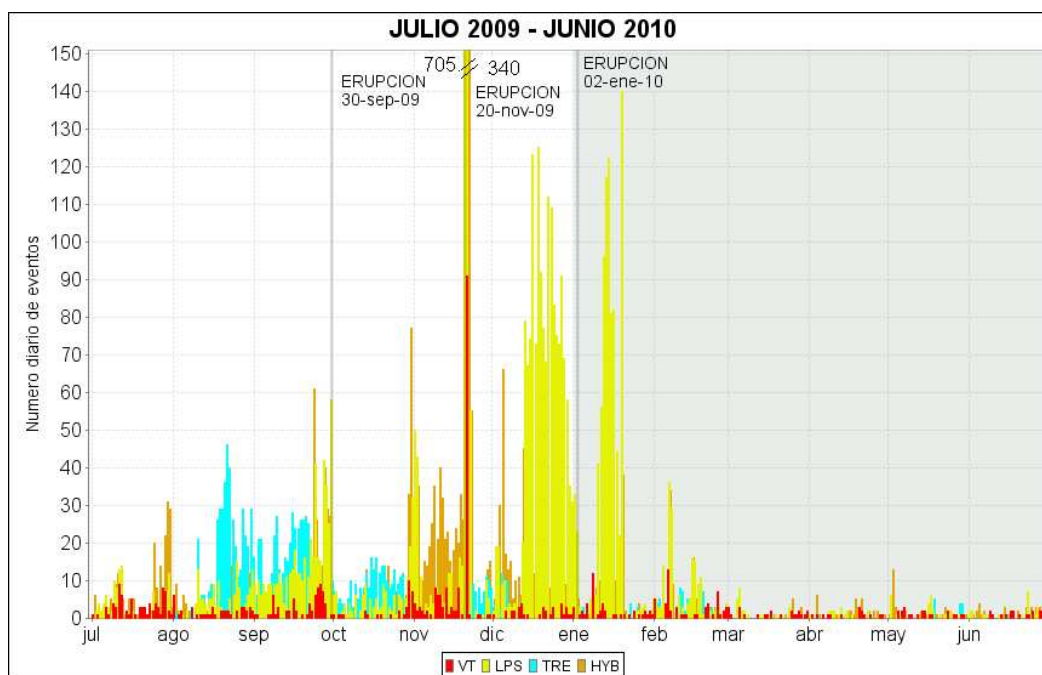


Figura 2.1.6. Histograma de número diario de eventos volcánicos por tipo, desde julio de 2009 a junio de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

En la figura 2.1.8 se muestra un diagrama que compara los niveles de ocurrencia y energía liberada, del semestre que se evalúa en este informe respecto al semestre inmediatamente anterior. Se puede observar que en cuanto a número de sismos por tipo se registró una notable reducción, que es más marcada para los eventos que involucran movimiento de fluidos, especialmente del tipo Tremor (Tabla 2.1.6). En cuanto a los cambios en la energía (Tabla 2.1.7), es necesario aclarar que el incremento en el valor de los sismos tipo TRE se debe a que la evaluación de la energía sísmica de la erupción del 2 de enero se efectuó con la formulación de este tipo de sismos. El caso del incremento en energía en los sismos tipo VT está relacionado con once eventos que aportaron con cantidades importantes de energía al acumulado del semestre.

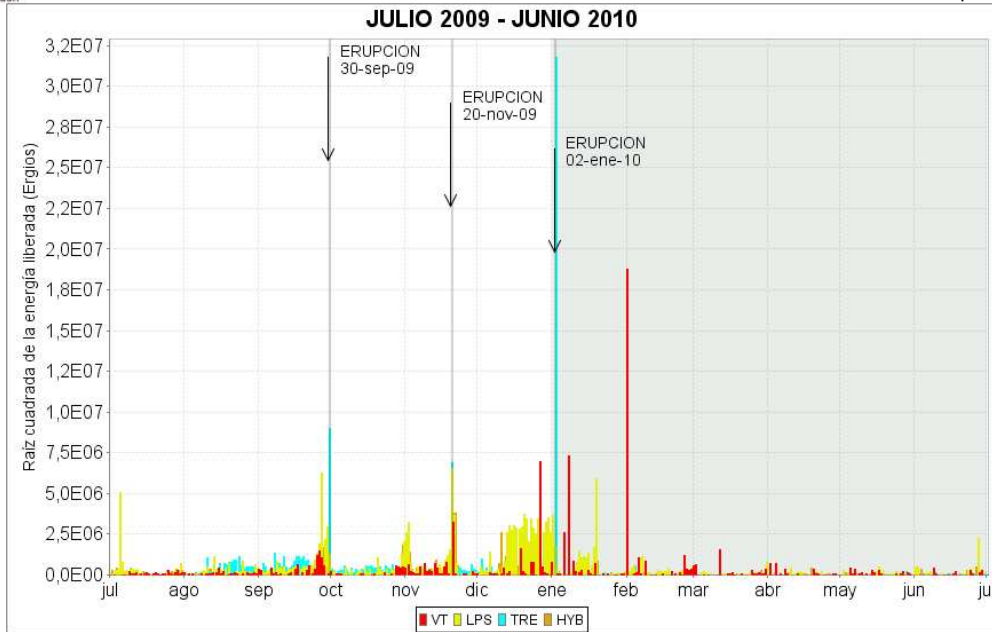


Figura 2.1.7. Histograma de energía liberada diaria, en términos de su raíz cuadrática, de eventos volcánicos por tipo, desde julio de 2009 a junio de 2010. El recuadro gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

Las figuras desde la 2.1.9 a la 2.1.17, muestran de manera gráfica el comportamiento de la sismicidad en el segundo semestre de 2009 en cuanto a su ocurrencia y energía liberada, comparándolas con lo calculado para el primer semestre de ese año.

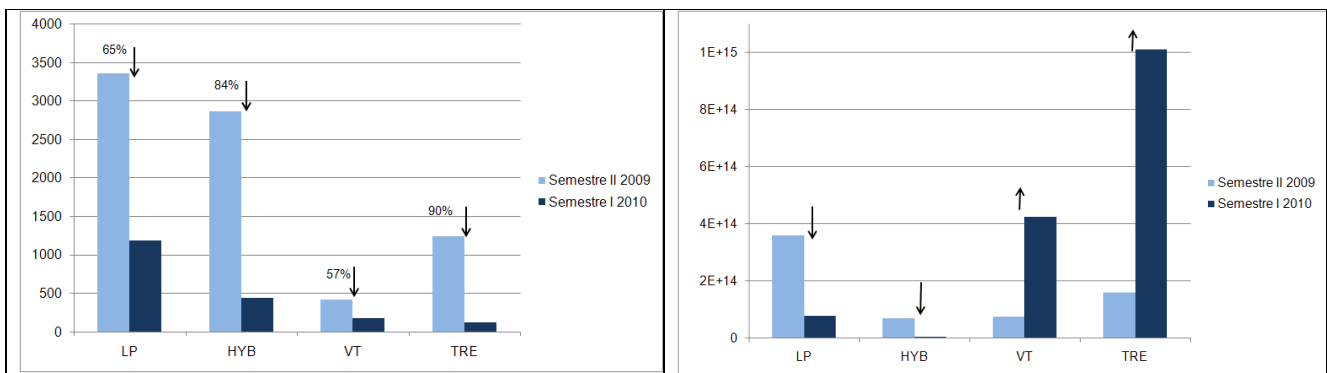


Figura 2.1.8. Relaciones porcentuales de la variación de la sismicidad del segundo semestre del 2009 en comparación con el Primer Semestre de 2010. Izquierda, en cuanto a número de sismos y derecha, energía sísmica liberada.

Tabla 2.1.6. Número de sismos volcánicos por tipo, registrados en los periodos indicados.

TIPO DE SISMO	Semestre I de 2010	Semestre II de 2009
Largo Periodo (LP)	1.183	3.365
Híbrido (HYB)	444	2.864
Volcano-Tectónico (VT)	179	421
Tremor (TRE)	124	1.241
TOTAL	1.930	7.891

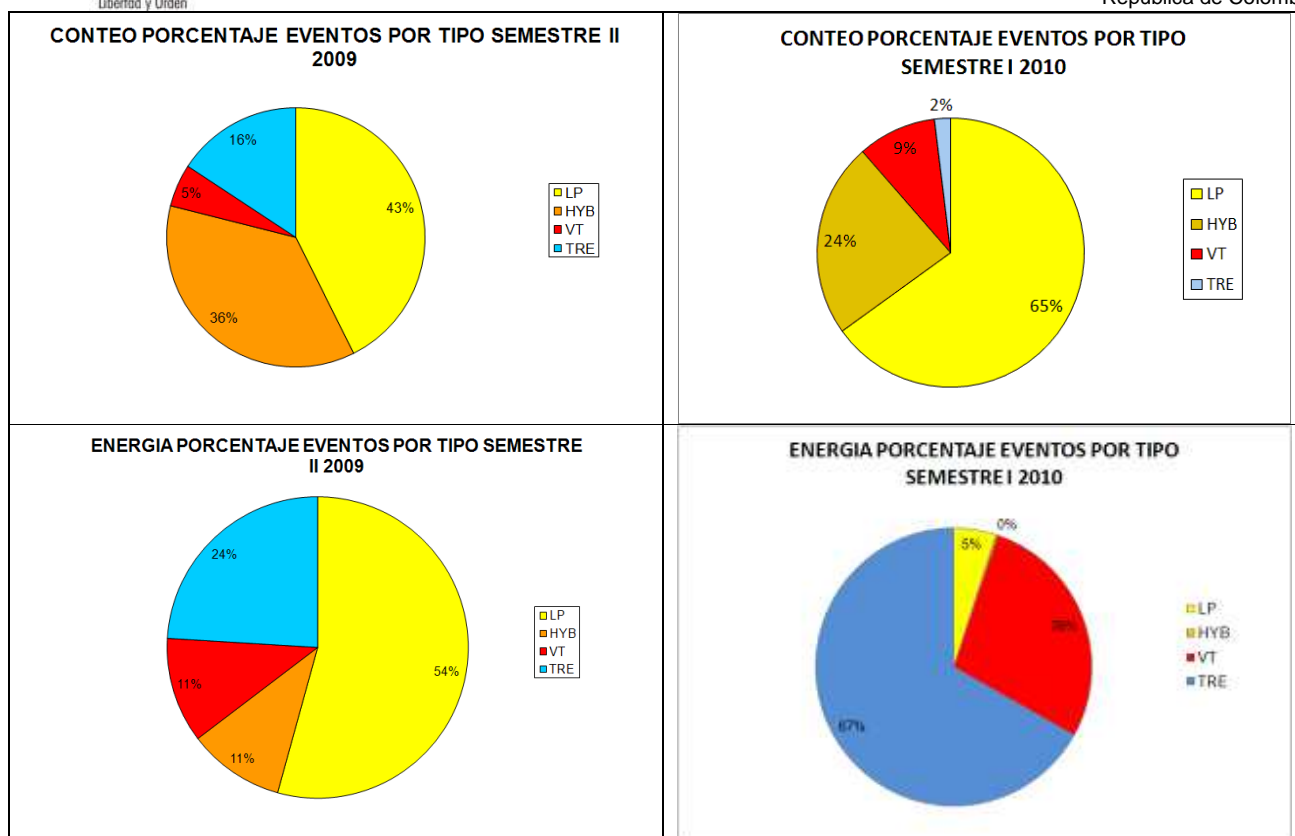


Figura 2.1.9. Relaciones porcentuales de conteo (arriba) y energía sísmica liberada (abajo) por tipo de sismos para el segundo semestre de 2009 (izquierda) y el Primer Semestre de 2010 (derecha).

Tabla 2.1.7. Energía sísmica liberada para cada tipo de evento, en los periodos indicados.

TIPO DE SISMO	Semestre I de 2010	Semestre II de 2009
Largo periodo (LP)	7.50E+13	3.57384E+14
Híbrido (HYB)	3.05E+12	6.82242E+13
Vulcano-Tectónico (VT)	4.23E+14	7.44367E+13
Tremor (TRE)	1.01E+15	1.58174E+14
TOTAL	1.51201E+15	6.58219E+14

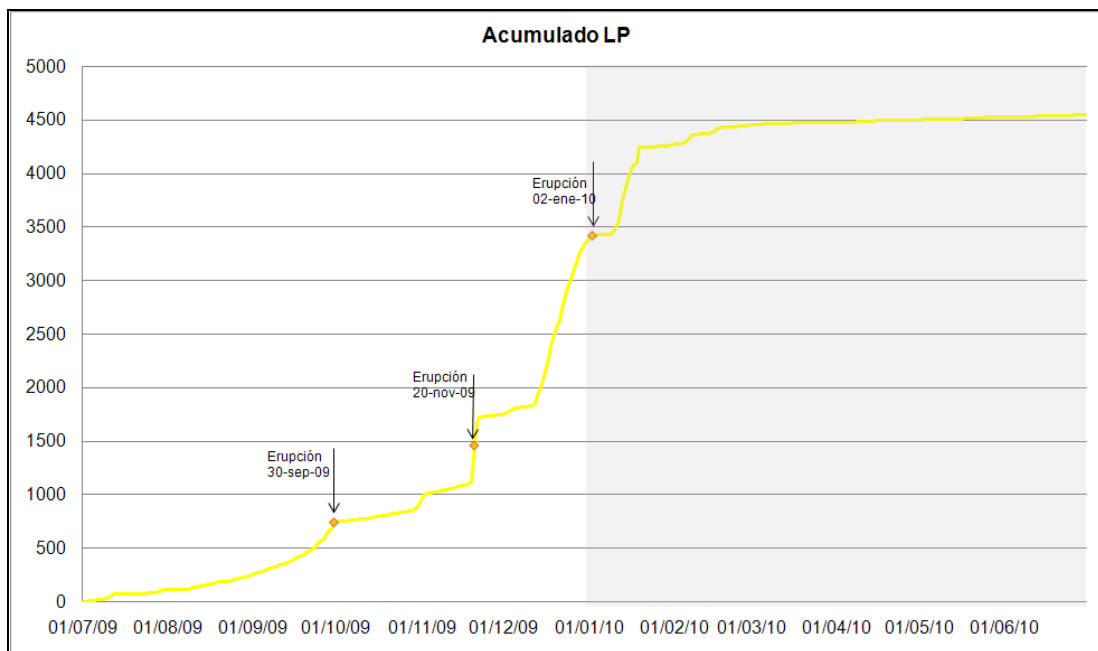
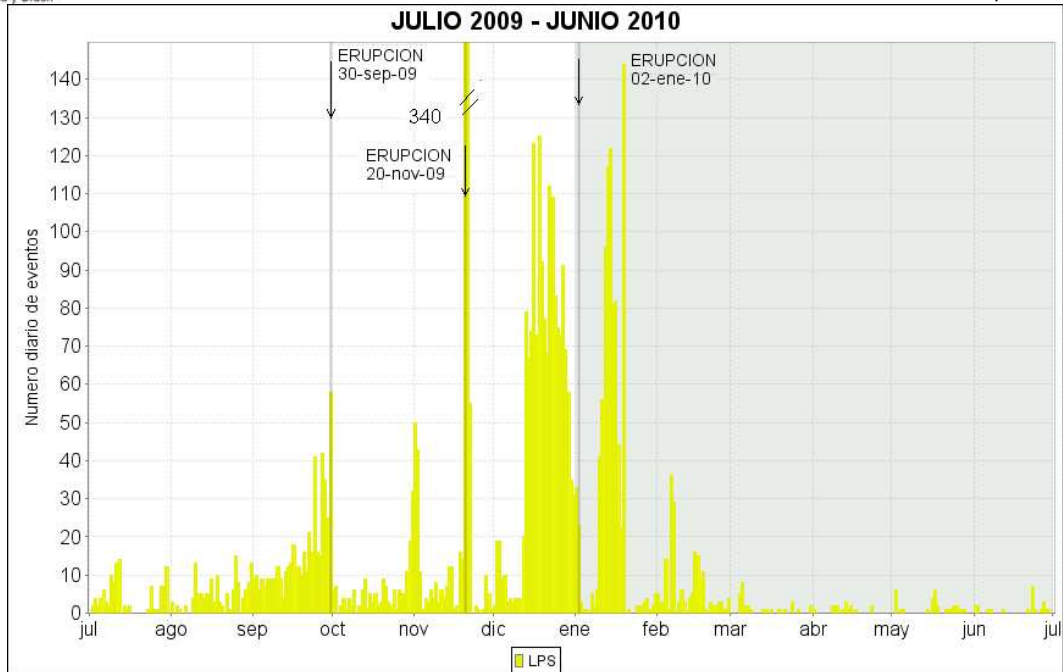


Figura 2.1.10. Histograma de número diario de sismos LP (arriba) y acumulado de sismos LP (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

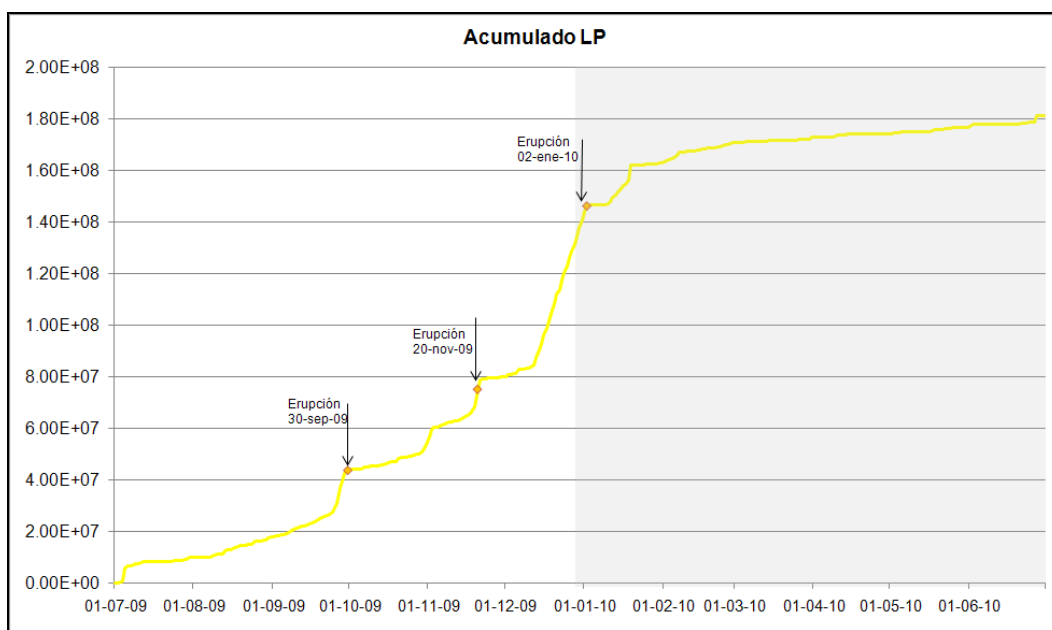
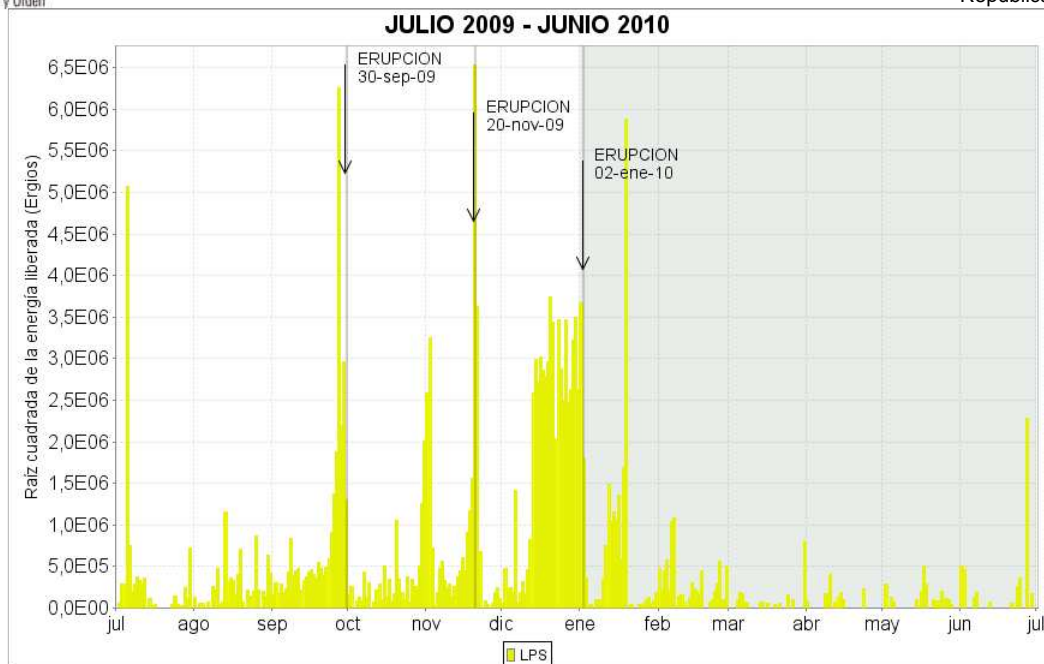


Figura 2.1.11. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos LP (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

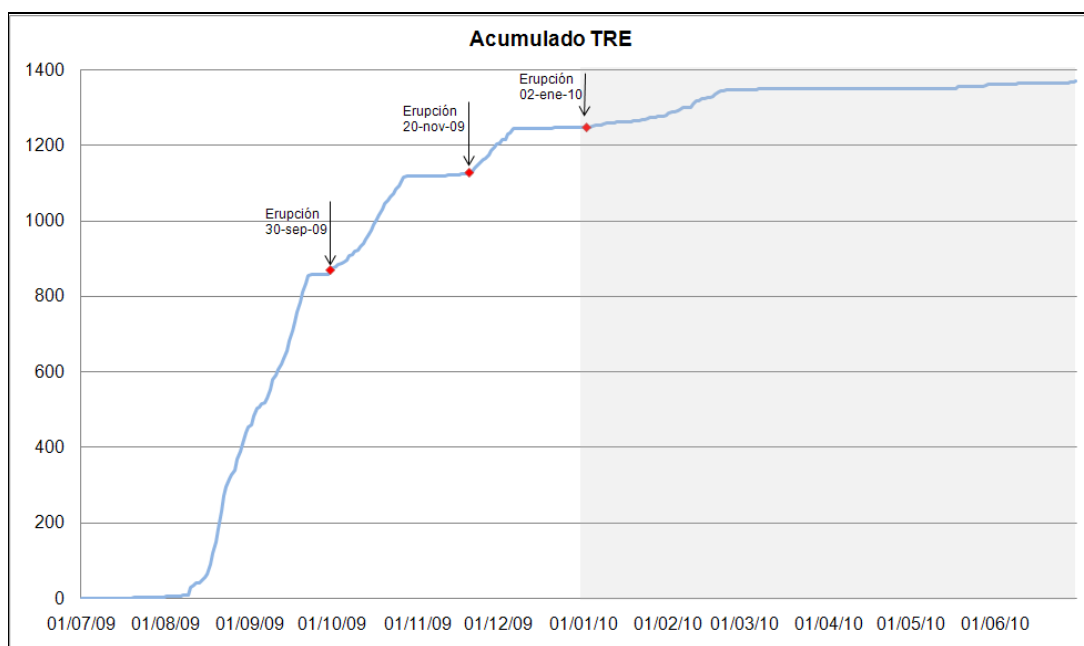
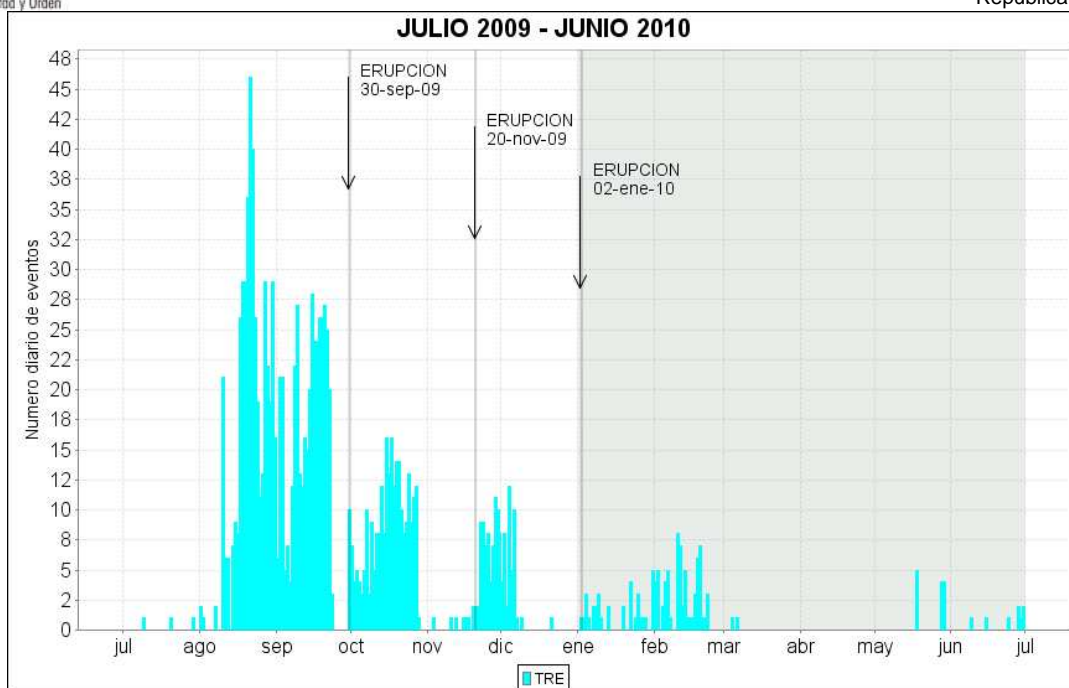


Figura 2.1.12. Histograma de número diario de episodios TRE (arriba) y acumulado de episodios TRE (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

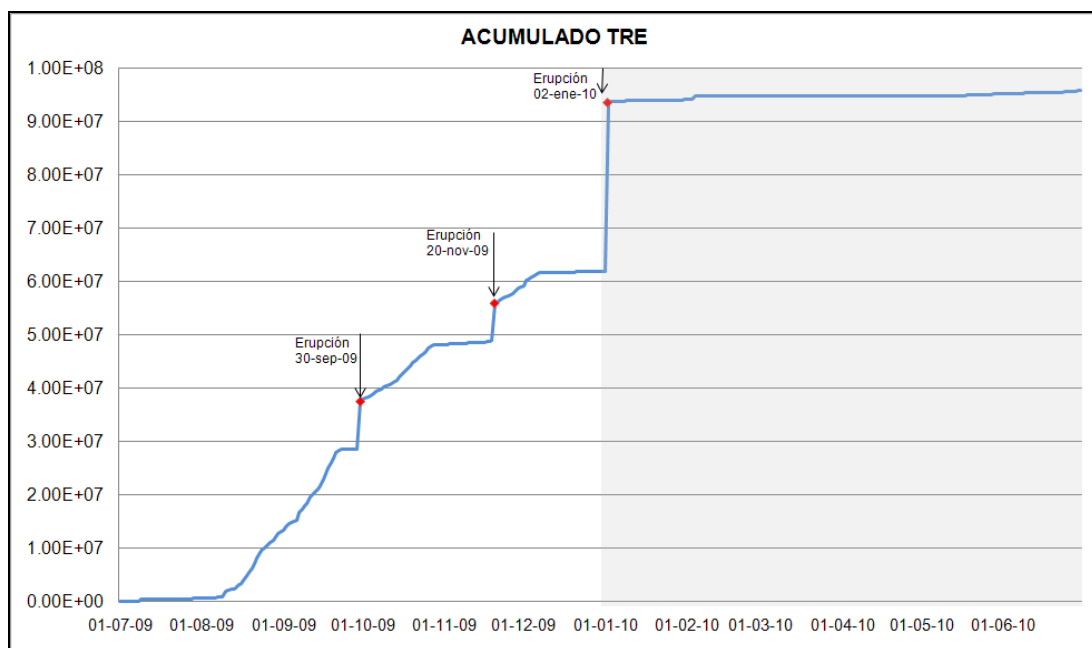
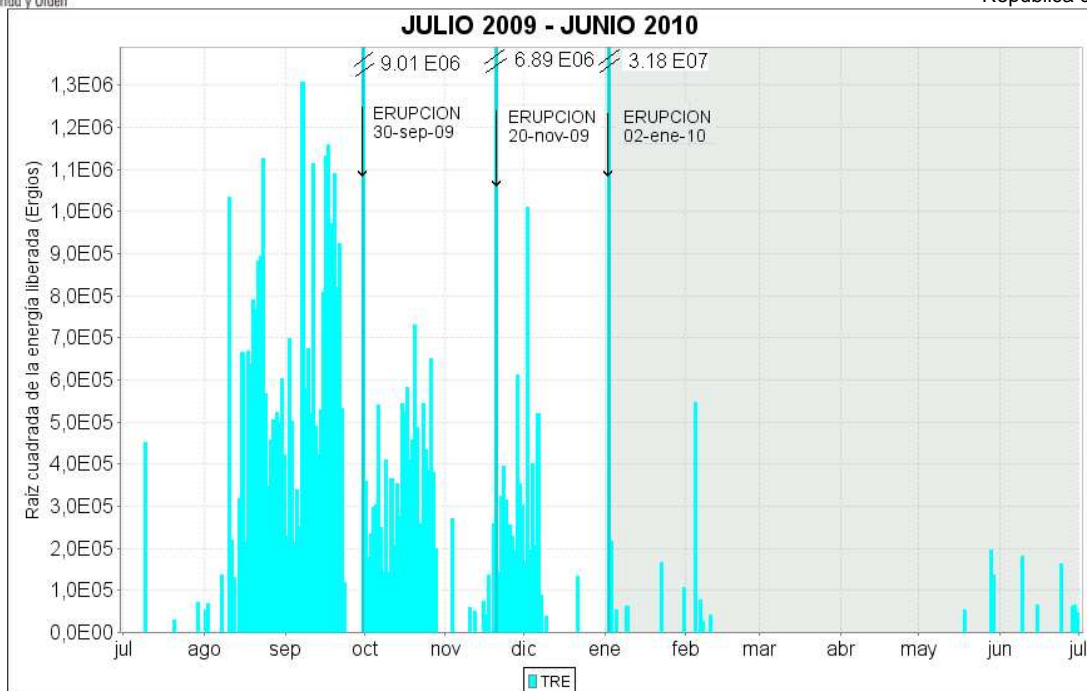


Figura 2.1.13. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos TRE (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

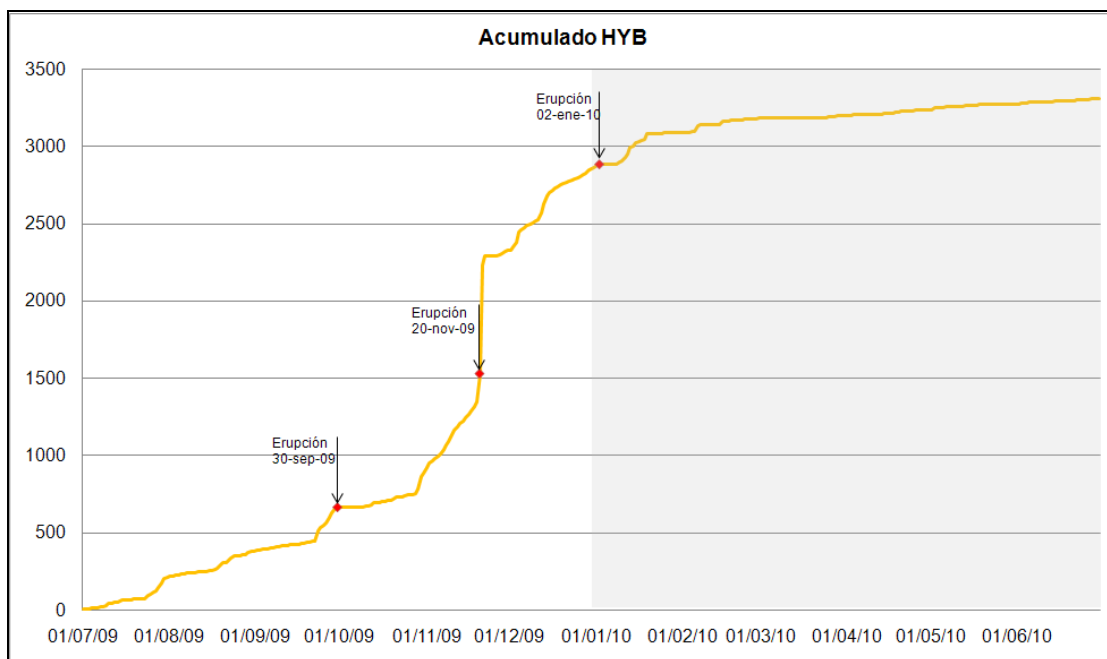
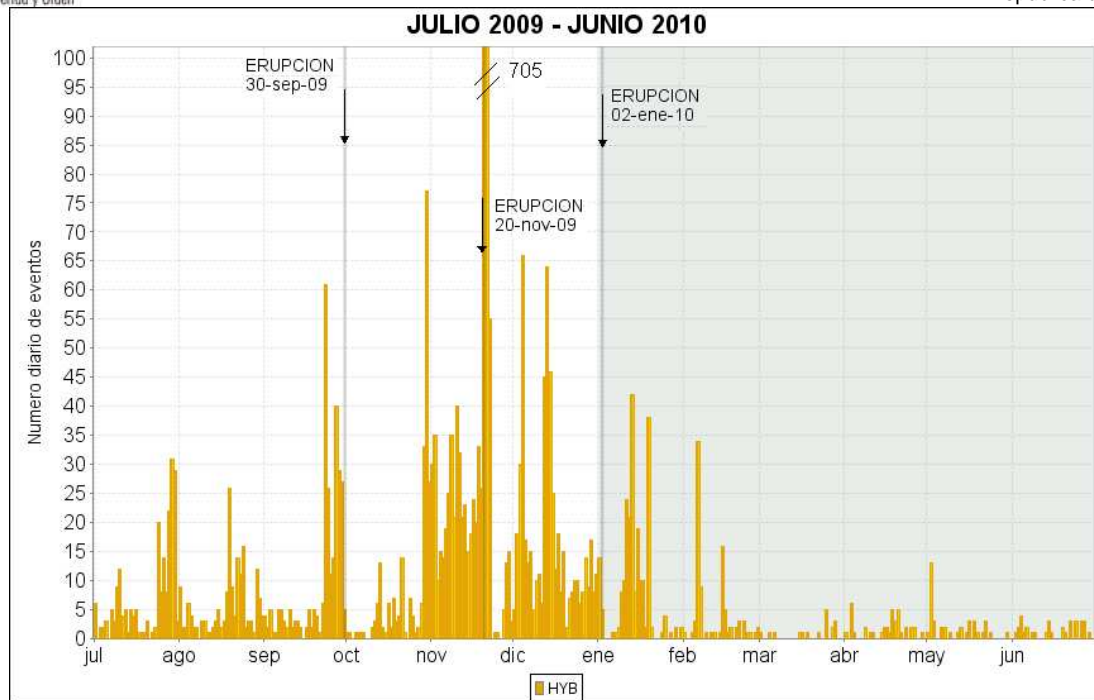


Figura 2.1.14. Histograma de número diario de sismos HYB (arriba) y acumulado de sismos HYB (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

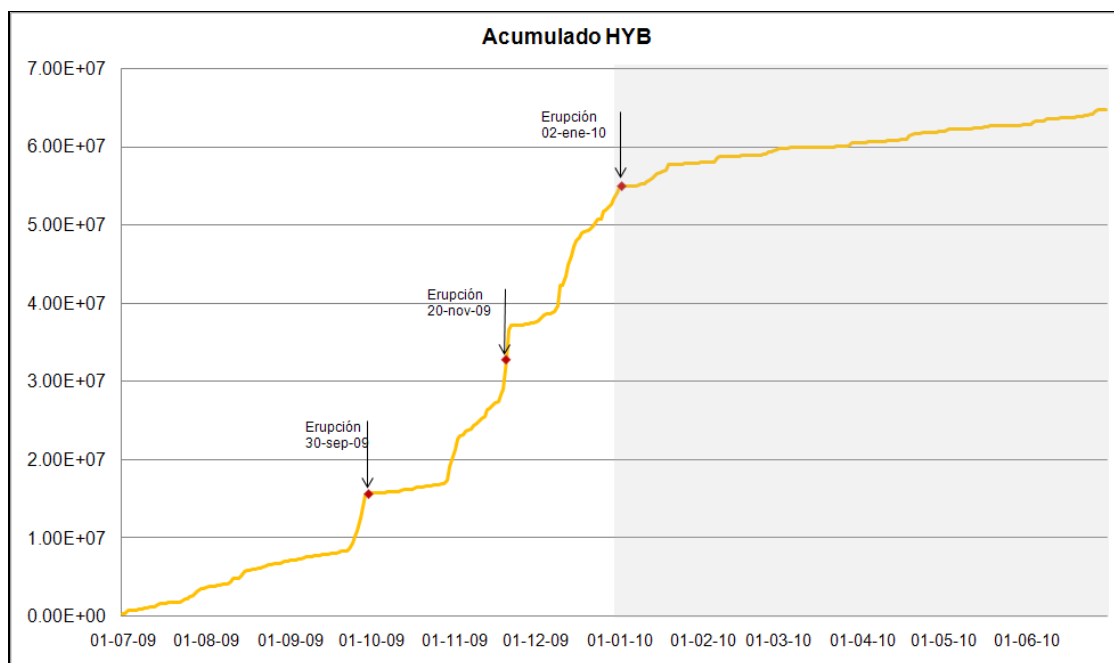
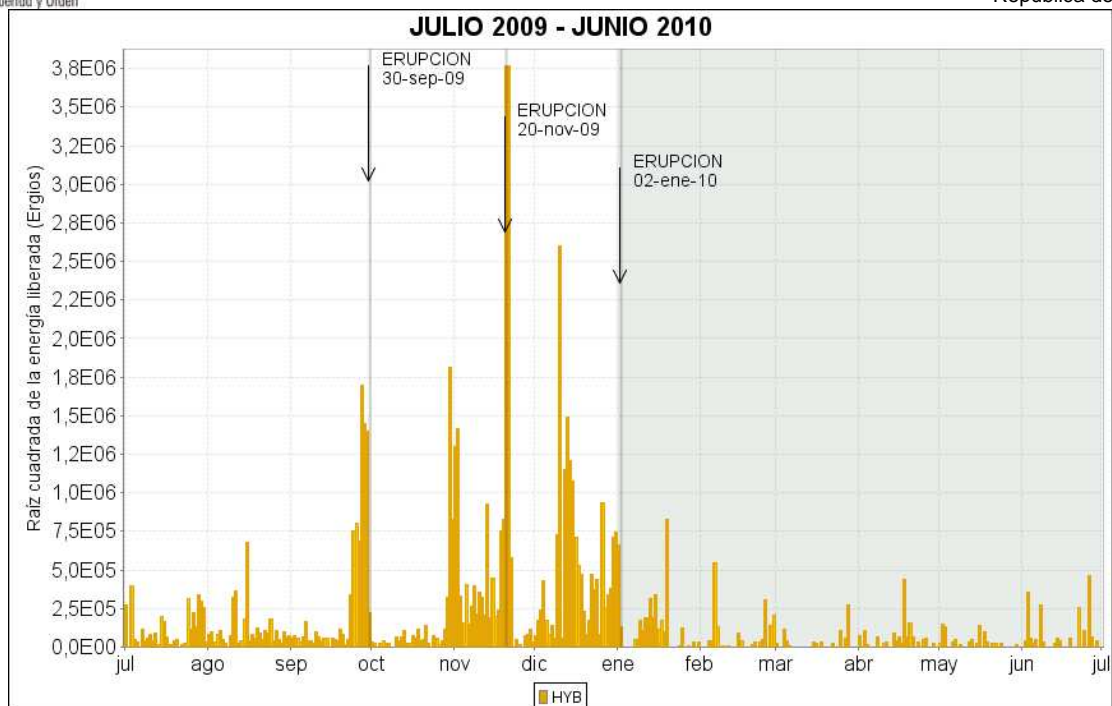


Figura 2.1.15. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos HYB (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

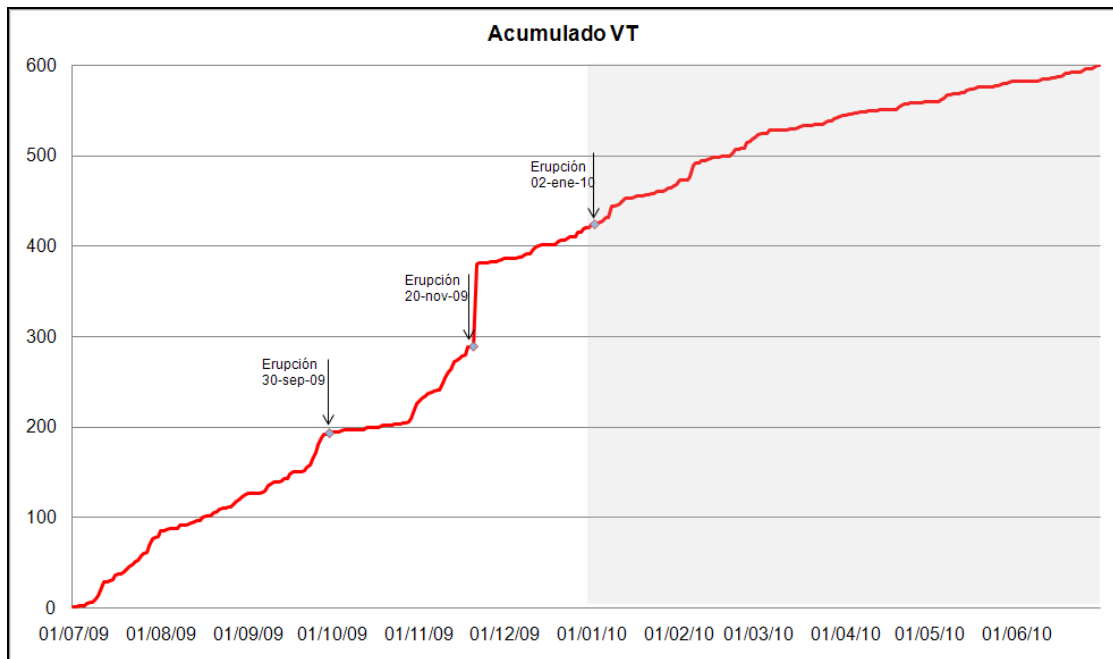
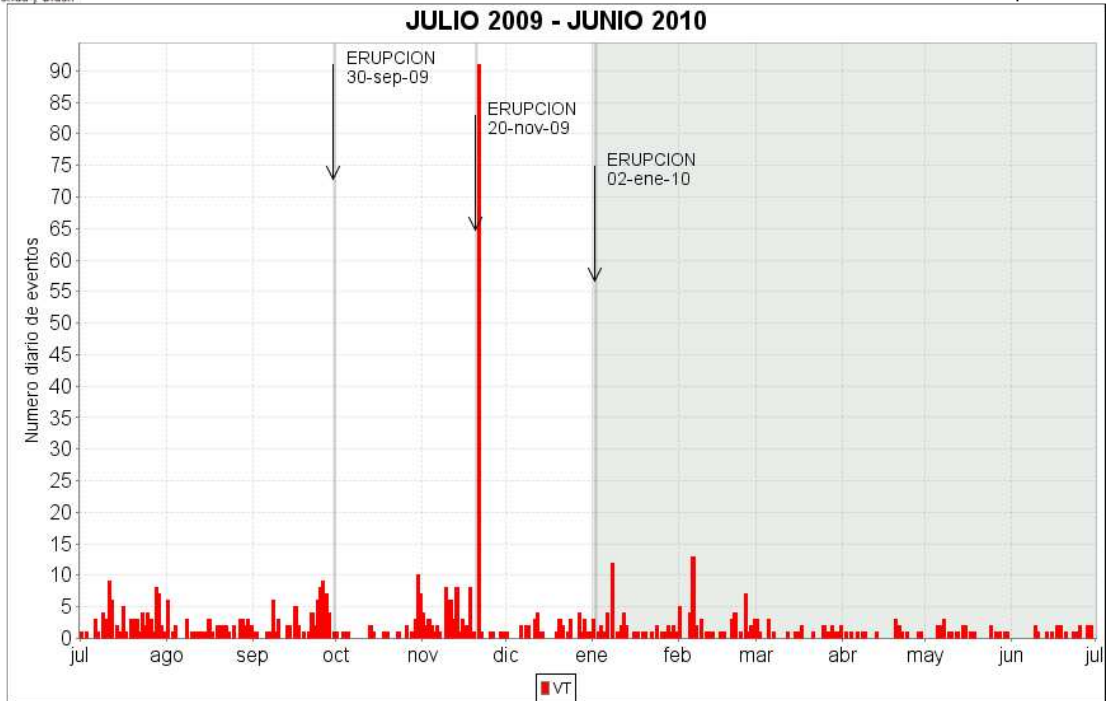


Figura 2.1.16. Histograma de número diario de sismos VT (arriba) y acumulado de sismos VT (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

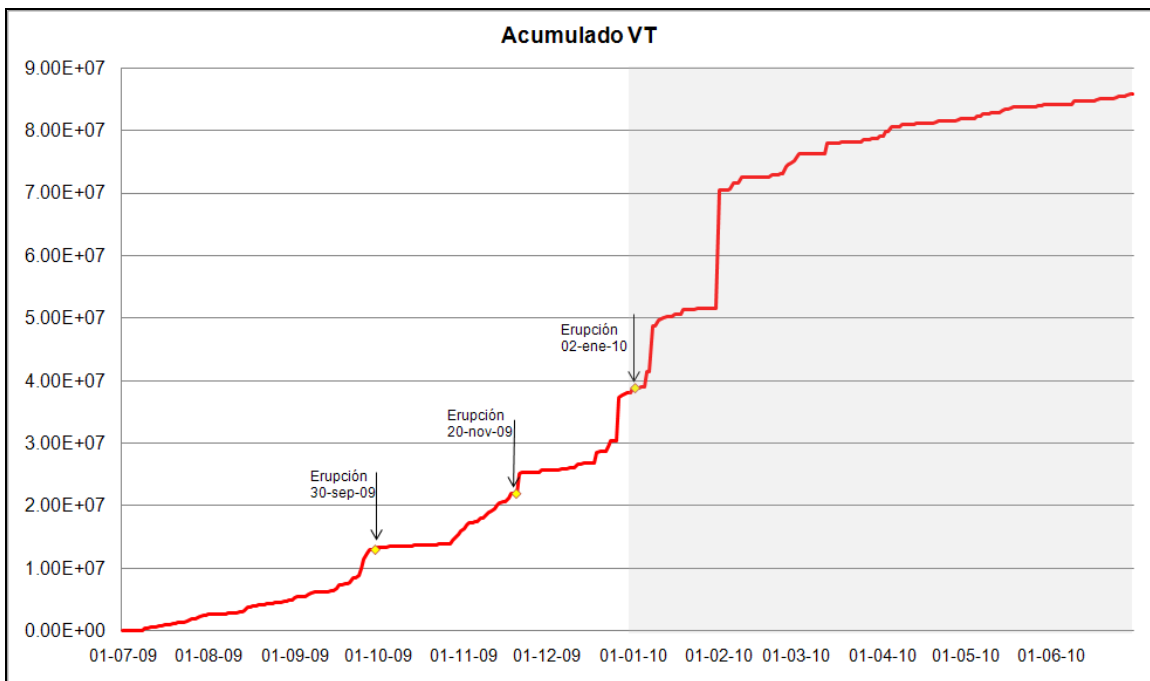
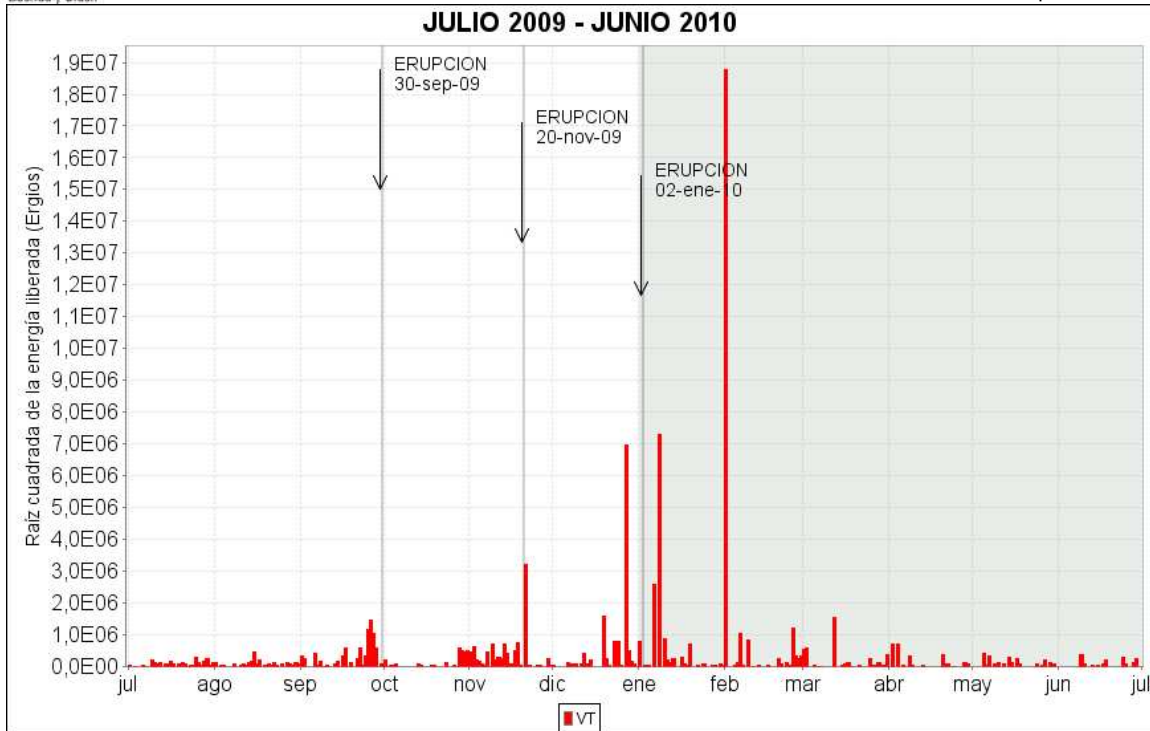


Figura 2.1.17. Histograma de energía sísmica liberada diaria de sismos VT (arriba) y acumulado de la energía (abajo) durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. La región sombreada corresponde al periodo evaluado en el presente informe.

En las gráficas de la 2.1.18 a la 2.1.21, se muestran detalles de parámetros propios de los sismos que involucran únicamente fracturamiento de material cortical y sismos que contienen la mezcla de este fenómeno, con movimiento de fluidos, reconocidos como Híbridos.

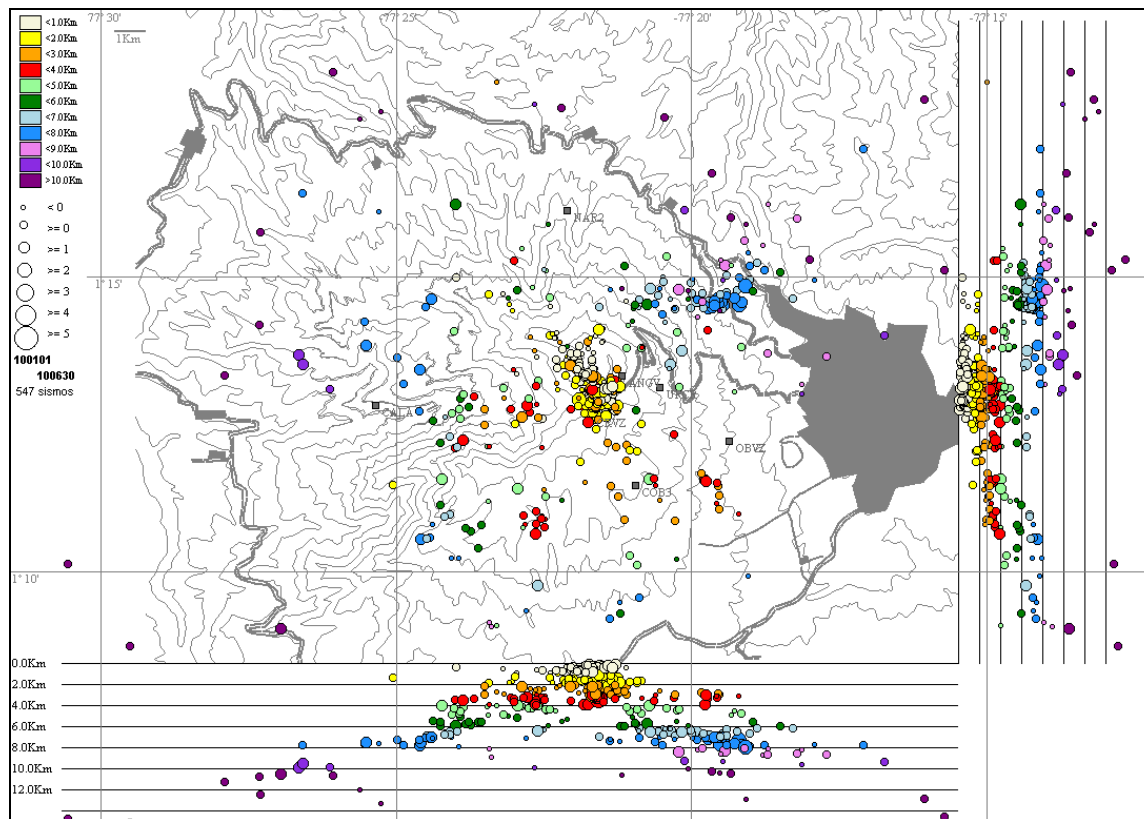


Figura 2.1.18. Hipocentros de sismos VT en la zona de influencia de Galeras durante el Primer Semestre de 2010. En los cortes norte-sur (derecha) y este-oeste (abajo) cada división equivale a 2 Km.

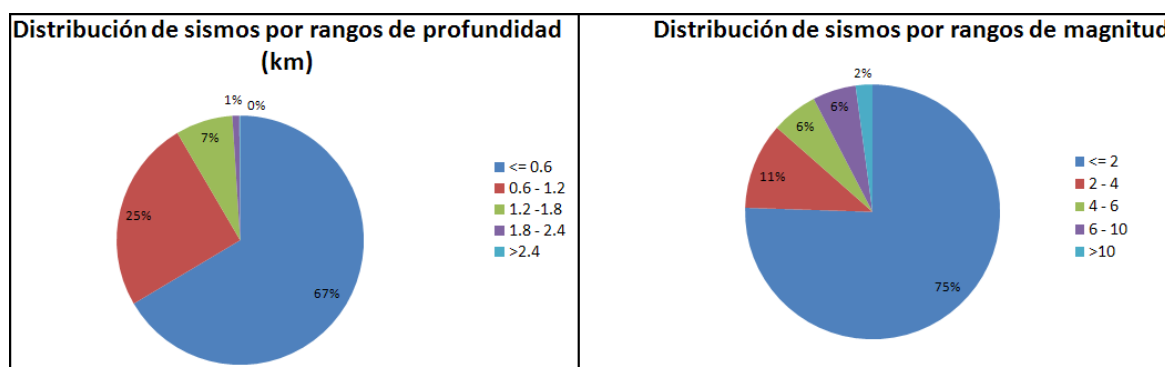


Figura 2.1.19. Relaciones porcentuales por rangos de profundidad (izquierda) y por rangos de magnitud local (derecha) para los sismos VT localizados durante el Primer Semestre de 2010. A la derecha de cada diagrama se presentan sus convenciones.

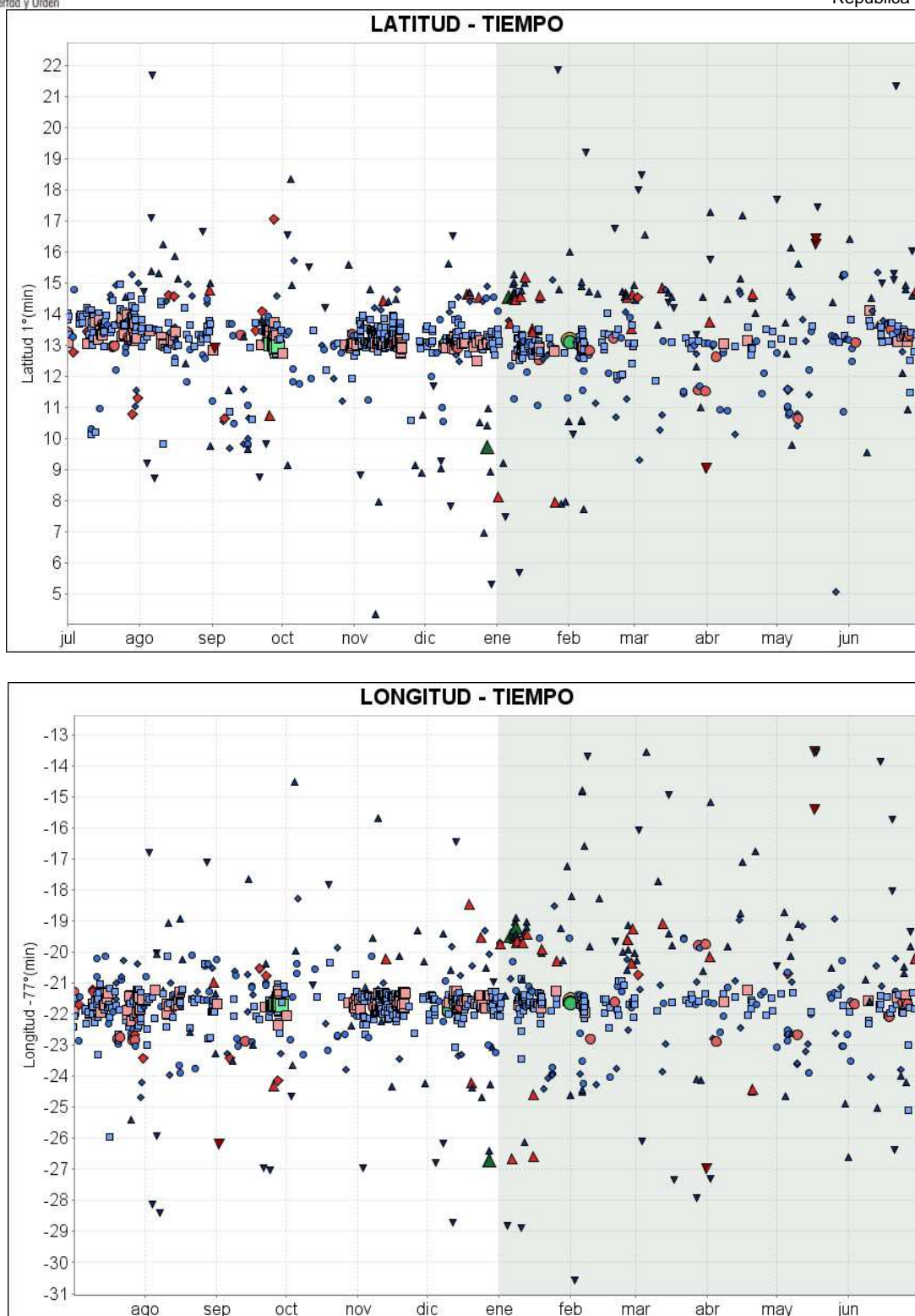


Figura 2.1.20. Evolución espacio temporal de sismos VT durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. En la gráfica superior se muestra las Latitudes y en la inferior las Longitudes.

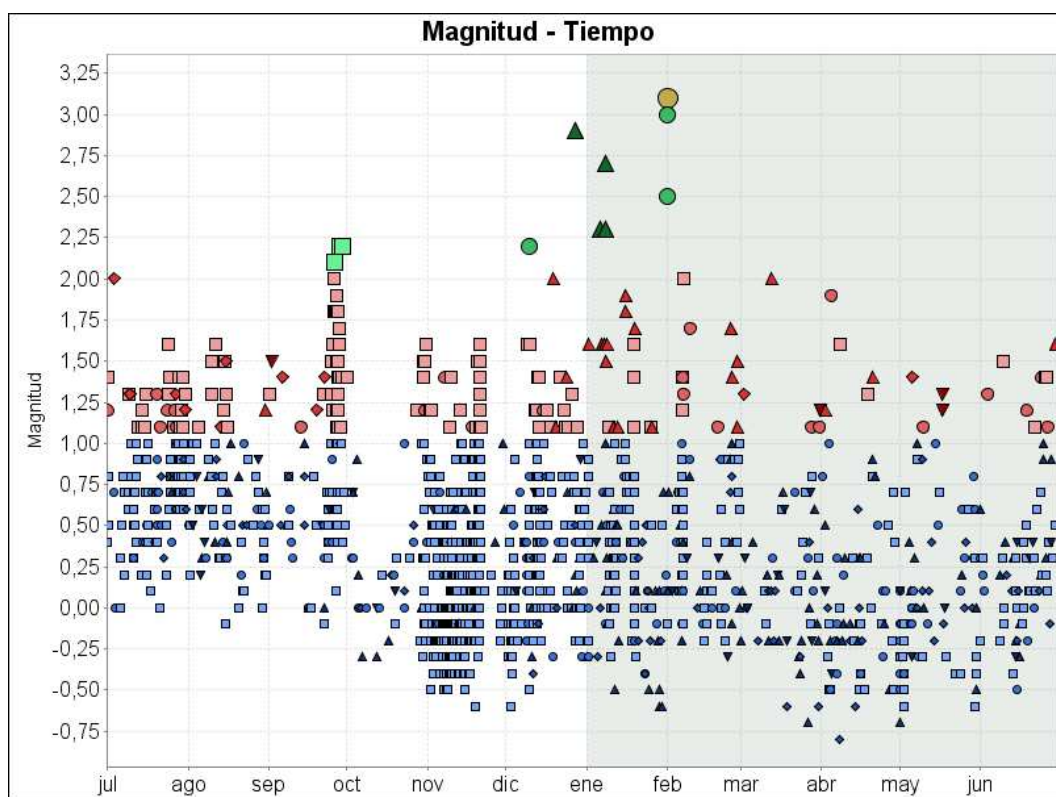
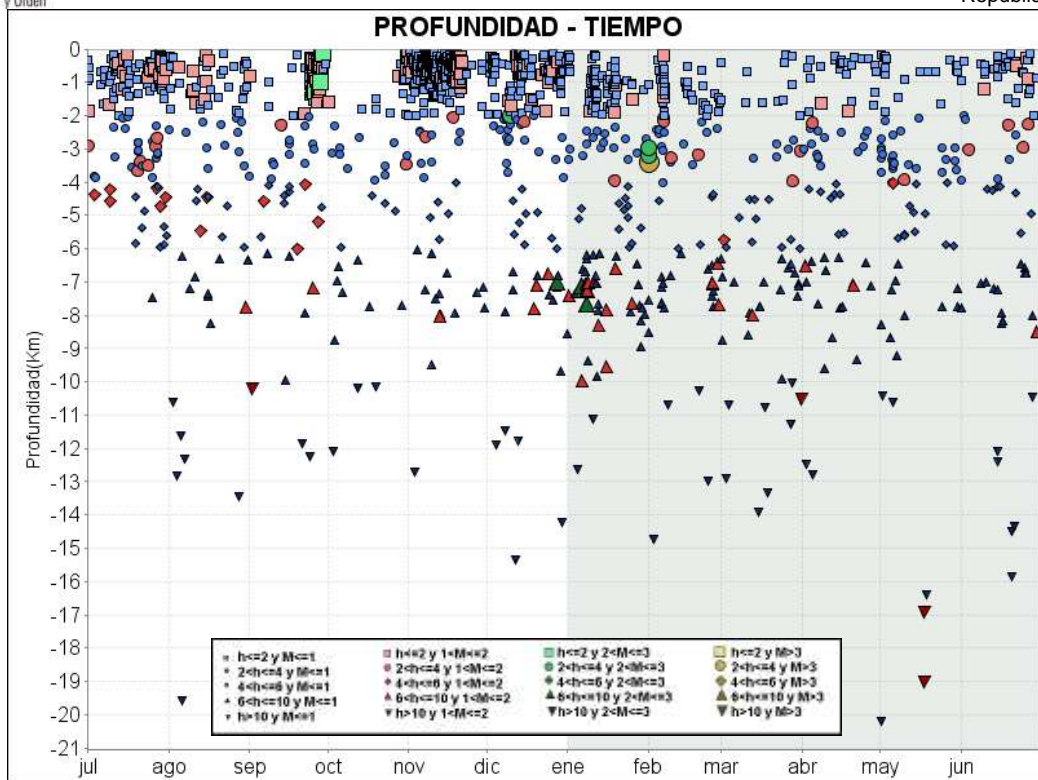


Figura 2.1.21. Evolución espacio temporal de sismos VT durante el segundo semestre de 2009 y Primer Semestre de 2010. En la gráfica superior se muestra las profundidades y en la inferior las magnitudes.

De los sismos de fractura (Anexo 1), se destacan 11 eventos que por su nivel energético y localización fueron sentidos por habitantes en la zona de influencia de Galeras. A continuación se presentan detalles de algunos de estos eventos.

Entre los días 6 y 8 de enero de 2010, las estaciones de la red del volcán Galeras han registrado 12 sismos de tipo Volcano-tectónico con magnitudes locales hasta de 2.7 en la escala de Richter. Los sismos fueron localizados concentrados en una zona a 4.5 Km., al nororiente del cráter principal (Figura 2.2.22), con profundidades entre los 6 y 8 Km., respecto a la cima del volcán. En la tabla 2.1.8, se detalla información de las localizaciones de estos sismos. Se recibieron reportes de los eventos sentidos en sectores rurales y urbanos del municipio de Pasto, tales como: Postobón, Villacampestre, Maridiaz, Parque Infantil, Aranda y Briceño.

Tabla 2.1.8. Parámetros de localización y energía de los sismos tipo VT ocurridos entre el 6 y el 8 de enero de 2010.

Fecha	Hora Local	Latitud (N)		Longitud (W)		Profundidad (Km)	Magnitud Local	Sentido por personas
		grado	minutos	grados	minutos			
06/01/2010	1:39 AM	1	14.54	77	19.48	7.1	2.3	SI
06/01/2010	2:00 PM	1	14.46	77	19.49	6.6	0.5	
08/01/2010	12:07 AM	1	14.97	77	19.03	6.7	0.1	
08/01/2010	3:06 AM	1	14.62	77	19.53	7.7	2.7	SI
08/01/2010	4:01 AM	1	14.58	77	19.49	7.1	1.6	
08/01/2010	5:02 AM	1	14.54	77	19.21	7.3	2.3	SI
08/01/2010	5:31 AM	1	14.56	77	19.53	7.0	0.7	
08/01/2010	7:54 AM	1	14.65	77	19.56	7.1	1.1	
08/01/2010	11:41 AM	1	15.03	77	19.42	6.3	0.5	
08/01/2010	11:57 AM	1	15.26	77	18.9	6.2	0.3	
08/01/2010	2:36 PM	1	14.47	77	19.72	7.3	1.5	SI
08/01/2010	8:04 PM	1	14.51	77	19.64	6.7	1.6	

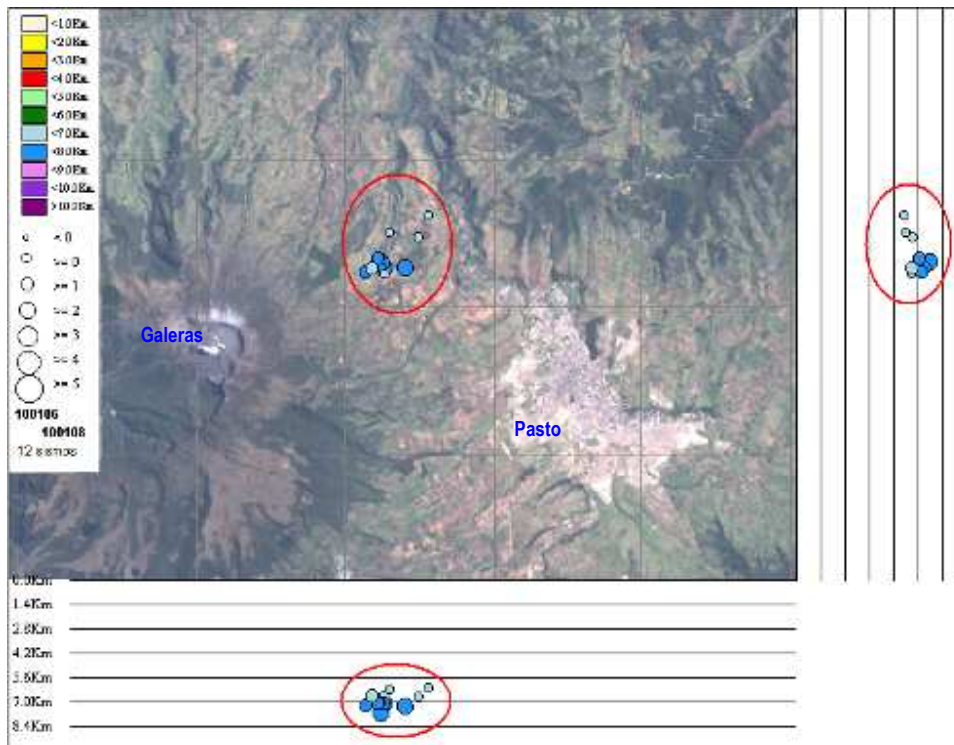


Figura 2.1.22. Localización de los eventos tipo VT registrados entre el 6 y 8 de enero de 2010.



En el mes de febrero 5 sismos (Tabla 2.1.9) fueron reportados como sentidos, entre los que se destaca, el registrado el 25, a la 1:34 p.m., con magnitud local de 1.7 y el segundo el mismo día, a las 7:44 p.m., con magnitud local de 1.4 en la escala de Richter, sentidos en la vereda Chachatoy. El más energético de estos fue localizado hacia el sector noreste del volcán a una profundidad aproximada de 7 km., respecto a la cima volcánica y distancia respecto al cráter de 5 km.

Otro evento registrado el 2 de marzo (Tabla 2.1.9), fue reportado como sentido desde el corregimiento de Genoy, el sismo ocurrió a las 7:13 a.m., tuvo una magnitud local de 1.3 en la escala de Richter y se localizó a unos 4 km., al nororiente del cono activo a una profundidad de 6 km., desde la cima del volcán.

El 12 de marzo, a las 9:28 p.m., se registró otro evento sentido, que tuvo una magnitud local de 2 en la escala de Richter. Este evento fue localizado a unos 7 km., hacia el sector este - noreste del cráter y a unos 8 km., de profundidad, se reportó como sentido por algunos habitantes del municipio de Pasto (Tabla 2.1.9).

Tabla 2.1.9. Parámetros de localización de los sismos tipo VT ocurridos en el Primer Semestre de 2010, los cuales fueron reportados como sentidos desde varios sectores de la zona de influencia del volcán Galeras.

FECHA	HORA LOCAL	LATITUD °N		LONGITUD °W		PROFUNDIDAD km	MAGNITUD		No. FASES	GAP	Dist-Min km	RMS	ERH	ERZ	CALIDAD	TIPO EVENTO
		grados	minutos	grados	minutos		Md	ML								
2010-01-06	01:39:06	1	14.54	77	19.48	7.12	2.34	2.3	14	119	3.2	0.07	0.4	0.2	B1	GVA
2010-01-08	03:06:06	1	14.62	77	19.53	7.66	2.42	2.7	9	234	3.3	0.03	0.3	0.1	C1	GVA
2010-01-08	05:02:14	1	14.54	77	19.21	7.25	2.15	2.3	11	242	3.5	0.07	0.4	0.4	C1	GVA
2010-01-08	14:36:17	1	14.47	77	19.72	7.25	1.84	1.5	13	226	2.9	0.06	0.3	0.3	C1	GVA
2010-02-01	03:05:53	1	13.16	77	21.57	3.41	2.34	3.1	11	101	1.3	0.04	0.1	0.2	B1	GVA
2010-02-01	03:06:31	1	13.09	77	21.61	3.18	1.78	2.5	11	97	1.2	0.05	0.2	0.3	B1	GVA
2010-02-01	03:07:04	1	13.09	77	21.66	2.98	2.26	3	12	96	1.2	0.06	0.2	0.3	B1	GVA
2010-02-25	13:35:57	1	14.59	77	19.61	7.06	1.74	1.7	13	231	3.2	0.05	0.2	0.2	C1	GVA
2010-02-25	19:44:13	1	14.52	77	19.62	7.03	1.44	1.4	13	230	3.1	0.05	0.2	0.3	C1	GVA
2010-03-02	07:13:25	1	14.54	77	20.75	5.74	0.75	1.3	15	190	2.3	0.09	0.3	0.4	C1	GVA
2010-03-12	21:28:25	1	14.86	77	19.09	7.99	1.94	2	11	250	4.1	0.06	0.5	0.1	C1	GVA

En cuanto a la sismicidad que involucra dinámica de fluidos, los aspectos más relevantes se describen a continuación.

Desde el 8 de diciembre de 2009, la actividad de Galeras mostró variaciones importantes, como la presencia de sismos asociados con el incremento de presiones en el sistema volcánico y con condiciones geométricas especiales del medio y que sísmicamente se reflejaron en el registro de eventos tipo Tornillo y "pseudo-Tornillo". Lo anterior junto con los bajos niveles de SO₂ registrados durante este período, la escasa actividad superficial y el comportamiento térmico del cono activo, llevo a que el 9 de diciembre de 2009 se tomara la decisión de cambiar el nivel de actividad a Naranja (II) "Erupción probable en término de días o semanas".

Después de un periodo de bajos niveles de ocurrencia y energía en la sismicidad, desde el 12 de diciembre, se inicia un incremento en los sismos relacionados con dinámica de fluidos, en su gran mayoría del tipo LP. La sismicidad asociada a fluidos, continuó incrementándose hacia el final de la tercera semana de diciembre, cuando se llegaron a registrar más de 120 eventos por día, luego se presentó un descenso paulatino que desembocó en la erupción del 2 de enero de 2010. Sismicidad con características similares se observó en etapas previas a las erupciones del 30 de septiembre y 20 de noviembre de 2009, con la diferencia de que la sismicidad previa a dichas erupciones contenía más eventos en los que se conjuga fractura de material cortical y movimiento de fluidos, sismos tipo Híbrido (HBD).

Cabe resaltar que durante la fase previa a la erupción del 2 de enero de 2010, se registraron diez eventos tipo Tornillo y 7 "pseudo-Tornillo". Para Galeras, la importancia de los tornillos radica en que se han presentado en



etapas que antecedieron a varios de los episodios eruptivos registrados entre 1992 y 2009. En la mayoría de los casos han mostrado características comunes como disminución en la frecuencia fundamental e incremento en sus duraciones.

De acuerdo a algunos modelos para eventos volcánicos asociados con dinámica de fluidos, en general, la tendencia a la disminución de las frecuencias dominantes de esta sismicidad, puede estar relacionada con incremento en la fracción gaseosa de los volátiles magmáticos presentes en el sistema volcánico. El aumento en las duraciones de este tipo de eventos puede explicarse a partir de contrastes significativos de las propiedades físicas, tales como la densidad del fluido que se mueve dentro de cavidades resonantes.

Los Tornillos que antecedieron la erupción del 2 de enero, mostraron características similares a las mencionadas en el párrafo anterior, en general, su frecuencia fundamental disminuyó (Figura 2.1.23), mientras que sus duraciones se incrementaron (Figura 2.1.24). De igual manera los eventos tipo pseudo-Tornillo mostraron un comportamiento similar en cuanto a las duraciones (Figura 2.1.25). La inyección de vapor de agua u otros volátiles magmáticos hacia la cavidad resonante sería la causa de que la fracción de gas en el fluido aumente, lo que implica disminución en las frecuencias del registro sísmico y dado que la densidad del fluido disminuye (densidad promedio) se genera incremento en el contraste de impedancias entre la roca encajante y el fluido, lo que redundaría en aumento de las duraciones de los Tornillos.

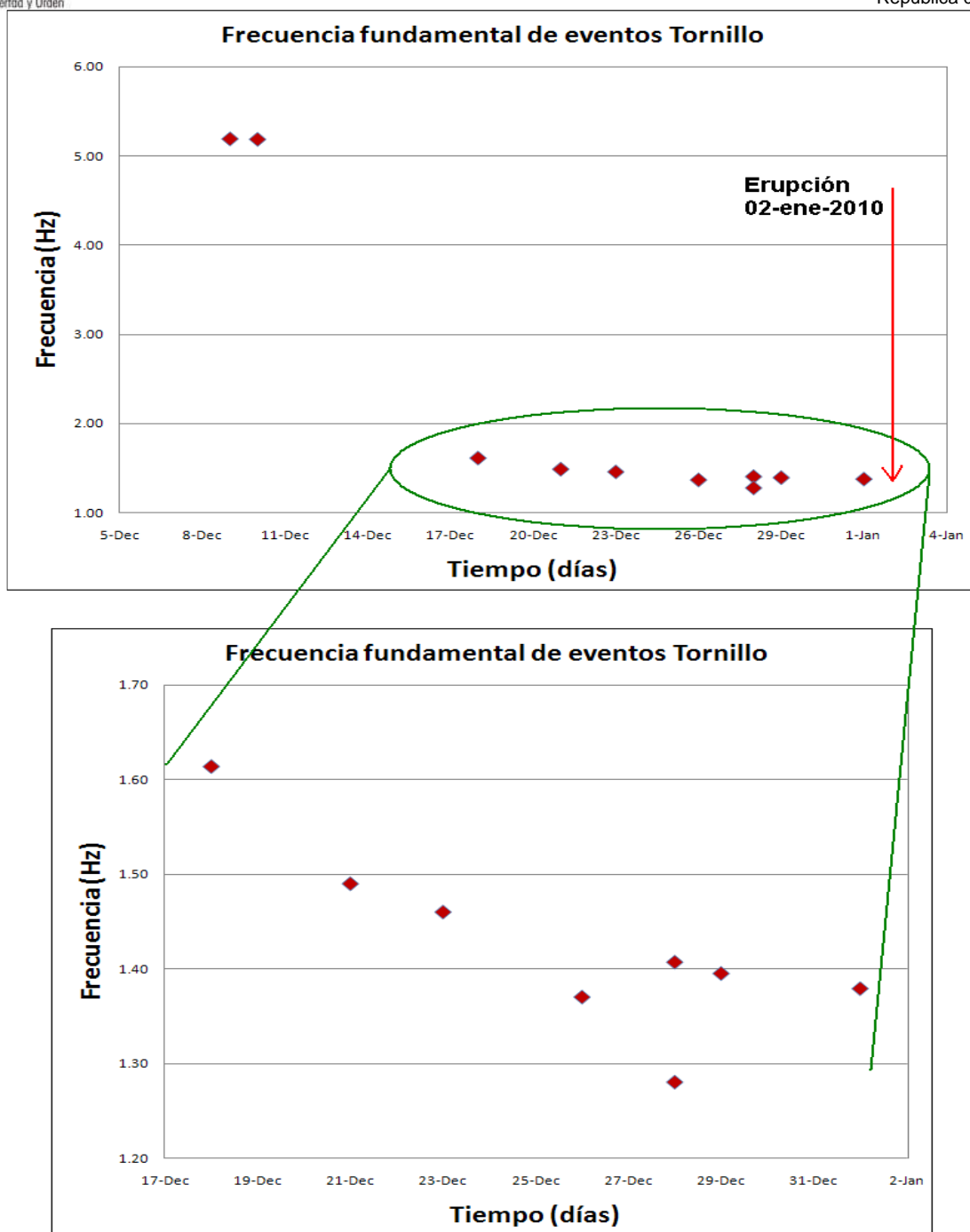


Figura 2.1.23. Evolución temporal de la frecuencia fundamental de los eventos tipo tornillo registrados por la estación Anganoy entre el 9 de diciembre de 2009 y el 1 de enero de 2010. En la gráfica inferior se muestra un detalle de los eventos presentados desde el 18 de diciembre ya que el cambio en sus frecuencias es sutil.

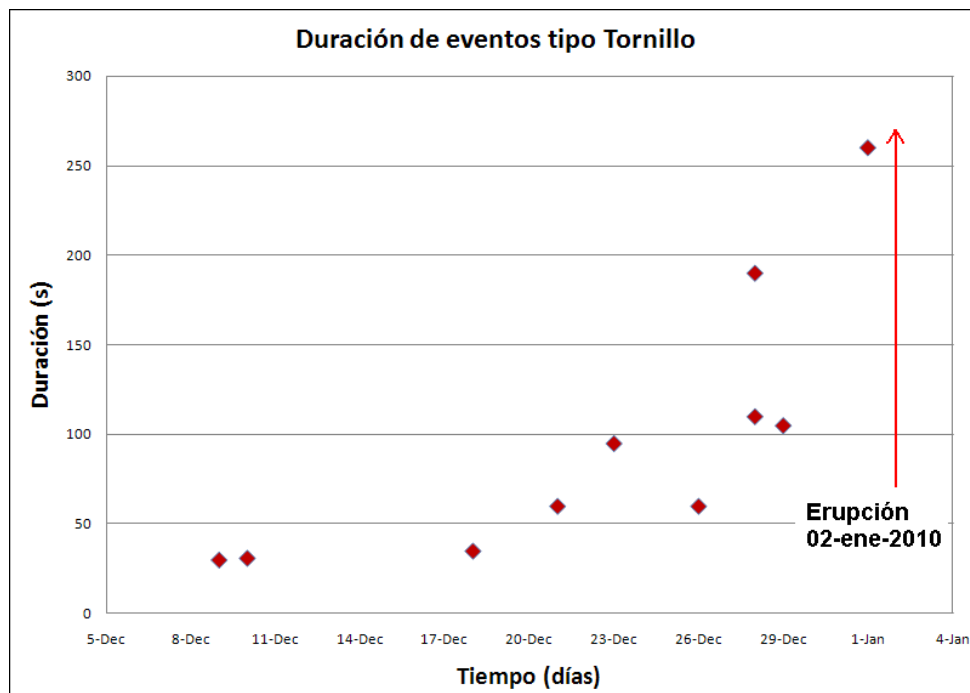


Figura 2.1.24. Evolución temporal de la duración de los eventos tipo tornillo, registrados por la estación Anganoy, entre el 9 de diciembre de 2009 y el 1 de enero de 2010.

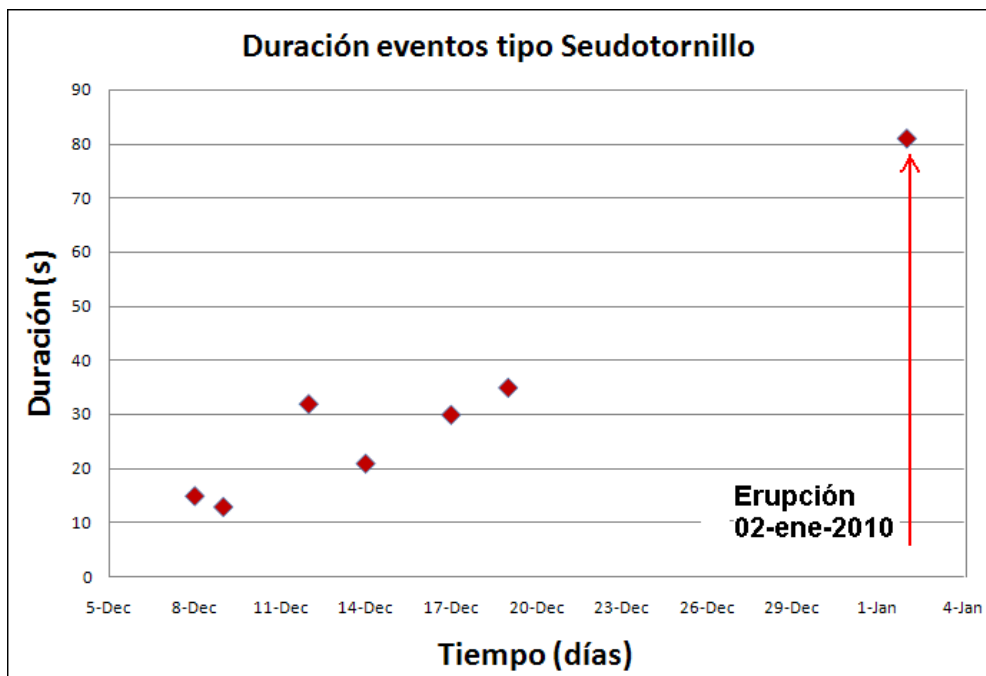


Figura 2.1.25. Evolución temporal de la duración de los eventos tipo pseudo-Tornillo, registrados por la estación Anganoy, entre el 9 de diciembre de 2009 y el 1 de enero de 2010.

En las gráficas 2.1.26 y 2.1.27 se muestra dos eventos tipo Tornillo, registrados en la etapa previa al evento eruptivo del 2 de enero de 2010.

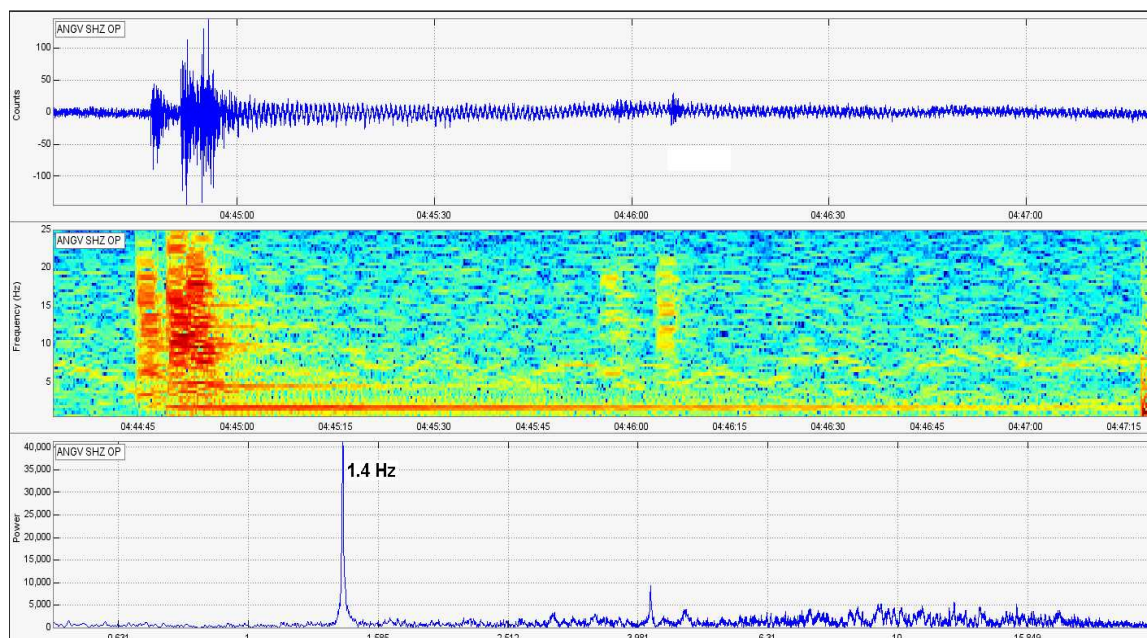


Figura 2.1.26. Sismograma, espectrograma y espectro del evento tipo Tornillo ocurrido el 29 de diciembre de 2009 a las 11:45 p.m., el cual registra una fase inicial con pulsos o eventos pequeños mayores que las ondas de coda.

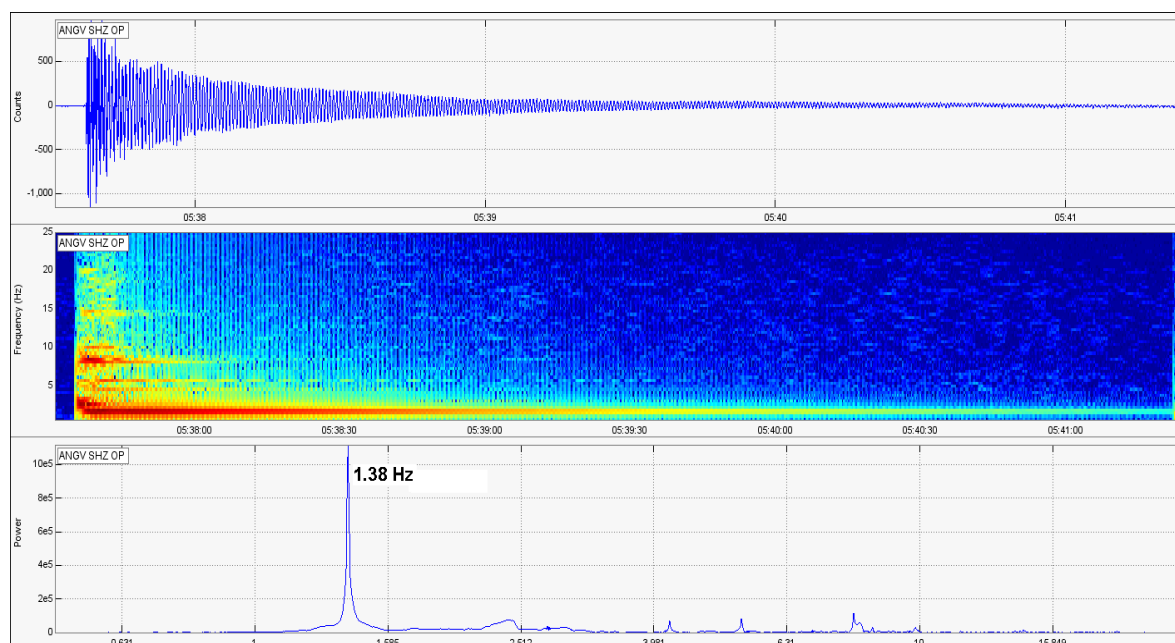


Figura 2.1.27. Sismograma, espectrograma y espectro del evento tipo Tornillo ocurrido el 1 de enero de 2010, a las 12:37 a.m. Este evento tuvo una duración de poco más de cinco minutos y correspondió al último de este tipo, registrado antes del evento eruptivo.

Entre los factores involucrados en etapas previas a las erupciones de Galeras, se ha observado la presencia de tremores con características espectrales especiales, como son los sismos de fuente persistente en el tiempo y en

los que sobresalen algunas de sus componentes armónicas (tremor armónico). Las erupciones ocurridas en 2009 han sido antecedidas por tremor armónico que se ha presentado desde semanas, hasta días, antes de las erupciones; de manera similar, cuatro semanas antes del evento eruptivo del 2 de enero de 2010, se registraron episodios de tremor que mostraban, cerca del final de la señal, un armónico dominante de baja frecuencia, estos eventos luego desaparecieron. La figura 2.1.28 muestra un ejemplo de un episodio de tremor de este tipo, registrado el 4 de diciembre de 2009. El fenómeno involucrado en la generación de estos sismos se relaciona muy probablemente con la intrusión de material magmático hacia niveles más superficiales propiciando las condiciones necesarias para la gestación de nuevos eventos eruptivos.

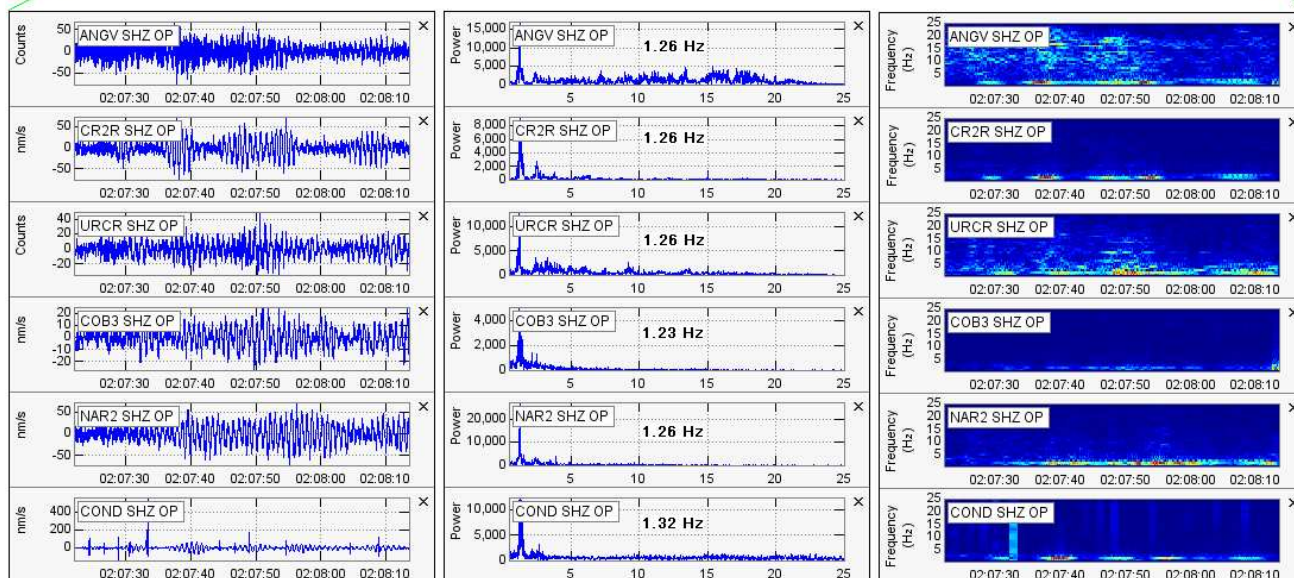
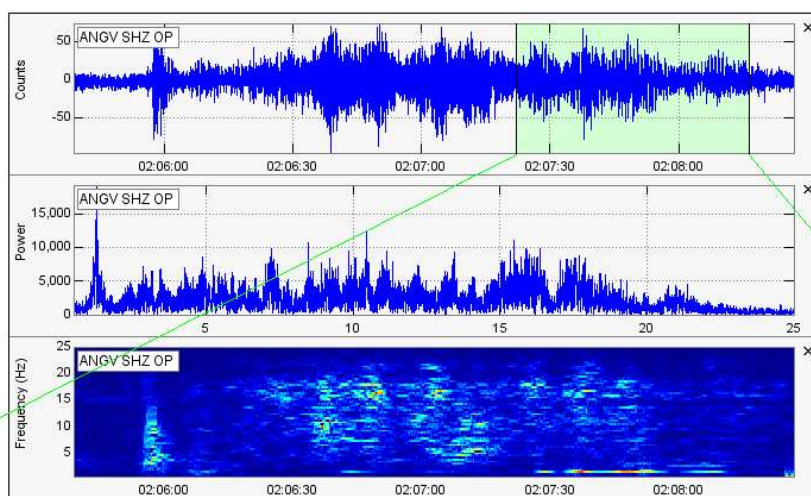


Figura 2.1.28. Sismogramas, espectros y espectrogramas del evento tipo tremor ocurrido el 4 de diciembre a las 9:06 p.m., el cual presenta características armónicas en la parte final del evento.

2.1.2.1. Evento eruptivo del 2 de enero de 2010

El 2 de enero a las 7:43 p.m. (hora local) se registró un evento eruptivo de carácter explosivo (Figuras 2.1.29 y 2.1.30), lo que implicó el cambio de nivel a Rojo (I), “Erupción inminente o en curso”, después de un periodo aproximado de 24 días en nivel Naranja. La señal sísmica asociada, para la estación Cráter-2 (ubicada a 1.5 km., al sur del cráter principal), tuvo una duración aproximada de 30 minutos. Aproximadamente 30 segundos después del inicio de la erupción, la estación Anganoy a 900 m del cráter, dejó de funcionar. En comparación con los registros sísmicos asociados a erupciones ocurridas desde marzo de 2009, esta es la segunda más energética después de la del 13 de marzo de 2009 (Figura 2.1.31 y 2.1.32). En lo que va corrido del periodo eruptivo iniciado en 2004, la señal sísmica asociada a esta erupción es la quinta, en cuanto a su nivel energético después de las ocurridas el 21 de noviembre de 2004, 12 de agosto de 2004, 20 de febrero de 2009 y 13 de marzo de 2009, en ese orden.

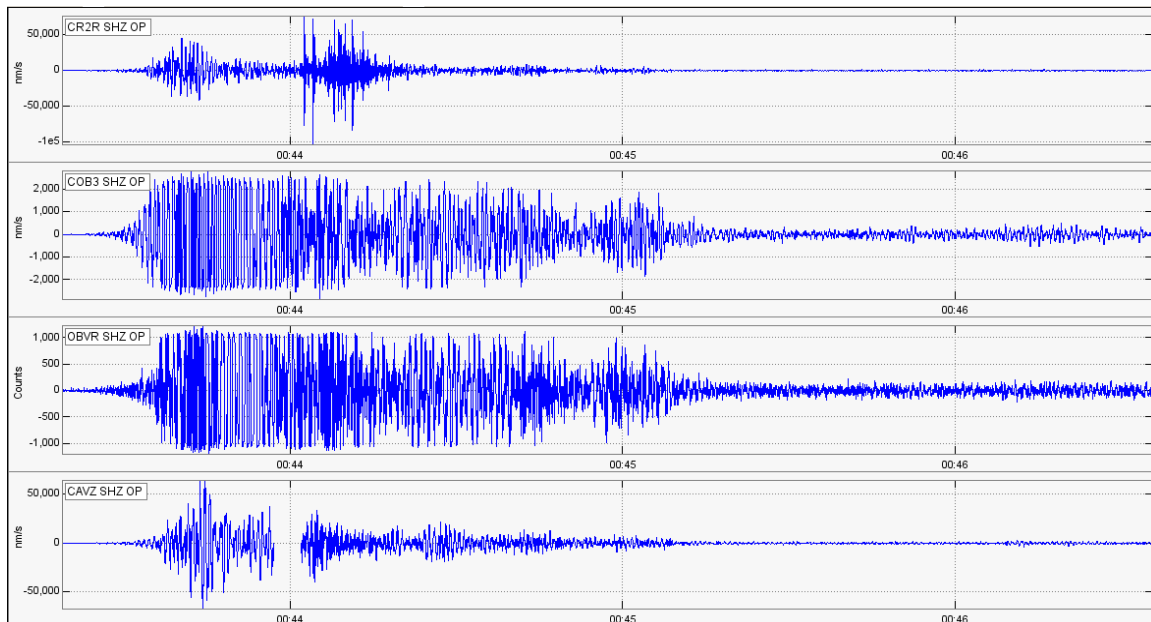


Figura 2.1.29. Sismogramas para las estaciones (de arriba abajo) Cráter-2, Cobanegra, Obonuco y Calabozo (componentes verticales), asociados al evento eruptivo de Galeras registrado el 2 de enero de 2010, a las 7:43 p.m. El alto nivel energético de la señal sísmica superó el rango de detección de la instrumentación de las estaciones Cobanegra y Obonuco, alcanzando su nivel de saturación.

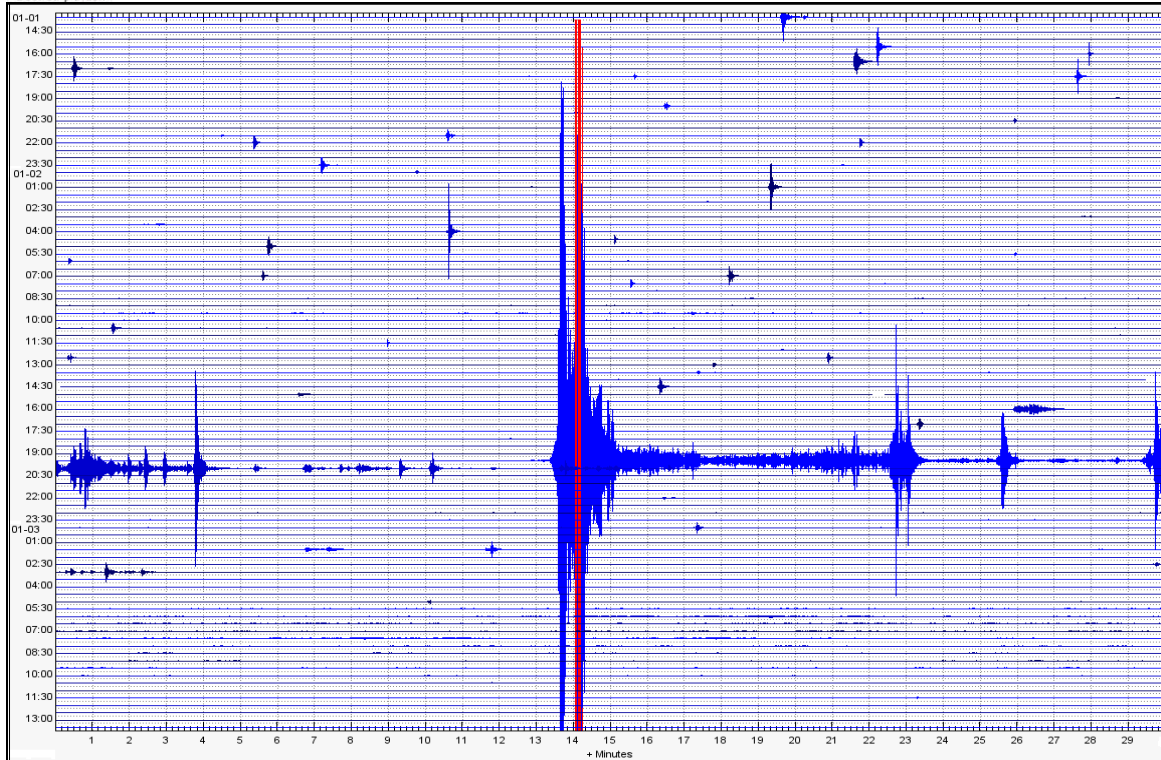


Figura 2.1.30. Sismograma registrado por la estación Cráter entre la 1:30 p.m. del 1 de enero hasta las 1:00 a.m. del 3 de enero de 2010. El tipo de digitalizador utilizado en esta estación impide la saturación de la señal, por tanto es posible observar hasta cuando esta alcanza su máxima amplitud (color rojo).

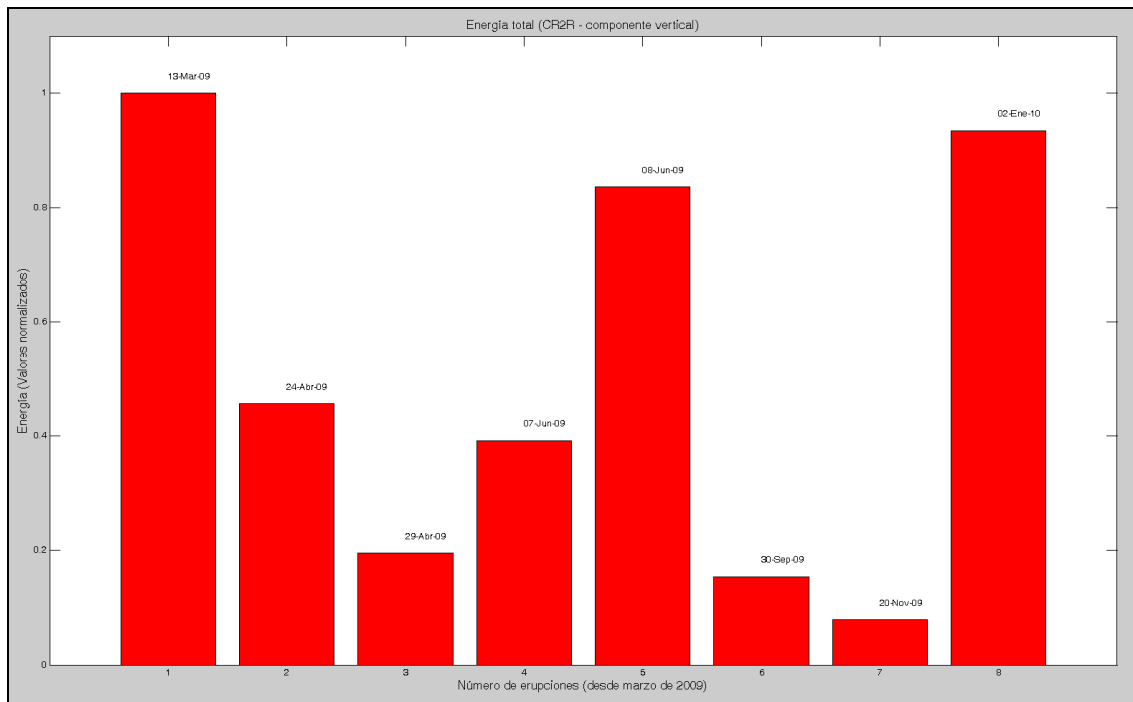


Figura 2.1.31. Comparación de los niveles energéticos de las señales sísmicas asociadas a las erupciones de Galeras, registradas entre marzo de 2009 y enero de 2010.

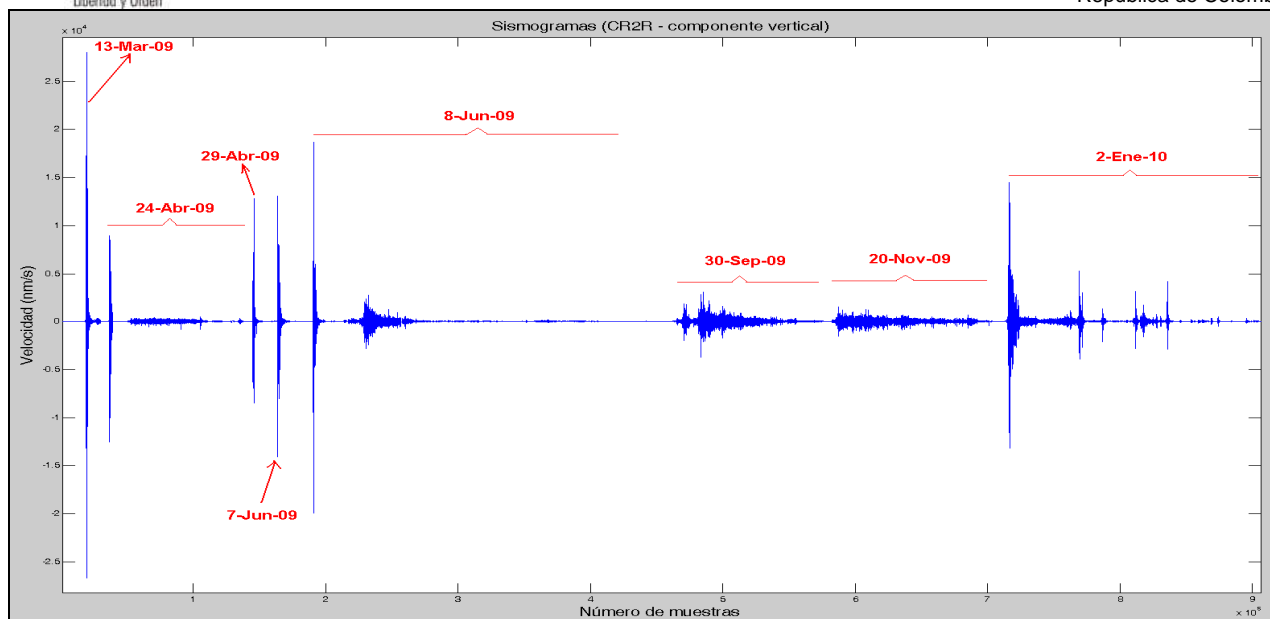


Figura 2.1.32. Sismogramas de las señales sísmicas asociadas a las erupciones desde el 13 de marzo de 2009 hasta el 2 de enero de 2010. Las trazas corresponden a los registros de la estación Cráter (que tiene un sismómetro de componente vertical) y están separadas por pequeños intervalos de tiempo para hacer posible su comparación.

La erupción generó una onda acústica que fue registrada por los sensores instalados en las estaciones Cráter y Calabozo, esta última ubicada a 6.8 km., al oeste-suroeste del cráter principal. Para el sensor acústico *ISLA14* (desarrollado por la Universidad de Hawái), el registró de su amplitud máxima es cerca de 9 veces mayor que la amplitud máxima registrada para la erupción de noviembre 20 de 2009. La figura 2.1.33 muestra los registros de los tres sensores acústicos y la señal sísmica registrada por la estación Cráter. Se recibieron reportes de personas que escucharon sonidos parecidos a explosiones desde diversos sectores del área de influencia de Galeras, especialmente desde zonas rurales y urbanas del municipio de Pasto.

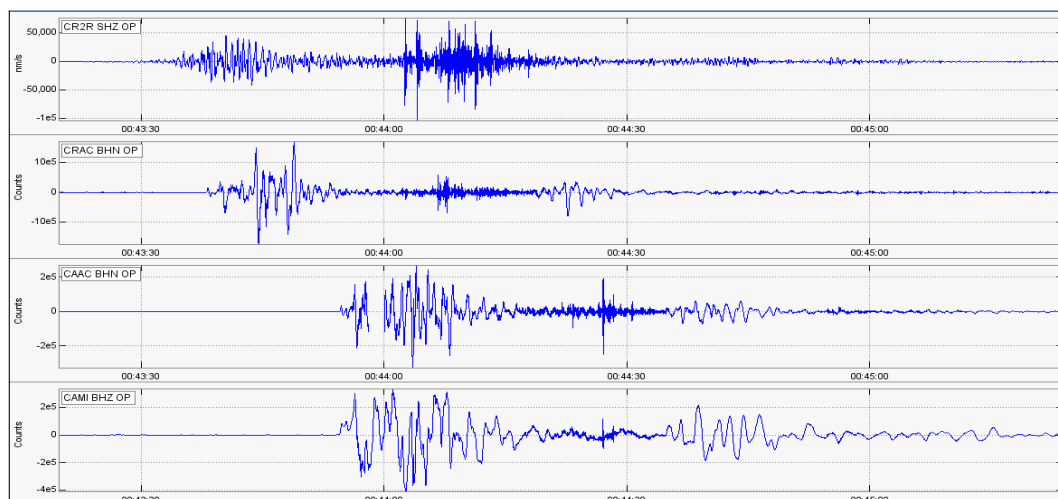


Figura 2.1.33. Registros del evento eruptivo del 2 de enero a las 7:43 p.m. para los sensores en la estación Calabozo, componente vertical de la estación Cráter, sensor acústico en Cráter, acústico EENTEC SA-4, acústico *ISLA14*. El desfase de las acústicas de Calabozo respecto a la señal sísmica de Cráter es mucho mayor, esto se debe a la distancia que hay entre el cráter y estos sensores teniendo en cuenta que la velocidad de propagación del sonido es aproximadamente de 340 m/s.

Posterior a la erupción del 2 de enero de 2010, predominaron los lapsos de tiempo en los que no se presentaba sismicidad, se resalta que entre el 6 y el 8 de enero, se registraron 12 eventos Vulcano-tectónicos ubicados en una zona a 4.5 km., al nororiente del cráter principal, cuatro de los cuales fueron sentidos por personas en el área de influencia de Galeras. Luego de la ocurrencia de los eventos de fractura y particularmente a partir del 9 de enero, empezaron a registrarse sismos LP de bajo nivel energético, la ocurrencia de estos eventos empezó a incrementarse paulatinamente, algunos de los eventos LP se caracterizaron por presentar un contenido espectral cuasi-monocromático, a partir del 15 de enero empezaron a registrarse nuevamente eventos tipo Tornillo y pseudo-Tornillo. Las figuras 2.1.34 y 2.1.35 muestran dos de los eventos tipo Tornillo registrados. El comportamiento en frecuencias, tanto de los eventos Tornillo, pseudo-Tornillo como de los eventos LP cuasi-monocromáticos mostró un descenso en los armónicos energéticamente destacados (Figura 2.1.36).

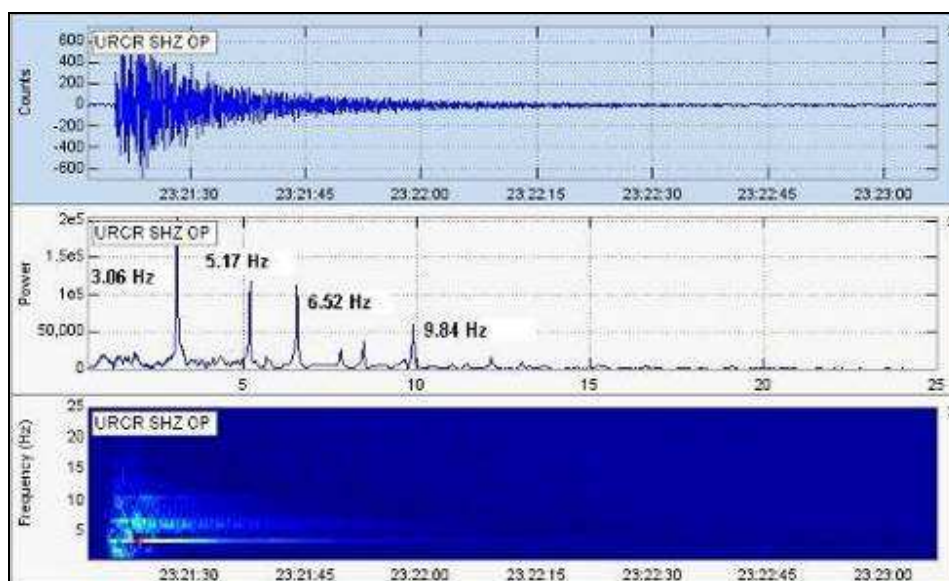


Figura 2.1.34. Sismograma, espectro y espectrograma del evento tipo Tornillo, registrado el día 17 de enero de 2010, a las 6:21 p.m.

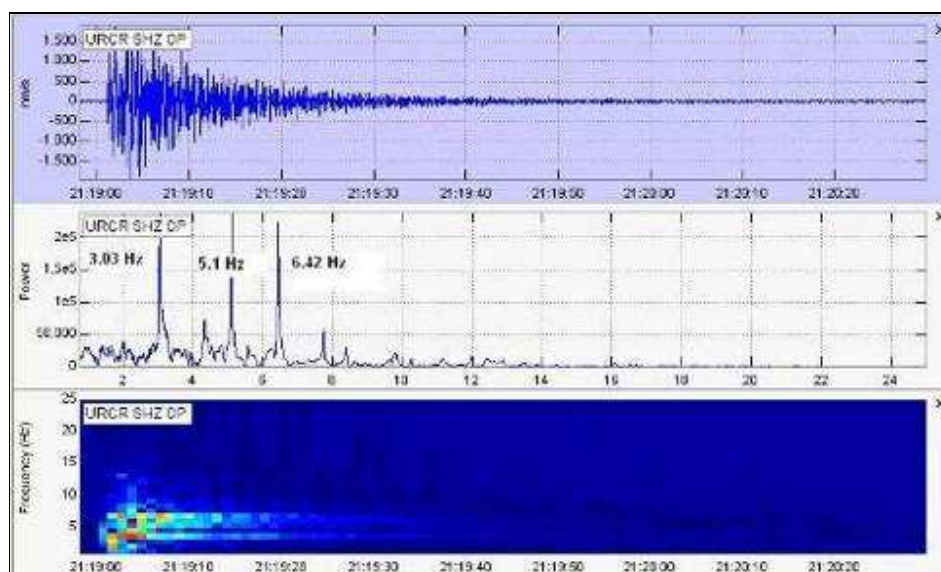


Figura 2.1.35. Sismograma, espectro y espectrograma del evento tipo Tornillo, registrado el día 18 de enero a las 7:56 p.m.

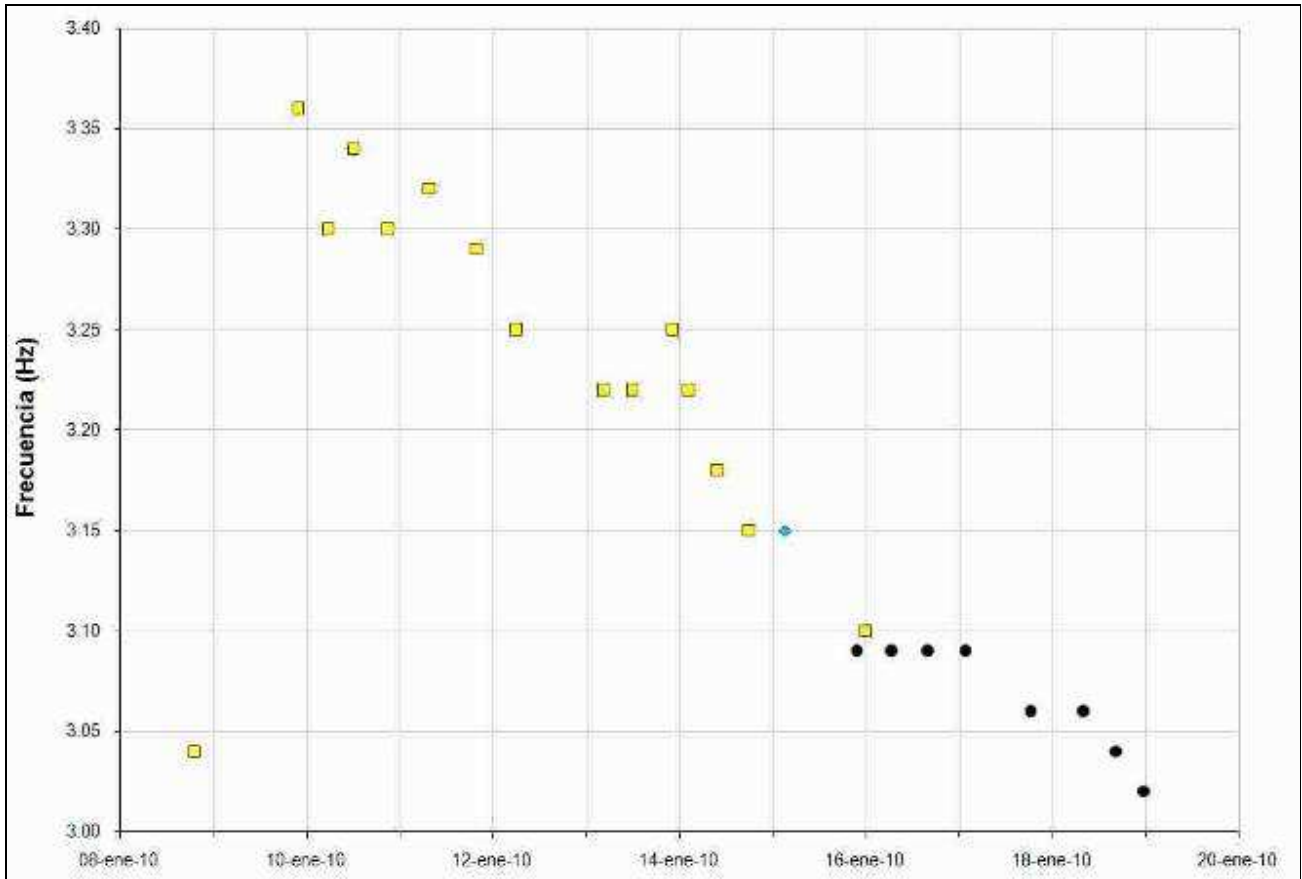


Figura 2.1.36. Frecuencia dominante evaluadas en la estación sismológica de corto período Urcunina, de los eventos tipo Tornillo (circulo negro) y Pseudo - tornillo (rombo azul) y LP monocromático (cuadrado amarillo), registrados entre el 8 y el 18 de enero de 2010, para la estación sismológica Urcunina.

Entre la 1:00 a.m. y las 5:30 a.m. del 19 de enero, se registró un enjambre de eventos sísmicos, que reflejaron un cambio en el sistema, que paso del registro de un número considerable de Tornillos y pseudo-Tornillo al predominio de silencio sísmico, con la ocurrencia de muy pocos eventos de nivel energético bajo (Figura 2.1.37); comportamiento que continuó hasta el 31 de enero.

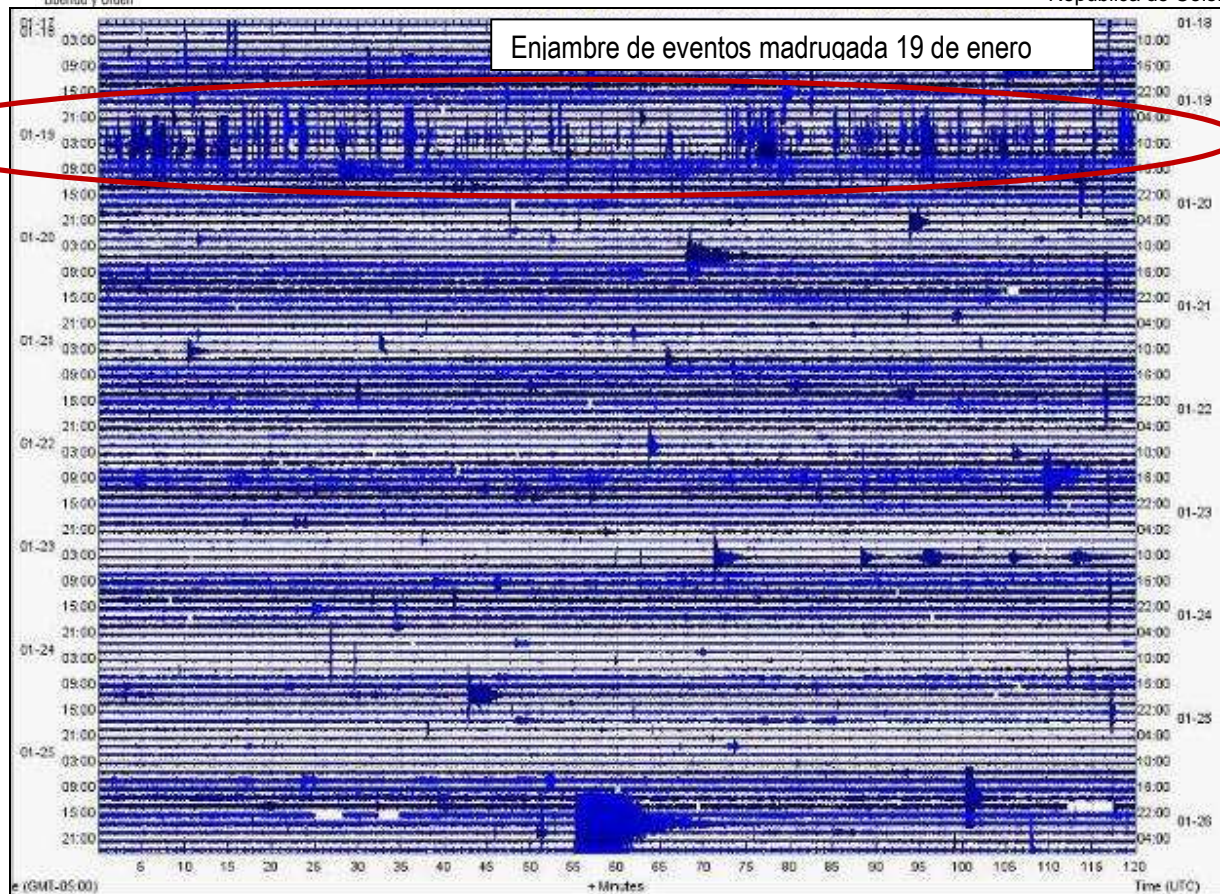


Figura 2.1.37. Sismograma del 18 al 25 de enero del 2010 de la estación Urcunina - componente vertical (ubicada a 2.3 km., al ESE del volcán), se resalta enjambre de eventos registrado la madrugada del 19 de enero de 2010.

Luego, la sismicidad dominante estuvo relacionada con movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico; además, durante la primera semana de febrero se continuó con el registro de sismos asociados con el incremento de presiones en el sistema con condiciones geométricas especiales del medio que sísmicamente se reflejaron en el registro de cinco eventos tipo TOR (entre el 1 y 5 de febrero) y tres eventos tipo pseudo-Tornillo (dos de ellos registrados el 1 de febrero y uno registrado el 18), los cuales mostraron en el tiempo, un descenso en la frecuencia, observado en la mayoría de las estaciones que forman parte de la red sísmica de Galeras (Figura 2.1.38). Por otra parte, continuó el registro de los eventos tipo LP, caracterizados por el dominio de bajas frecuencias en su espectro y por la presencia de armónicos cuyas frecuencias sobresalen dentro de su banda espectral dominante y que se observan en la mayoría de las estaciones de la red sísmica (Figura 2.1.39). Estos eventos, por su contenido espectral, parecen estar asociados con la fuente que genera los eventos tipo Tornillo, de igual manera se observa una evolución en cuanto a la disminución paulatina de su frecuencia dominante (Figura 2.1.40).

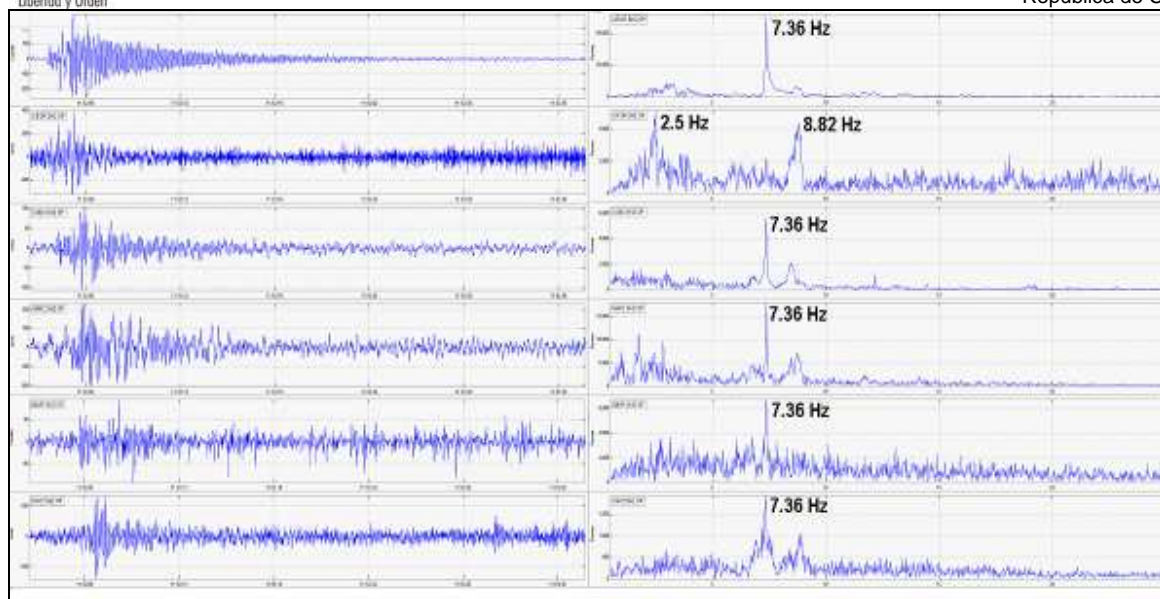


Figura 2.1.38. Evento tipo Tornillo registrado el 1 de febrero de 2010 a las 06:52 a.m.

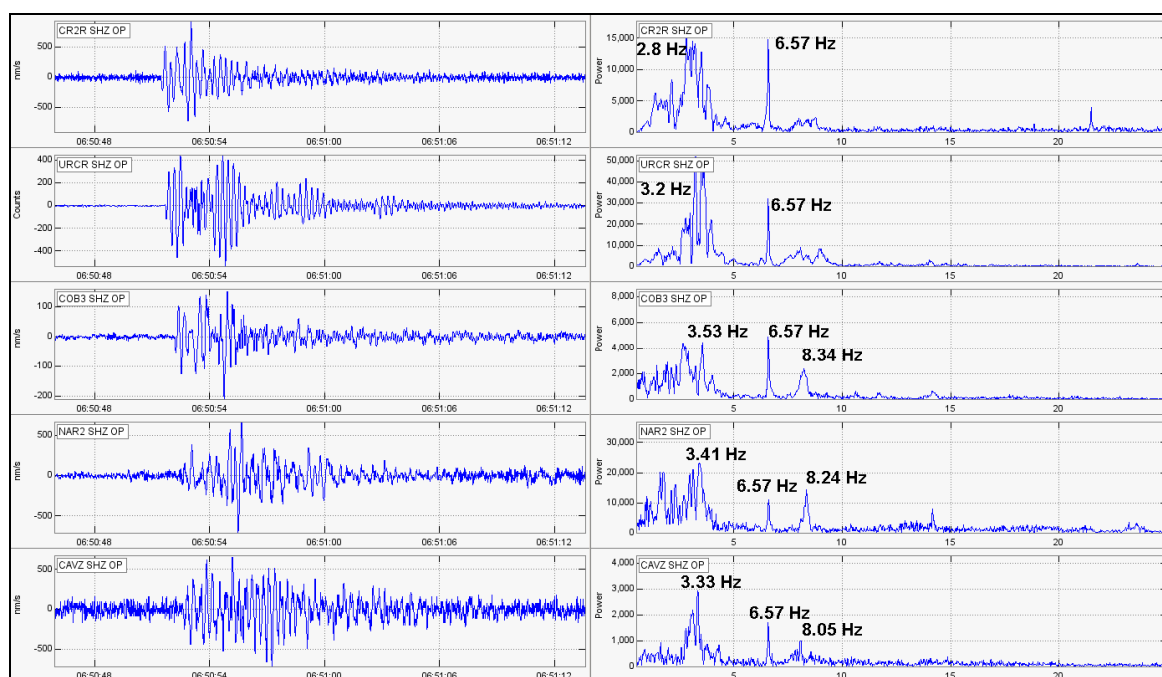


Figura 2.1.39. Evento tipo LP, registrado el 3 de febrero de 2010, a las 01:51 a.m.

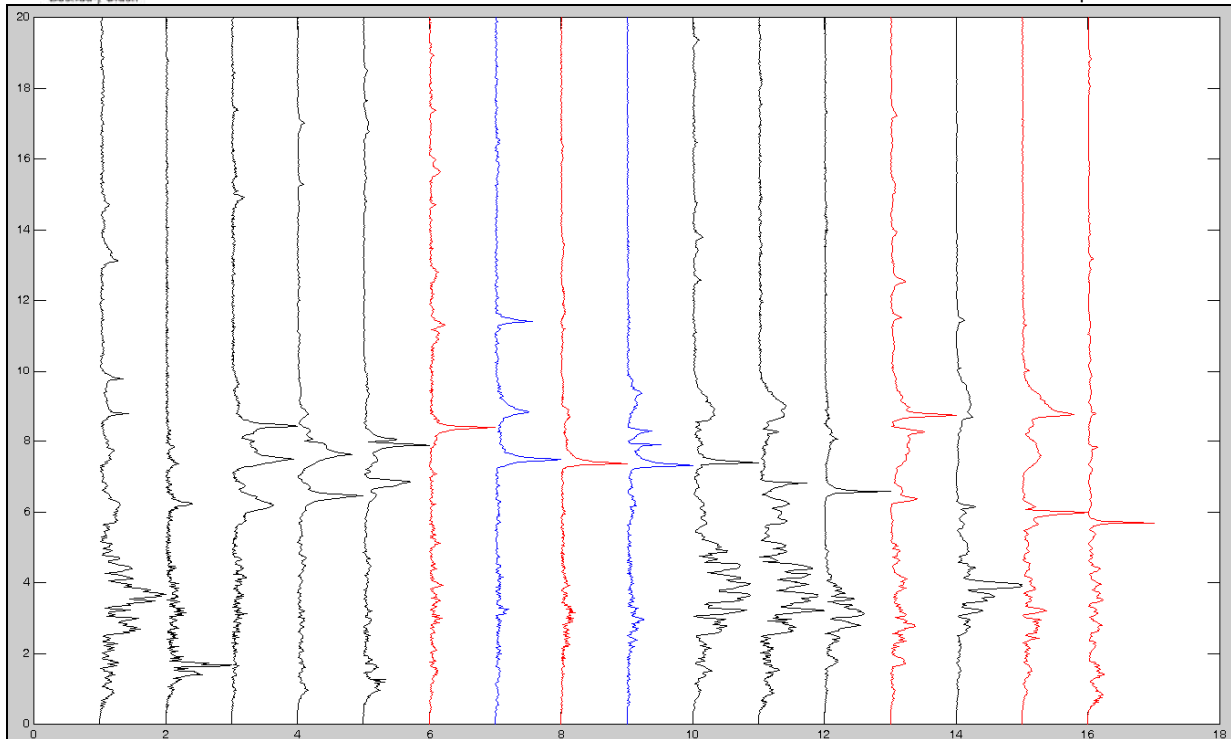


Figura 2.1.40. Espectro de Fourier de los eventos tipo Tornillo (rojo), Pseudo-Tornillo (azul) y LP (negro) registrados entre el 1 y el 5 de febrero de 2010.

Dentro del proceso registrado entre el 1 y el 7 de febrero de 2010, se destacan tres etapas: la primera con la presencia de eventos tipo Tornillo, la segunda con el enjambre sísmico ocurrido entre el 6 de febrero a las 10:12 a.m. y el 7 de febrero a las 03:04 a.m., y la tercera con la disminución y ausencia de eventos tipo Tornillo y con la ocurrencia de muy pocos eventos de nivel energético bajo. La figura 2.1.41 muestra el enjambre mencionado anteriormente, se contabilizaron 123 eventos, de los cuales 65 fueron LP, 43 HYB y 15 VT.

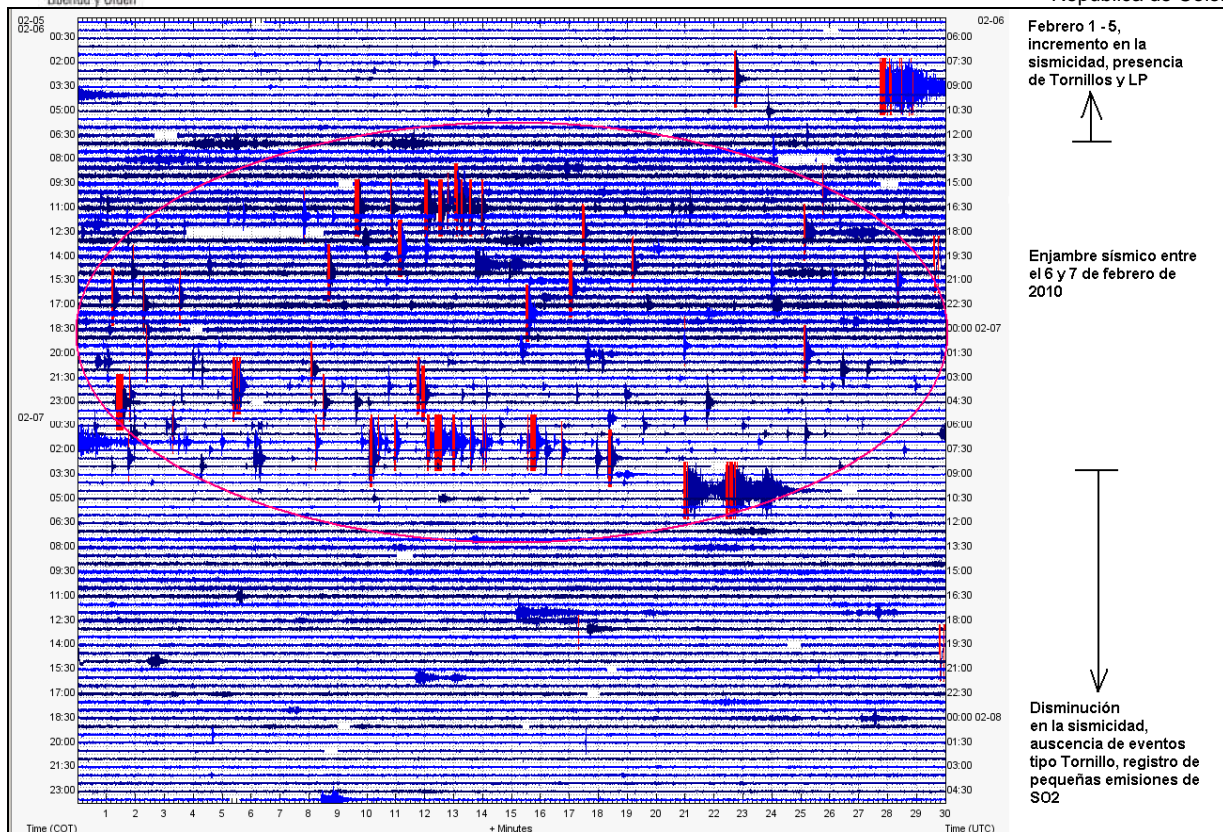


Figura 2.1.41. Sismograma del 6 al 7 de febrero del 2010 de la estación Urcunina - componente vertical (ubicada a 2.3 km., al ESE del volcán Galeras).

Luego del enjambre mencionado anteriormente, y después de tener unos índices de ocurrencia sísmica relativamente bajos, se destaca el registro de una serie de eventos (en total 56), en su mayoría eventos tipo HYB y otros tipo LP, los cuales se registraron a partir del 15 de febrero, hacia la 1:10 a.m. hasta finalizar el día; de ellos 10 alcanzaron el umbral de clasificación (amplitud mínima que debe cumplir un evento sísmico en la estación de referencia Urcunina (URCR) para ser considerado como clasificable), mientras que 46 de estos eventos fueron no clasificables, entre los que se contabilizaron 25 LP, 20 HYB y 1 VT (Figura 2.1.42).

El día 21 de febrero a las 10:50 a.m., se destaca el registro de un evento tipo LP, el cual posee la característica de ser cuasi-monocromático y se considera dentro de los eventos relacionados con movimientos de fluido como especiales, pues en su espectro se logra evidenciar claramente el predominio de un armónico con frecuencia cercana a los 3.54 Hz en la mayoría de las estaciones en las que se tuvo registro (Figura 2.1.43).

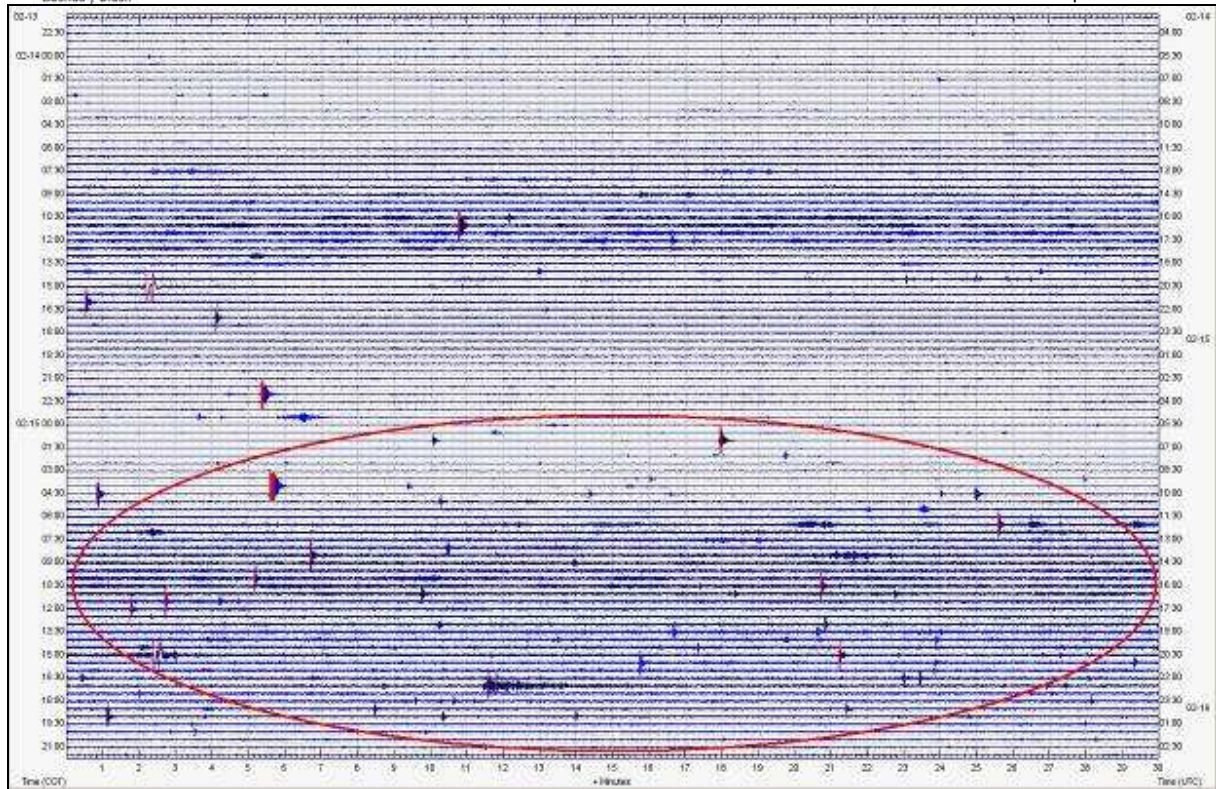


Figura 2.1.42. Sismograma del 14 al 15 de febrero de 2010 de la estación Urcunina - componente vertical (ubicada a 2.3 Km al ESE del volcán). El ovalo rojo resalta la ocurrencia de eventos sísmicos clasificables y no clasificables registrados durante el 15 de febrero de 2010.

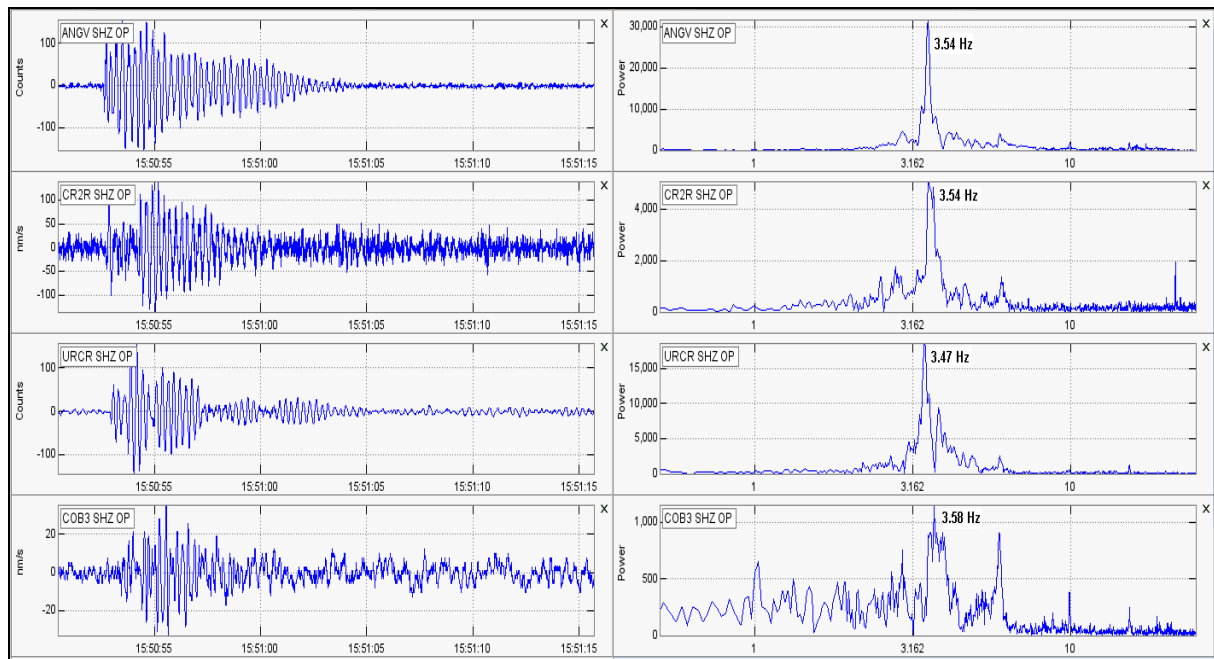


Figura 2.1.43. Evento tipo LP registrado el 21 de febrero de 2010, a las 10:50 a.m.

En la última semana de febrero se resalta que algunos de los eventos de fluidos, tipo LP, tuvieron un registro caracterizado por presentar una lenta atenuación en la parte final del evento, haciendo que estos tengan una coda alargada, con frecuencia dominante entre los 14 y 19 Hz, como los que se observa en las figuras 2.1.44 y 2.1.45. Aún cuando estos sismos mostraron una banda espectral amplia, tuvieron una frecuencia dominante considerada como alta, de alrededor de los 18 Hz.

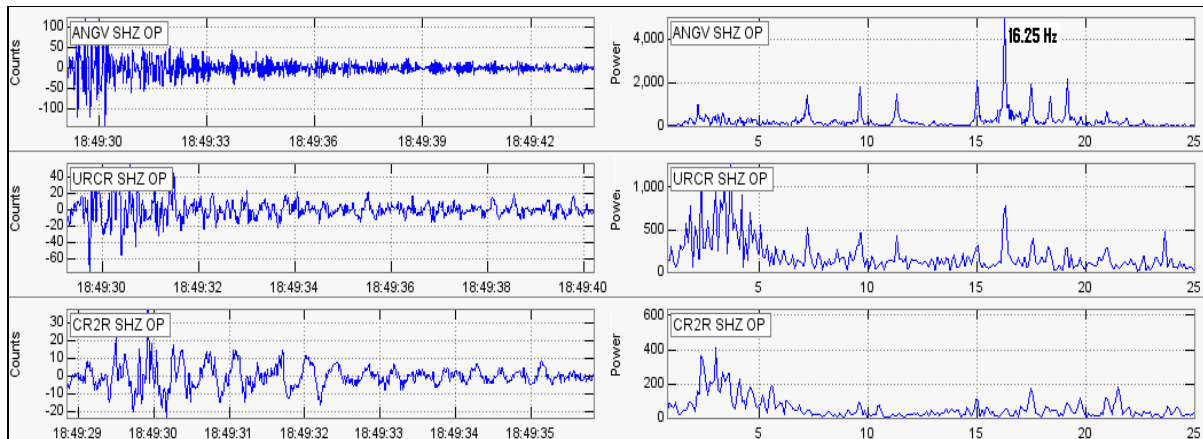


Figura 2.1.44. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 23 de febrero a la 1:49 p.m., el cual presenta características de lenta atenuación en la parte final del evento.

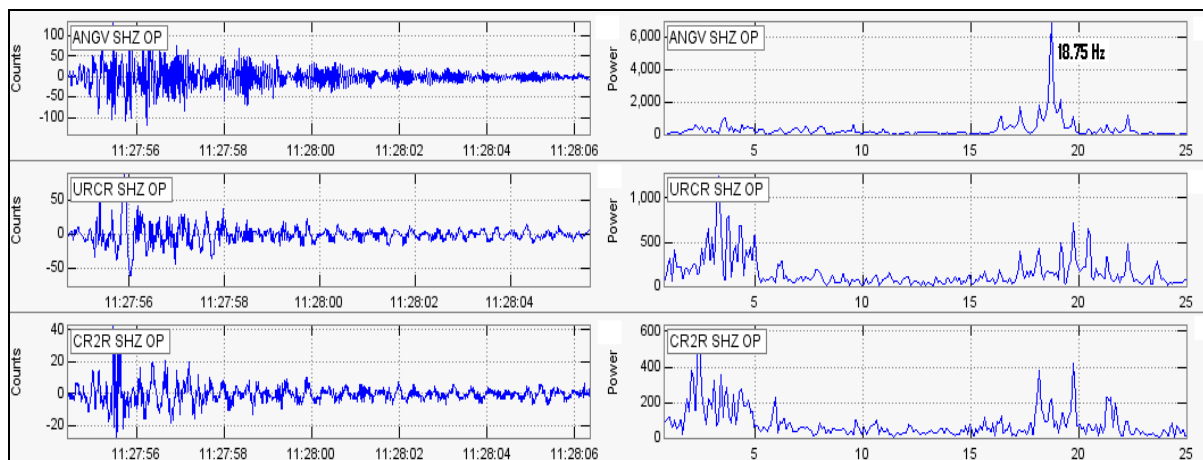


Figura 2.1.45. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 25 de febrero a la 6:27 a.m., el cual presenta características de lenta atenuación en la parte final del evento.

Por otra parte es importante mencionar la ocurrencia de eventos tipo tremor de bajos niveles energéticos ya que esto puede propiciar una relajación parcial de esfuerzos en el sistema. Las figuras 2.1.46 y 2.1.47 representan dos de los eventos de este tipo más destacados durante el periodo evaluado.

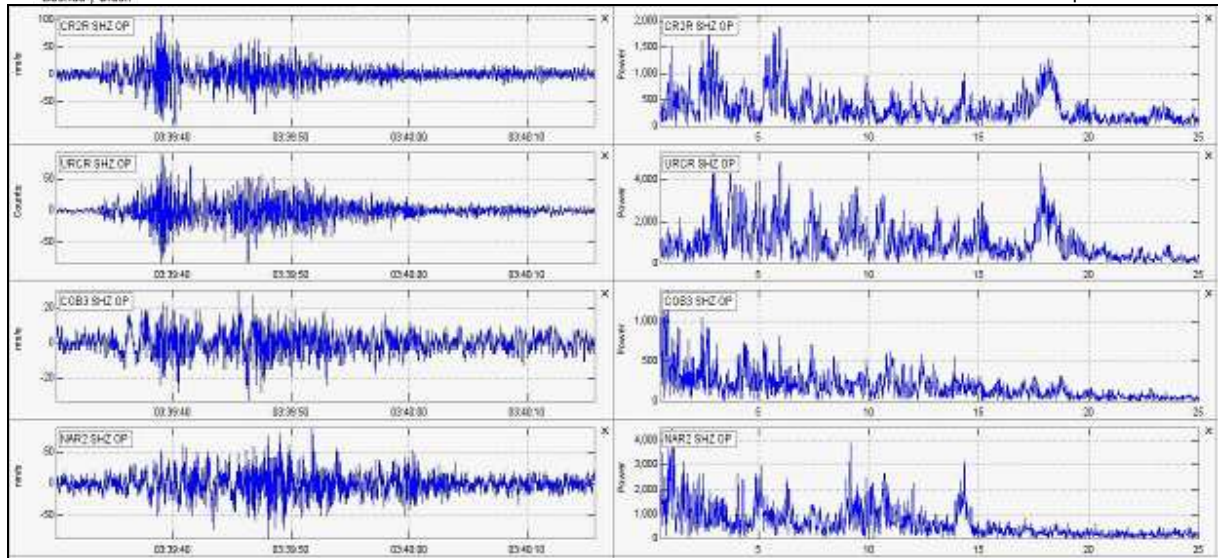


Figura 2.1.46. Evento tipo TRE registrado el 10 de febrero de 2010 a las 10:39 p.m. Al lado izquierdo se muestra la traza sísmica del evento en las estaciones CR2R, UR2R, COB3 y NAR2, a la derecha se muestra el espectro de frecuencias.

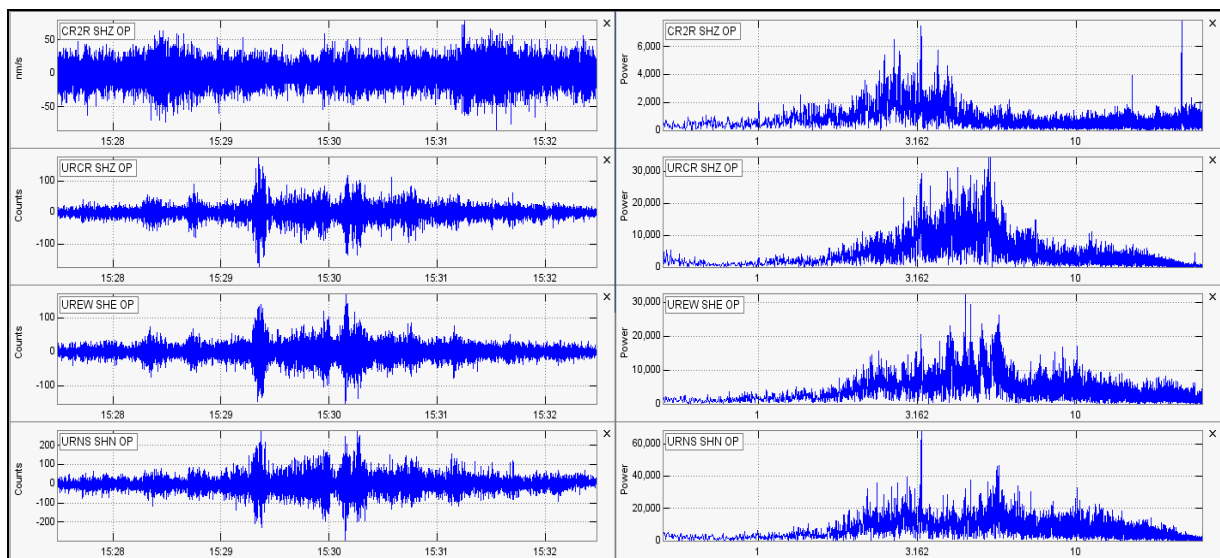


Figura 2.1.47. Evento tipo TRE registrado el 20 de febrero de 2010, a las 10:28 a.m.

Dentro del proceso registrado durante el mes de abril de 2010, se resalta la ocurrencia de un enjambre de sismos de bajo nivel energético ocurrido el 18 de abril, entre las 11:16 a.m. y la 1:45 p.m.; en total se registraron 35 eventos tipo LP e HYB entre clasificables y no clasificables. Este enjambre terminó con el registro de un evento tipo HYB, el cual tuvo una magnitud local de 1,3 en la escala de Richter (Figura 2.1.48).

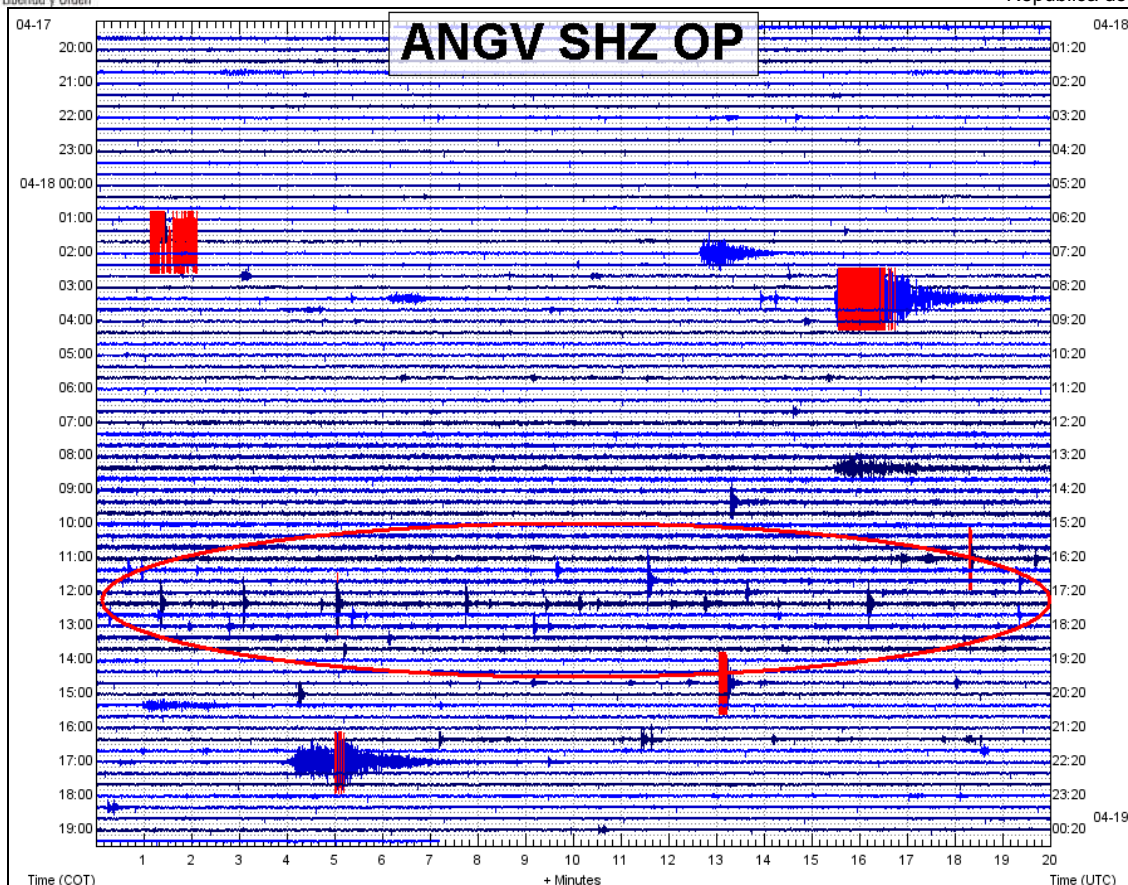


Figura 2.1.48. Sismograma del 17 al 18 de abril de 2010 de la estación Anganoy - componente vertical (ubicada a 0,84 km., al ESE del cráter principal). El ovalo rojo resalta la ocurrencia de eventos sísmicos clasificables y no clasificables registrados durante el 18 de abril de 2010.

De la sismicidad registrada en el mes de mayo, también se destaca la ocurrencia de tres enjambres sísmicos, de bajo nivel energético, el primer enjambre comenzó a las 10:50 a.m. del 2 de mayo de 2010 y duró hasta la madrugada del 3 de mayo de 2010 a las 3:00 a.m.; en su mayoría los sismos fueron de tipo LP y otros de tipo HYB, de los cuales, 14 alcanzaron el umbral de clasificación, mientras que 76 fueron no clasificables, es decir, se totalizaron 90 eventos (Figura 2.1.49).

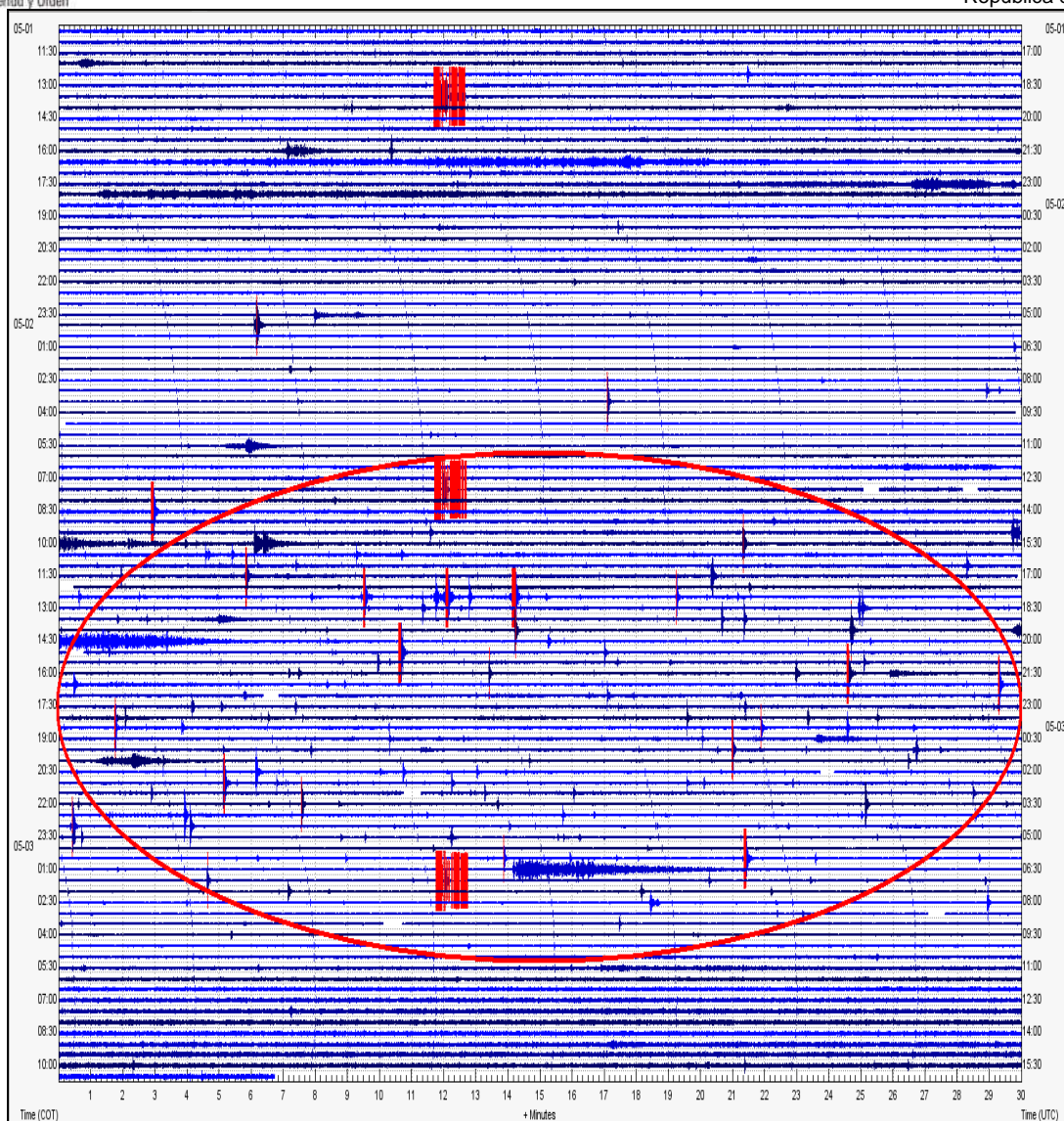


Figura 2.1.49. Sismograma de la estación Anganoy (ANGV) de la red de vigilancia de Galeras, entre el 1 y el 3 de mayo de 2010. El óvalo rojo resalta el enjambre sísmico, registrado entre el 2 y el 3 de mayo de 2010.

El segundo enjambre ocurrió entre la noche del 4 de mayo y la madrugada del 5 de mayo, en su mayoría LP e HYB, que totalizaron 50 eventos no clasificables. El tercer enjambre se registró el 17 de mayo, entre las 4:36 p.m. y 5:36 p.m., totalizando 40 eventos sísmicos, entre LP e HYB, que en su mayoría corresponden a eventos no clasificables.

En el mes de mayo se incrementa la presencia de tremor, estos solamente se registraron desde la segunda mitad del mes. En total se registraron 17 eventos tipo Tremor, entre armónico y espasmódico y entre clasificables y no clasificables; 13 episodios de tremor cumplieron con los parámetros de clasificación, bien sea por su registro en amplitud o por la duración de la señal; la duración sumada de los 17 episodios de tremor fue de 130.4 minutos.

Se resaltan los episodios de tremor ocurridos el 18 de mayo de 2010, clasificados como armónicos por mostrar en su espectro de Fourier, picos definidos con armónicos frecuenciales dominantes. En total se registraron 9 episodios de TRE, el registro de todos los episodios de TRE ocurridos este día, totalizó 19 minutos y 48 segundos de duración, esto para la estación de referencia Anganoy (ANGV). Se destaca que la frecuencia dominante de estos episodios de tremor fue cercana a los 3 Hz y en promedio presentaron hasta 8 armónicos de frecuencias, menores de 6 Hz en su espectro, estos picos se espacian aproximadamente cada 0.9 Hz (Figura 2.1.50).

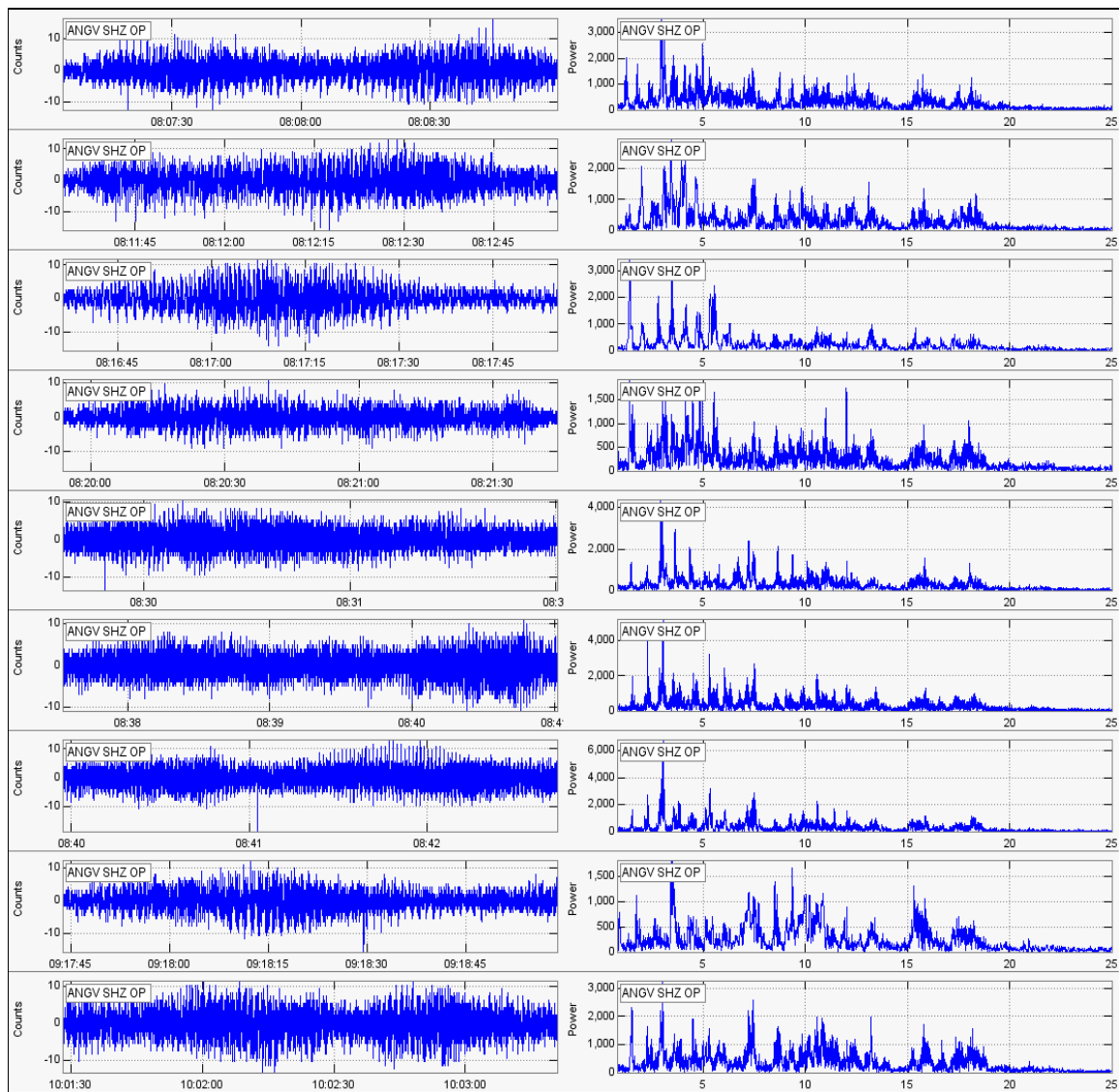


Figura 2.1.50. Sismogramas y espectros en frecuencia de los eventos tipo TRE armónico ocurridos el 18 de mayo de 2010, registrados en la estación Anganoy, de la red de vigilancia de Galeras.

En la figura 2.1.51, se muestra un ejemplo de los eventos registrados tipo TRE espasmódico el cual ocurrió el 29 de mayo de 2010.

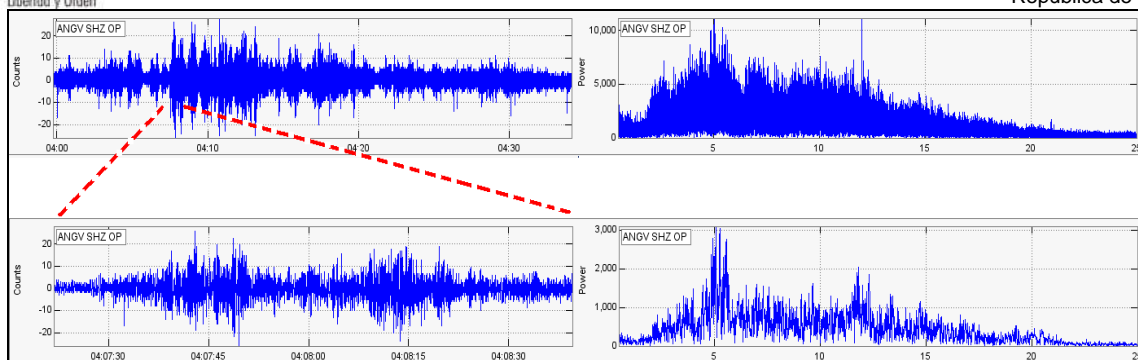


Figura 2.1.51. Sismograma y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado en la estación Anganoy, de la red de vigilancia de Galeras, el 29 de mayo de 2010 a las 10:59 p.m.

También es importante mencionar que algunos de los eventos de fluidos, tipo LP, entre clasificables y no clasificables, tuvieron un registro caracterizado por presentar una lenta atenuación en la parte final del evento, haciendo que estos tengan una coda alargada, en las figuras 2.1.52 y 2.1.53, se presentan ejemplos de señales sísmicas típicas relacionadas con dinámica de fluidos, junto con su espectro de Fourier.

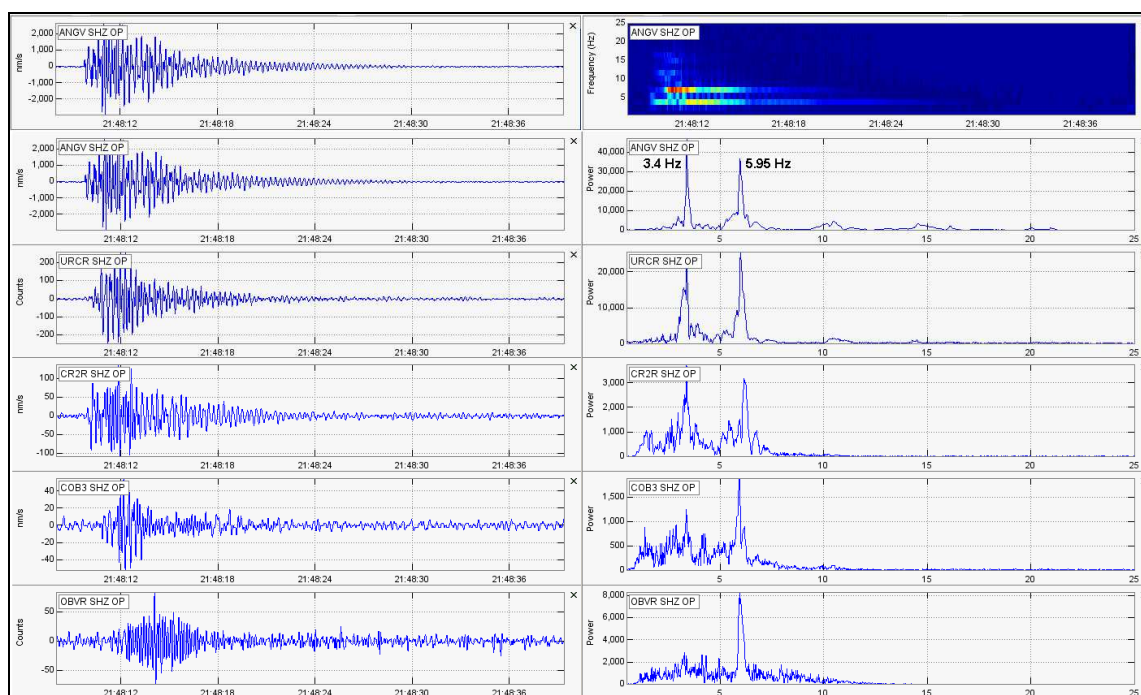


Figura 2.1.52. Evento tipo LP registrado por algunas estaciones de la red de monitoreo de Galeras, el 16 de mayo a las 5:48 p.m. Izquierda: Sismograma digital, derecha: espectro de Fourier.

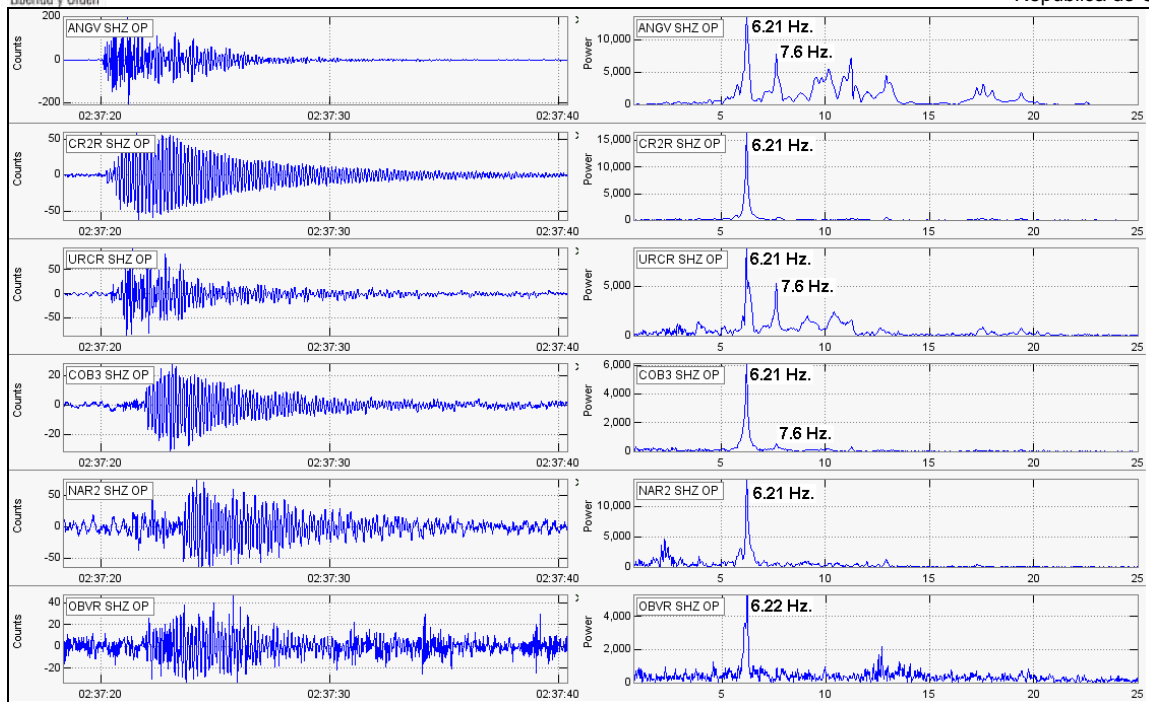


Figura 2.1.53. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP ocurrido el 23 de mayo a las 9:37 p.m., registrado por algunas de las estaciones de monitoreo del volcán Galeras.

De la sismicidad registrada en el mes de junio de 2010, se destaca la ocurrencia de 5 eventos asociados con el incremento de presiones en el sistema volcánico que sísmicamente se reflejaron en el registro de tres señales clasificadas como Tornillo (TOR) y dos eventos clasificados como pseudo -Tornillo (PST). El primer evento tipo TOR se registró el 7 de junio de 2010, a las 11:32 a.m. y presentó frecuencias dominantes de 4,6 Hz en las estaciones más cercanas y de 8,4 Hz en la estación más lejana (Figura 2.1.54); los otros dos eventos se registraron el 23 de junio de 2010, a las 7:22 p.m. y el 24 de junio de 2010, a las 1:24 a.m., los cuales presentaron frecuencias dominantes con valores de 5,9 y 4,2 Hz, estos eventos se observaron en la mayoría de las estaciones que forman parte de la red sísmica de Galeras (Figuras 2.1.55 y 2.1.56). Los eventos tipo PST se registraron el 21 y el 23 de junio de 2010 a las 5:17 a.m. y a las 11:34 p.m. respectivamente (Figuras 2.1.57 y 2.1.58).

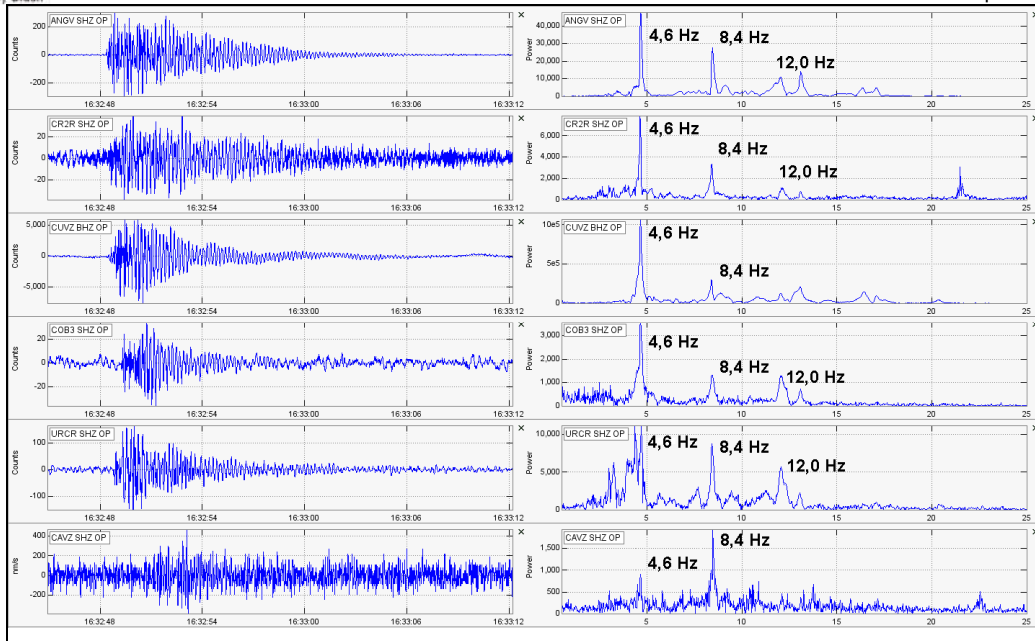


Figura 2.1.54. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Tornillo registrado el 7 de junio de 2010, a las 11:32 a.m.

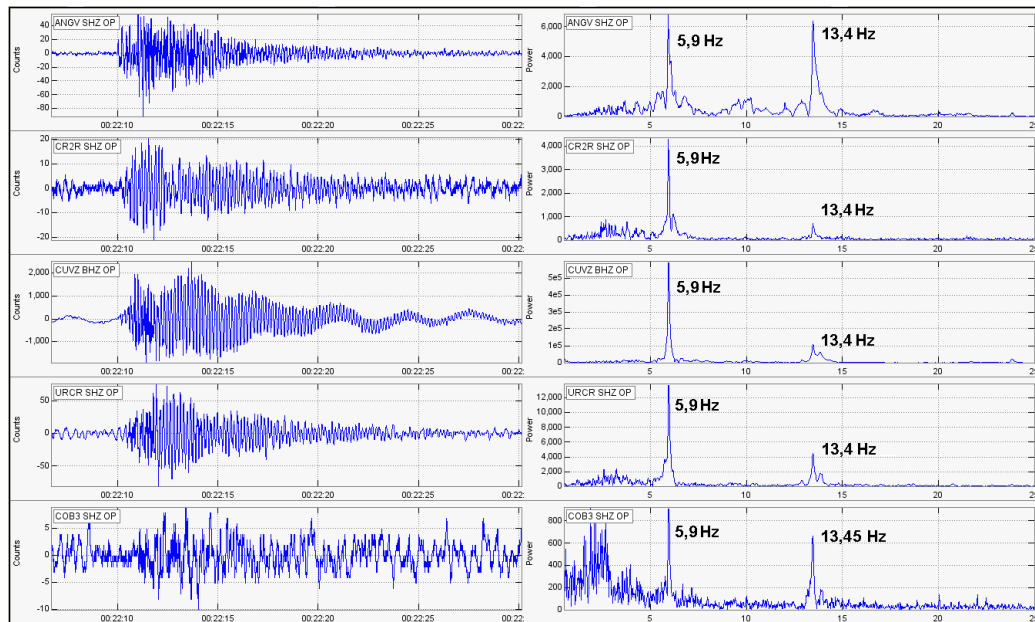


Figura 2.1.55. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR registrado el 23 de junio de 2010, a las 7:22 p.m.

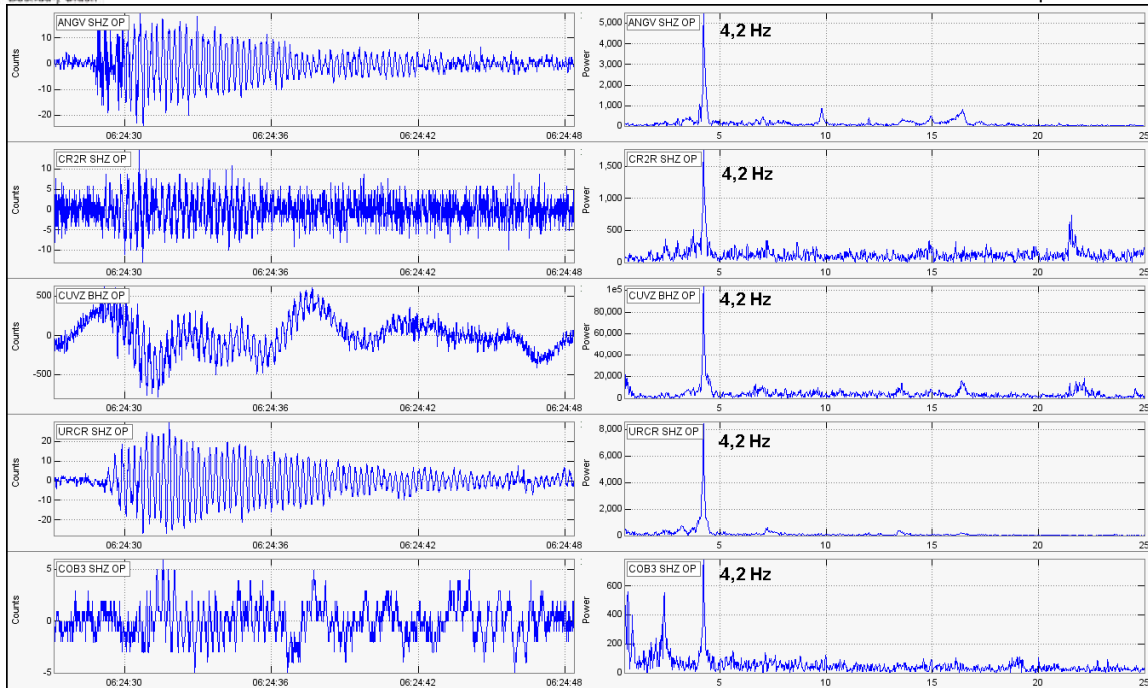


Figura 2.1.56. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TOR registrado el 24 de junio de 2010, a la 1:24 a.m.

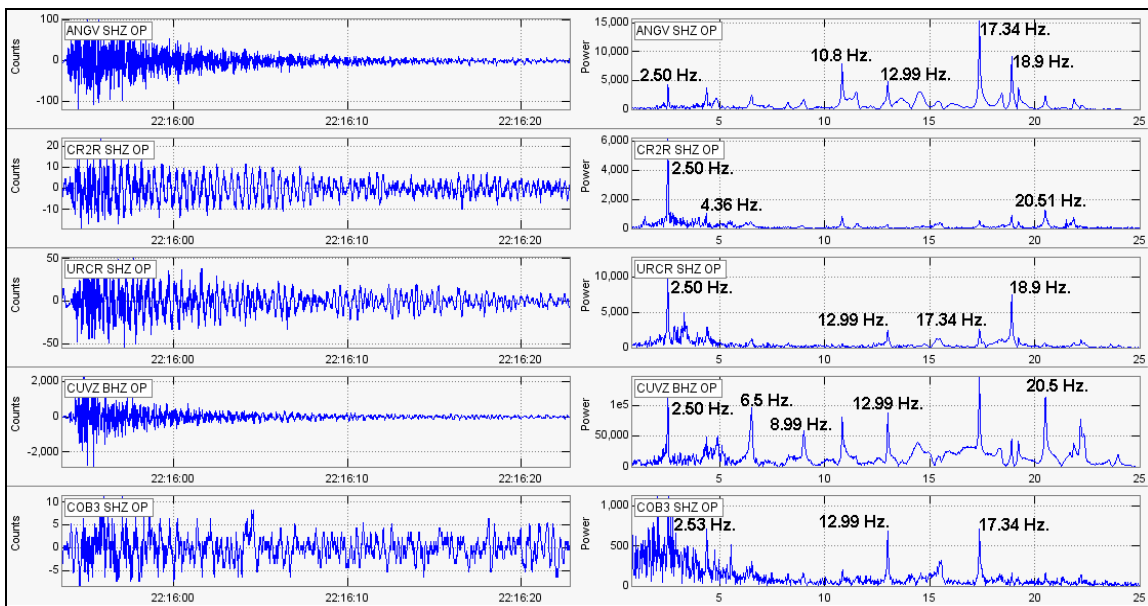


Figura 2.1.57. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Pseudo-Tornillo (PST) registrado el 21 de junio, a las 5:17 a.m.

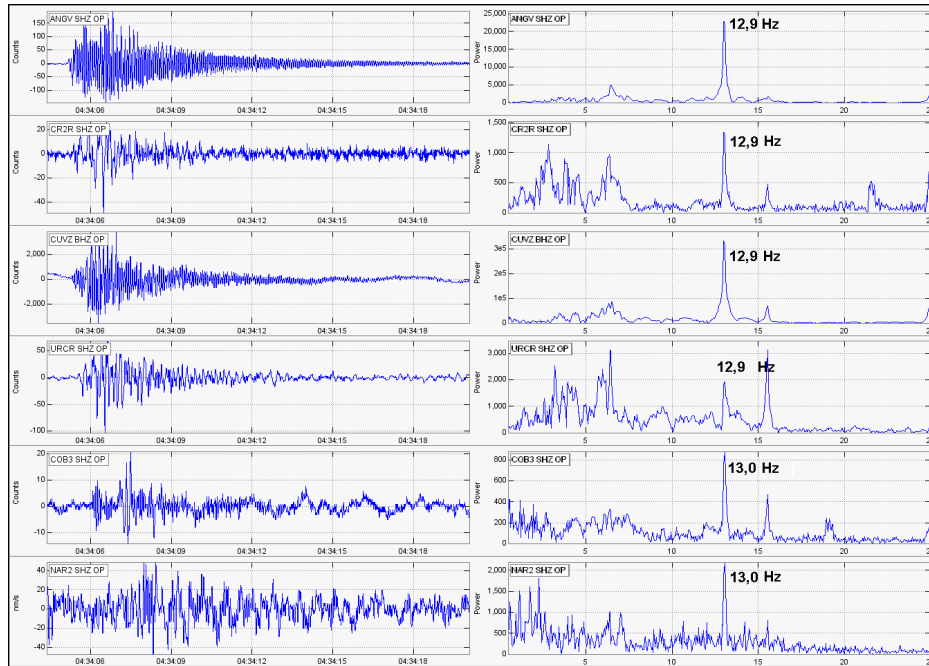


Figura 2.1.58. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo Pseudo-Tornillo registrado el 23 de junio de 2010, a las 11:34 p.m.

Por otra parte, durante el mes de junio, se mantuvo el registro de eventos tipo LP, entre clasificables y no clasificables, caracterizados por el dominio de bajas frecuencias en su espectro y por la presencia de armónicos asociados con procesos en el origen. Por su contenido espectral, pueden estar relacionados con la fuente de generación de los eventos tipo TOR, las figuras 2.1.59, 2.1.60 y 2.1.61 muestran ejemplos de este tipo de eventos.

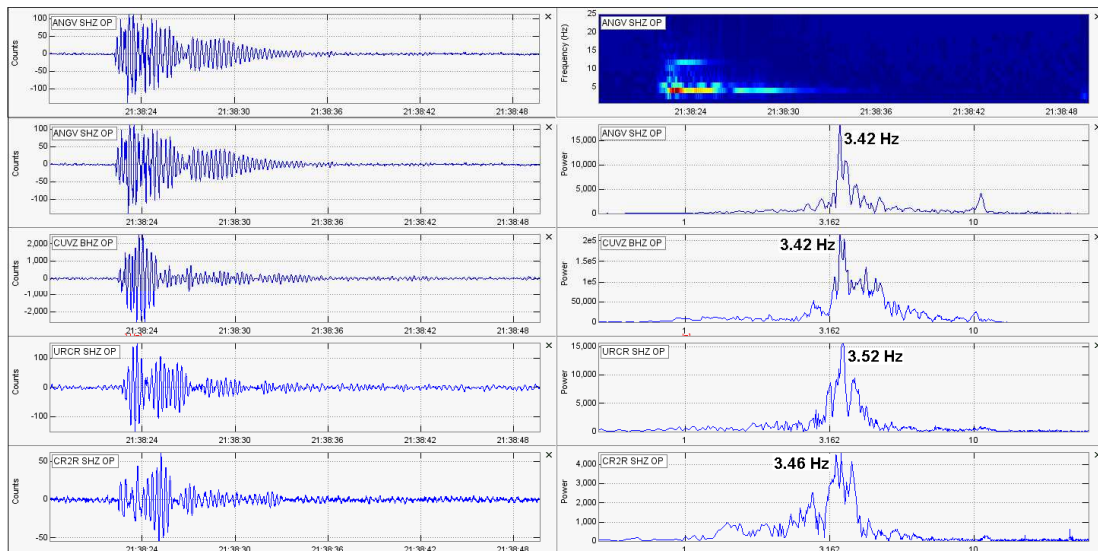


Figura 2.1.59. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP con coda no clasificable registrado el 12 de junio a las 4:38 p.m.

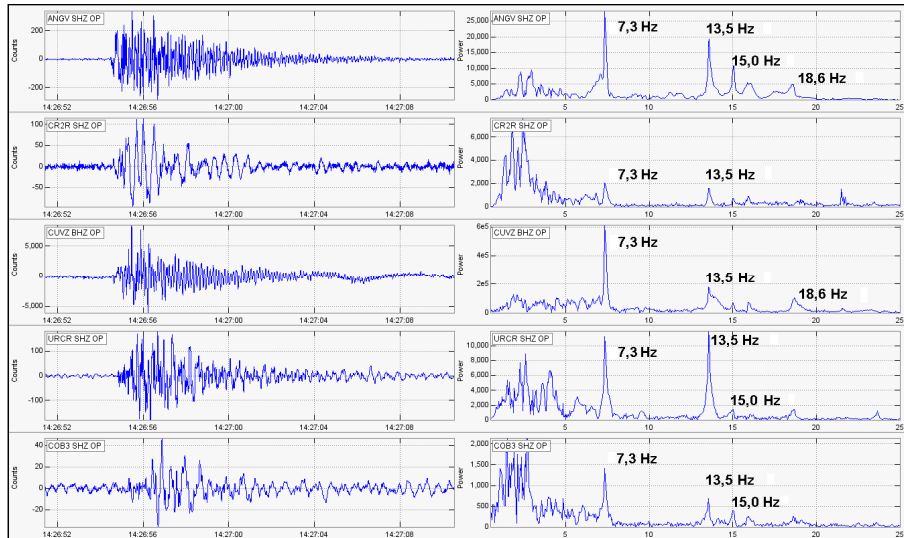


Figura 2.1.60. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP registrado el 23 de junio de 2010, a las 9:26 a.m.

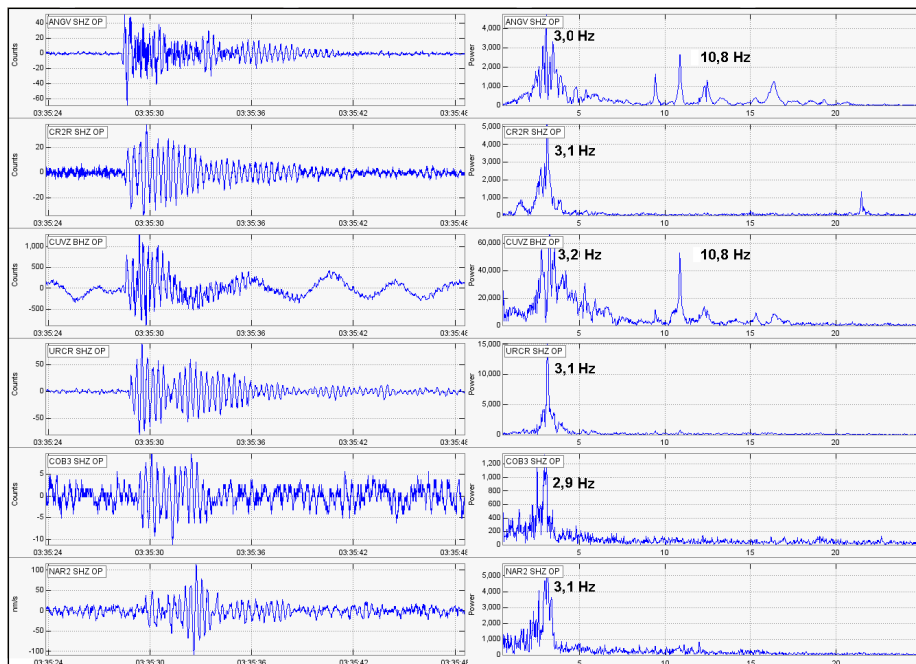


Figura 2.1.61. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP no clasificable registrado el 23 de junio de 2010, a las 10:35 p.m.

Adicionalmente, dentro del proceso registrado durante el mes de junio de 2010, se resalta la ocurrencia de sismos asociados a dinámica de fluidos de fuente persistente (TRE). El primero de ellos se registró el 9 de junio de 2010, a las 9:21 p.m. y se presentó después de diez días de ausencia de este tipo de señal (Figura 2.1.62). En la última semana de junio de 2010 se destaca también el evento tipo TRE registrado el 24 de junio de 2010, a la 1:29 a.m., el cual tuvo una duración aproximada de 13 minutos (Figura 2.1.63). Además, se resaltan los episodios

registrados el 28 de junio de 2010, a las 9:21 p.m. y a las 9:28 p.m. por presentar características monocromáticas con un valor de frecuencia igual a 2,38 Hz en todas las estaciones de la red sísmica de Galeras (Figuras 2.1.64 y 2.1.65).

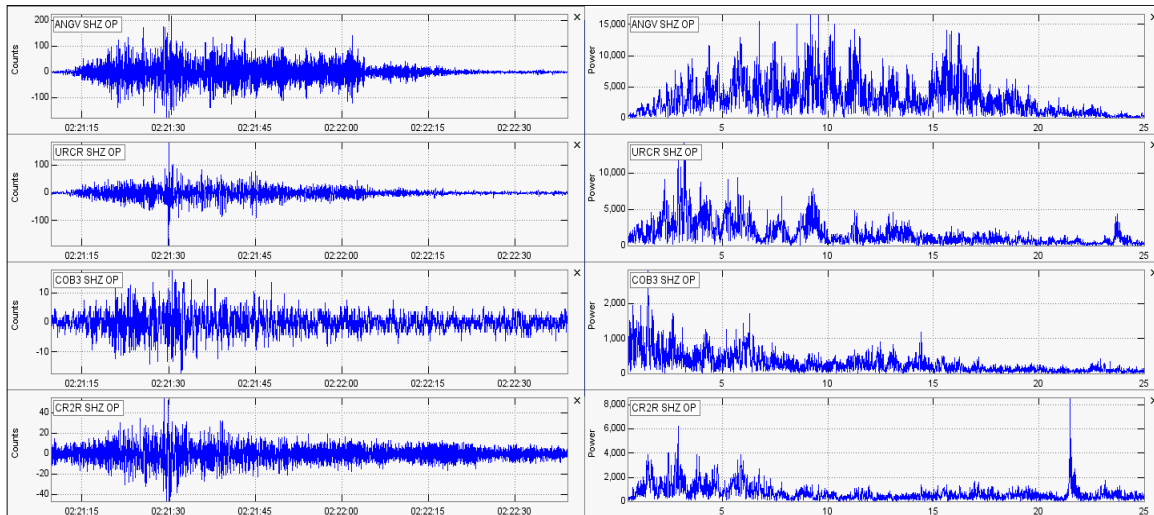


Figura 2.1.62. Sismogramas y espectros en frecuencia del Episodio de tremor espasmódico registrado el 9 de junio a las 9:21 p.m.

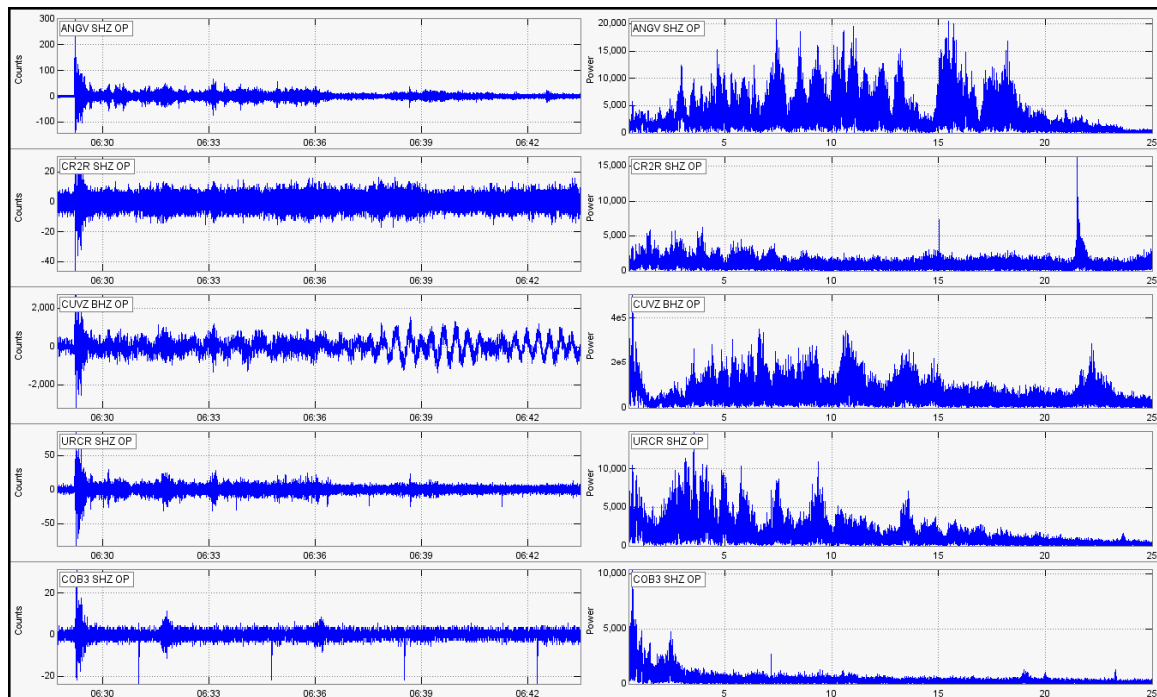


Figura 2.1.63. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 24 de junio de 2010, a la 1:29 a.m.

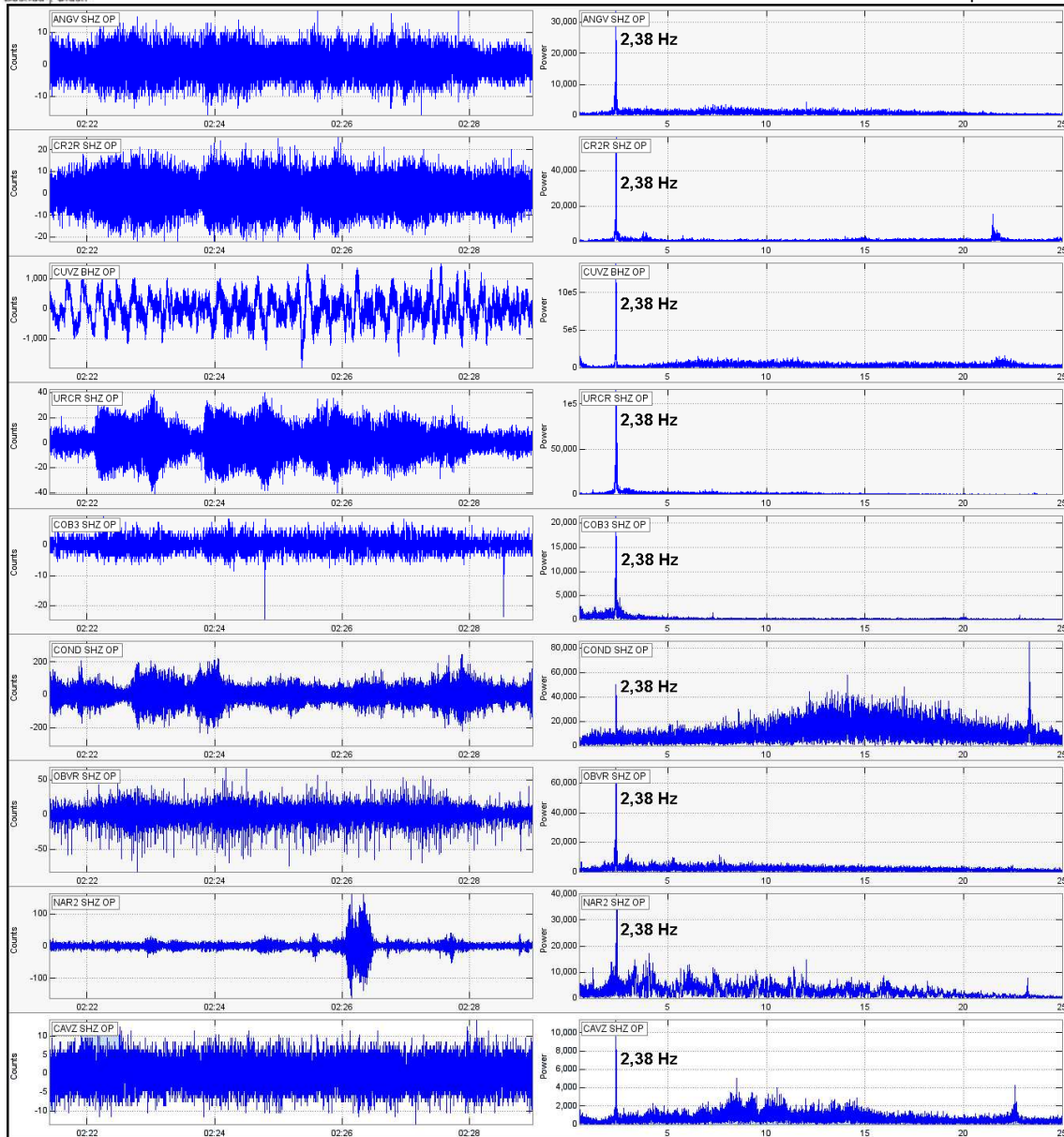


Figura 2.1.64. Sismograma y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 28 de junio de 2010, a las 9:21 p.m.

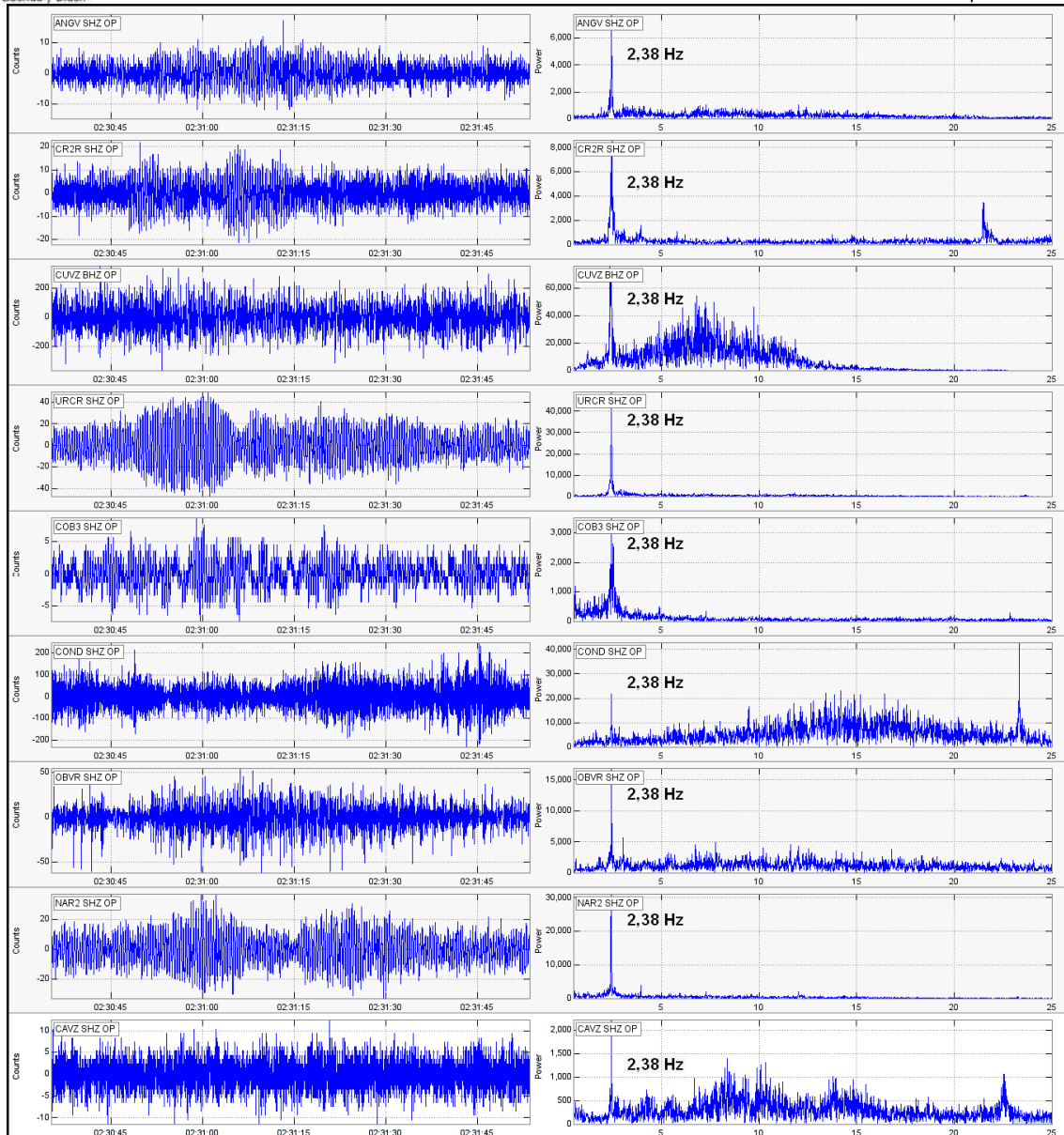


Figura 2.1.65. Sismograma y espectro en frecuencia del evento tipo TRE registrado el 28 de junio de 2010, a las 9:28 p.m.



Libertad y Orden

2.1.3 Deformación

Es de mencionar que el interior de algunos volcanes se encuentra sometido a altas presiones y temperaturas, tales condiciones físicas hacen que en ciertos casos, un volcán experimente deformaciones verticales y horizontales en su parte exterior. Para identificar en qué sector del edificio volcánico de Galeras se están produciendo deformaciones y en qué proporción, en el área de Deformación se adoptaron los métodos de Inclinometría Electrónica y E.D.M., este último a finales del semestre.

2.1.3.1. Inclinometría Electrónica

Durante la mayor parte del Primer Semestre de 2010, se contó con los datos de los inclinómetros electrónicos Cráter, Peladitos, Calabozo, Huairatola y Cobanegra, cuya localización se puede apreciar en la figura 2.1.2. Destacando que el 20 de octubre de 2009, se instaló el inclinómetro Cobanegra, además, el inclinómetro Cráter, salió de funcionamiento el 17 de enero de 2010, por problemas en los sistemas de suministro de energía a la estación (descarga de baterías) y se reincorporó a la red de deformación el 17 de febrero de 2010, gracias al mantenimiento correctivo realizado.

En cuanto a la información suministrada por los inclinómetros electrónicos sobre los procesos deformativos del edificio volcánico se presentan los siguientes aspectos resaltables:

- El inclinómetro Cráter (ubicado a 0.8 km., al este-noreste del cráter principal, 4060 msnm), en la figura 2.1.66, se observa un descenso en el voltaje a partir del 3 de enero y hasta el 17 de enero, día en que la estación sale por problemas de alimentación. Muy seguramente la erupción del 2 de enero causó daños en la estación que afectaron el normal funcionamiento. Desde el 17 de febrero hasta el 15 de marzo, mostró un descenso en su componente Tangencial que alcanzó 58 μ rad y desde el 15 de marzo hasta la fecha de cierre de este informe muestra un comportamiento relativamente estable, ya que su variación es de alrededor de 2.0 μ rad. Su componente Radial presentó un comportamiento levemente estable (Figura 2.1.66), mostró variaciones poco considerables; variaciones que pueden estar relacionadas con el registro del sensor de temperatura del instrumento.
- En cuanto al inclinómetro Peladitos (ubicado a 1.4 km., al sureste del cráter principal, 3850 msnm), se observó que, desde el 10 de octubre de 2009 hasta el 16 de febrero de 2010 mostró la componente Tangencial un comportamiento ascendente muy pronunciado, alcanzando 64 μ rad y desde el 16 de febrero, se observó que aunque continua el comportamiento ascendente, la tendencia es leve, registrando desde el 16 de febrero hasta el 14 de julio de 2010, un ascenso cercano a los 20 μ rad. Su componente Radial presentó un comportamiento levemente estable, registrando pequeñas fluctuaciones las cuales al parecer se encuentran asociadas al registro del sensor de temperatura (Figura 2.1.67).
- El inclinómetro Huairatola (ubicado a 1.7 km., al norte del cráter principal, 3745 msnm), mostró variaciones poco significativas tanto en la componente Radial como Tangencial, por lo que su comportamiento se considera como estable en sus dos componentes. Adicionalmente solo se identificaron pequeñas variaciones asociadas a los ciclos día noche, implicando cambios en la temperatura y el voltaje de alimentación de los instrumentos (Figura 2.1.68)
- El inclinómetro Calabozo (ubicado a 6.8 km., al oeste-suroeste del cráter principal, 2350 msnm), mantiene el comportamiento descendente, aun cuando entre febrero y marzo el descenso tiende a ser menos



pronunciado. Entre el 31 de diciembre de 2009 y hasta el 31 de marzo, este comportamiento registró 128 μrad para la componente Tangencial y 107 μrad para la Radial (Figura 2.1.69).

- El inclinómetro Cobanegra (ubicado a 3.9 km., al sur-sureste del cráter principal, 3610 msnm), muestra un comportamiento estable para sus dos componente Tangencial y Radial con variaciones menores a 2 μrad (Figura 2.1.70).

En general, lo que se observa gracias al registro de la red de inclinómetros, es que desde mediados del mes de febrero a marzo tienden a estabilizar sus comportamientos en sus dos componentes Radial y Tangencial.

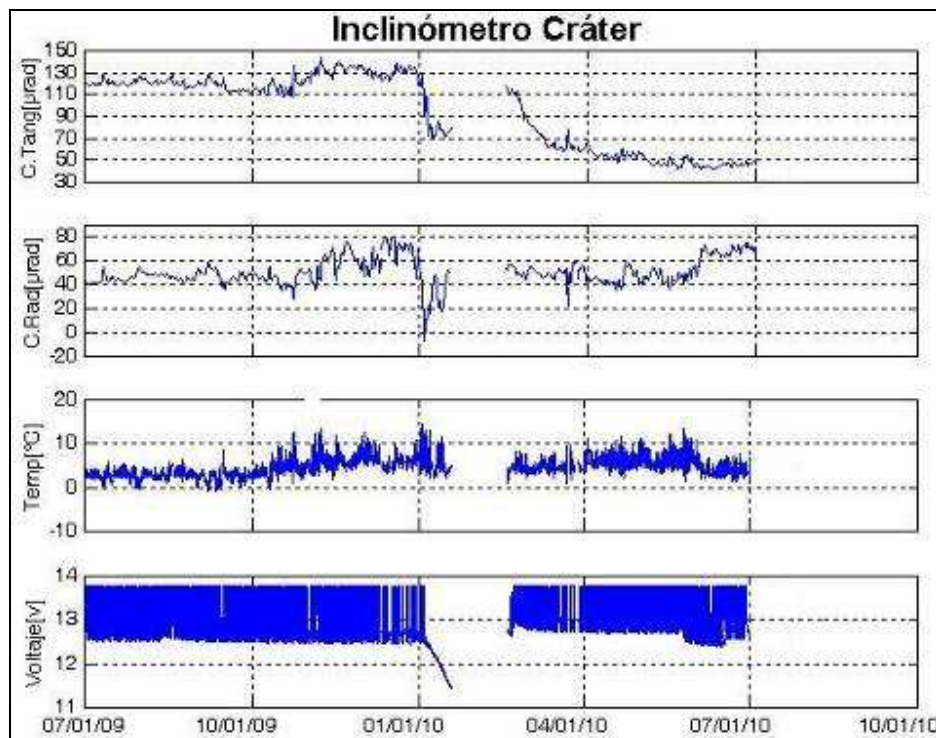


Figura 2.1.66. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Cráter, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.

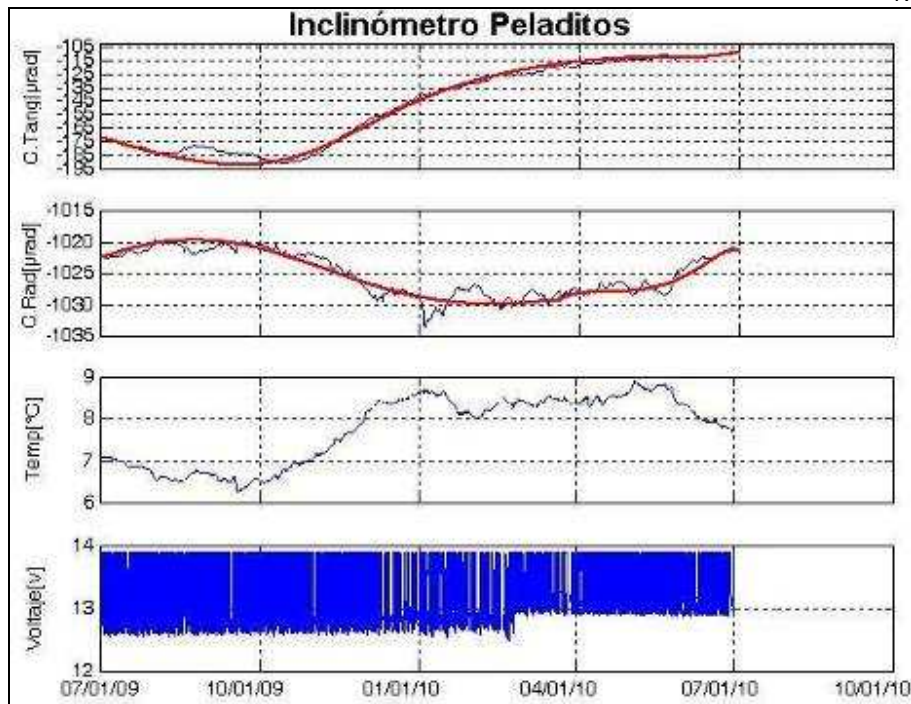


Figura 2.1.67. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Peladitos, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.

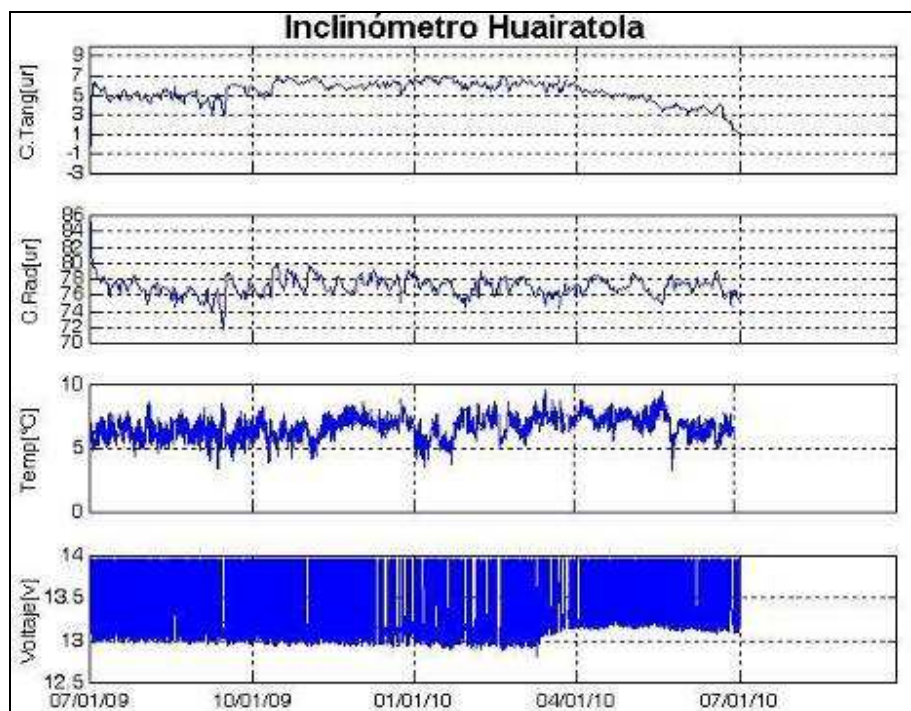


Figura 2.1.68. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Huairatola, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.

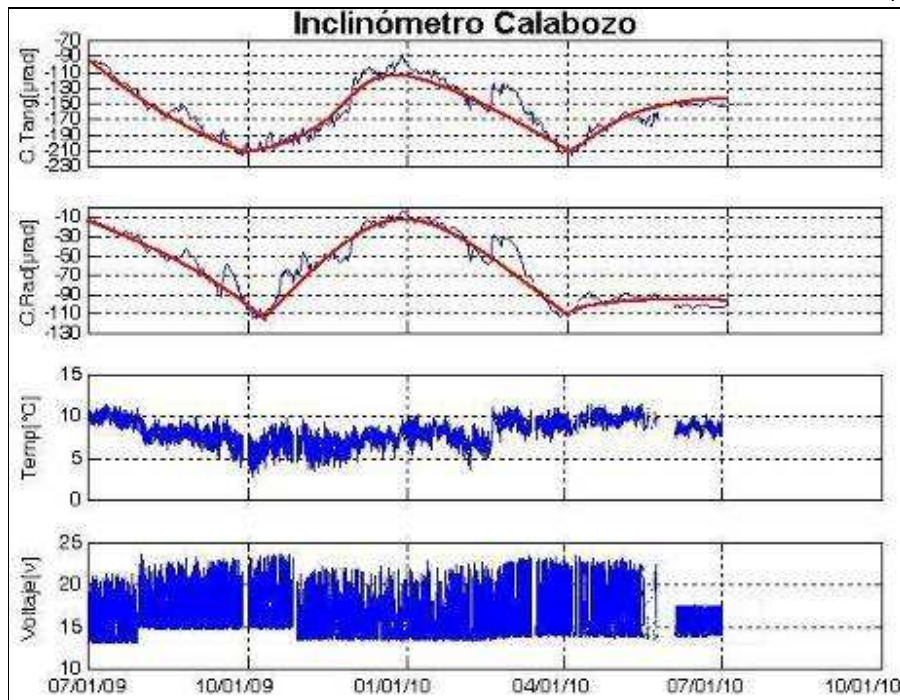


Figura 2.1.69. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Calabozo, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.

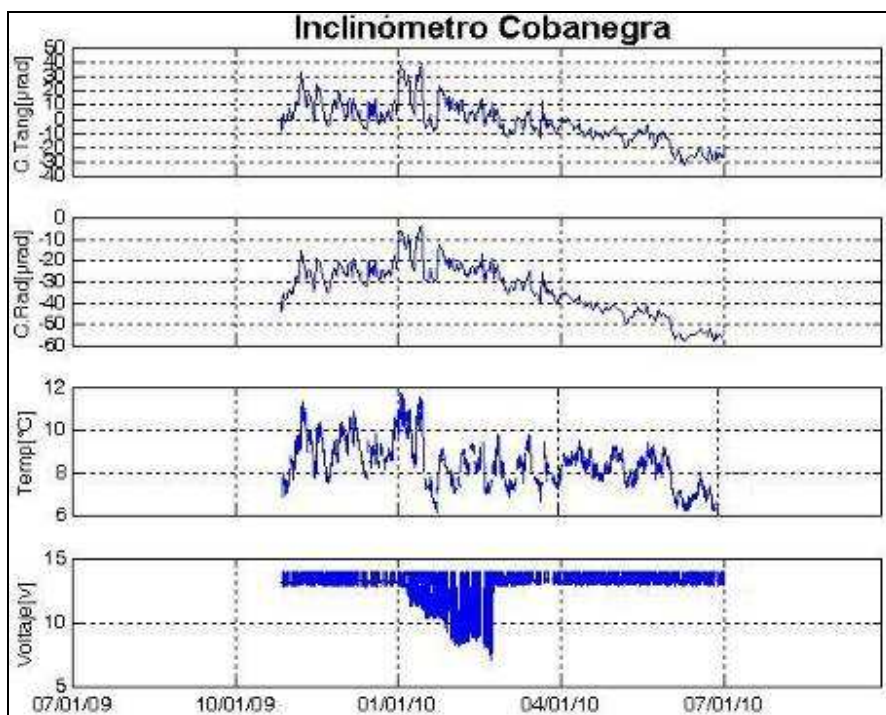


Figura 2.1.70. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Cobanegra, instalado en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 junio de 2010.



2.1.3.2. Medición Electrónica de Distancias E.D.M.

Como apoyo a las labores de monitoreo que adelanta el OVSP y como una herramienta adicional para los procesos de evaluación de la actividad volcánica de Galeras, en los meses de mayo y junio, se realizó la instalación de prismas reflectores sobre la superficie del volcán, buscando siempre un alineamiento de control, esto con el fin de implementar la metodología EDM (Medición Electrónica de Distancias), el procedimiento es medir distancias (distancia geométrica) desde puntos fijos, a los cuales llamaremos Bases, hacia los reflectores instalados en la superficie del volcán, basándose en la medición indirecta del tiempo transcurrido entre la emisión de un rayo luminoso incidente y su recepción en dirección paralela en el mismo punto de partida tras sufrir reflexiones en un prisma reflector situado en la distancia a medir, esto con el fin de registrar y cuantificar las deformaciones en superficie y así determinar la tasa de inflación o deflación del edificio volcánico, análisis orientado a la vigilancia y monitoreo del volcán Galeras.

La primera línea de control y por facilidad de acceso se decidió ubicar en el sector oriental utilizando la vía que conduce hasta la cima del volcán. De esta manera se instalaron 11 prismas (Tabla 2.1.10, Figura 2.1.71), los cuales se podrán medir desde dos bases, la primera ubicada en el sector del complejo deportivo la Pastusidad, al oriente del volcán y la segunda desde el sector de Pinasaco, en la carretera Panamericana, por la salida al norte. Estas dos bases se escogieron teniendo en cuenta que permiten visualizar y medir los puntos establecidos, son de fácil acceso y además se ubican fuera del edificio volcánico, lo cual nos permitirá realizar medidas periódicas incluso cuando la actividad del volcán cambie y nos veamos limitados en ir hasta la parte alta del volcán.

Tabla 2.1.10. Coordenadas WGS84 de los puntos materializados sobre la superficie del volcán Galeras, donde se ubican reflectores EDM.

No.	Latitud °N	Longitud °W	Altitud [msnm]	Observaciones
1	1° 12' 39.8"	77° 18' 11.4"	2760	Se observa desde la Base 1.
2	1° 13' 6.1"	77° 19' 8.0"	2969	Se observa desde la Base 2.
3	1° 13' 31.7"	77° 19' 39.1"	3095	Se observa desde la Base 2.
4	1° 12' 59.2"	77° 19' 45.3"	3244	Se observa desde la Base 1.
5	1° 13' 51.1"	77° 20' 39.1"	3616	Se observa desde la Base 2.
6	1° 13' 16.7"	77° 20' 41.2"	3844	Se observa desde la Base 1.
7	1° 13' 0.8"	77° 20' 15.4"	3480	Se observa desde la Base 1.
8	1° 13' 37.0"	77° 20' 44.3"	3812	Se observa desde la Base 2.
9	1° 12' 51.8"	77° 21' 14.4"	4088	Se observa desde la Base 1.
10	1° 12' 59.3"	77° 21' 14.6"	4182	Se observa desde la Base 1.
11	1° 13' 20.0"	77° 21' 11.3"	4230	Se observa desde la Base 2.
Base 1	1° 11' 45.4"	77° 17' 55.1"	3650	La Pastusidad
Base 2	1° 14' 42.9"	77° 17' 49.7"	3691	Pinasaco

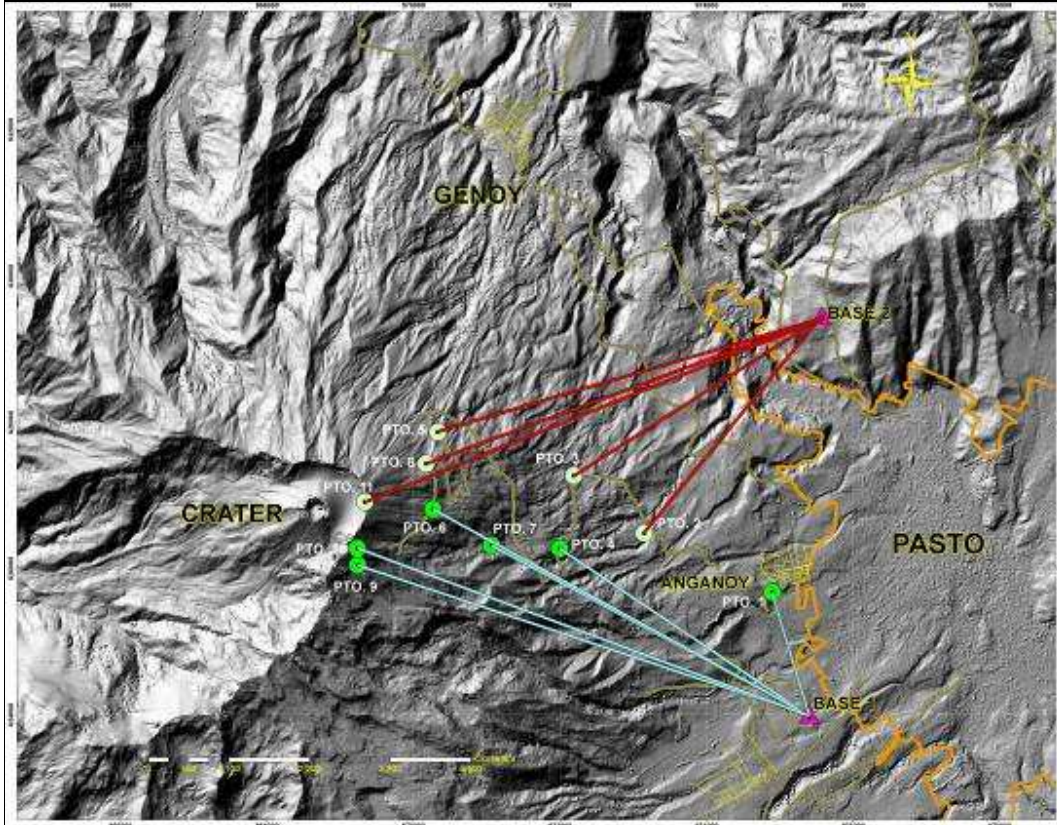


Figura 2.1.71. Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Galeras. Las figuras de color violeta indican la ubicación de las Base 1 y 2, las figuras de color verde (oscuro y claro) indican la ubicación de los prismas.

Se instalaron 11 puntos los cuales forman un alineamiento de control sobre el costado oriental del edificio volcánico de Galeras. Las mediciones se programarán inicialmente cada 15 días hasta tener una línea base, posteriormente y de acuerdo a los cambios que se observen se verá la opción de aumentar o disminuir la frecuencia del muestreo.

2.1.4 Físicoquímica

En cuanto a la emisión de gases de origen volcánico, monitoreados en la zona de influencia del volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010, se efectuaron mediciones de Dióxido de Azufre (SO_2) en el aire, con las estaciones permanentes ScanDOAS y con el movilDOAS. También se realizaron mediciones en suelo del isótopo 222 del elemento radiactivo Radón (Rn_{222}), que es el isótopo más estable de éste gas, con el sistema E-PERM en una red de estaciones localizadas a manera de perfil sobre el recorrido de la carretera de ascenso a la cima volcánica.

El estudio químico permite identificar y medir indicadores de la actividad volcánica, así mismo conocer las variaciones en las condiciones termodinámicas de los gases y como base para la formulación de modelos geoquímicas relacionados con los sistemas volcánicos, reuniendo los métodos clásicos de análisis para gas carbónico (CO_2), cloruro de hidrógeno (HCl), azufre total y aproximaciones para evaluar el contenido de anhídrido



sulfuroso (SO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua. Así como análisis de sulfuros, cloruros y carbonatos en muestras de aguas termales.

2.1.4.1 Mediciones de Dióxido de Azufre SO₂

Se tomó datos de flujo de Dióxido de Azufre (SO₂) emitido por Galeras a la atmósfera, utilizando las estaciones telemétricas permanentes tipo scanDOAS (Differential Optical Absorption Spectrometer) y el instrumento moviDOAS del Proyecto NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change; <http://www.novac-project.eu>) de la Unión Europea del cual INGEOMINAS es partícipe. Las estaciones se localizan en el cuadrante noroccidental de Galeras (Figura 2.1.1), debido a que el viento se dirige hacia ese sector durante la mayor parte del año. Mientras la estación climática está por fuera de operación, los datos de velocidad y dirección del viento, necesarios para los cálculos, fueron obtenidos de los reportes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). El MoviDOAS se usa para hacer medidas móviles, principalmente en la carretera Circunvalar a Galeras.

En general, los valores calculados de las emisiones detectadas, son considerados como bajos para Galeras (Tabla 2.1.11, Figura 2.1.72), destacando el registro del 8 de junio, el cual es considerado como alto.

Tabla 2.1.11. Emisiones de SO₂ del volcán Galeras (cuantificadas en términos de flujo de emisión) registradas en el Primer Semestre de 2010, por las estaciones ScanDOAS y el instrumento MoviDOAS (Proyecto NOVAC).

FECHA	HORA LOCAL	DIRECCIÓN AZIMUT	VELOCIDAD [m/s]	Máximo flujo SO ₂ diario	Estación de registro	INSTRUMENTO
08-Jan-10	02:37 PM	313	2.6	78	Santa Barbara	SCANDOAS
19-Jan-10	08:29 AM	307	7.7	873	Alto Tinajillas	SCANDOAS
19-Jan-10	10:54 AM	188	11.7	184	Pasto - Yacuanquer	MOVILDOAS
22-Jan-10	12:49 PM	309	6.2	23	S. Bárbara - El Ingenio	MOVILDOAS
24-Jan-10	01:37 PM	321	2.6	78	Santa Barbara	SCANDOAS
25-Jan-10	09:13 AM	311	2.6	55	Santa Barbara	SCANDOAS
07-Feb-10	12:18 PM	298	2.2	141	Alto Jimenez	SCANDOAS
08-Feb-10	11:04 AM	255	2.6	167	Yacuanquer - Consacá	MOVILDOAS
09-Feb-10	11:22 AM	237	2.6	350	Consacá - Yacuanquer	MOVILDOAS
10-Feb-10	11:05 AM	290	4.7	253	S. Bárbara - Consacá	MOVILDOAS
12-Feb-10	12:42 PM	231	2.6	116	Consacá - Yacuanquer	MOVILDOAS
14-Feb-10	10:23 AM	225	2.6	88	Santa Barbara	SCANDOAS
16-Feb-10	11:03 AM	357	4.1	303	Genoy - La Florida	MOVILDOAS
01-Mar-10	12:00 PM	317	4.5	137	Nariño-El Ingenio	MOVILDOAS
04-Mar-10	11:00 AM	305	4.7	102	El ingenio - Sandoná	MOVILDOAS
08-Mar-10	12:19 PM	326	3.7	60	La Florida - Nariño	MOVILDOAS
11-Mar-10	10:38 AM	15	4	208	Pasto - Nariño	MOVILDOAS
16-Mar-10	10:33 AM	50	3.9	165	Pasto - Nariño	MOVILDOAS
18-Mar-10	10:30 AM	336	5.1	115	S. Bárbara - Nariño	MOVILDOAS
23-Mar-10	08:35 AM	286	7.7	298	Alto Jimenez	SCANDOAS
05-Apr-10	12:00 PM	316	2.6	15	Sta. Bárbara - Sandoná	MOVILDOAS
12-Apr-10	11:16 AM	307	2.6	18	La Florida - Sta Barbara	MOVILDOAS
28-Apr-10	12:00 PM	1	7.7	215	Briceño-La Florida	MoviDOAS
28-Apr-10	02:30 PM	240	7.7	130	consacá- Arguello	MoviDOAS
01-Jun-10	09:54 AM	355	2.6	107	Santa Barbara	SCANDOAS
01-Jun-10	11:11 AM	299	9.3	426	Consacá - Sandoná	MOVILDOAS
08-Jun-10	12:00 PM	270	10.3	2020	Sandoná - Consacá	MOVILDOAS
15-Jun-10	01:31 PM	261	7.7	24	Rumipa - Consacá	MOVILDOAS
21-Jun-10	09:04 AM	302	2.6	72	Santa Barbara	SCANDOAS
21-Jun-10	01:30 PM	244	2.6	13	Consacá - Sandoná	MOVILDOAS

* Flujo de emisión de SO₂ [Toneladas/día]. *Bajo*: < 500; *moderado*: > 500 y < 1000; *alto*: > 1000 y < 3000; *muy alto*: > 3000.

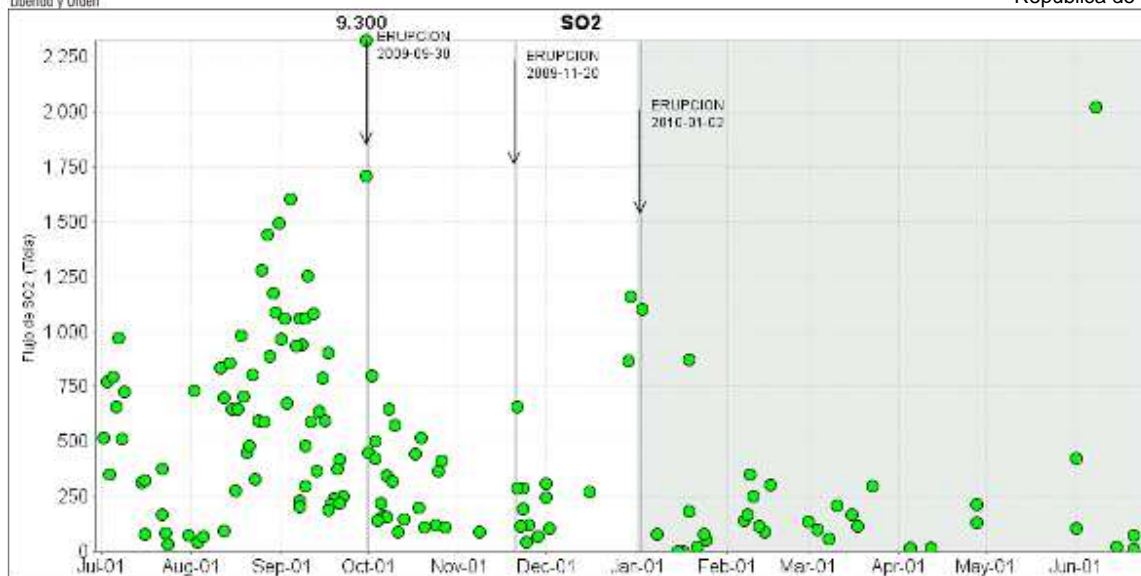


Figura 2.1.72. Flujo de emisión de SO₂ registrado entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010, por los instrumentos ScanDOAS y MovilDOAS en Galeras. Se resalta en gris el periodo evaluado.

En la gráfica es posible observar que días antes de la ocurrencia del episodio eruptivo del 2 de enero, en cuanto al monitoreo del flujo de SO₂, procesos de descenso en los valores de flujo. Adicionalmente en el transcurso del periodo evaluado, se presentó ausencia del mismo por varios días (Figura 2.1.72) y también se observó un elevado valor de flujo después de varios días sin registro.

Además se utilizó la información de las imágenes satelitales capturadas por el sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument), acoplado al satélite Aura, que es el tercer satélite del Sistema de Observación Terrestre (Earth Observing System) de la NASA, el cual monitorea la presencia de algunos gases en la atmósfera, entre ellos el SO₂; no se tiene registro de concentraciones de SO₂ emitido por Galeras para el periodo evaluado.

2.1.4.2 Muestreo de aguas termales del Volcán Galeras

2.1.4.2.1 Ubicación de las fuentes termales

Se da inicio al muestreo de las fuentes termales del volcán Galeras: CEHANI, Río Pasto, Aguas Agrias, Licamancha y Fuente Blanca; siguiendo los lineamientos que se tienen para la vigilancia volcánica en Colombia.

Los sitios seleccionados se encuentran dentro del área de influencia del fenómeno volcánico, lo cual implica un conocimiento de la zona y de las fuentes presentes en ella. La elección de una fuente para ser muestreada y monitoreada fue tomada por el programa tras la evaluación de su representatividad y localización. Se establecieron las coordenadas geográficas y la altitud de los puntos de muestreo mediante GPS. A continuación se describe la ubicación de las fuentes termales.



2.1.4.2.1.1 Fuente Termal: CEHANI

Este pozo se encuentra ubicado en la sede del Centro de Rehabilitación del Niño – CEHANI (Figura 2.1.73), ubicado en la Calle 18 N° 45 - 49 del barrio Pandiaco del municipio de San Juan de Pasto. Como característica es Lejana influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 1° 13' 46.3" Latitud Norte y 77° 17' 28.6" Longitud Occidental y se encuentra a 2502 msnm.



Figura 2.1.73. Imagen de la fuente termal: CEHANI, del volcán Galeras.

2.1.4.2.1.2 Fuente Termal: Río Pasto

Vía de acceso: Desde el casco urbano de la ciudad de San Juan de Pasto, se sigue la vía hacia Genoy. En el primer cruce se sigue la vía hacia Briceño, recorriendo 2,0 km., hasta el siguiente cruce. En este cruce se debe seguir por el lado izquierdo, pasando luego por la cantera de don Samuel Pabón hasta donde llega el carro, frente a la planta eléctrica de Cedenar. Luego se debe descender 0,1 km, hasta el río Pasto, donde se halla la fuente termal. Esta fuente termal (Figura 2.1.74) tiene como característica un alta influencia magmática y se observó un burbujeo desde la base de la fuente. Geográficamente se sitúa entre 1° 16' 12.6" Latitud Norte y 77° 18' 54.3" Longitud Occidental y se encuentra a 2146 msnm.



Figura 2.1.74. Imagen de la fuente termal: Río Pasto, del volcán Galeras.

2.1.4.2.1.3 Fuente Termal: Aguas Agrias

Vía de acceso: Viajando por la vía Pasto - Genoy, se debe desviar a la izquierda en el crucero ubicado a la entrada de Genoy. Después del crucero se debe recorrer 2,0 km., hasta la curva por donde pasa la quebrada Aguas Agrias. Luego, siguiendo el cauce de la quebrada Aguas Agrias se debe ascender 0,5 km, hasta el manantial de la fuente termal. Esta fuente termal (Figura 2.1.75) tiene como característica un alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 1° 15' 6.2" Latitud Norte y 77° 19' 48.4" Longitud Occidental y se encuentra a 2227 msnm.



Figura 2.1.75. Imágenes de la fuente termal: Aguas Agrias, del volcán Galeras.

2.1.4.2.1.4 Fuente Termal: Fuente Blanca

Vía de acceso: Desde el municipio de Consacá (Nariño) se sigue la vía hasta la Hacienda Churupamba. De allí se sigue por un sendero pasando por El Calabozo y caminando 2 horas hasta llegar sobre el río Azufral. Esta fuente termal (Figura 2.1.76) tiene como característica un alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 1° 12' 33.6" Latitud Norte y 77° 26' 4.8" Longitud Occidental y se encuentra a 2432 msnm.



Figura 2.1.76. Imagen de la fuente termal: Fuente Blanca, del volcán Galeras.



Libertad y Orden

2.1.4.2.1.5 Fuente Termal: Licamancha

Desde el municipio de Consacá (Nariño) se sigue la vía hasta la Hacienda Churupamba. De allí se sigue por un sendero pasando por El Calabozo y caminando dos horas hasta llegar al frente de la cuchilla Ciénaga Grande, donde se halla la fuente (Figura 2.1.77). Geográficamente se sitúa entre 1° 12' 50" Latitud Norte y 77° 23' 20" Longitud Occidental y se encuentra a 2702 msnm.



Figura 2.1.77. Imagen de la fuente termal: Licamancha, del volcán Galeras.

2.1.4.2.2 Toma de la muestra

Haciendo uso de los vasos de precipitado plásticos de 200 ml y teniendo en cuenta las precauciones de seguridad, se realizó la toma de cuatro muestras en cada fuente termal para aniones, cationes, Redox y CO₂.

Utilizando el equipo de filtración, se filtro el agua para llenar el recipiente de aniones, cationes y CO₂ respectivamente (Figura 2.1.78).

Para la toma de la muestra para cationes, si el pH de la fuente presenta un pH mayor a 3 se debe acidular con HNO₃ (ácido Nítrico) 1:1, hasta alcanzar un pH de 2, esto se realiza con el fin de mantener los iones estables, hasta la realización de sus respectivos análisis en el laboratorio de la ciudad de Bogotá.



Figura 2.1.78. Imágenes en las cuales se observa el muestreo en las aguas termales del Volcán Galeras.

2.1.4.2.3 Medición de Parámetros Físicoquímicos

Se realizó la medición de parámetros físicoquímicos como temperatura y pH. Si la temperatura es menor a 30°C, se hace la medición de conductividad. En la tabla 2.1.12 se indican los parámetros medidos in situ en el mes de abril de 2010 y mediciones de los mismos parámetros medidos en años anteriores.

Tabla 2.1.12. Parámetros físicoquímicos de las fuentes termales del Volcán Galeras.

FUENTE TERMAL	pH				TEMPERATURA (°C)				CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (μS/cm)			
	1995	1996	1997	2010	1995	1996	1997	2010	1995	1996	1997	2010
CEHANI	-	-	6.6	7.3	-	-	34	31.3	-	-	-	-
Río Pasto	-	-	6.0	6.3	-	-	45	43.5	-	-	2.74	-
Aguas Agrias	-	1.2	1.6	2.6	-	30	30	28.5	-	-	-	1920
Fuente Blanca	6.5	-	6.5	6.2	22	-	22	22.9	-	-	2.35	16.68
Licamancha	5.3	-	5.3	8.1	22	-	22	13.8	-	-	2.15	456

Según los resultados reportados en el mes de abril de 2010, se puede observar que los valores correspondientes al potencial de hidrogeno (pH), no han tenido una variación significativa en comparación a las mediciones realizadas en años anteriores. Los valores de pH para las fuentes termales Río Pasto y Fuente Blanca son ligeramente ácidos, por el contrario para la fuente termal Aguas Agrias, su pH es ácido con un valor de 2.6, lo que quiere decir que esta fuente termal es una zona de alta producción protónica, típica de un ambiente de alta influencia magmática y/o hidrotermal. Y para la fuente termal CEHANI su pH es de 7.3 lo que indica que son aguas de carácter de neutralidad. Para la fuente termal Licamancha, los valores de los parámetros físicoquímicos no se pueden comparar con las mediciones realizadas en años anteriores, ya que el muestreo de mayo no se realizó en el mismo punto.

En la tabla 2.1.12, también se muestran los datos de las temperaturas medidas desde 1995, para las fuentes termales del volcán Galeras. De acuerdo con estos valores, se puede considerar que la temperatura ha sido estable, y solo presentan variaciones de ± 2.7 .

Con respecto a los valores de conductividad eléctrica se puede apreciar que hay algunos cambios representativos para las fuentes termales Fuente Blanca y Licamancha, lo que indica que hay variaciones en cuanto a la presencia de iones. Para las fuentes termales CEHANI y Río Pasto no se tomaron valores de conductividad debido a que sus temperaturas superan los 30°C.

2.1.4.2.4 Análisis de Bicarbonatos, Cloruros y Sulfuros en las Fuentes Termales

Se realizó el análisis de bicarbonatos, cloruros y sulfatos a las fuentes termales del volcán Galeras, para determinar su relación con la actividad volcánica y determinar su clasificación con otros iones. Estos análisis se realizan mediante métodos volumétricos en los cuales se hace reaccionar cuantitativamente una solución de una sustancia cuya concentración se busca, con un reactivo en solución cuya concentración y forma de reaccionar se conocen.

Los análisis de bicarbonatos se determinaron por titulación de la muestra con una solución valorada de un ácido fuerte como el HCl, mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, indicados por medio del cambio de color de azul a verde, utilizando dos indicadores ácido-base, como fenolftaleína y azul de bromo fenol. Este análisis se realizó en campo, ya que los resultados de estas muestras almacenadas no son representativos (Figura 2.1.79). Los análisis correspondientes a Cloruros y Sulfatos se realizaron en el laboratorio del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. Los resultados de estos análisis se expresan en la tabla 2.1.13.



Figura 2.1.79. Fotografía del análisis de carbonatos y bicarbonatos de las fuentes termales del Volcán Galeras.

Tabla 2.1.13. Concentraciones de los aniones presentes en las fuentes termales del Volcán Galeras.

FUENTE TERMAL	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁼ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
CEHANI	55.30	100.5	2031.3
Río Pasto	337.90	624.58	945.5
Aguas Agrias	388.53	2614.58	1677.5
Fuente Blanca	138.26	1460.42	36.6
Licamancha	17.02	2162.50	183

Giggenbach (1981,1984)¹ estudió la “madurez” de muchas aguas geotermales en el mundo por medio de gráficas de concentraciones de diferentes cationes y aniones en diagramas de actividad. El asume idealidad en las

¹ LOPEZ, D. Hidrogeoquímica de sistemas hidrotermales. Curso impartido en el Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica. Abril de 1994. pp 41-43.

soluciones, o sea actividad igual a concentración para los diferentes iones, porque, los diagramas son generalmente logarítmicos y también porque, en la mayoría de los casos usa razones de concentración entre diferentes iones. Como ya se mencionó, el uso de diagramas logarítmicos hace imperceptible la diferencia entre actividad y concentración si la solución no es muy concentrada.

Los diagramas desarrollados por Giggenbach presentan las reacciones químicas que pueden explicar la asociación mineral comúnmente encontrada en sistemas hidrotermales volcánicos.

Para realizar el análisis de las muestras tomadas en el Volcán Galeras. Se utilizó el diagrama triangular Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} , presentado en la figura 2.1.80. Las aguas se clasifican de acuerdo al anión dominante como aguas sulfatadas, bicarbonatadas o cloruradas.

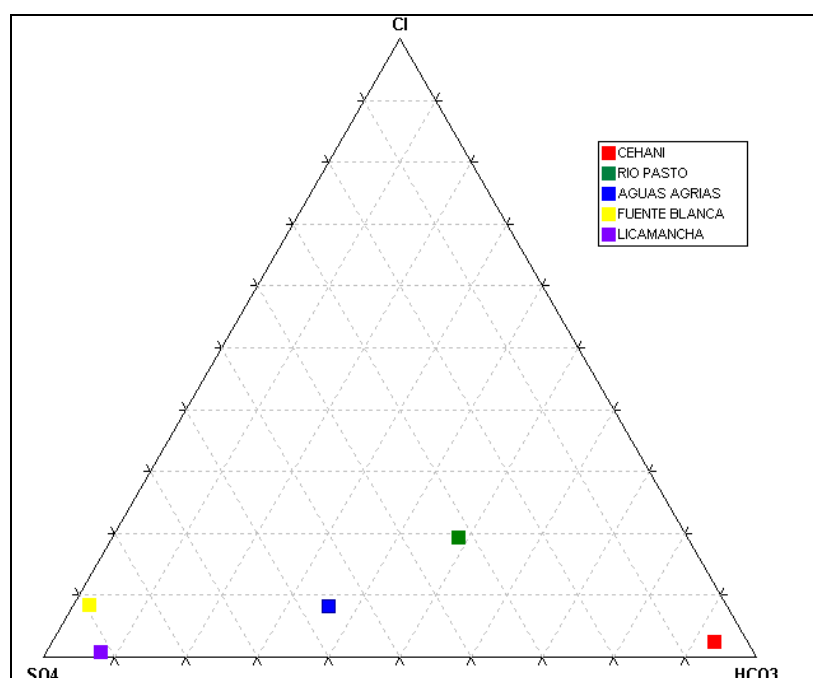


Figura 2.1.80. Diagrama triangular Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} para las fuentes termales del Volcán Galeras.

De acuerdo con los resultados de los análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos se puede determinar la clasificación de las fuentes termales según el ion dominante (Tabla 2.1.14). Las fuentes termales Fuente Blanca y Licamancha poseen altas concentraciones de sulfatos, que, de cloruros y bicarbonatos, esto podría asociarse a la condensación de gases volcánicos cerca de la superficie con aguas meteóricas.

Tabla 2.1.14. Clasificación de las fuentes termales del Volcán Galeras.

FUENTE TERMAL	CLASIFICACIÓN
CEHANI	Aguas Bicarbonatadas
Riío Pasto	Aguas Bicarbonato – sulfatadas
Aguas Agrias	Aguas Sulfato - bicarbonatadas
Fuente Blanca	Aguas Sulfatadas
Licamancha	Aguas Sulfatadas



2.1.4.2.5. Análisis de Cationes en las Fuentes Termales del Volcán Galeras.

Se realizó el análisis para cationes como: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), litio (Li), estroncio (Sr), hierro (Fe), Manganeseo (Mn), aluminio (Al) y silicio (Si). En la tabla 2.1.15, se expresan las concentraciones en mg/L de los diferentes cationes.

Tabla 2.1.15. Concentraciones de cationes en aguas termales del Volcán Galeras.

MUESTRA	Ca	Mg	Na	K	Li	Sr	Fe	Mn	Zn	Al	Si
CEHANI	149.0	159.7	244.1	36.46	0.1	0.78	1.57	0.72	<0,1	<1	73.84
Río Pasto	68.64	145	426.9	75.85	0.14	0.8	2.59	0.21	<0,1	<1	79.32
Aguas Agrias	104.4	101.5	198.1	30.15	<0,1	0.68	11.64	6.26	0.27	202.4	47.35
Fuente Blanca	346.8	124.1	130.5	8.3	<0,1	0.96	<0,2	4.46	<0,1	<1	34.08
Licamancha	50.04	12.6	28.55	<0,1	1.16	0.78	<0,2	<0,1	<0,1	<1	6.34

En la tabla 2.1.16, se puede apreciar que las concentraciones de estroncio y zinc no son significativas, así como manganeso y aluminio lo que indica que no hay interacción de las aguas con rocas por ataque ácido.

Por el contrario, las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio y silicio son considerables, en comparación, con la de los otros iones, que podría ser, por el contenido de cloruros que circulan a profundidad y salen a la superficie con temperaturas altas.

Para el análisis de cationes, se utilizan un geoindicador Na-K-Mg, basado en los geotermómetros de Na/K y K/Mg, que permiten identificar el grado de equilibrio, en la interacción fluido roca. Las aguas de reservorio en equilibrio, registran temperaturas similares para los dos geotermómetros mientras que aquellas sometidas a mezclas con aguas no equilibradas indican temperaturas K/Mg menores, a las señaladas para Na/K, que son menos afectadas por dichas mezclas. Este geoindicador permite además, delinear tendencias de mezclas que se identifican por líneas rectas cuyo miembro extremo de mayor temperatura puede ser postulado por extrapolación de la recta sobre la línea de equilibrio que indica la temperatura Na/K. (Giggenbach, W., 1988).

Como se infiere de la figura 2.1.81, elaborada con base en la composición relativa de los iones Na, K y Mg, las fuentes termales del sistema hidrotermal del Volcán Galeras están claramente afectados por mezclas con aguas no equilibradas o aguas inmaduras.

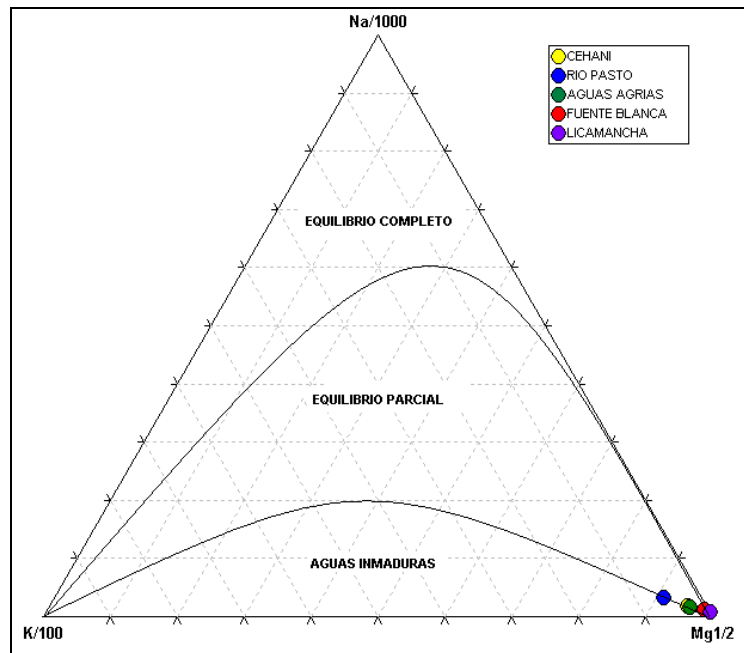


Figura 2.1.81. Diagrama triangular $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Mg}^+$, para las fuentes termales del Volcán Galeras.

2.1.4.3 Gas Radón en el suelo

Un gran número de investigaciones han demostrado la relación entre los cambios de las tensiones neodinámicas en el interior de la tierra y las variaciones de la concentración de radón del suelo y de las aguas subterráneas. De acuerdo con esto, el radón y otros gases como el He, Ar y CO_2 son perspectivas precursores en la búsqueda de métodos para el pronóstico de sismos y erupciones volcánicas.

Una característica de los sismos Volcano-tectónicos, es que son el producto de la acumulación de esfuerzos en la zona focal. Bajo estas condiciones los retículos cristalinos de los minerales, comienzan a ser destruidos o fracturados, favoreciendo un intenso escape del radón desde los poros de las rocas.

Se puede considerar que el aumento de las emisiones del radón, meses o días, antes de que un sismo sea registrado instrumentalmente, está relacionado con su desorción, causado por las frecuencias ultrasónicas que ocurren antes de un fracturamiento a profundidad. Una vez ocurre la desorción del radón desde la superficie de los minerales, ese isótopo puede transportarse rápidamente a superficie, gracias a su alto coeficiente de difusión.

INGEOMINAS en su misión de comprender y modelar los procesos que ocurren en el subsuelo colombiano, utiliza diversas herramientas científicas. Una de ellas consiste en medir las emisiones de gas radón del suelo y buscar correlaciones de su comportamiento con los diversos eventos geodinámicos que se investigan y se monitorean en los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos. Por esta razón se realizó la instalación de diferentes estaciones de Gas Radón en el volcán Galeras, con el fin de contribuir con la vigilancia volcánica de dicho volcán.

2.1.4.3.1 Instalación de estaciones de gas Radón en la Línea Galeras

En el transcurso del Primer Semestre de 2010, se realizó la instalación de 10 estaciones de Gas Radón (Tabla 2.1.16, Figura 2.1.82) en la línea Galeras - Pasto. En primer instancia se realizó la búsqueda de sitio para la

instalación del sistema de Radón, el cual debe estar ubicado dentro del edificio volcánico de Galeras. Para definir el sitio adecuado se tuvo en cuenta que la estación de medición debe estar ubicada en un sitio cercano al foco volcánico, preferiblemente en una zona cerca, igualmente a una falla geológica que cruce por el volcán para lograr detectar las mayores emisiones de gas Radón en suelo. Preferiblemente, el sitio debe contener capa orgánica, que pueda ser atravesada por el tubo PVC.

Tabla 2.1.16. Características de las estaciones instaladas para el monitoreo de gas Radón en el volcán Galeras, durante el Primer Semestre de 2010.

Estación	Coordenadas WGS84			Distancia al cono activo (km)	Ubicación respecto al cráter
	Latitud N	Longitud W	Altitud msnm		
Caldera	1°13.02'	77°21.30'	4238	1.1	SE
Telecom	1°12.62'	77°21.44'	4051	1.6	SSE
Peladitos	1°12.83'	77°20.92'	3927	1.9	SE
Cuñño	1°13.61'	77°20.74'	3809	1.9	ENE
Frailejón	1°13.33'	77°20.48'	3730	2.3	ESE
Piedras	1°13.98'	77°20.78'	3590	2.0	ENE
Mirador	1°13.66'	77°20.31'	3510	2.7	ENE
Parques	1°12.78'	77°19.88'	3358	3.6	ESE
Lava2	1°13.26'	77°19.58'	3166	4.0	ESE
Lava1	1°13.31'	77°19.31'	3000	4.5	ESE

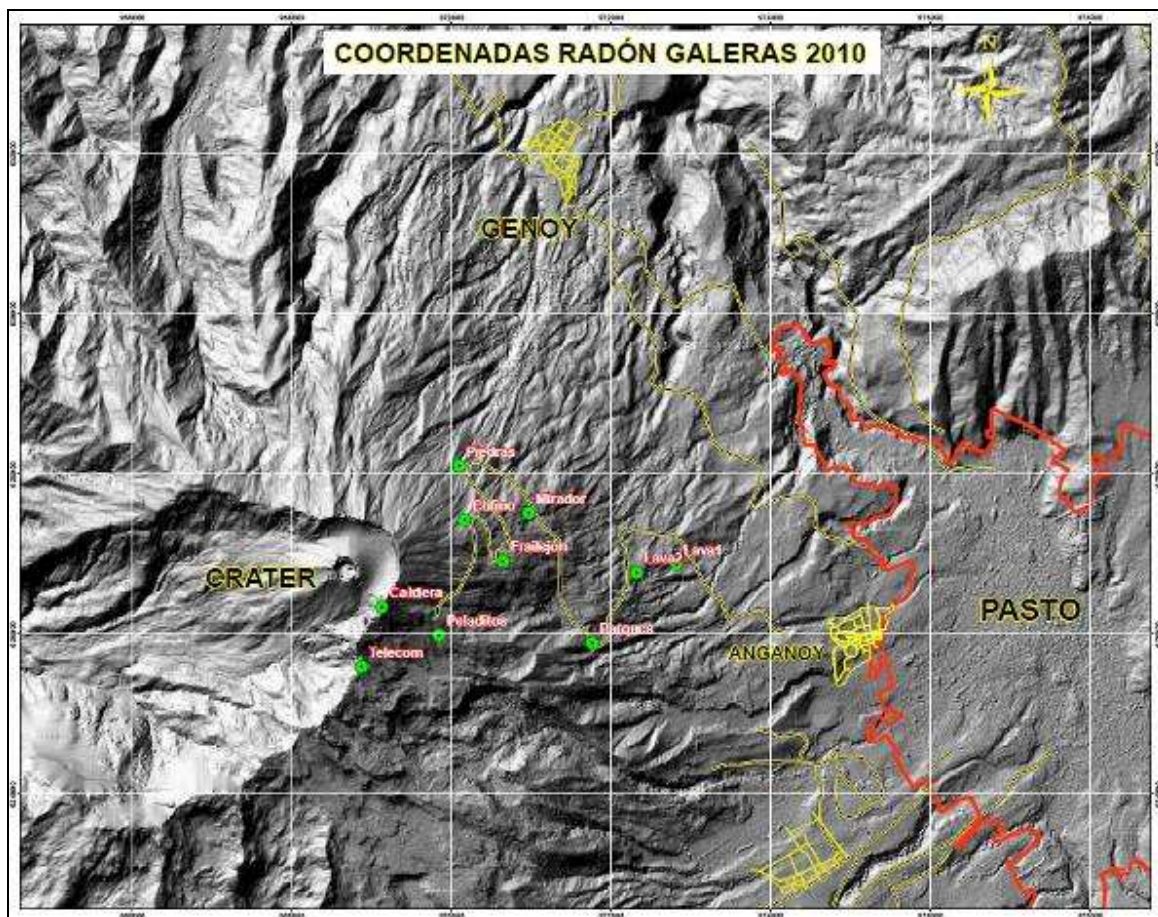


Figura 2.1.82. Mapa de localización de las estaciones no telemétricas para el monitoreo de gas Radón en el volcán Galeras, que funcionaron durante el Primer Semestre de 2010.

Además, se tomó muestra del suelo en donde estaba ubicada cada una de las estaciones para realizar análisis mineralógicos por DRX (Difracción de Rayos X) en los laboratorios de la regional Cali.

2.1.4.3.2 Mediciones de gas Radón en el suelo

Con la instalación de las 10 estaciones de Gas Radón se realizó el monitoreo periódicamente, entre 8 a 10 días máximo; el cambio de electrets y toma de muestra del gas CO₂ en el suelo. Para realizar los respectivos análisis orientados a la vigilancia y monitoreo del volcán Galeras.

Se realizó la medición de radón en suelo en las estaciones Caldera, Telecom, Peladitos, Cufiño, Frailejón, Piedras, Mirador, Parques, Lava 2 y Lava 1, cada 10 días. Se realizan los cálculos de la concentración de radón teniendo en cuenta las características de instalación y mediciones como, el tipo de cámara, tipo L, configuración LLT y radiación gamma de 0.12 pCi/L. En la gráfica (Figura 2.1.83) se indica las variaciones de concentración que han mostrado las diferentes estaciones desde su instalación.

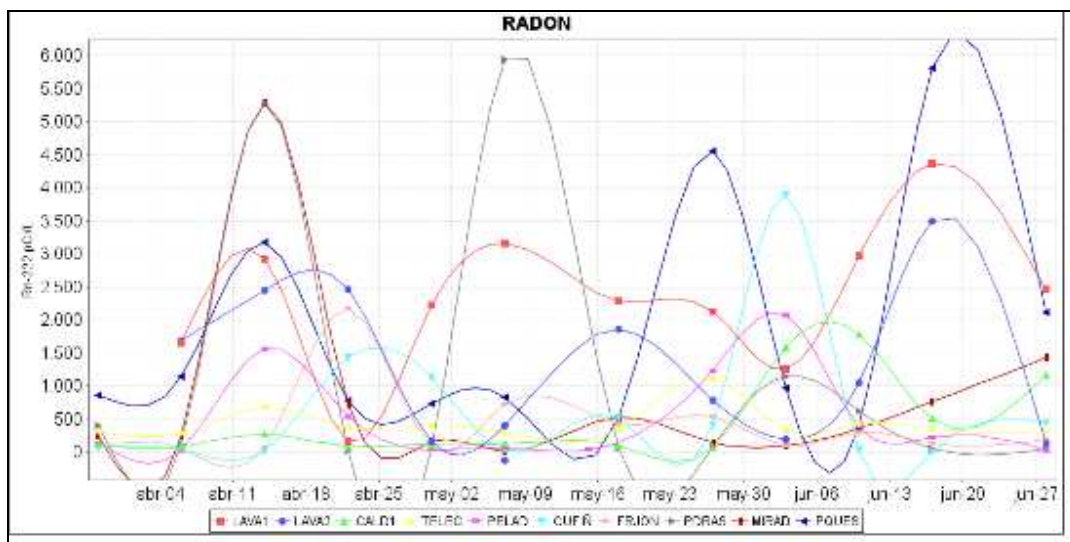


Figura 2.1.83. Emisiones de gas Radón (Rn₂₂₂) en las estaciones de la línea Galeras, entre marzo y junio de 2010.

Según la gráfica se puede observar que la concentración del isótopo radioactivo Rn-222 en la zona de influencia del Volcán Galeras a tenido algunas variaciones en el transcurso de monitoreo desde el mes de marzo hasta la fecha.

En el inicio del monitoreo, correspondiente a los días finales del mes Marzo e inicios de Abril la concentración de Rn-222 por el sistema EPRM encontrado en las 8 estaciones iniciales indican niveles bajos de Radón en el suelo. Por otro lado, a partir del segundo monitoreo en el mes de Abril, se encontró un aumento en todas las estaciones (10 estaciones), particularmente en las estaciones: Peladitos, Lavas 2, Parques; Lava 1, Piedras y Mirador, las cuales presentan niveles de concentración de Rn-222 por encima de 1.500 pCi/L; estos valores corresponderían probablemente a la existencia de altos niveles de emisión gaseosa y posibles fracturamientos durante estos días.



Sin embargo, para las estaciones Piedras, Mirador y Parques las concentraciones que superan los valores de 4500pCi/L, de Rn-222 no son representativas, debido a que en estas estaciones se presentaron filtraciones de agua por el invierno presentes en esos días, perjudicando la lectura de los electrets.

Para el periodo final de análisis en el mes de Abril, se encontraron unos descensos en la concentración de Rn-222 en todas las estaciones de monitoreo que podría corresponder a un residual de este gas.

Para el mes de Mayo, se puede apreciar que la concentración de Rn-222, máxima encontrada está por encima de los 3000pCi/L correspondiente a la estación Lava 1, (entre 6-7 de mayo) y también se observan variaciones en las estaciones Frailejón y Lavas 2, de concentraciones no superiores a 1000pCi/L; dada la probabilidad que ocurrió un evento sísmico el 7 de Mayo. Sin embargo, el aumento considerable de la concentración de Radón en una sola estación (Lava 2), podría corresponder a fenómenos propios de la dinámica del gas, como la migración de los átomos que dependen del coeficiente de difusión, del poder de emanación y absorción del gas, según la clase del suelo, minerales y rocas que el gas atraviesa en el camino hasta la superficie.

Para el periodo del 12 al 19 de mayo, se encontraron valores de concentración bajas de Rn-222, que no superan los 500pCi/L; sin embargo, para las estaciones de Lava 1 y Lava 2, se encontró un descenso y ascenso de concentraciones 1800 y 2300 pCi/L respectivamente, que podrían corresponder a la dispersión de los residuales del gas.

En el último periodo de medición, correspondiente al 22 de Mayo, se encuentran unos ascensos no muy significativos en algunas estaciones que podrían estar relacionadas con ciertos eventos sísmicos ocurridos entre el 24 y 26 de Mayo, ya que en estudios previos a diferentes volcanes, se ha observado una cierta relación en donde las emisiones gaseosas de Radón se han visto alteradas con la ocurrencia de eventos sísmicos, sin embargo esto sigue siendo objeto de estudio.

Para el mes de Junio, se puede observar que la concentración del isótopo Radioactivo Rn-222 en la zona de influencia del Volcán Galeras ha tenido algunas variaciones en el transcurso de este mes. Los niveles de Radón en el suelo, en 7, de las 10 estaciones ubicadas en Galeras son bajos, valores que no superan los 2000 pCi/L, en donde en la mayoría de las estaciones el nivel de gas radón, se ha mantenido en niveles bajos en las últimas dos semanas. Sin embargo, para el segundo periodo comprendido entre 14 y 21 de Junio, en las estaciones: Parques, Lavas 2 y Lavas 1, la concentración de Radón superan los valores de 3500 pCi/L, destacando el valor de la estación de Parques que supera los 5500 pCi/L. Estos niveles altos de Radón podrían estar relacionados a un intenso escape de radón, desde los poros de las rocas debido a posibles fracturamientos en estos días.

Podría darse la posibilidad de que el aumento de las emisiones de Radón, para estas estaciones es un perspectiva precursor de eventos que se han manifestado en los días próximos de la toma de los datos. (Como es el caso de los VT que se reportan después del 19 de Junio), debido a la desorción causada por frecuencias ultrasónicas que ocurren antes de un fracturamiento a profundidad. Una vez que ocurre la desorción del Radón desde la superficie de los minerales, este isótopo puede transportarse rápidamente a superficie gracias a su alto coeficiente de difusión, ya que en estudios previos a diferentes volcanes, se ha observado una cierta relación en donde las emisiones gaseosas de Radón se han visto alteradas con la ocurrencia de eventos sísmicos, sin embargo esto sigue siendo objeto de estudio.

En el último periodo de medición correspondiente al 28 de Junio, se encuentran unos ascensos, no muy significativos en algunas estaciones como la Caldera y el Mirador, y por el contrario para las estaciones Lava 1, Lava 2 y Parques se observa un descenso de concentraciones, que podrían corresponder a la dispersión de los residuales del gas.



Libertad y Orden

2.1.5 Geología

**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS**

República de Colombia

De acuerdo con la información suministrada por el VAAC (Volcano Ash Advisory Center: Centro de Información sobre Ceniza Volcánica de los Estados Unidos), basada en el análisis de las imágenes del sensor satelital GOES-12 (con canales para espectro visible, infrarrojo y gases, como vapor de agua), la columna eruptiva del 2 de enero de 2010, alcanzó entre las 7:43 p.m. y las 8:45 p.m., una altura máxima aproximada de 12 km., sobre la cima de Galeras (lo cual es consecuente con la imagen térmica de la columna eruptiva, Figura 2.1.84), con dispersión principalmente hacia el sector Occidente y luego tendiéndose hacia el Sur, penetrando después de algunas horas en la República del Ecuador (Figuras 2.1.85 y 2.1.86).



Figura 2.1.84. Imagen térmica de la columna de material asociada a la erupción explosiva de Galeras, registrada el 2 de enero de 2010 a las 7:43 p.m. En la imagen (tomada empleando la cámara térmica FLIR ThermoCAM PM595PAL, convenio INGEOMINAS - BGR de Alemania), los colores más claros representan temperaturas más altas. La altura de columna en el momento de la captura de la imagen fue de 12 Km aproximadamente.



Figura 2.1.85. Mapa de dispersión de cenizas de la erupción de Galeras ocurrida el 2 de enero de 2010, a las 7:43 p.m., elaborado por VAAC con base en las imágenes del sensor satelital GOES-12. Las altitudes máximas de columna se expresan en unidades FL (Flight Lines : Líneas de Vuelo). Una FL equivale a aproximadamente 100 pies sobre la superficie terrestre. Las horas se expresan en UT (Universal Time, Tiempo Local menos 5 horas).

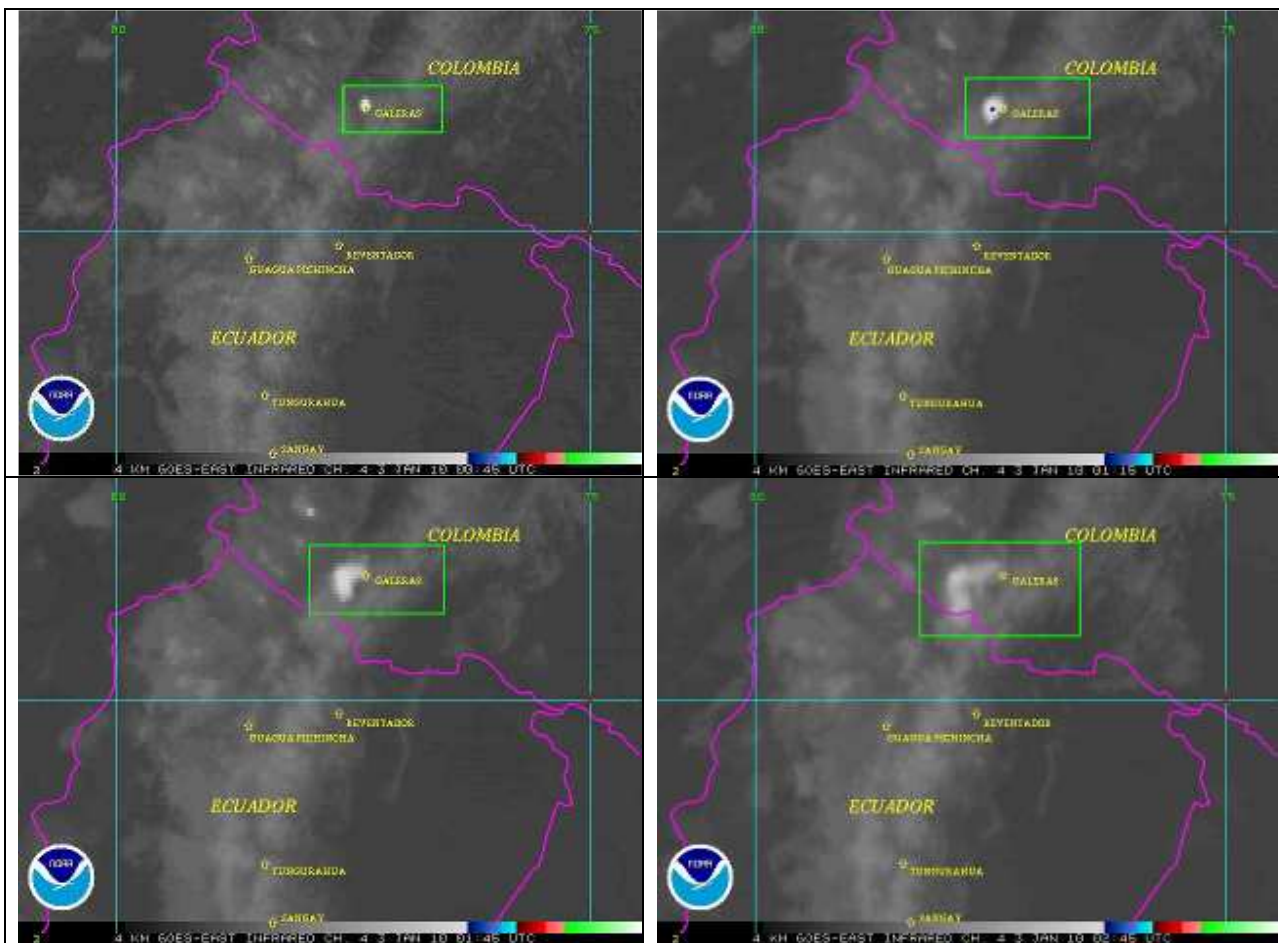


Figura 2.1.86. Secuencia de imágenes del satélite GOES-12 (canal infrarrojo, resolución de 4 Km., por píxel) en las que se observa la evolución entre las 7:45 p.m. hasta las 8:45 p.m., de la columna de gases y cenizas asociada al episodio eruptivo del volcán Galeras, registrado a las 7:43 p.m., del 2 de enero de 2010.

Durante la erupción fueron expulsados piroclastos, tamaño ceniza, que se dispersaron y depositaron principalmente al occidente debido a efectos eólicos. El tamaño de grano de la ceniza depositada varió desde sectores cercanos al cráter hasta los sitios más alejados del mismo. Se realizó reconocimiento, vía terrestre (Figura 2.1.87) sobre las poblaciones ubicadas en la circunvalar al Galeras, tales como: Yaquanquer, Bomboná, Consacá, Sandoná, El Ingenio; además en las poblaciones de Ancuya, Linares, Samaniego, Guachavés, La Llanada, Túquerres, Pierdrancha, Ricaurte, Altaquer y Junín. En varios de estos sitios se corroboró el depósito de ceniza y se tomaron muestras para su posterior análisis.



Figura 2.1.87. Imágenes de algunos de los sectores y poblaciones donde se realizó muestreo de la ceniza emitida en la erupción del 2 de enero de 2010 y depositada en la vía circunvalar al Galeras (superior izquierda), Ancuya (superior derecha), Ricaurte (inferior izquierda), Linares (inferior derecha).

Con base en muestreo desarrollado en campo (tanto aéreo como terrestre), en reportes de caída de ceniza y en imágenes satelitales analizadas, se elaboró el mapa de distribución de caída piroclástica depositada por transporte eólico (mapa de isópacas; Figura 2.1.88). El cálculo preliminar realizado indica un volumen mínimo depositado de 3'560.000 m³, que corresponde al mayor volumen depositado de las 18 erupciones explosivas registradas en los 20 años de monitoreo. Desde la erupción del 14 de febrero de 2009, hasta la registrada el 2 de enero de 2010, se ha estimado un volumen depositado de 11'907.000 m³ (Tabla 2.1.17).

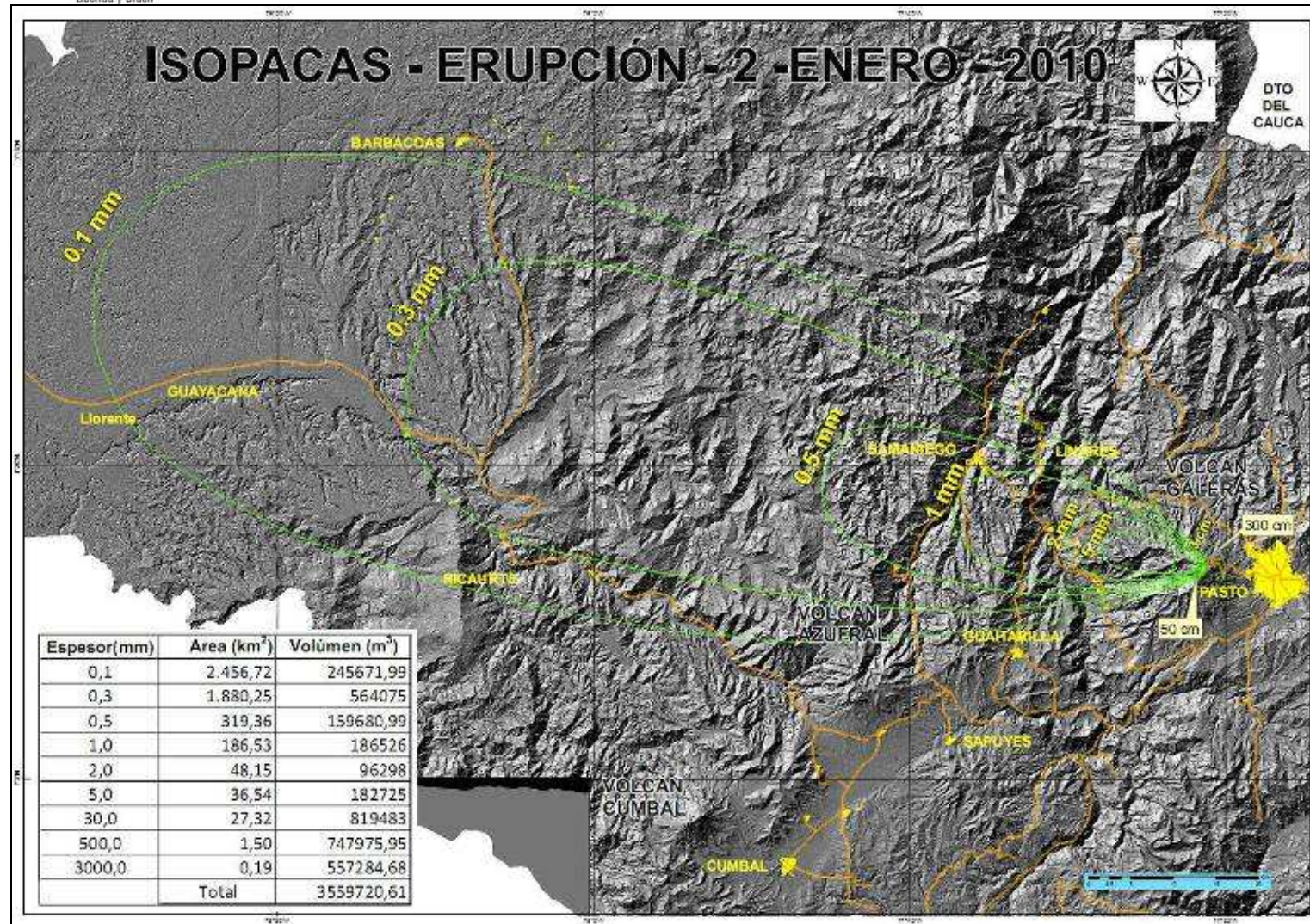


Figura 2.1.88. Mapa de isópacas para la erupción de Galeras registrada el 2 de enero de 2010. La tabla en la parte inferior izquierda indica las áreas efectivas, los volúmenes calculados para las isópacas de cada espesor estimado y el volumen total estimado.

Tabla 2.1.17. Volúmenes de material emitido, calculados para las erupciones explosivas de Galeras, registradas entre el 14 de febrero de 2009 y el 2 de enero de 2010.

Fecha	Volumen calculado [m ³]
14-Feb-09	285.000
20-Feb-09	1'431.000
13-Mar-09	852.000
24-Apr-09	1'000.000
29-Apr-09	63.000
7-Jun-09	35.000
8-Jun-09	2'214.000
30-Sep-09	2'014.000
20-Nov-09	453.000
2-Ene-10	3'560.000
Total Volumen emitido	11'907.000

La figura 2.1.89 corresponde a una muestra de ceniza tomada en la localidad de Consacá, a unos 11.5 km., hacia el occidente del cráter principal, vista bajo la lupa binocular (aumento X 10). Se aprecian los fragmentos de vidrio (1, 2 y 3) que varían en coloración de traslúcido a negro, igualmente se observan algunos cristales de plagioclasas (4), piroxeno (5) y fragmentos de roca (6).



Figura 2.1.89. Aspecto de la muestra de ceniza bajo la lupa binocular (aumento X 10). Correspondiente a una muestra vítrea, tomada en la localidad de Consacá, en la cual se aprecian algunos fragmentos de cristales y roca.



2.1.6 Actividad superficial y cambios geomorfológicos

Las manifestaciones en superficie de la actividad del volcán se documentan mediante las observaciones directas hacia la cima volcánica, desde la sede del OVSP, por reportes de las comisiones de personal en campo, por reportes de la comunidad o las autoridades civiles y militares, así como también por sobrevuelos efectuados por personal del Observatorio en el helicóptero Huey de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

El sitio web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto tiene como URL: <http://intranet.ingegominas.gov.co/pasto>. Este sitio cuenta con una galería de imágenes y videos seleccionados que están a disposición del público en general, el uso de este material debe estar acorde a los términos de uso consignados en la siguiente página institucional: http://intranet.ingegominas.gov.co/pasto/Pasto:Términos_de_Uso.

La principal observación del Primer Semestre de 2010, se relaciona con la erupción registrada el 2 de enero, a las 7:43 p.m. Gran parte de la población de la ciudad de Pasto y de ciertos pueblos que tienen visual hacia Galeras, lograron percibir el evento eruptivo, las condiciones climáticas durante la erupción no fueron favorables para apreciar en detalle el desarrollo del evento.

En el Primer Semestre de 2010, se realizaron 5 sobrevuelos, los días 3 de enero, 15 de febrero, 22 de marzo, 30 de abril y 10 de mayo; en dos de ellos (15 de febrero y 30 de abril) se capturaron algunas imágenes térmicas, que permitieron observar la variación de las condiciones de temperatura del material rocoso en el cono volcánico. En la mayoría de visitas de reconocimiento, orientadas a realizar el seguimiento de la información de la actividad superficial, ya sea desde tierra o desde aire, se observó la columna de gases de color blanco, tendida hacia el costado occidental. Los principales focos de emisión, fueron el cráter principal y los cráteres secundarios denominados como El Paisita (interno y externo), y Las Chavas; y puntos de emisión, como Las Deformes.

El evento eruptivo ocurrido en la noche del 2 de enero, fue captado por la cámara web instalada en la sede del OVSP (ubicada a 11.5 km., al oriente del cráter principal), en el video es posible observar la fase explosiva del evento, caracterizada por la incandescencia que emerge de manera violenta desde el cráter principal a manera de pulsos (Figura 2.1.90), esta incandescencia acompaña a la columna de gases y ceniza, que rápidamente se eleva transportando consigo partículas con carga eléctrica negativa, cuando estas alcanzan la atmósfera, que generalmente, tiene partículas con carga positiva, genera un potencial eléctrico que es capaz de producir el paso de corriente eléctrica, ionizando las moléculas de aire produciendo pulsos de luz blanca en forma de rayos.

En el registro filmico se observa también proyectiles balísticos de diversos tamaños, que describen trayectorias parabólicas y que caen sobre las faldas del edificio volcánico, hasta distancias luego calculadas en cerca de 3 – 3.5 km. Algunos de estos bloques iniciaron incendios que duraron hasta la tarde del 3 de enero (en la zona nor-oriental) y 4 de enero (en el sector nor-occidental), consumiendo la vegetación que a su paso encontraban. El video completo puede observarse en el siguiente enlace de la página web del observatorio:

http://intranet.ingegominas.gov.co/pasto/Imagen:Erupcion_galeras_2_ene_2010.mpg



Figura 2.1.90. Fotogramas captados por la cámara web ubicada en la sede del OVSP de las manifestaciones en superficie del evento eruptivo registrado el 2 de enero de 2010.

Adicionalmente, desde el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, el Profesor Alberto Quijano Vodniza, registró imágenes de los incendios ocasionados por los proyectiles balísticos, estas fotos fueron tomadas el día 3 de enero (Figura 2.1.91). Desde otros sectores del municipio de Pasto, varias personas capturaron fotografías que publicaron en sitios públicos de Internet, la figura 2.1.92 muestran dos de estos registros.



Figura 2.1.91. Fotografía capturada desde la sede del Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, el 3 de enero de 2010.



Figura 2.1.92. Fotografías registradas desde diferentes sectores del municipio de Pasto. La fotografía de la izquierda fue tomada por el señor Luis Ponce M. desde el Estadio de la Pastusidad, minutos después de la erupción, se observa como la columna adquiere una forma especial debido a las diferencias en las direcciones del viento con la altura. La fotografía de la derecha fue registrada desde el sector de Pinasaco.

En reconocimiento aéreo realizado en la mañana del 3 de enero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (Helicóptero Huey II), fue posible registrar algunas imágenes, en la fotografía de la izquierda, se observan los efectos de los incendios provocados por los proyectiles balísticos sobre el sector norte y noroccidente del edificio volcánico, algunos de los cuales se extinguieron finalmente entre el 3 y 4 de enero. (Figura 2.1.93 - izquierda), también se observaron cráteres formados por el impacto y cantidades considerables de depósito de cenizas, especialmente sobre el cono activo (Figura 2.1.93 - derecha).



Figura 2.1.93. Registros fotográficos tomados durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras
– 3 de enero de 2010.

Durante la mayor parte del mes de febrero se contó, en general, con buenas condiciones climáticas, a pesar de esto, las observaciones de actividad superficial que se lograron capturar desde la ciudad de Pasto, fueron mínimas. Por otra parte, los reportes de actividad que se recibieron corresponden a

los eventos Volcano-tectónicos registrados el 1 y 25 de febrero, los cuales fueron reportados como sentidos, en sectores de la ciudad de Pasto y en el área de influencia de Galeras.

El 7 de febrero de 2010, a las 6:23 a.m., 9:00 a.m. y 10:07 a.m., hubo reportes de emisiones, las dos primeras fueron reportadas, como vistas desde el municipio de Consacá, las cuales no fueron observadas desde el municipio de Pasto debido a la baja altura que alcanzaron y a su rápida dispersión. Las tres emisiones fueron de coloración blanca y de baja altura. El 22 de febrero, a las 6:15 p.m., desde la sede del OVSP, se evidenció una columna de gases de coloración blanca, de baja altura y poco densa (Figura 2.1.94).



Figura 2.1.94. A la izquierda, se observa la emisión de Galeras, registrada el 7 de febrero a las 10:07 am., y a la derecha, se observa la emisión, registrada el 22 de febrero a las 06:15 p.m.
Las imágenes fueron capturadas desde el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto.

En reconocimiento aéreo realizado el 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC (Helicóptero Huey II), fue posible registrar fotografías e imágenes térmicas digitales (empleando la termocámara FLIR) del cono volcánico de Galeras. En las imágenes digitales se evidencia la expulsión de gases, desde los cráteres secundarios denominados El Paisita, Las Chavas, Las Deformes y de la pared suroriental del cráter principal (Figura 2.1.95).



Figura 2.1.95. Registro fotográfico tomado durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Galeras, del 15 de febrero de 2010.

Gracias a las imágenes enviadas por el Señor Mario Alberto Caicedo López, que presta sus labores en la estación RTVC Galeras, capturadas el 24 de febrero, es posible evidenciar salida de gases de los cráteres secundarios Las Deformes, Las Chavas, El Paisita y desde la pared interna ubicada en el sector norte del cráter principal (Figura 2.1.96), donde se puede observar que por instantes se incrementa la expulsión de gas.



Figura 2.1.96. Imágenes de Galeras tomada por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 24 de febrero de 2010.

Para el mes de marzo, se presentan las observaciones de mayor relevancia durante este periodo y algunas imágenes relacionadas:

El 4 de marzo, a la 1:18 p.m. la comisión de OVSP que realizó mediciones móviles de SO_2 , reportó que desde el municipio de Consacá, se observa salida de gases de coloración blanca, provenientes de los cráteres secundarios Las Chavas y El Paisita (Figura 2.1.97).



Figura 2.1.97. Imagen de Galeras capturada desde el municipio de Consacá, el día 4 de marzo de 2010.

El 8 de marzo, personal del OVSP, obtuvo imágenes de la cima de Galeras, en ellas es posible evidenciar salida de gases de coloración blanca desde el campo fumarólico Las Deformes, del cráter secundario Las Chavas y desde el cráter principal (Figura 2.1.98). Además, hacia la 1:00 p.m., la comisión reportó que cerca a la estación de Policía, que se encuentra por la cima de Galeras se percibe olor a gases azufrados.



Figura 2.1.98. Registro fotográfico del cono activo de Galeras, tomado el día 8 de marzo de 2010.

El 10 de marzo, personal del OVSP realizó una visita de reconocimiento hacia el sector del Camino Real, ubicado sobre el costado oriente y nororiente del edificio volcánico y desde el sector de la quebrada Maragato en adelante, reportaron sentir fuertes olores a gases azufrados.

El 12 de marzo, gracias a las imágenes enviadas por el Señor Mario Alberto Caicedo López, que presta sus labores en la estación RTVC Galeras, es posible evidenciar salida de gases del campo fumarólico Las Deformes y desde los cráteres secundarios Las Chavas y El Paisita (Figura 2.1.99). Además, desde el Centro de Salud de Consacá a las 8:10 a.m., reportaron una pequeña emisión de gases de coloración blanca.



Figura 2.1.99. Imagen de Galeras tomada por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 12 de marzo de 2010.

El 15 de marzo, de igual manera, gracias a imágenes enviadas por el Señor Mario Alberto Caicedo López, es posible evidenciar salida de gases. En las fotografías se observa la salida de gas en poca cantidad proveniente del centro del cráter principal, desde Las Deformes y de varios de los cráteres secundarios de Galeras (Figura 2.1.100).



Figura 2.1.100. Imagen de Galeras tomada por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 15 de marzo de 2010.

El 15 de marzo, en visita de reconocimiento a la cima, personal del OVSP ubicado en el sector sur de la caldera, reportó salida de gas en poca cantidad proveniente del centro del cráter principal, del campo fumarólico Las Deformes y desde los cráteres secundarios Las Chavas y El Paisita, no se percibieron olores a gases azufrados.

El 20 de marzo, personal de OVSP que se encontraba en comisión en campo en un sector cercano al Camino Real, reportó sentir un fuerte olor a azufre.

En reconocimiento aéreo realizado el 22 de marzo de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC, se observó salida de gas de coloración blanca, en poca cantidad desde el interior del cráter principal, desde el campo fumarólico Las Deformes y los cráteres secundarios El Paisita y Chavas principalmente, se observa la emisión de gas desde la pared interna en el sector norte, cercana al cráter secundario Paisita. Durante el sobrevuelo no se percibió olores a gases azufrados (Figura 2.1.101).



Figura 2.1.101. Imagen de Galeras tomada en sobrevuelo con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana, efectuado el 22 de marzo de 2010.

El 23 de marzo, cerca de las 5:47 a.m., al encontrarse la cima del volcán despejada, es posible visualizar desde la sede del OVSP, una emisión de gases de coloración blanca con tendencia hacia el occidente-suroccidente, la columna alcanzó una altura máxima de 300 m, sobre la cima a las 6:06 a.m., la emisión continua hasta las 6:35 a.m. (Figura 2.1.102).



Figura 2.1.102. Imagen de Galeras tomada desde la sede del OVSP, el 23 marzo de 2010, a las 6:21 a.m.

Además, en algunas imágenes enviadas por el Señor Mario Alberto Caicedo López, que presta sus labores en la estación RTVC Galeras, se observó hacia el borde de la caldera en la parte sur, por sector del consorcio de las antenas y en dirección hacia la estación Cráter, grietas posiblemente provocadas por las últimas erupciones (Figura 2.1.103).



Figura 2.1.103. Imágenes de Galeras tomadas por el Señor Mario Alberto Caicedo desde la estación RTVC Galeras, el 15 de marzo de 2010.

Durante la mayor parte del mes de abril de 2010 se contó, en general, con buenas condiciones climáticas. Las observaciones de actividad superficial que se lograron capturar desde la ciudad de Pasto fueron mínimas.

El 2 de abril de 2010, en horas de la mañana, desde la sede del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP), fue posible visualizar una columna de gases de color gris oscuro, la cual alcanzó una altura no mayor a los 200 m y por acción de los vientos se dirigió hacia el norte del volcán (Figura 2.1.104).



Figura 2.1.104. Emisión de gases vista desde la sede del OVSP, el 2 de abril de 2010, en horas de la mañana (entre las 6:05 a.m. y las 6:40 a.m.).

El 7 de abril de 2010, entre las 3:18 p.m. hasta las 3:32 p.m., se logró observar una emisión de color blanco, con una altura de columna de 380 m, sobre la cima de Galeras y con dirección de dispersión al suroccidente del cráter (Figura 2.1.105).



Figura 2.1.105. Emisión de gases vista desde la sede del OVSP, el 7 de abril de 2010, en horas de la tarde (3:20 p.m.).

El 8 de abril de 2010, se lograron observar dos emisiones, la primera a las 5:34 a.m., con una altura máxima de columna de 200 m y de color gris; el segundo pulso de actividad superficial fue posible observarlo a las 2:14 p.m., con una altura máxima de columna de 130 m, coloración blanca y dirección de dispersión al sector occidental de Galeras.

El 9 de abril de 2010, se recibió una llamada de Parques Nacionales a las 6:15 p.m., reportando que se alcanzaba a percibir un fuerte olor a azufre desde la cabaña, que se encuentra ubicada cerca de la estación Urcunina (URCR), ubicada en el área de influencia de Galeras.

El 10 de abril de 2010, se logró evidenciar una pequeña columna de 200 m de altura, de coloración gris que se dirigió hacia el sur del edificio volcánico (Figura 2.1.106).



Figura 2.1.106. Emisión de gases vista desde la sede del OVSP, el 10 de abril de 2010, en horas de la tarde (5:03 p.m.).

El 12 de abril de 2010, se registraron dos emisiones, la primera, de coloración gris, inició a las 5:47 a.m.; la segunda de coloración blanca, se presentó a las 7:48 a.m. y alcanzó una altura máxima de 250 m., las dos columnas se dirigieron hacia el sector norte del volcán (Figura 2.1.107).

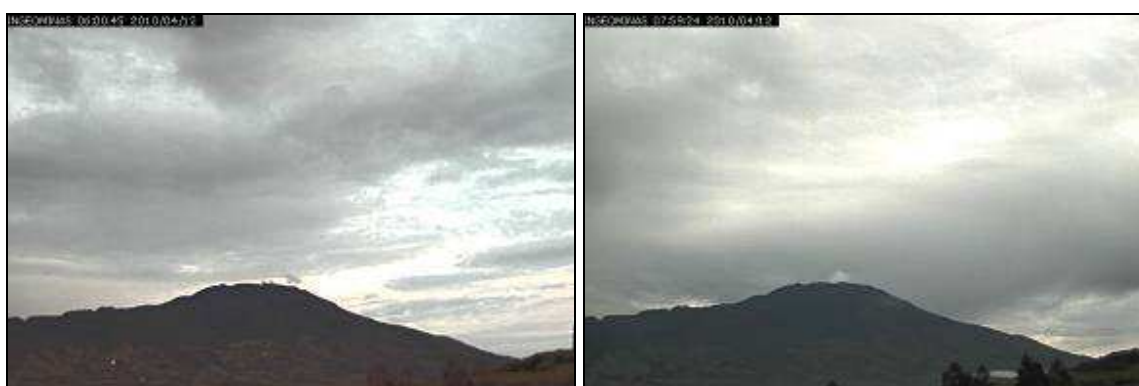


Figura 2.1.107. Emisiones de gases vistas desde la sede del OVSP el 12 de abril de 2010. Izquierda: Emisión a las 6:00 a.m. Derecha: Emisión a las 7:59 a.m.

El 13 de abril de 2010, a las 5:25 p.m. fue posible observar una emisión de coloración blanca, de igual forma, el 14 de abril, desde las 6:05 a.m., hasta las 6:25 a.m., se presentó una emisión de

coloración blanca, de baja altura con dirección preferencial hacia el sector norte, la cual se dispersó rápidamente. Luego, entre las 7:50 a.m. y las 8:15 a.m., se observó una nueva emisión de gases, conservando el color y dirección que la mencionada anteriormente, ésta alcanzó una altura de 250 m sobre la cima de Galeras (Figura 2.1.108).



Figura 2.1.108. Imágenes de Galeras tomadas desde la sede del OVSP, el 14 de abril de 2010.
Capturadas a las 7:49 a.m. (izquierda) y a las 7:56 a.m. (derecha).
En las fotografías se observa la salida de gas de coloración blanca y dirección norte.

El 15 de abril de 2010, se observó una emisión de coloración blanca, que alcanzó una altura de 250 m, sobre la cima de Galeras, con dirección norte, la cual se presentó aproximadamente hasta las 8:05 a.m., además, el 16 de abril, desde las 6:10 a.m. hasta las 6:35 a.m. se presentó una emisión de coloración blanca, con dirección hacia el norte y alcanzó una altura de 200 m.

El 22 de abril de 2010, a las 12:21 p.m., se presentó una emisión que tuvo una duración de cuatro minutos aproximadamente y presentó coloración blanca, con desplazamiento vertical, alcanzando una altura máxima de 200 m, sobre la cima del volcán (Figura 2.1.109).



Figura 2.1.109. Imagen de Galeras tomada desde la sede del OVSP, el 22 de abril de 2010, a las 12:21 p.m.

Los días 29 y 30 de abril de 2010, a las 5:40 p.m. y a las 6:27 p.m. respectivamente, desde la sede del OVSP, fue posible visualizar pequeñas columnas de emisión de color blanco, que alcanzaron alturas de 200 m y 100 m, sobre la cima de Galeras y que por acción de los vientos se dirigieron hacia el suroccidente del volcán.

En reconocimiento aéreo realizado el 30 de abril de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC (Helicóptero Huey II), fue posible registrar fotografías e imágenes térmicas digitales del cono volcánico de Galeras. Durante el sobrevuelo se observó una pequeña columna de gases de color blanco que alcanzó una altura aproximada de 200 m sobre la cima. Además, se observó bastante cantidad de gas, emergiendo desde el fondo del cráter principal y emanaciones menores desde los cráteres secundarios Las Chavas, Las Deformes y El Paisita (Figura 2.1.110). Por acción del viento, la columna de gases se tendía hacia el occidente, por lo que al sobrevolar este sector del cráter, se percibió un fuerte olor a gases azufrados, asociados al Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) y el olor irritante y fuerte, asociado con Dióxido de Azufre (SO_2).



Figura 2.1.110. Imagen del cono activo de Galeras, tomada durante el sobrevuelo realizado en horas de la mañana del 30 de abril de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

El 4 de mayo, entre las 4:05 p.m. y las 4:35 p.m., fue posible evidenciar la salida de gases de coloración blanca, con dirección hacia el sur-occidente, alcanzando a las 4:18 p.m., una altura de 120 m sobre la cima de Galeras (Figura 2.1.111).



Figura 2.1.111. Imágenes de Galeras capturadas el 4 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 4:20 p.m. (izquierda) y a las 4:17 p.m. (derecha).

El 5 de mayo, personal del OVSP, reportó olores fuertes a gases azufrados por el sector de La Y, y cerca de la estación de potenciales. El 6 de mayo, entre las 6:35 a.m. y las 6:52 a.m., fue posible observar salida de gases de coloración blanca, con dirección hacia el Sur, a manera de pequeños pulsos de gas (Figura 2.1.112).



Figura 2.1.112. Imágenes de Galeras capturadas el 6 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 6:43 a.m. (izquierda) y a las 6:44 a.m. (derecha).

En las fotografías se observa emisión de gas de coloración blanca a manera de pulsos.

El 23 de mayo, entre las 4:20 p.m. y las 4:40 p.m., fue posible observar una emisión de gases de coloración blanca, con dirección hacia el sector norte, alcanzando a las 4:36 p.m., una altura de 336 m sobre la cima de Galeras y a las 4:38 p.m. alcanzó 428 m de altura (Figura 2.1.113), de igual manera, el 24 de mayo, a las 2:10 p.m., se observó una emisión de gas de coloración blanca, de poca duración, la cual se desvanece rápidamente. Luego, entre las 2:44 p.m. hasta cerca de las 3:10 p.m., se logró observar una nueva emisión, de igual coloración que la anterior, registrando una altura máxima de 150 m sobre la cima de Galeras (Figura 2.1.114).



Figura 2.1.113. Imágenes de Galeras capturadas el 23 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 4:35 p.m. (izquierda) y a las 4:37 p.m. (derecha). En las fotografías se observa emisión de gas de coloración blanca.

El 25 de mayo, a partir de las 7:40 a.m. aproximadamente, se observó una emisión a manera de pulsos de coloración gris; la cual, por acción de los vientos se dispersa rápidamente en dirección norte. En este día, a las 12:40 p.m., personal que labora en el OVSP y que se encontraba realizando labores de mantenimiento a las estaciones en la cima del volcán reportó que percibieron moderado olor a azufre en el lugar donde se encuentra instalada la estación sísmica Anganoy.



Figura 2.1.114. Imagen de Galeras capturada el 24 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP. En la fotografía se observa emisión de gas de coloración blanca.

Para el 28 de mayo, desde las 7:23 a.m. hasta aproximadamente las 8:15 a.m., se observó un emisión pulsátil de color gris, la cual alcanzó una altura máxima de 150 m sobre la cima de Galeras. La dispersión por acción de los vientos fue en dirección Norte (Figura 2.1.115).



Figura 2.1.115. Imágenes de Galeras capturadas el 28 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, a las 7:33 a.m. (izquierda) y a las 7:34 a.m. (derecha).

En las fotografías se observa emisión de gas de coloración gris, a manera de pulsos.

Así mismo, entre las 3:37 p.m. y las 4:28 p.m., se observó una nueva emisión de color blanco que alcanzó una altura máxima de 350 m sobre la cima de Galeras. Su dispersión por acción de los vientos fue en dirección Norte (Figura 2.1.116). Además, entre las 4:29 p.m. y las 5:00 p.m., se observó una emisión de color gris que alcanzó una altura máxima de 460 m sobre la cima de Galeras. La columna se dispersó hacia el flanco norte del volcán (Figura 2.1.117). Entre las 5:04 p.m. y las 5:47 p.m. se observó una emisión de color gris que alcanzó una altura máxima de 340 m sobre la cima de Galeras. Esta emisión se dispersó en dirección Norte.



Figura 2.1.116. Imagen de Galeras capturada el 28 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, entre las 3:37 p.m. y las 4:28 p.m.



Figura 2.1.117. Imagen de Galeras capturada el 28 de mayo de 2010, desde la sede del OVSP, entre las 4:29 p.m. y las 5:00 p.m.

Durante el mes de junio de 2010, las condiciones climáticas permitieron evidenciar un número bajo de observaciones de actividad superficial, las cuales se lograron observar desde la ciudad de Pasto.

El 1 de junio de 2010, a las 2:00 p.m., la comisión conformada por funcionarios del Observatorio, que se encontraba en la vía hacia el volcán, reportó fuerte olor a azufre, similar al olor de un huevo podrido. Aproximadamente a las 2:48 p.m. se observó una pequeña emisión de color blanco y dirigida hacia el Sur por efecto de los vientos, esta columna alcanzó una altura máxima de 200 m sobre la cima del volcán (Figura 2.1.118).



Figura 2.1.118. Imagen de Galeras, en la cual se observa emisión de gases, vista desde la sede del OVSP, el 1 de junio de 2010, entre las 2:48 p.m. y las 2:56 p.m.

El 2 de junio de 2010, una comisión del Observatorio, que se encontraba en la cima de Galeras, reportó olores fuertes a gases azufrados los cuales son percibidos desde la cima hasta áreas circundantes a la estación de Potenciales, localizada a 700 m de la cima, de igual forma se reporta salida de gases del campo fumarólico Las Deformes y el cráter secundario el Paisita (Figura 2.1.119).



Figura 2.1.119. Emisión de gases del campo de fumarolas Las Deformes y el cráter secundario el Paisita, reportado por la comisión de deformación el día 2 de junio de 2010.

El 17 de junio de 2010, personal del OVSP, reportó olores fuertes a gases azufrados desde la estación del inclinómetro Cráter. No se logró observar actividad superficial del cráter, debido a la gran nubosidad presente.

El 21 de junio de 2010, fue posible evidenciar salida de gases, entre las 7:39 a.m. y las 7:59 a.m., de coloración gris, con dirección hacia el sur, alcanzando una altura de 100 m, sobre la cima de Galeras. De igual manera a las 3:25 p.m. y a las 6:00 p.m., fue posible observar emisión de gases de coloración blanca con dispersión en dirección Norte (Figuras 2.1.120 y 2.1.121). Además una comisión del OVSP que se encontraba en el Municipio de Consacá, reportó salida de gases de coloración blanca desde el campo fumarólico Las Deformes y desde el cráter adventicio Las Chavas, no fue posible evidenciar salida de gas desde el cráter principal debido a la nubosidad presente.



Figura 2.1.120. Imagen de Galeras, en la cual se observa emisión de gases, vista desde la sede del OVSP, el 21 de junio de 2010, a las 3:27 p.m.



Figura 2.1.121. Imagen de Galeras, en la cual se observa emisión de gases, vista desde la sede del OVSP, el 21 de junio de 2010 a las 6:09 p.m.

2.1.6.1 Reconocimiento de la cima de Galeras, debido a los efectos de la erupción del 2 de enero de 2010.

El 9 de febrero, luego de la evaluación del comportamiento de la actividad volcánica de Galeras, se retornó a Nivel Amarillo (III) . Entre el 9 y el 16 de febrero se observó la evolución de la actividad del volcán y se realizaron los planes de trabajo para restablecer las diferentes estaciones ubicadas en las zonas de amenaza alta y media de Galeras.

El 17 de febrero el OVSP, realizó una comisión conformada por cuatro funcionarios del INGEOMINAS, para realizar trabajos de reconocimiento en la cima de Galeras. Las observaciones realizadas se describen a continuación.

2.1.6.1.1 Estado de la carretera

En términos generales, se evidencia que la carretera fue afectada por los productos volcánicos emitidos en la erupción del 2 de enero de 2010. Sin embargo, estos efectos no fueron tan dañinos como en episodios eruptivos anteriores, donde no fue posible subir hasta la cima. En esta ocasión, quitando solamente las rocas de mayor tamaño (~1m de diámetro) y unas pocas de menor tamaño fue posible acceder a la parte más alta del volcán (Figura 2.1.122).



Figura 2.1.122. Efectos de los impactos de roca en la parte externa de las instalaciones de la empresa de telecomunicaciones.

Vale la pena referir que previo a la visita del OVSP, el 7 de enero de 2010, personal del Consorcio que se encarga del manejo de los equipos de Telefónica Telecom subió hasta ese sector donde se encuentran instalados los equipos de telecomunicaciones y removieron algunas de las rocas que obstruían el camino, taparon algunos de los cráteres de impacto generados por las misma y adicionalmente tomaron imágenes de los efectos que identificaron, tanto en la carretera como en el sector de Telecom (Figuras 2.1.123, 2.1.124 y 2.1.125).



Figura 2.1.123. Efectos identificados en la carretera, en la vía a la cima de Galeras, generados por la erupción del 2 de enero de 2010.



Figura 2.1.124. Efectos en el sector externo de la empresa de telecomunicaciones debido a impactos de roca por la erupción del 2 de enero de 2010.



Figura 2.1.125. Efectos de los impactos de roca en la parte externa de las instalaciones, así como en la parte interna de las instalaciones de la empresa de telecomunicaciones.

2.1.6.1.2 Efectos generales de la erupción del 2 de enero de 2010

En general, fue posible observar que las rocas que cayeron fueron de tamaño menor a 40 cm. Eventualmente se encontraron rocas grandes o los cráteres de impacto originados por las mismas. En estos lugares se tomaron puntos de GPS e imágenes para tener una referencia de la distancia que alcanzaron estas rocas y de los efectos que generaron (Tabla 2.1.18, Figuras 2.1.126, 2.1.127, 2.1.128).

Tabla 2.1.18. Puntos de referencia donde se identificaron las rocas de mayor tamaño expulsadas por el evento eruptivo del 2 de enero de 2010.

Punto	Latitud N		Longitud			Altura (m)	Observaciones	
	grad	min	sec	grad	min			sec
A01	1	12	46.3	77	21	12.3	3796.9	Subiendo el sector de la Y
A02	1	12	50.4	77	21	16.9	3908.4	Subiendo el sector de la Y
A03	1	12	53.7	77	21	20.5	4039.4	Subiendo el sector de la Y, muestra de roca de ~ 90x60 cm de diámetro
A04	1	12	55.8	77	21	16.9	4082.6	Subiendo el sector de la Y, muestra de roca de ~ 70 cm de diámetro
A05	1	12	57.7	77	21	15.4	4110.7	Proyectil de aproximadamente 60 cm de diámetro.
A06	1	13	13.7	77	21	11.6	4202.5	Impactos en la caldera vía a Anganoy.
A07	1	13	17.6	77	21	11.1	4236.7	
A08	1	12	50.1	77	21	22.1	4132.1	Proyectil en la carretera de alrededor de 70x40 cm.
A09	1	12	49.4	77	21	23.2	4133.1	Proyectil en la carretera de alrededor de 170 cm de diámetro.
A10	1	12	49.4	77	21	24.7	4149.7	Subiendo a la repetidora de Cala, cráter de impacto de alrededor de 230 cm de diámetro.
A11	1	12	49.4	77	21	25.8	4155.4	Subiendo a la repetidora de Cala, cráter de impacto de alrededor de 220 cm de diámetro.
A12	1	12	49.0	77	21	26.3	4155.9	Alrededor de 20 m de la repetidora de Cala, proyectil de alrededor de 1 m de diámetro y cráter de impacto de 450 cm de diámetro.
A13	1	12	29.1	77	21	31.7	4042.5	Vía a la estación de Cráter, cráter de impacto de 90 cm de diámetro, 80 cm de alto, aproximadamente a 15 m de la estación.
A14	1	12	31.2	77	21	29.5	4036.0	Vía a la estación de Cráter, cráter de impacto de 80 cm de diámetro y 50 cm de alto, aproximadamente a 15 m de la estación.

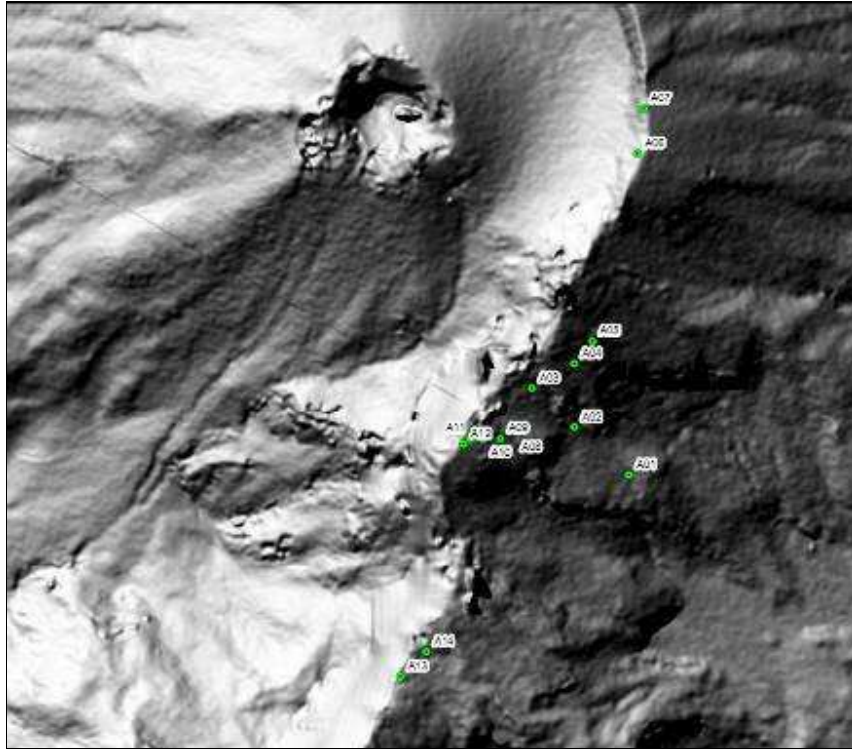


Figura 2.1.126. Ubicación en el mapa de sombras elaborado por la NASA con un modelo de elevación del terreno de 1 m, de los puntos muestreados.



Figura 2.1.127. Imagen de la roca descrita en el punto A04 (izquierda).
Imagen del Cráter de impacto descrito en el punto A09 (derecha).



Figura 2.1.128. Imagen del Cráter de impacto descrito en el punto A10 (izquierda). Imagen del Cráter de impacto descrito en el punto A12 (derecha), el de mayor diámetro (4.5 m) observado para este evento eruptivo.

En el sector de la cima de Galeras, el primer efecto observado fue en la base del reflector que se encontraba ubicado a pocos metros de la base militar (Figura 2.1.129) y algunos daños en el sector de la base militar, de los cuales no se puede afirmar que todos fueron generados en el evento eruptivo del 2 de enero de 2010. Es claro que este evento eruptivo contribuyó a la destrucción del edificio militar que años atrás (hasta 2005) presentaba unas condiciones óptimas para ser habitada por personal de las fuerzas armadas (Figura 2.1.130).



Figura 2.1.129. Imágenes del reflector ubicado a pocos metros de la base militar, afectado por el material emitido por el evento eruptivo del 2 de enero.

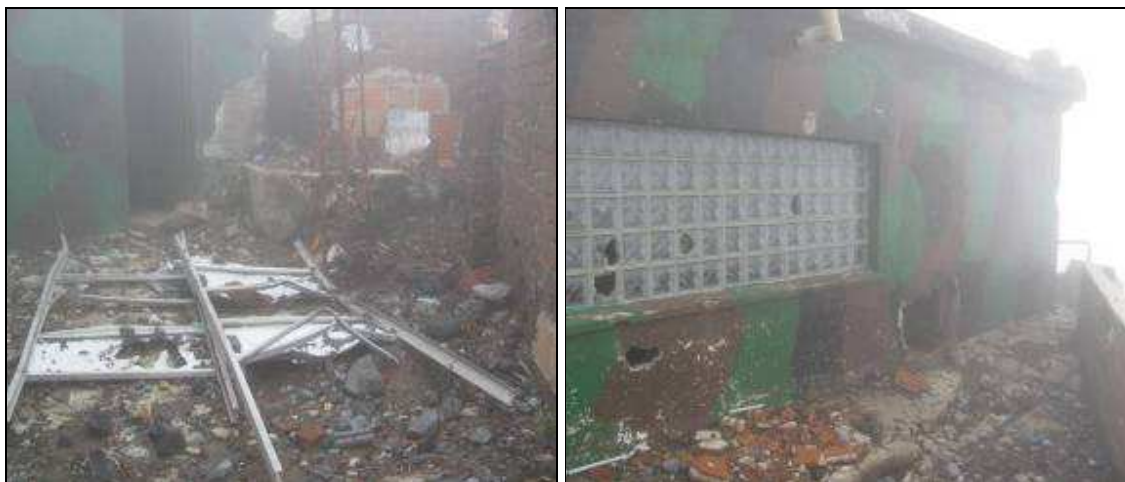


Figura 2.1.130. Efectos de los procesos eruptivos en el sector de la base militar ubicada en la cima de Galeras.

2.1.6.1.3 Condiciones de los equipos de monitoreo volcánico

Se visitaron tres sitios donde se encuentran ubicados equipos de monitoreo volcánico de Galeras. En el sector de la estación sismológica de corto período Anganoy, se encontraron rotos los paneles solares y los cables de conexión de estos a las baterías de alimentación de los equipos, de igual manera se encontró roto el cable de la antena y el codo de PVC por el cual entran los cables de antena y paneles a dicha caseta (Figura 2.1.131).



Figura 2.1.131. Daño de paneles solares (izquierda).
Impacto de roca sobre el cable de la antena de la estación de Anganoy (derecha).

En el inclinómetro electrónico Cráter se encontró roto el panel solar y el cable de conexión a la batería. La antena al parecer recibió un impacto que cortó tres de sus 17 elementos, quedando torcida y sobre el suelo (Figura 2.1.132). Se levantó la antena y se realizó cambio de batería, el equipo quedó registrando correctamente.



Figura 2.1.132. Daño de panel solar (izquierda).
Daño en la antena de transmisión de datos del inclinómetro electrónico Cráter (derecha).

En el sector de la repetidora de la estación sismológica de corto período Calabozo no se encontraron daños (Figura 2.1.133), pese a que el mayor de los cráteres de impacto se encontró aproximadamente a 20 m. En este sitio se realizó cambio de batería, mientras que una segunda comisión realizaba mantenimiento preventivo y correctivo en el sector de la estación, ubicada al occidente del cráter volcánico. La estación quedó funcionando adecuadamente.



Figura 2.1.133. Estado de los paneles solares de la repetidora de la estación Calabozo (izquierda).
Condiciones de funcionamiento de la repetidora de la estación de corto período Calabozo (derecha).

En el sector de la estación de corto período de Cráter no se encontraron efectos mayores, al parecer rocas muy pequeñas impactaron los paneles, pero sin generarles graves problemas, por lo que continuaron funcionando adecuadamente, generando el voltaje de carga de las baterías que alimentan el sistema. En este sector, pese a que no se observan claramente cráteres importantes, la visión general es, que hay mayor presencia de material volcánico (roca) de menores dimensiones distribuidas aleatoriamente (Figura 2.1.134).



Figura 2.1.134. Estado de los paneles solares en la estación de Cráter (izquierda).
Distribución de material volcánico de menor tamaño en el sector de la estación Cráter (derecha).

2.1.7 Imágenes térmicas

En los sobrevuelos realizados los días 15 de febrero y 30 de abril de 2010, en los cuales participó personal de INGEOMINAS-OVSP con la colaboración la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en un Helicóptero Huey II, se tomaron imágenes térmicas con el fin de hacer el seguimiento de la evolución de las temperaturas de la roca en diferentes puntos del cono activo de Galeras, debido a pocos registros, no es posible realizar un seguimiento continuo del comportamiento de las temperaturas en zonas del cráter de Galeras, durante el Primer Semestre de 2010, el registro de la temperatura más alta fue de 97°C, en el fondo del cráter principal. Las imágenes también se encuentran disponibles en la página web del observatorio, en la URL: <http://intranet.ingominas.gov.co/pasto>.

En la tabla 2.1.19, se listan las temperaturas máximas registradas con la cámara FLIR en diferentes puntos del cono activo del volcán Galeras, durante sobrevuelos realizados entre enero y junio de 2010. La cámara térmica, tiene dos rangos de operación; rango bajo de -20°C a 180°C, usado para observar detalle de zonas con anomalías térmicas consideradas como bajas; rango alto de 80°C hasta 550°C, usado para observar un rango amplio de temperaturas en zonas de anomalías térmicas consideradas como altas.

Tabla 2.1.19. Sobrevuelos realizados con las temperaturas máximas obtenidas en ellos, en el primer semestre de 2010.

Sobrevuelo	Temperatura máxima
15 de febrero	81 °C
30 de abril	97 °C

El día 2 de enero, desde el Observatorio fue posible capturar imágenes térmicas, minutos después de la erupción (Figura 2.1.135), empleando la termocámara FLIR ThermaCAM PM595PAL (Convenio INGEOMINAS-BGR de Alemania), en la imagen, los colores más claros representan temperaturas más altas. La altura de columna en el momento de la captura de la imagen fue de 12 km aproximadamente.



Figura 2.1.135. Imagen térmica de la columna de material asociada a la erupción explosiva de Galeras, registrada el 2 de enero de 2010 a las 7:43 p.m.

En reconocimiento aéreo realizado el 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC (Helicóptero Huey II), fue posible registrar imágenes térmicas (empleando la termocámara FLIR) del cono volcánico de Galeras, debido a problemas con el lente de la cámara térmica, no se obtuvieron imágenes de buena calidad (Figura 2.1.136), el recuadro en la fotografía, resalta el fondo del cráter principal, el cual alcanzó una temperatura de 81°C.

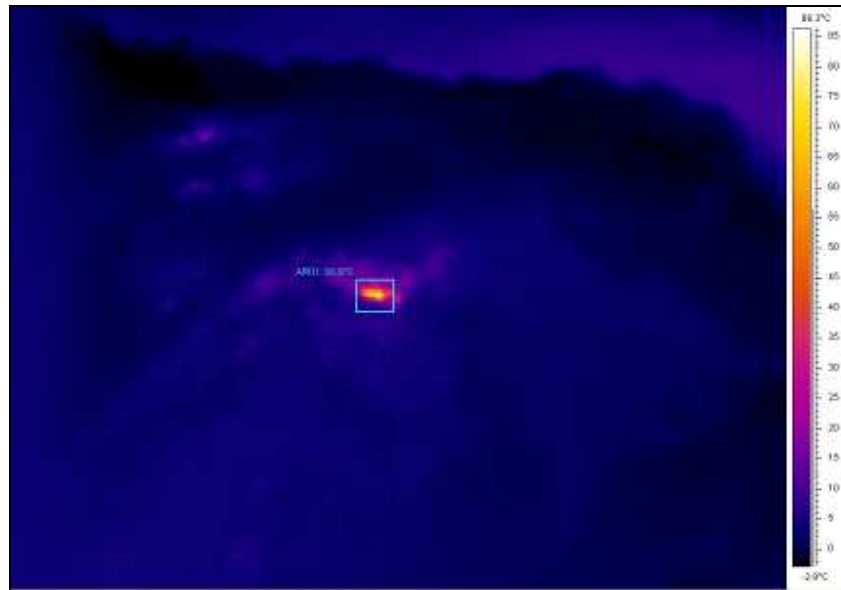


Figura 2.1.136. Imagen térmica del cono activo de Galeras, registrada el 15 de febrero de 2010.

En reconocimiento aéreo realizado el 30 de abril de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana FAC (Helicóptero Huey II), fue posible registrar imágenes térmicas digitales del cono volcánico de Galeras, estas imágenes mostraron temperaturas de hasta 97°C, en la pared interna del cráter principal en el sector sur-occidental y de 87°C, en un punto ubicado al fondo del cráter principal. El cráter secundario El Paisita mostró una temperatura de 94°C. En comparación con imágenes térmicas anteriores, las zonas con anomalía térmica se han incrementado, al igual que las temperaturas (Figura 2.1.137).

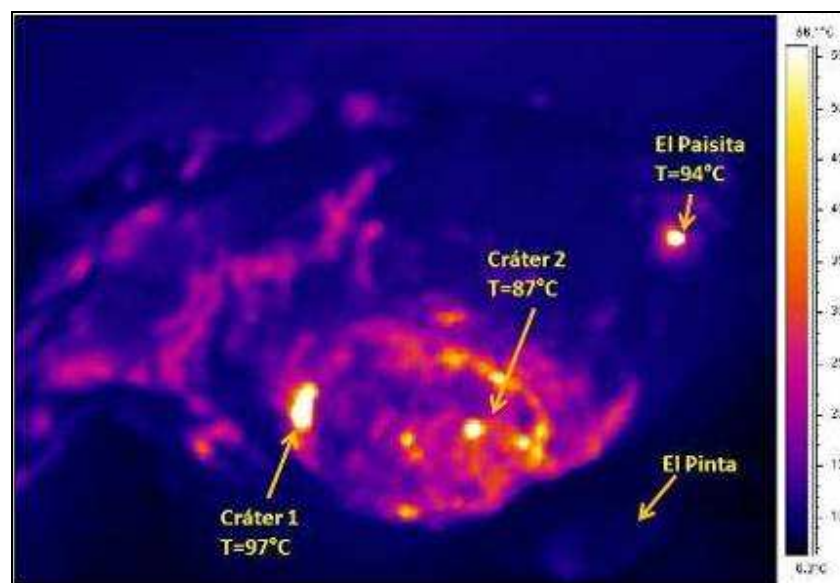


Figura 2.1.137. Imagen térmica del cono activo de Galeras tomada el 30 de abril, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.



2.1.8 Conclusiones

- El evento eruptivo del 2 de enero fue precedido por el registro de enjambres sísmicos asociados con movimientos súbitos de fluidos, que en ocasiones rompen material cortical y la presencia de sismos tipo Tornillo, descenso en los niveles de SO₂, bajos niveles de actividad superficial registrada tanto en el cráter principal, como en los diferentes cráteres secundarios y campos fumarólicos. Estos patrones enmarcados en un contexto de un sistema volcánico con material magmático a niveles superficiales mostró la probabilidad de ocurrencia de un evento eruptivo, razón por la cual el 9 de diciembre de 2009 el OVSP cambió el nivel de actividad de Amarillo (III) a Naranja (II) “Erupción en términos de días o semanas”.
- A lo largo de estos cinco años el volcán ha intruido material magmático desde niveles más profundos. Parte de este material ha extruido formando domos de lava en superficie, el resto aparentemente aún continúa presente en los conductos. Teniendo en cuenta que el motor de la actividad eruptiva de los volcanes es el magma y sus volátiles, en Galeras estas condiciones están dadas, lo que posibilita que en un futuro cercano puedan presentarse nuevos eventos eruptivos.
- Los enjambres de eventos sísmicos ocurridos, los registros de emisiones de dióxido de azufre, los reportes de olores a gases azufrados y la verificación de poca actividad superficial (emisión de gases), indican que aunque hay evidencia de presencia de material magmático en niveles superficiales, sugieren que el sistema no se encuentra totalmente sellado. Estas condiciones sugieren que el sistema volcánico permite tanto la liberación parcial de gases, como de presiones al interior del sistema volcánico.
- Si bien la actividad actual en Galeras continúa mostrando bajos niveles de ocurrencia y energía liberada, así como también un desarrollo inestable, el comportamiento registrado permite prever la posibilidad de que se requiera algún tiempo para que se generen nuevas condiciones de sobrepresión.



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS**

República de Colombia

Continuación Anexo 1. Parámetros de las localizaciones obtenidos (empleando el método de Geiger, implementado por el programa HYPO71) a partir de los registros sísmicos de los principales eventos Vulcano-tectónicos e híbridos registrados durante el Primer Semestre de 2010, en Galeras, se resalta los eventos reportados como sentidos.

FECHA	HORA LOCAL	LATITUD °N		LONGITUD °W		PROF. KM	MAGNITUD		No. FASES	GAP	Dist-Min KM	RMS	ERH	ERZ	CALIDAD	TIPO EVENTO
		grados	minutos	grados	minutos		Md	ML								
2010-06-17	01:57:41	1	13.7	77	21.88	0.59	-0.05	-0.1	5	338	1.5	0.03	0.4	0.7	C1	GHD
2010-06-17	18:01:07	1	13.67	77	22.02	0.53	0	0	9	208	1.7	0.05	0.2	0.7	C1	GVA
2010-06-17	19:50:57	1	13.13	77	21.46	0.25	0.34	0.4	12	168	0.7	0.09	0.2	0.8	B1	GVA
2010-06-18	20:35:39	1	13.71	77	22.07	0.39	-1.74	0.3	6	342	1.8	0.02	0.1	0.4	C1	GVA
2010-06-18	20:35:42	1	13.51	77	22.1	1.48	-1.24	0.5	8	297	1.8	0.06	0.4	0.7	C1	GVA
2010-06-18	20:35:45	1	13.51	77	22.07	2.28	1.41	1.2	10	293	1.7	0.05	0.3	0.2	C1	GVA
2010-06-19	04:55:46	1	13.8	77	20.84	3.3	0	-0.2	10	168	0.4	0.05	0.4	0.2	B1	GVA
2010-06-19	10:08:52	1	13.71	77	21.96	0.5	0.03	0.1	9	293	1.6	0.05	0.2	0.6	C1	GHD
2010-06-19	22:11:13	1	13.33	77	21.82	0.14	0.12	0.1	10	274	1.2	0.03	0.1	0.8	C1	GHD
2010-06-20	06:43:35	1	15.12	77	15.73	14.5	0.26	0.3	15	305	9.3	0.08	1.1	0.8	C1	GVA
2010-06-20	07:14:52	1	15.3	77	18.02	15.84	0.62	0.3	9	291	5.9	0.02	0.6	0.3	C1	GVA
2010-06-21	06:22:44	1	21.34	77	26.38	14.35	0.22	0.4	12	337	13	0.09	1.5	2	C1	GVA
2010-06-21	15:54:48	1	13.45	77	21.27	2.58	-1.46	0	6	237	0.3	0.13	1.7	0.5	C1	GVA
2010-06-21	16:57:25	1	13.14	77	20.21	4.32	-0.13	0.1	7	248	0.3	0.02	0.4	0.2	C1	GVA
2010-06-21	21:55:01	1	13.17	77	21.38	1.61	-0.1	0.3	6	218	0.5	0.03	0.4	0.5	C1	GVA
2010-06-22	00:08:35	1	13.61	77	21.7	0.36	0.29	0.1	6	333	1.1	0.03	0.2	0.4	C1	GHD
2010-06-22	00:39:40	1	13.12	77	21.47	0.49	0.67	1.1	13	169	0.7	0.13	0.3	0.6	B1	GHD
2010-06-22	20:31:43	1	13.25	77	21.37	1.16	-0.4	0.6	9	191	0.4	0.09	0.4	0.4	C1	GHD
2010-06-23	15:24:01	1	12.8	77	23.8	5.54	-0.08	0.1	11	174	2.6	0.07	0.5	0.4	B1	GVA
2010-06-23	22:36:33	1	12.11	77	23.99	6.45	0.84	0.2	16	166	1.9	0.09	0.4	0.4	B1	GVA
2010-06-24	08:54:09	1	13.5	77	21.93	0.67	-0.18	0.7	9	285	1.4	0.05	0.4	0.7	C1	GHD
2010-06-24	15:57:21	1	13.3	77	21.63	2.96	0.95	1.4	14	98	0.9	0.04	0.1	0.2	B1	GVA
2010-06-24	21:29:05	1	13.46	77	21.96	0.71	0.1	0.2	8	286	1.5	0.02	0.1	0.3	C1	GHD
2010-06-25	05:40:40	1	14.81	77	20.69	6.57	0.56	1	14	200	2.2	0.14	0.5	0.5	C1	GVA
2010-06-25	06:35:55	1	14.93	77	20.48	6.72	0.16	0.9	14	212	2.5	0.12	0.5	0.4	C1	GVA
2010-06-26	00:25:54	1	10.93	77	24.21	6.73	0.34	0.3	13	241	3.6	0.06	0.4	0.3	C1	GVA
2010-06-26	00:27:25	1	13.11	77	21.41	0.25	1.23	1.4	12	162	0.6	0.09	0.2	0.8	B1	GHD
2010-06-26	05:47:56	1	13.24	77	21.68	0.31	0.51	0.2	9	259	1	0.03	0.2	0.4	C1	GHD
2010-06-26	12:15:06	1	13.3	77	21.67	0.87	1.47	1.4	8	261	0.9	0.04	0.4	0.2	C1	GHD
2010-06-26	17:34:54	1	13.33	77	21.68	2.26	0.6	1.1	9	188	0.9	0.11	0.6	0.6	C1	GHD
2010-06-26	22:02:02	1	11.47	77	25.08	1.32	1.43	0.1	6	351	8	0.07	0.9	4.4	C1	GHD
2010-06-27	05:16:55	1	12.51	77	23.01	1.22	0.31	0.4	6	344	3.7	0.06	1.3	3.4	C1	GHD
2010-06-27	09:28:18	1	13.4	77	21.78	0.14	0.23	0.4	10	273	1.1	0.02	0.1	0.7	C1	GHD
2010-06-27	17:56:16	1	15.19	77	19.32	4.94	0.07	-0.1	5	338	3.9	0.05	0.6	0.5	C1	GHD
2010-06-28	03:42:09	1	16.02	77	19.35	10.44	0.54	0.4	12	284	4.5	0.05	0.5	0.4	C1	GVA
2010-06-28	03:47:33	1	14.6	77	19.83	8.02	0.78	0.9	17	225	2.5	0.07	0.4	0.3	C1	GVA
2010-06-28	21:10:08	1	12.79	77	21.3	2	0.17	0.3	11	136	0.7	0.04	0.1	0.1	B1	GVA
2010-06-29	18:24:50	1	13.36	77	21.81	0.85	1.02	0.5	6	274	1.2	0.03	0.5	0.6	C1	GHD
2010-06-29	23:24:47	1	14.79	77	20.22	8.49	0.93	1.6	14	217	2.4	0.08	0.5	0.4	C1	GVA

2.2 VOLCÁN DOÑA JUANA

El Volcán Doña Juana se localiza en la Cordillera Central en el sector nor-oriental del Departamento de Nariño, con coordenadas $1^{\circ}30,31' N$ y $76^{\circ}56,17' W$ y una altura de 4250 m sobre el nivel del mar, en el dominio de los municipios de La Cruz, San Bernardo, Tablón de Gómez en Nariño y los municipios de Bolívar y Santa Rosa en el Cauca.

Es considerado como un estrato volcán andesítico, con un cráter de diámetro, cercano a 4 km, sin glaciares y en el cual se encuentran varios domos de lava (Figura 2.2.1 y 2.2.2).

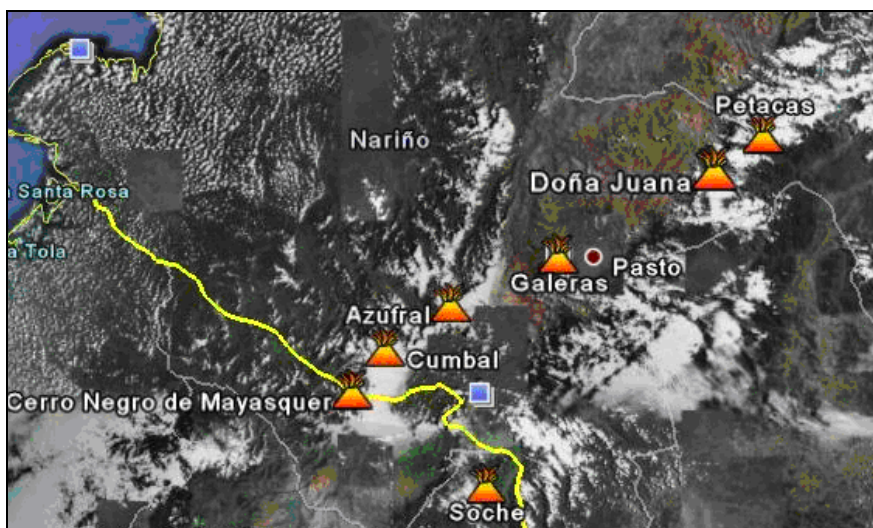


Figura 2.2.1. Imagen tomada de Google Earth en donde se observan algunos volcanes del sur de Colombia y del norte del Ecuador, entre ellos están Doña Juana, Galeras, Azufral y Cumbal, monitoreados por el OVSP - INGEOMINAS.



Figura 2.2.2. Imagen de la cima del volcán Doña Juana.



Libertad y Orden

Sus depósitos son asociados con flujos de lava, flujos piroclásticos y cenizas. La amenaza que la actividad de este volcán puede acarrear, se relaciona con la ocurrencia de flujos piroclásticos, flujos de lodo o lahares y caídas de ceniza.

2.2.1 Red de vigilancia

Durante el Primer Semestre de 2010, la red de vigilancia de Doña Juana estuvo conformada por:

- Tres estaciones sísmicas telemétricas triaxiales: dos de Corto Periodo y una de Banda Ancha (Tabla 2.2.1, Figura 2.2.3). La recepción de la información que detectan estas estaciones en la sede del OVSP, se realiza a través de una red telemétrica tipo punto a punto con dos repetidoras instaladas en los cerros Morasurco y Cruz de Amarillo (Figura 2.2.4). La información de las estaciones de banda ancha tanto de este volcán, como, de los volcanes Cumbal y Azufral se concentra en la repetidora Cruz de Amarillo, mediante una unidad DCM, la cual optimiza el uso de equipo para radio telemetría.
- Dos inclinómetros electrónicos telemétricos (Tabla 2.2.1, Figura 2.2.3). La transmisión de los datos se realiza usando una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para los inclinómetros instalados en el departamento de Nariño.

Las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Doña Juana, tuvieron un funcionamiento total del 58% (Figura 2.2.5). No se tuvo un 100% de funcionamiento, debido principalmente a los problemas presentados en las estaciones de inclinometría electrónica de Páramo y Lavas, cabe destacar que se cambió tanto el criterio de evaluación del funcionamiento de las estaciones, donde se evalúa más que la telemetría de la estación, la utilidad del dato para el monitoreo del volcán. A continuación se relaciona el funcionamiento de cada estación:

- La estación de corto período Lavas, la mayor parte del tiempo, envió la información solo por la componente vertical por ello su porcentaje de operación llegó al 27% debido a interferencias que afectaron la calidad de la señal a causa de problemas de radio-enlace.
- La estación Florida, que tiene instalado un sismómetro de corto período, tuvo un porcentaje de funcionamiento del 43%; debido también a que solo se tiene la mayor parte del tiempo señal solo de su componente vertical.
- La estación sismológica de banda ancha Páramo tuvo un porcentaje de funcionamiento del 74%, debido a problemas en el radio-enlace y al programa de adquisición de SCREAM.
- El porcentaje de funcionamiento de los inclinómetros electrónicos Páramo y Florida fue del 53% y 98% respectivamente. Se hizo necesario retirar el radio y la tarjeta del inclinómetro, debido a fallas en la comunicación para revisión en sede y se reinstalará en la próxima visita a Páramo.

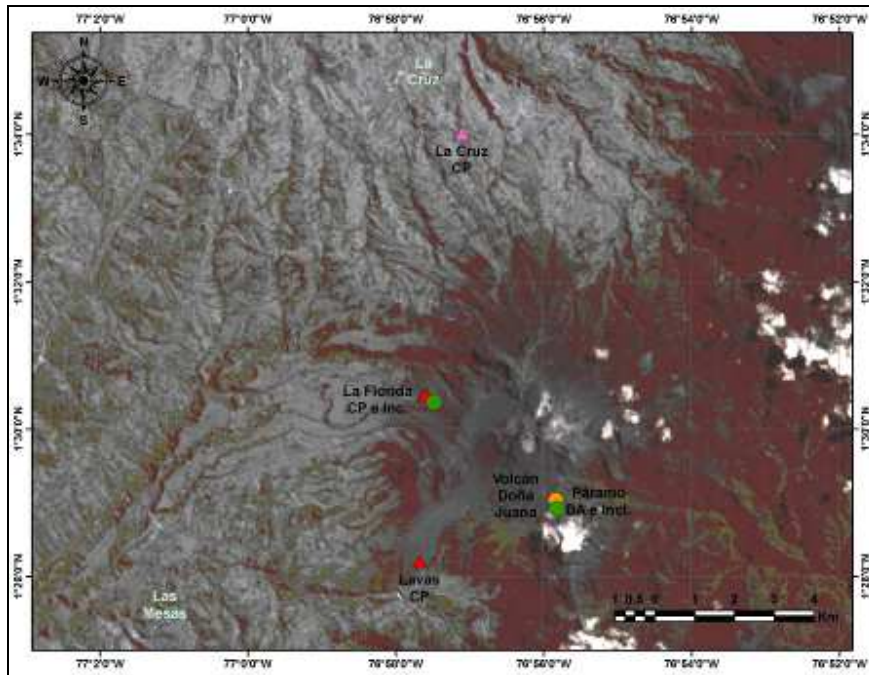


Figura 2.2.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el Primer Semestre de 2010.

Tabla 2.2.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Doña Juana durante el primer semestre de 2010.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia a los domos (km)	Dirección respecto al cráter	Altitud (msnm)
Lavas	Analógica	Sismómetro Corto Período	Triaxial	4.10	SW	2954
Páramo	Digital	Sismómetro Banda Ancha	Triaxial	2.10	SE	3533
Florida	Analógica	Sismómetro Corto Período	Triaxial	2.30	W	3154
I. Páramo	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial	2.10	SE	3533
I. Florida	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial	2.30	W	3154

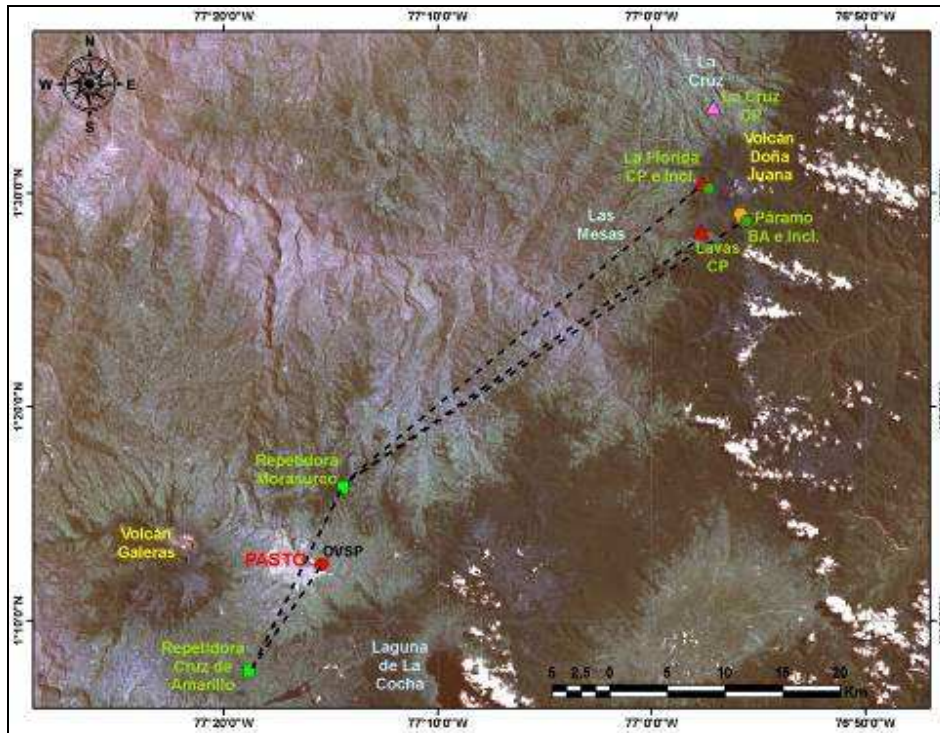


Figura 2.2.4. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana durante el primer semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos. Los triángulos rojos representan estaciones sísmicas de corto periodo; el triángulo magenta, una estación sísmica de corto periodo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC); el hexágono naranja, una estación sísmica de banda ancha; los círculos verdes, inclinómetros electrónicos; y los cuadros verdes, estaciones repetidoras.

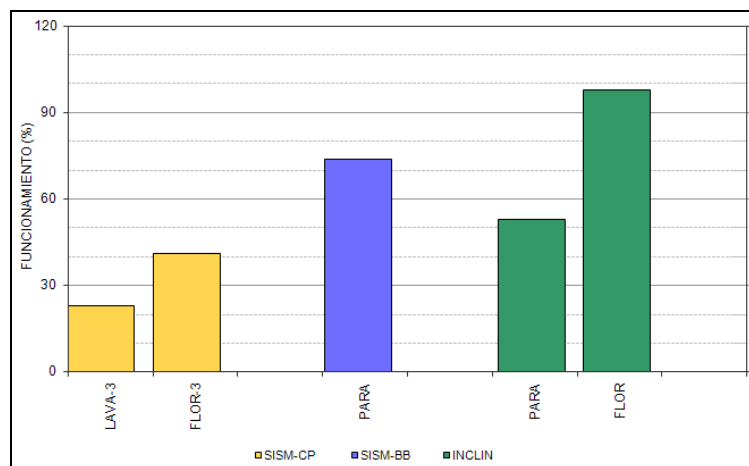


Figura 2.2.5. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el primer semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Doña Juana.

2.2.2 Sismología

Durante el Primer Semestre de 2010, la sismicidad del volcán Doña Juana estuvo dominada por la ocurrencia de eventos asociados con fracturamiento de material cortical al interior del sistema volcánico, seguidos por los eventos volcánicos – VOL, sismos que se registran en la zona de influencia del edificio volcánico, cuya fuente puede estar asociada con procesos volcánicos, pero que no es fácil catalogarlos dentro de alguno de los grupos mencionados. Estos sismos serán analizados con mayor detalle cuando se demarque una línea base suficientemente amplia de información y luego de analizar un volumen suficiente de registros, serán agrupados de acuerdo con sus características y de acuerdo a los procesos que los estén generando.

En total se registraron 1512 sismos. Se destaca la ausencia, de eventos relacionados a procesos de movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico, donde la fuente es más sostenida (TRE), así como también, de eventos mixtos relacionados con procesos de movimiento del material fluido y fractura de la roca encajante (HYB). Adicionalmente, se resalta que entre febrero y marzo, fue cuando se tuvo el mayor registro de sismos (Figura 2.2.6).

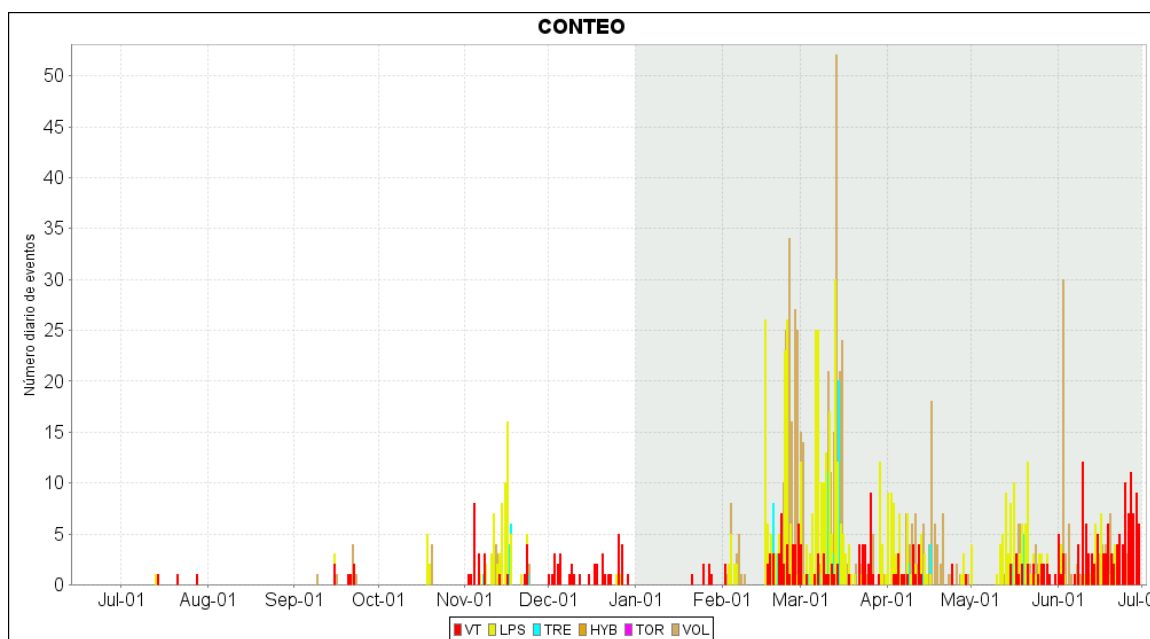


Figura 2.2.6. Histograma del número de eventos volcánicos por tipo, ocurridos entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010, para el volcán Doña Juana. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

De la sismicidad registrada en Doña Juana, durante el Primer Semestre de 2010, se destaca la ocurrencia de algunos eventos a manera de pulsos de mayor energía embebidos en la señal continua de tiempo, los cuales se registraron en las estaciones sísmicas Florida y Lavas.

El primer episodio de estos pulsos se registró el 16 de abril desde las 11:29 a.m. hasta las 11:33 a.m. (Figura 2.2.7). Los eventos presentaron una banda espectral amplia (Figura 2.2.8).

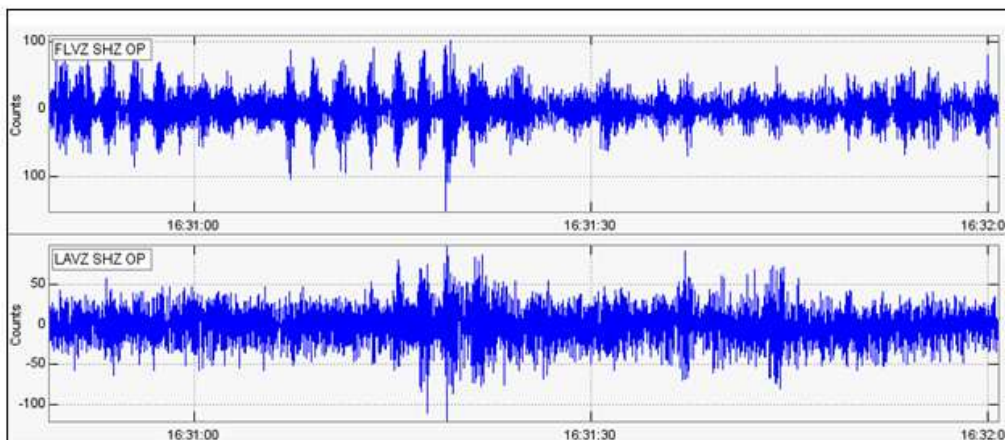


Figura 2.2.7. Registro del episodio de pulsos, en las estaciones Florida y Lavas, en la componente vertical, registrado entre las 11:29 a.m. y las 11:33 a.m., del 16 de abril de 2010.

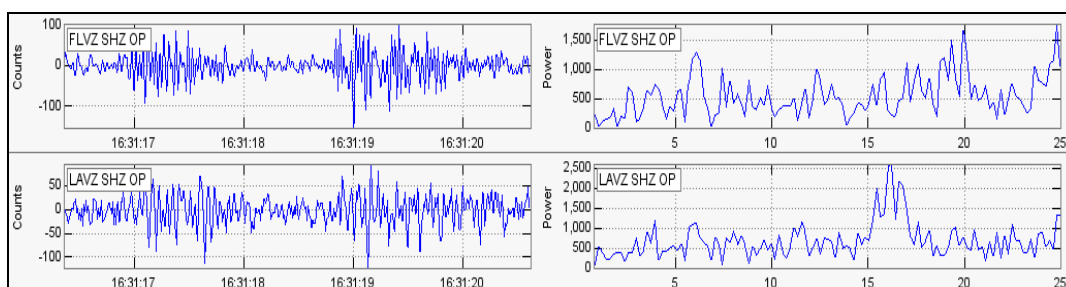


Figura 2.2.8. Sismogramas y espectros en frecuencia de los pulsos registrados el 16 de abril de 2010, registrado entre las 11:29 a.m. y las 11:33 a.m.

El segundo episodio se registró el mismo día entre las 11:44 a.m. y las 11:54 a.m. (Figuras 2.2.9 y 2.2.10).

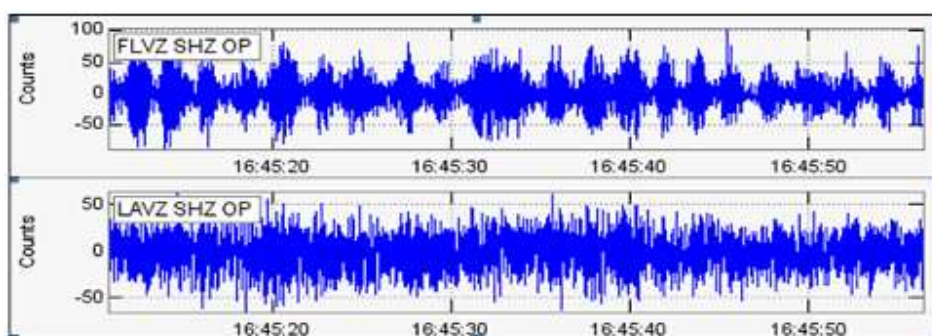


Figura 2.2.9. Registro del episodio de pulsos, en las estaciones Florida y Lavas, en la componente vertical, registrado entre las 11:44 a.m. y las 11:54 a.m., del 16 de abril de 2010.

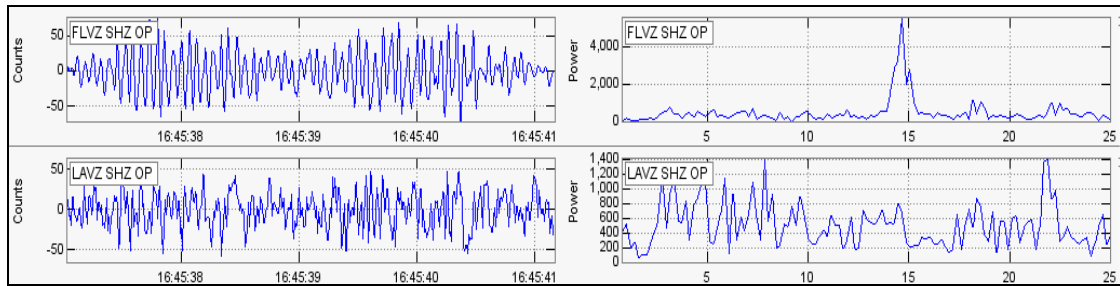


Figura 2.2.10. Sismogramas y espectros en frecuencia de los pulsos registrados el 16 de abril de 2010, registrado entre las 11:44 a.m. y las 11:54 a.m.

El tercer episodio se registró entre las 12:01 p.m. y las 12:03 p.m., y solo se registró en la componente vertical de la estación sísmica Florida.

El cuarto episodio se registró entre las 12:08 p.m. y las 12:10 p.m., de igual manera, solo se registró en la componente vertical de la estación Florida.

A manera de ejemplos de la sismicidad del volcán Doña Juana, en las figuras de la 2.2.11 a 2.2.14, se muestran registros que asociados con actividad de este volcán, junto con su espectro de Fourier.

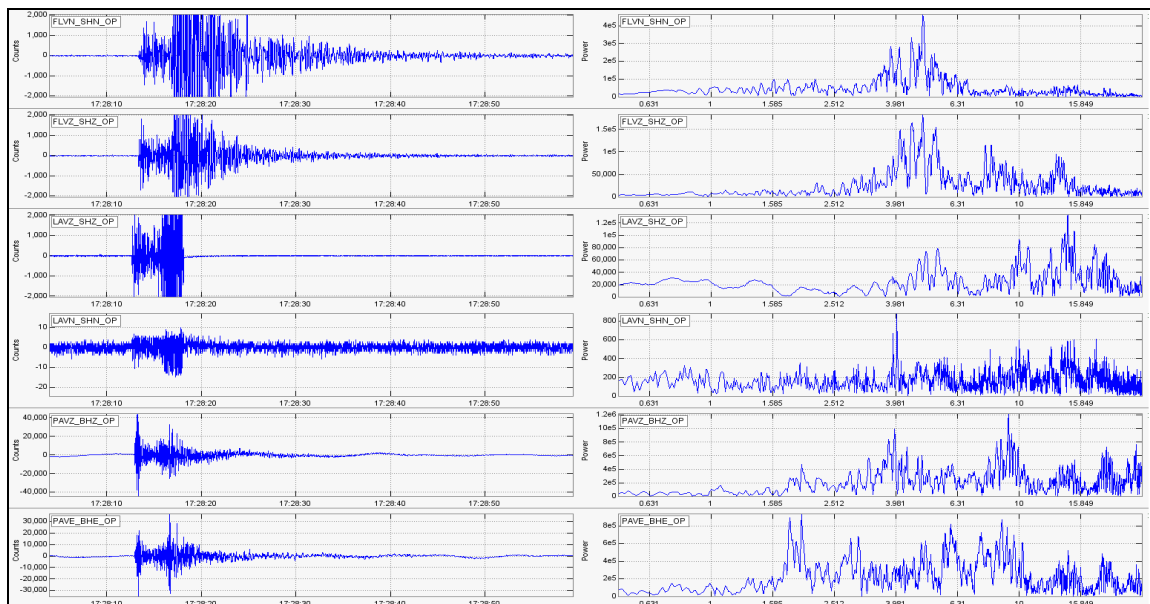


Figura 2.2.11. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, registrado el 12 de marzo a las 12:28 p.m. Estos registros en algunas estaciones de monitoreo de Doña Juana, se encuentran saturados, lo que significa que el nivel energético del evento sísmico sobrepasa el rango de amplitud que la estación puede tolerar.

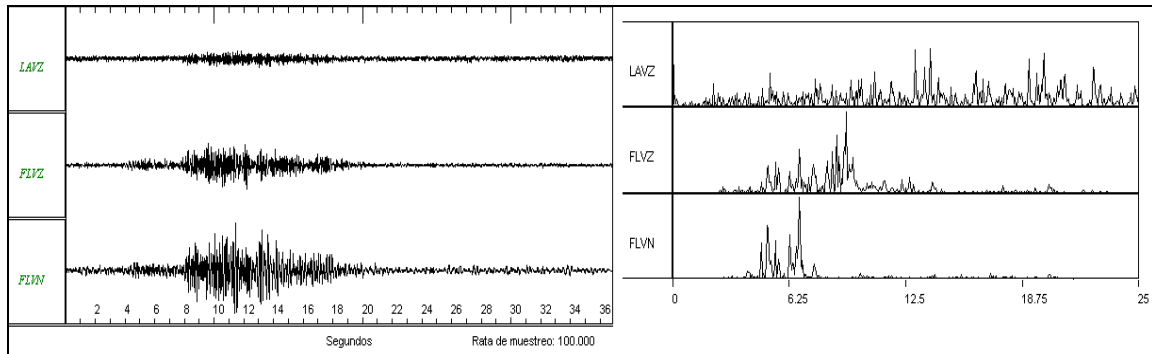


Figura 2.2.12. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 13 de marzo a las 6:45 p.m., en las estaciones de monitoreo del volcán Doña Juana.

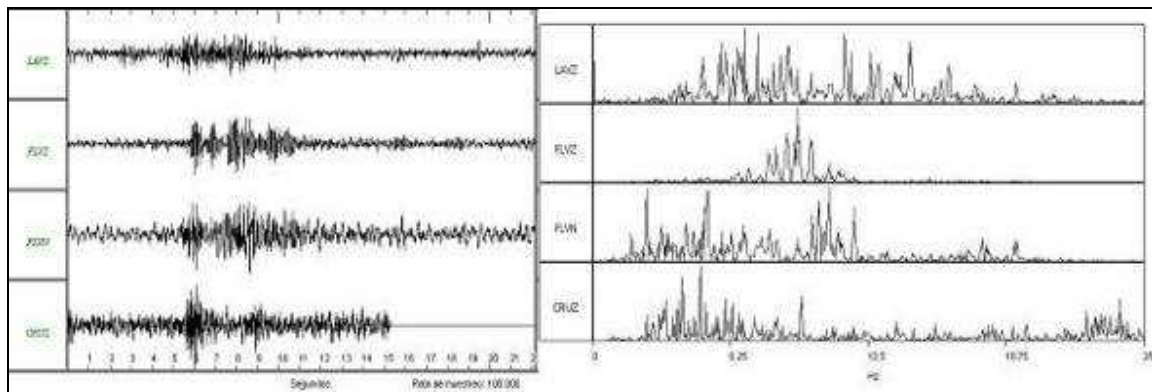


Figura 2.2.13. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VC, ocurrido el 11 de mayo de 2010, a las 6:39 p.m., registrado en las estaciones de monitoreo del volcán Doña Juana.

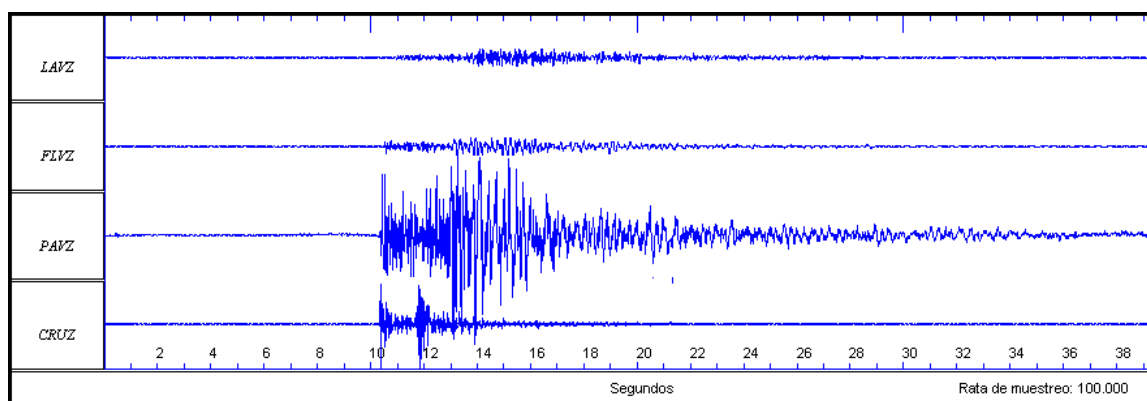


Figura 2.2.14. Sismogramas del evento tipo VT, registrado el 25 de junio de 2010 a las 7:02 a.m., por las componentes vertical de la estación Lavas, Florida, Páramo y la Cruz.

Respecto a la sismicidad asociada con fracturamiento de material cortical al interior del edificio volcánico, eventos VT, en el transcurso del Primer Semestre de 2010, haciendo uso del programa HYP071 fue posible obtener una solución de localización para 99 sismos. Aclarando que no fue posible localizar algunos de los eventos clasificados como VT por problemas de cobertura de la red de monitoreo sísmico.

Los eventos se ubicaron a diferentes distancias epicentrales del cráter, entre 4 y 15 km., (Figura 2.2.15, anexo 2), la mayoría de los eventos se encuentran concentrados hacia el sector noreste del cono activo, al sur del volcán Animas. Las magnitudes locales de estos sismos fluctuaron entre -0.3 y 2.3 en la escala de Richter. El 67% de los eventos mostró magnitudes menores a 1 en la escala de Richter.

Los sismos localizados mostraron profundidades entre 2 y 16 km., tomando como referencia la cima de Doña Juana. El 55% de los eventos localizados tuvieron profundidad entre 6 y 7 km., con respecto a la cima volcánica (Anexo 2).

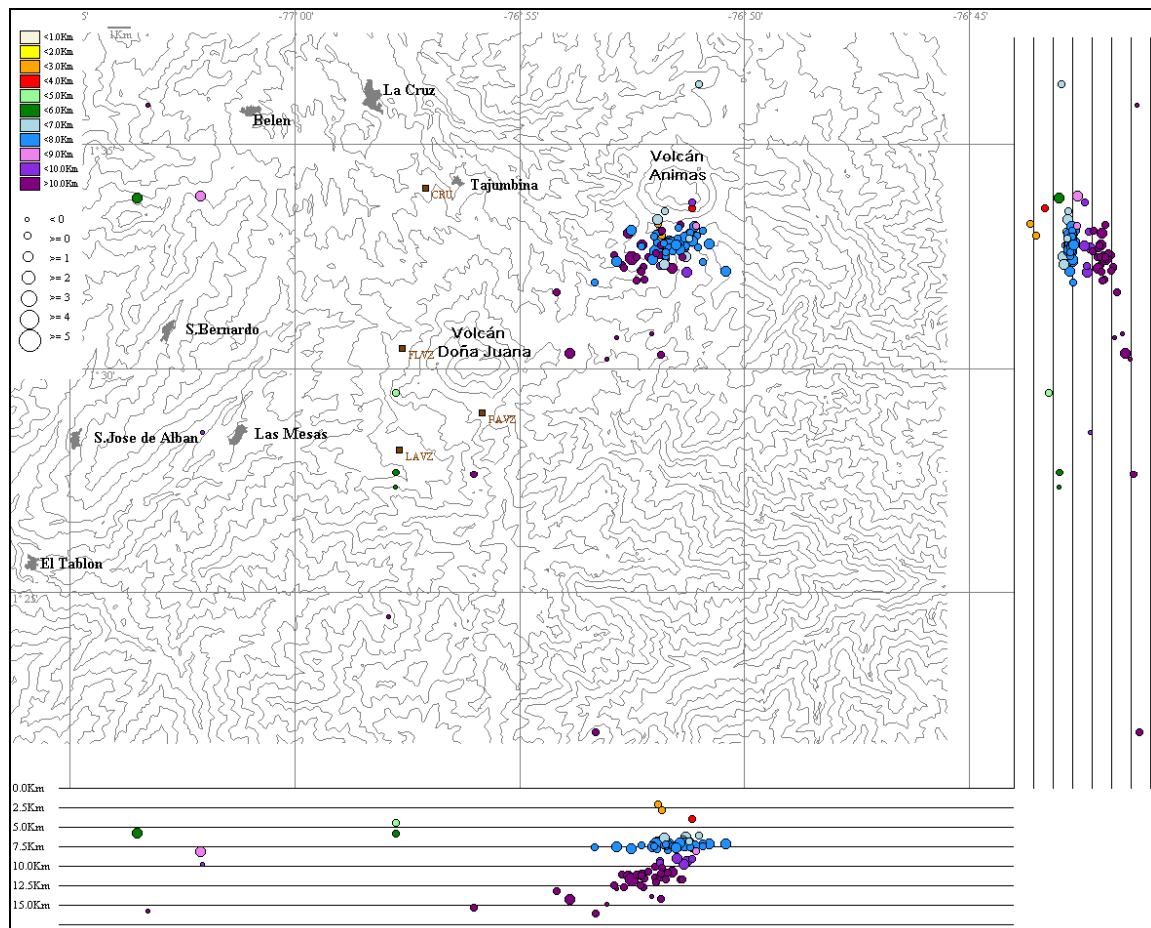


Figura 2.2.15. Localización epicentral e hipocentral de los sismos de fractura registrados por algunas estaciones de la red de monitoreo de Doña Juana, en el mes de septiembre de 2010, con sus respectivos cortes N-S (derecha) y E-W (abajo). En los cortes cada línea representa 2 km., de profundidad con respecto a la cima volcánica, el color de los círculos depende de su profundidad.

2.2.3 Deformación

De la información relacionada con procesos de deformación del edificio volcánico, suministrada por los inclinómetros electrónicos se resalta que:

El inclinómetro electrónico Florida (ubicado a 2.3 km., al oeste de los domos, 3154 msnm), tanto para la componente Radial, como Tangencial, se observó comportamiento relativamente estables, hasta el mes de abril de 2010, donde se observó grandes variaciones, las cuales al parecer, fueron provocadas por bastante humedad en el sensor, ya que luego de una revisión se lo encontró lleno de agua. (Figura 2.2.16).

Para el inclinómetro Páramo (ubicado a 2.1 km., al sur-este de los domos, 3533 msnm), para el Primer Semestre de 2010, la componente Radial, continuo su comportamiento descendente, mostrado desde el mes de octubre de 2009, cuya variación es de 28 μ rad, mientras que su componente Tangencial, se observó estabilidad (Figura 2.2.17).

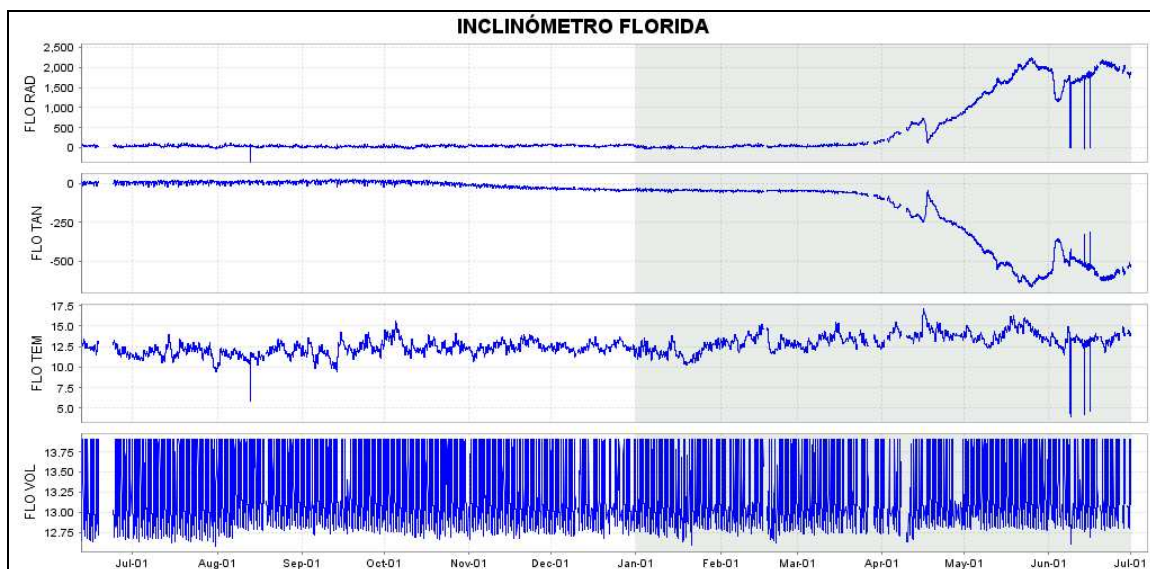


Figura 2.1.16. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Florida, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.

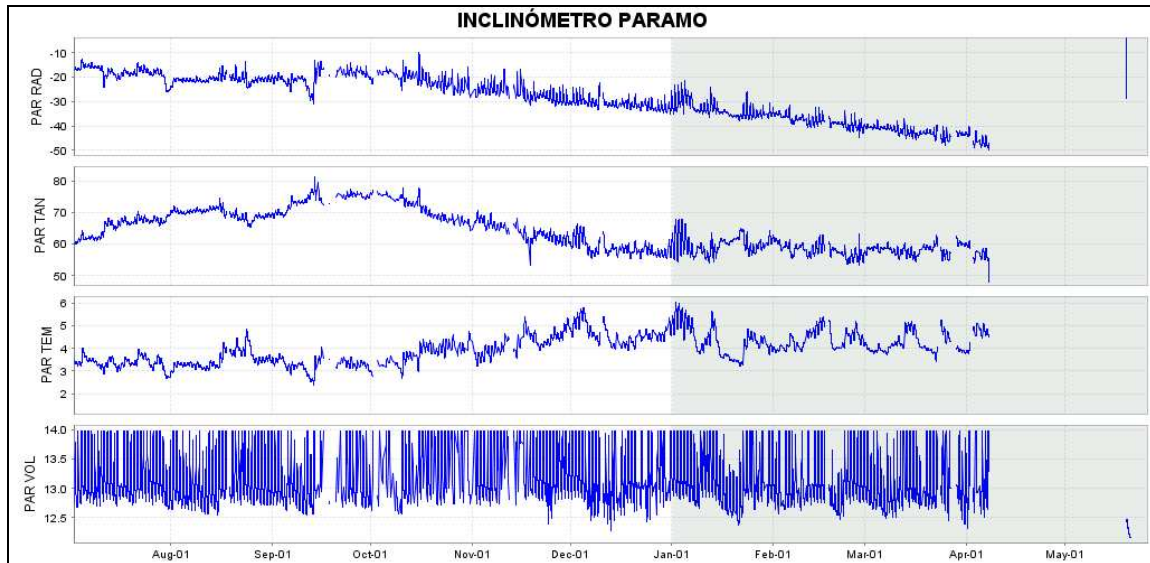


Figura 2.2.17. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Paramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 julio de 2009 y el 7 de abril de 2010 (fecha en la cual se retiró el equipo para revisión en sede).
El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.

2.2.4 Actividad superficial

El único reporte de actividad superficial que se tiene del volcán Doña Juana, se describe a continuación:

El día 2 de enero, después de la erupción del volcán Galeras, se recibieron reportes de emisión en el volcán Doña Juana (localizado al nororiente del Departamento de Nariño), por esta razón el 3 de enero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (Helicóptero Huey II), se realizó un sobrevuelo donde fue posible registrar imágenes de la cima del volcán Doña Juana (Figura 2.2.18), sin encontrar novedades en actividad superficial.



Figura 2.2.18. Registro fotográfico tomados durante el sobrevuelo a la zona de influencia de Doña Juana, el cual se realizó en horas de la mañana del 3 de enero de 2010 con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

2.2.5. Conclusiones

- Las estaciones instaladas en el volcán Doña Juana, permiten obtener el registro de señales que se pueden catalogar como volcánicas. De acuerdo a la forma de onda y al contenido frecuencial, algunos de estos sismos corresponden a eventos asociados con fracturamiento de material cortical. Se resalta la ocurrencia de eventos relacionados con movimiento de fluidos al interior del edificio volcánico.
- La mayor parte de los sismos registrados corresponden a eventos asociados con fracturamiento de material cortical al interior del sistema volcánico, cuya profundidad esta alrededor de los 7 km., con respecto a la cima volcánica, concentrados hacia el sector noreste del edificio volcánico a distancias epicentrales cercanas a los 10 km.
- La evaluación de los parámetros monitoreados durante el Primer Semestre de 2010, han mostrado que existe actividad volcánica con un comportamiento relativamente estable, lo que permite establecer el **NIVEL (IV) VERDE ●** : “**Volcán activo y comportamiento estable**”.



Continuación. Anexo 2. Parámetros de las localizaciones obtenidos (empleando el método de Geiger, implementado por el programa HYPO71) a partir de los registros sísmicos de los principales eventos Vulcano-tectónicos registrados durante el Primer Semestre de 2010, en Doña Juana.

FECHA	HORA LOCAL	LATITUD °N		LONGITUD °W		PROF. KM	MAGNITUD		No. FASES	GAP	Dist-Min KM	RMS	ERH	ERZ	CALIDAD	TIPO EVENTO
		grados	minutos	grados	minutos		Md	ML								
100625	1:19	1	32.84	-76	-51.7	7.96	0.73	0.2	6	305	10.2	0.04	1.3	1.1	C1	JVA
100625	1:29	1	33.07	-76	-51.82	10.19	0.72	0.3	6	304	9.9	0.02	0.4	0.8	C1	JVA
100625	5:14	1	32.27	-76	-52.24	12.65	1.38	0.9	6	298	8.9	0.02	0.7	0.7	C1	JVA
100625	7:02	1	32.93	-76	-51.32	7.48	2.36	1.9	8	308	10.8	0.09	0.8	0.2	C1	JVA
100625	10:08	1	32.19	-76	-52.31	12.46	0.98	0.6	6	297	8.8	0.01	0.4	0.4	C1	JVA
100625	10:47	1	32.77	-76	-51.65	7.2	2.05	1.1	8	305	10.3	0.07	0.6	0.2	C1	JVA
100625	11:43	1	33.03	-76	-51.2	7.5	0.72	0.5	6	309	11	0.02	0.2	0.1	C1	JVA
100626	4:07	1	33.72	-76	-51.16	9	0.35	0.4	3	312	11	0.02			C1	JVA
100626	6:52	1	32.54	-76	-51.87	11.49	0.96	0.6	6	302	9.8	0	0.1	0.1	C1	JVA
100626	13:14	1	32.5	-76	-52.39	11.11	0.77	0.6	6	297	9	0.03	0.8	1	C1	JVA
100626	14:54	1	32.9	-76	-51.49	7.61	1.01	0.7	6	307	10.6	0.03	0.3	0.1	C1	JVA
100626	16:04	1	32.46	-76	-51.75	11.67	1.44	0.8	6	303	9.9	0.03	0.8	1.1	C1	JVA
100626	23:16	1	32.52	-76	-51.74	7.16	1.24	0.9	8	304	9.9	0.13	1.1	0.4	C1	JVA
100626	23:20	1	27.68	-76	-57.77	5.82	0.79	0.2	8	308	1	0.08	0.7	0.5	C1	JVA
100627	4:20	1	32.18	-76	-52.29	11.2	0.74	0.2	5	297	8.8	0.01	0.8	0.8	C1	JVA
100627	5:23	1	32.59	-76	-51.97	12.08	0.98	0.4	6	301	9.7	0.02	0.7	0.8	C1	JVA
100627	6:34	1	32.65	-76	-51.41	7.01	1.43	1.1	8	307	10.6	0.07	0.6	0.2	C1	JVA
100627	13:51	1	33.07	-76	-50.92	7.39	1.23	0.4	6	312	11.5	0.03	0.4	0.1	C1	JVA
100628	5:12	1	32.49	-76	-51.38	11.69	1.36	0.2	6	307	10.4	0.04	1.2	1.7	C1	JVA
100628	10:33	1	32.7	-76	-51.69	10.82	1.21	0.8	6	305	10.2	0.02	0.5	0.7	C1	JVA
100628	12:40	1	32.74	-76	-51.74	7.48	1.7	0.4	8	304	10.2	0.07	0.4	0.1	C1	JVA
100628	17:07	1	32.75	-76	-51.85	10.95	0.8	0.3	6	303	10	0.03	0.7	1.1	C1	JVA
100628	20:18	1	32.73	-76	-52.29	7.27	0.56	0.7	7	298	9.2	0.1	1.5	2.1	C1	JVA
100628	22:38	1	32.72	-76	-51.67	7.16	1.16	0.9	8	305	10.3	0.08	0.7	0.2	C1	JVA
100629	1:47	1	32.95	-76	-52.01	7.44	0.99	0.8	7	302	9.6	0.03	0.3	0.1	C1	JVA
100629	2:42	1	32.62	-76	-51.6	7.41	1.11	0.6	8	305	10.3	0.05	0.5	0.2	C1	JVA
100629	5:22	1	32.79	-76	-51.79	7.32	1.03	0.8	8	304	10	0.07	0.6	0.2	C1	JVA
100629	5:42	1	32.32	-76	-51.77	6.43	1.73	1	8	303	9.7	0.02	0.2	0.3	C1	JVA
100629	6:10	1	32.61	-76	-51.75	7.2	1.23	0.8	8	304	10	0.08	0.6	0.2	C1	JVA
100630	6:02	1	32.76	-76	-51.51	7.71	0.23	1.2	8	306	10.6	0.05	0.5	0.1	C1	JVA
100630	9:45	1	32.91	-76	-51.22	6.86	0.72	0.6	8	309	11	0.07	0.5	1	C1	JVA

2.3 VOLCÁN AZUFRAL

El volcán Azufral es un estrato-volcán, con un cráter de diámetro estimado en 3 km., donde se encuentra una laguna cratérica llamada Laguna Verde (Figura 2.3.1), no registra la presencia de glaciares y sus depósitos están asociados con flujos de lava, flujos piroclásticos de gran magnitud y depósitos de caída (cenizas y pumitas). Este volcán nariñense es considerado como uno de los de mayor explosividad en el territorio Colombiano, resaltándose el potencial que tienen sus depósitos en términos de flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas.

El volcán Azufral se localiza en la cordillera Occidental, al suroriente del Departamento de Nariño (Figura 2.2.1), con una altura máxima de 4070 m sobre el nivel del mar, en los dominios de los municipios de Túquerres, Sapuyes, Mallama y Santa Cruz.



Figura 2.3.1. Panorámica de la laguna cratérica del volcán Azufral. Nótese el domo pequeño de color claro en la parte izquierda de la imagen y detrás de la laguna, los grandes domos. Septiembre 4 de 2008, 12:10 p.m.

2.3.1 Red de vigilancia

Durante el Primer Semestre de 2010, la red de vigilancia del volcán Azufral estuvo conformada por:

- Una estación sísmica telemétrica triaxial de Banda Ancha y una de corto periodo (Tabla 2.3.1, Figura 2.3.2). A través de una red telemétrica tipo punto a punto se recibe la información suministrada por esta estación en la sede del OVSP, usando una repetidora instalada en el cerro Cruz de Amarillo (Figura 2.3.3). La información de las estaciones de Banda Ancha Chaitán y de corto periodo se concentra en la Repetidora Cruz de Amarillo mediante una unidad DCM, la cual optimiza el uso de equipo de telemetría.

- Dos inclinómetros electrónicos telemétricos (Tabla 2.3.1, Figura 2.3.2). La transmisión de los datos se realiza usando una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para los inclinómetros instalados en el departamento de Nariño.

Durante el primer semestre de 2010, las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Azufral tuvieron un funcionamiento total del 64% (Figura 2.3.4). No se tuvo un porcentaje de funcionamiento del 100% debido básicamente a problemas del radio-enlace, principalmente en la estación sismológica de la Roca. A continuación se relaciona el funcionamiento de cada estación:

- La estación sismológica Chaitán presentó un funcionamiento del 88%, el 100% no se alcanzó debido a que esta estación presenta problemas de bloques perdidos debido al radio enlace.
- El porcentaje de funcionamiento del inclinómetro electrónico Chaitán fue del 98%.
- La señal de la estación sismológica de la Roca no ha podido ser detectada por los discriminadores en observatorio, se están evaluando y ensayando soluciones para obtener esta señal.
- El inclinómetro electrónico de la Roca presentó un porcentaje de funcionamiento de 69%.

Tabla 2.3.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia volcánica, del volcán Azufral durante el Primer Semestre de 2010.

Estación	Transmisión de datos	Tipo de Sensor	Componente	Distancia a la laguna (Km)	Ubicación respecto a la laguna	Altitud (msnm)
Chaitán	Digital	Sismómetro de Corto Período	Triaxial	4.3	ENE	3730
La Roca	Análogica	Sismómetro de Banda Ancha	Triaxial			4025
Chaitán	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial	4.3	ENE	3730
La Roca	Digital	Inclinómetro Electrónico	Biaxial			4025

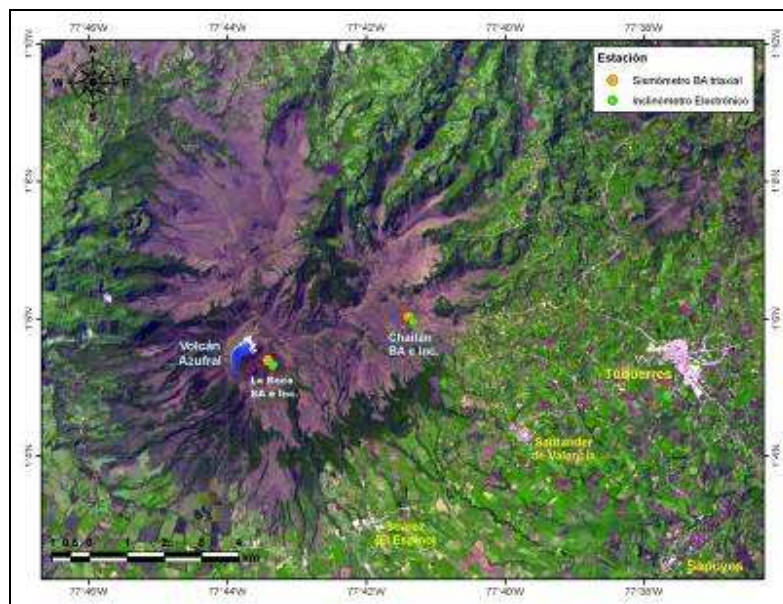


Figura 2.3.2. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral, durante el primer semestre de 2010.

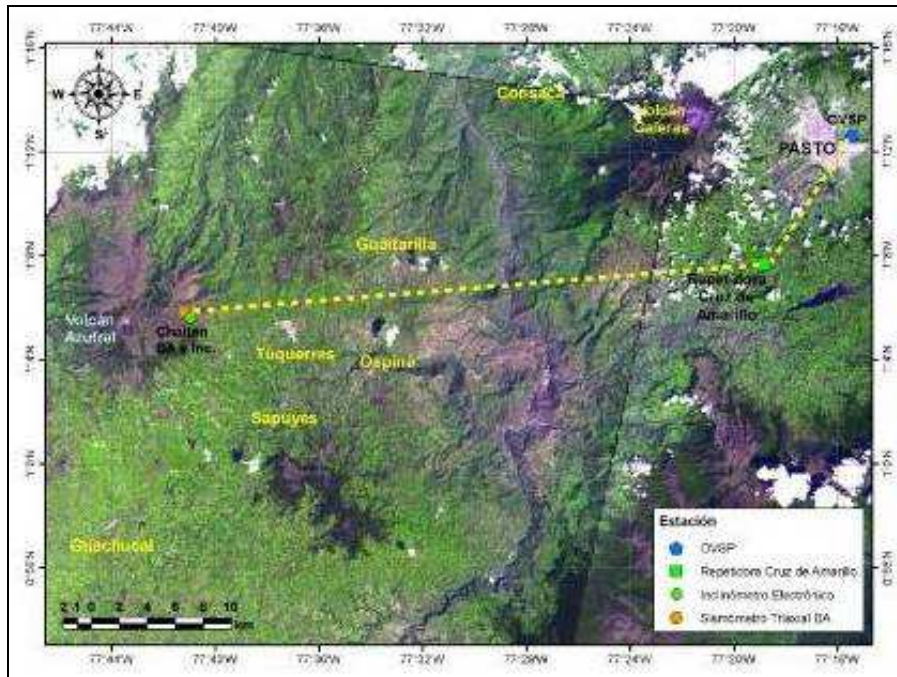


Figura 2.3.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral, durante el primer semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.

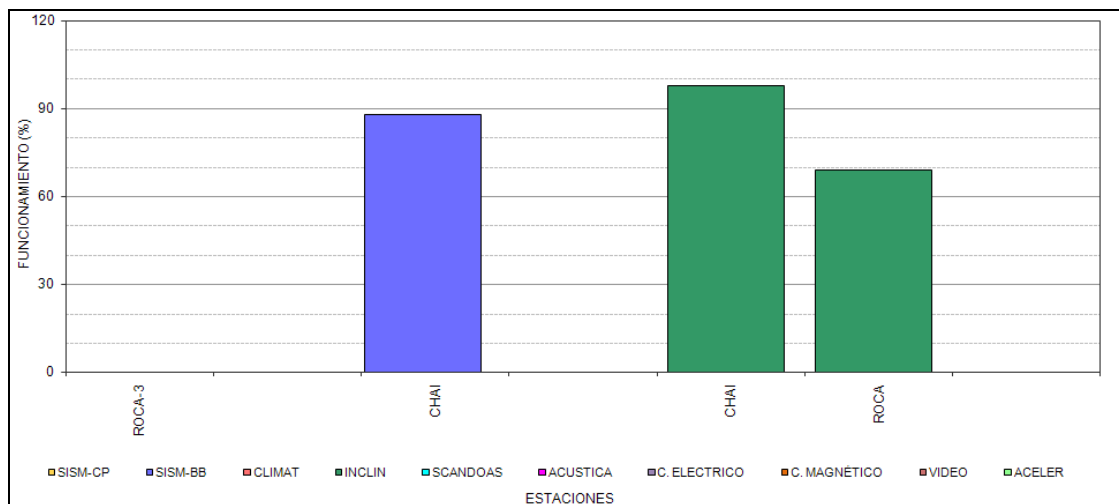


Figura 2.3.4. Histograma del porcentaje de funcionamiento durante el primer semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufral.

2.3.2 Sismología

Durante el Primer Semestre de 2010, para el volcán Azufral en la estación sísmica de monitoreo, se registró en total 1322 sismos volcánicos. El mayor aporte en ocurrencia proviene de los eventos tipo VOL - Volcánico sin clasificar (Figura 2.3.5), sismos que se registran en la zona de influencia del edificio volcánico, cuya fuente puede estar asociada con procesos volcánicos, que por sus características no es fácil clasificar, estos sismos serán analizados con mayor detalle cuando se demarque una línea base suficientemente amplia de clasificación, además se cuenta con el registro de una sola estación sísmica, por lo cual es más difícil su clasificación. De la sismicidad registrada, el 54% corresponde a eventos tipo VOL, el 11% a eventos asociados a fracturamiento de material cortical al interior del edificio volcánico, tipo VT, el 25% a eventos relacionados con movimiento de fluidos, de fuente transitoria en el tiempo, tipo LP y el 9%, eventos asociados con movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico, de fuente persistente en el tiempo, tipo TRE. Además, en la grafica, se observa que en los meses de marzo y abril, fue cuando se tuvo la mayor ocurrencia de sismos.

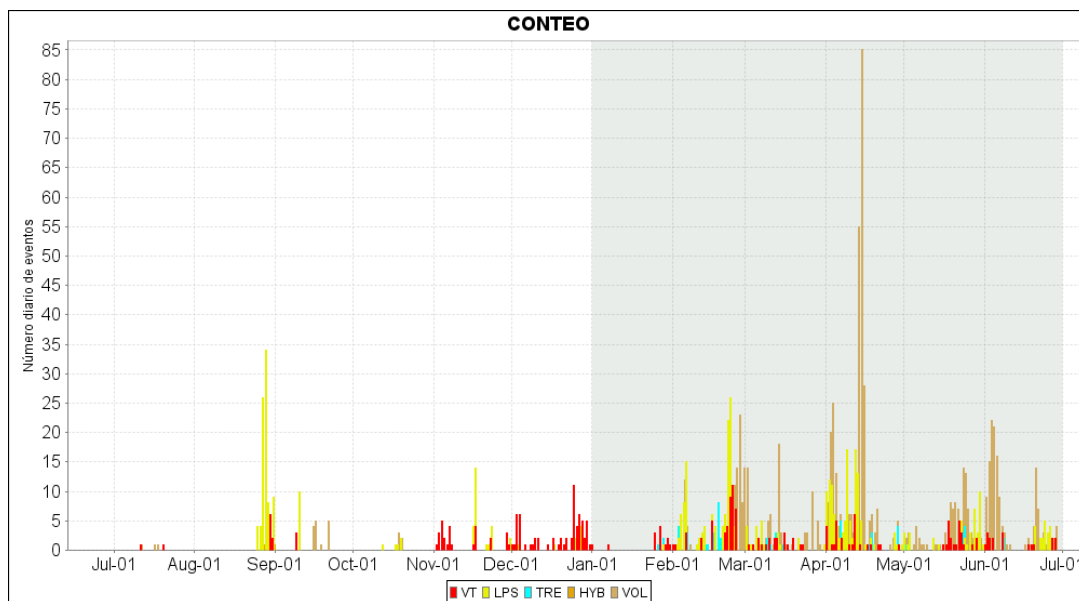


Figura 2.3.5. Histograma del número de eventos volcánicos por tipo, ocurridos entre el 1 de julio del 2009 y el 30 de junio de 2010, para el volcán Azufral. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en el presente informe.

De la sismicidad registrada en el Primer Semestre de 2010, en el volcán Azufra, se resalta que entre los días 5 y 6 de febrero, en la estación sísmica Chaitán se observó unas señales a manera de enjambre (Figura 2.3.6).

En las figuras 2.3.7 a 2.3.11, se presentan algunas señales obtenidas por las estaciones sísmológicas de Azufra, junto con su espectro en frecuencia de Fourier.

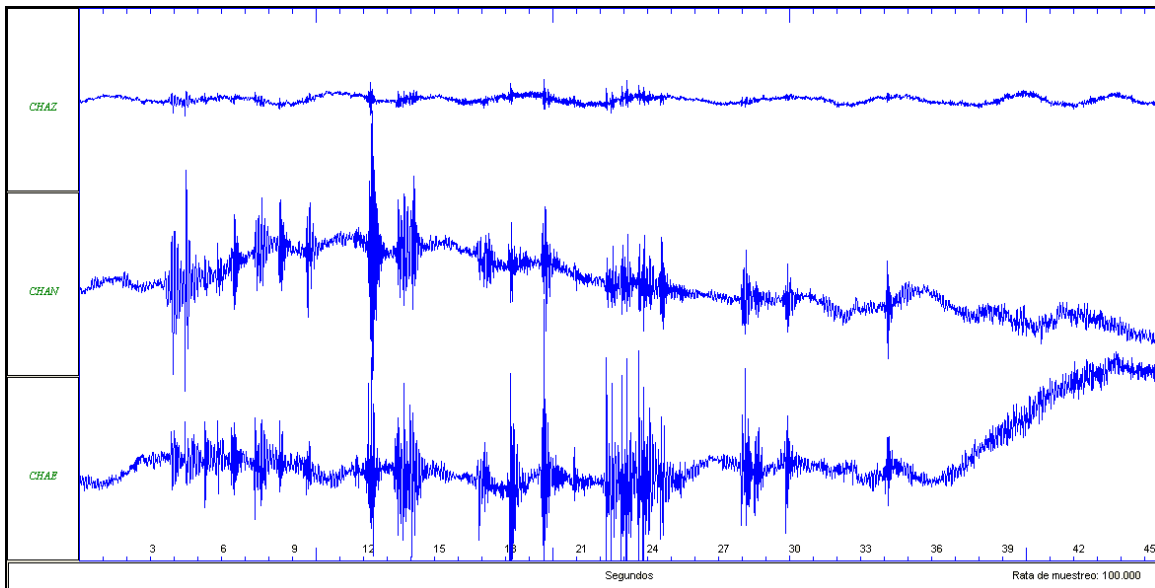


Figura 2.3.6. Sismograma en la estación Chaitán (instalada en Azufra) del enjambre de eventos sísmicos registrados el 5 de febrero a las 09:35 a.m.

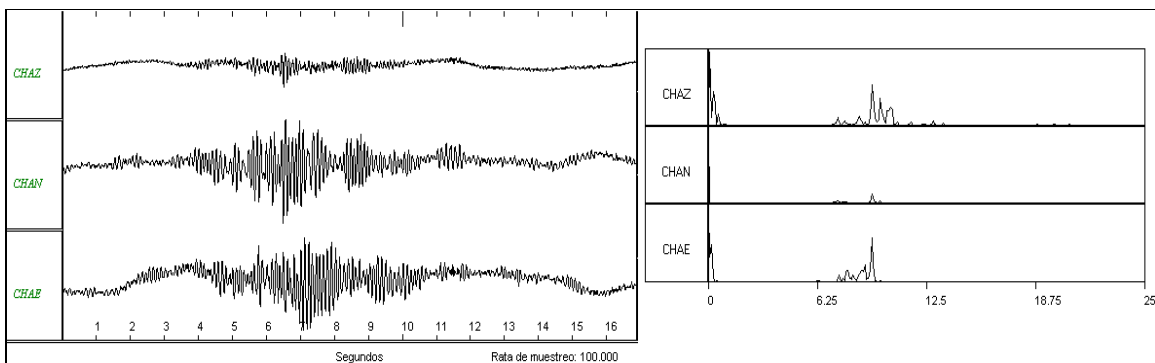


Figura 2.3.7. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo LP, registrado el 1 de marzo a las 9:44 p.m., en la estación sísmica Chaitán instalada en el volcán Azufra.

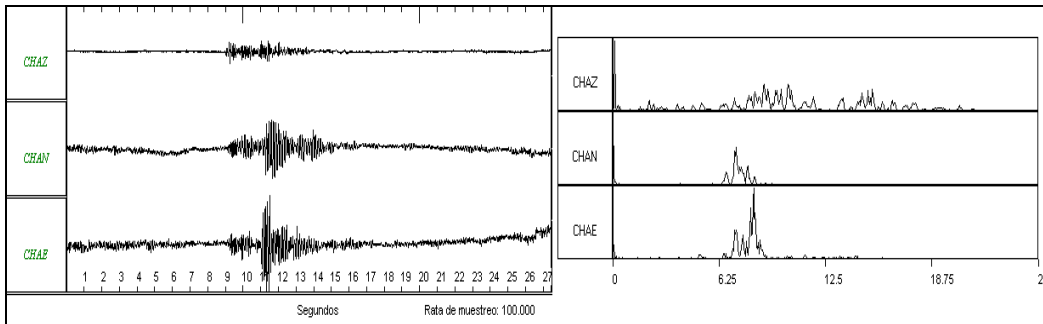


Figura 2.3.8. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VT, registrado el 6 de marzo a las 4:01 p.m., en la estación sísmica Chaitán instalada en el volcán Azufra.

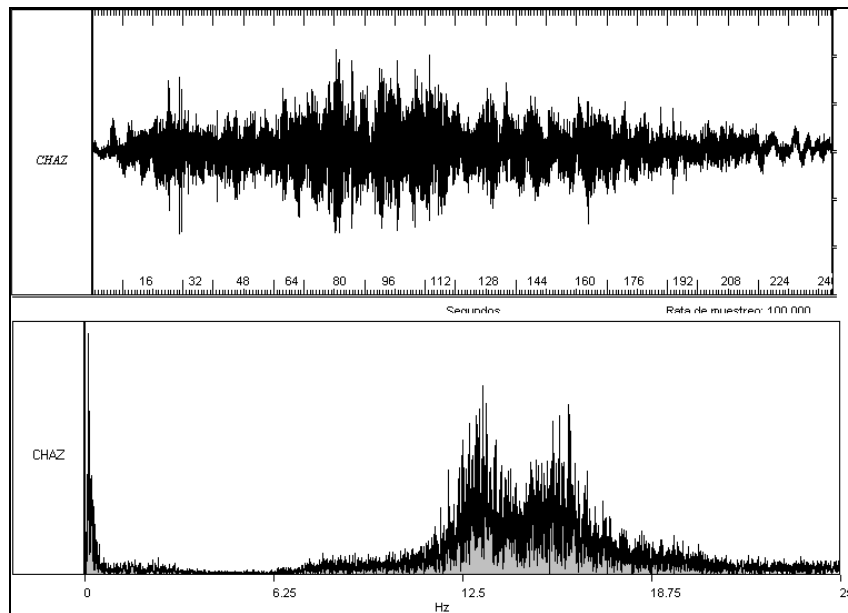


Figura 2.3.9. Sismograma (arriba) y espectro (abajo) en la estación Chaitán (componente vertical) de uno de los eventos relacionados movimiento de fluidos de fuente persistente tipo TRE registrado el 6 de abril de 2010 a la 1:26 p.m.

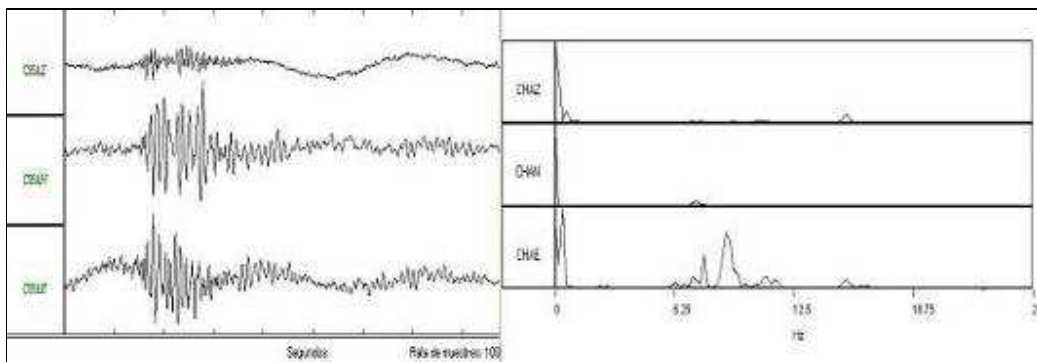


Figura 2.3.10. Sismogramas y espectros en frecuencia del evento tipo VC, ocurrido en Azufra, registrado el 18 de mayo a las 7:23 p.m., en la estación sísmica Chaitán.

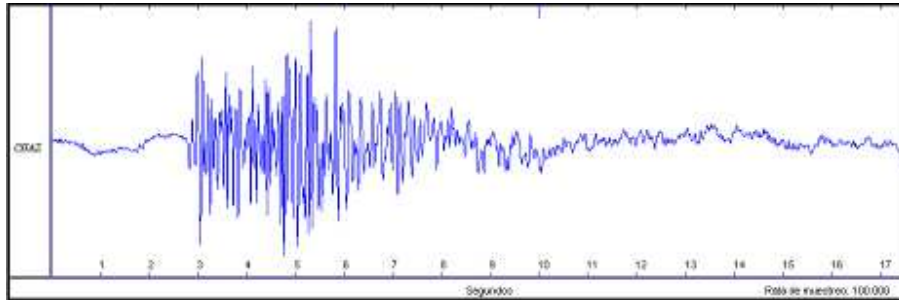


Figura 2.3.11. Sismograma en la estación Chaitán (componente vertical) de uno de los eventos relacionados con el fracturamiento de material cortical registrado el 2 de junio de 2010 a las 12:41 a.m.

2.3.3 Deformación

2.3.3.1. Inclinometría Electrónica

En cuanto a la información suministrada por los inclinómetros electrónicos instalados en Azufral, sobre los procesos deformativos del edificio volcánico se tiene:

- En la figura 2.3.12, se muestra el comportamiento de las componentes del inclinómetro Chaitán (ubicado a 4.3 km., al este-noreste de la laguna cratérica, 3730 msnm), donde se observó para la componente Radial, un comportamiento estable, mientras que en la componente Tangencial continua el comportamiento ascendente presente desde mediados de julio de 2009, alcanzando hasta el 30 de junio de 2010, cerca de 106 μ rad.

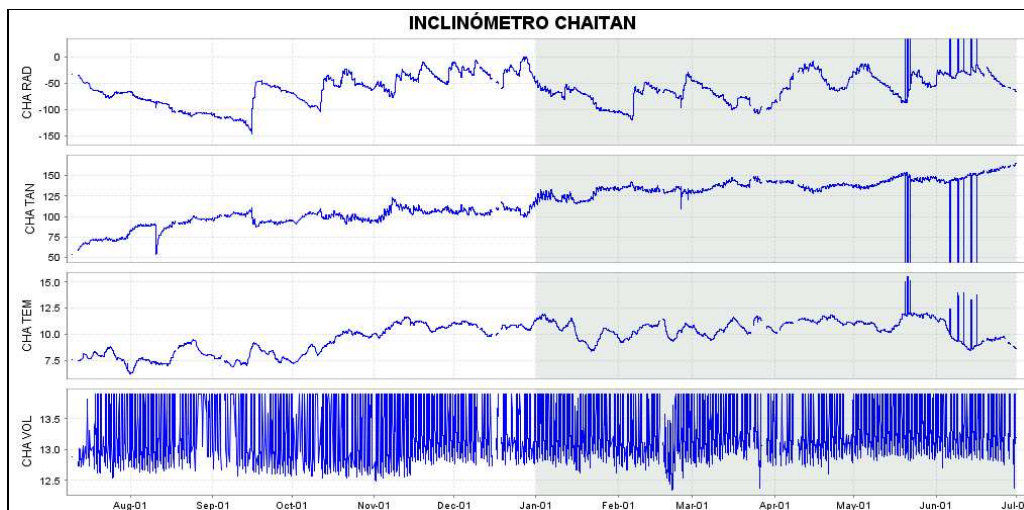


Figura 2.3.12. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro Chaitán, instalado en el volcán Azufral, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.

- En cuanto al inclinómetro La Roca (ubicado a 1.2 km., al este de la laguna cratérica, 4025 msnm), se observó, tanto para la componente Radial, como Tangencial, un comportamiento estable, hasta mediados de mayo de 2010, luego, para el mes de mayo de 2010, no presentó un correcto funcionamiento, en la figura 2.3.13 se puede observar el registro de las componentes tanto Radial, como Tangencial.

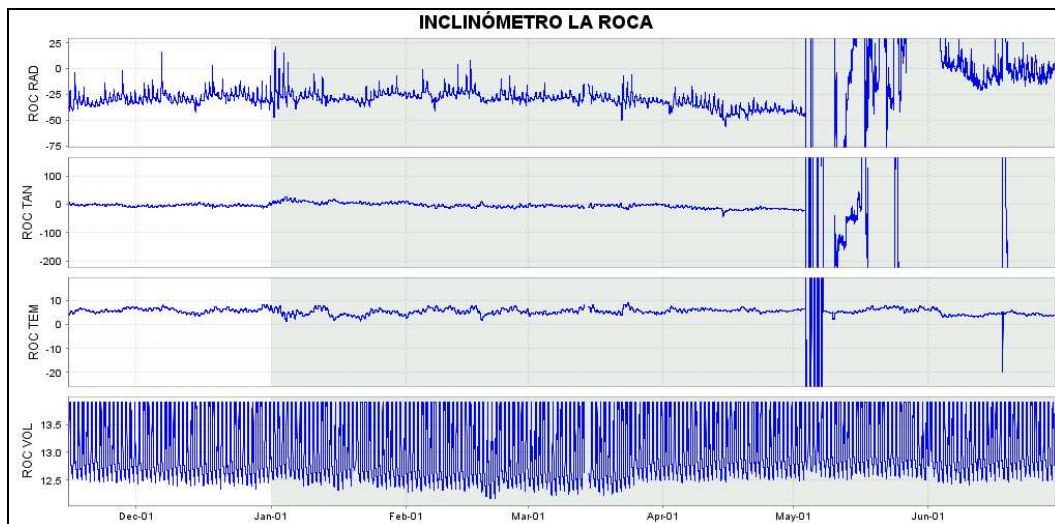


Figura 2.3.13. Componentes de inclinación Radial y Tangencial, junto con los datos del canal de temperatura y voltaje del inclinómetro La Roca, instalado en el volcán Azufra, para el periodo comprendido entre el 1 de noviembre de 2009 y el 30 de junio de 2010. El recuadro en gris indica el periodo evaluado en este informe.

2.3.3.2. Medición Electrónica de Distancias - E.D.M.

Como apoyo a las labores de monitoreo que adelanta el OVSP en Azufra y como una herramienta adicional para los procesos de evaluación de la actividad volcánica, en los meses de mayo y junio de 2010, se instaló nueve prismas reflectores sobre la superficie del volcán, se priorizó la instalación en la parte interna del volcán, teniendo en cuenta los cambios que se venían registrando en la Laguna Verde. Adicionalmente se instalaron otros reflectores en la parte externa del volcán formando un alineamiento construido en el sector occidental, hacia la población de Guaicés. En la tabla 2.3.2 se consignan las coordenadas de los puntos materializados y en la figura 2.3.14 se aprecia la ubicación de los mismos.

Tabla 2.3.2. Coordenadas WGS84 de los puntos de prismas reflectores materializados en el volcán Azufra.

No.	Latitud °N	Longitud °W	Altitud [msnm]	Observaciones
1	1° 5' 14.7"	77° 43' 0.1"	4015	Se observa desde la Base 1.
2	1° 5' 32.2"	77° 43' 25.1"	3830	Se observa desde la Base 1.
3	1° 5' 14.9"	77° 43' 38.2"	3813	Se observa desde la Base 1.
4	1° 5' 55.3"	77° 43' 18.9"	3997	Orientado hacia la Base 1.
5	1° 5' 55.3"	77° 43' 18.9"	3997	Orientado hacia la Base 2.
6	1° 5' 3.3"	77° 44' 1.1"	3748	Por Guaicés-Se observa desde la Base 2.
7	1° 4' 47.4"	77° 44' 21.8"	3488	Por Guaicés-Se observa desde la Base 2.
8	1° 5' 8.7"	77° 43' 7.5"	4057	Se observa desde la Base 1.
9	1° 4' 59.5"	77° 43' 16.5"	4022	Se observa desde la Base 2.
Base 1	1° 5' 31.4"	77° 42' 56.0"	3968	Mojón
Base 2	1° 3' 54.5"	77° 46' 20.4"	3088	El Amarillo - Cancha de baloncesto.

El procedimiento es medir distancias (distancia geométrica) desde puntos fijos, a los cuales llamaremos Bases, hacia los reflectores instalados en la superficie del volcán, los cuales forman un alineamiento, esto con el fin de registrar y cuantificar las deformaciones en superficie y así determinar la tasa de inflación o deflación del edificio volcánico, análisis orientado a la vigilancia y monitoreo del volcán Azufral.

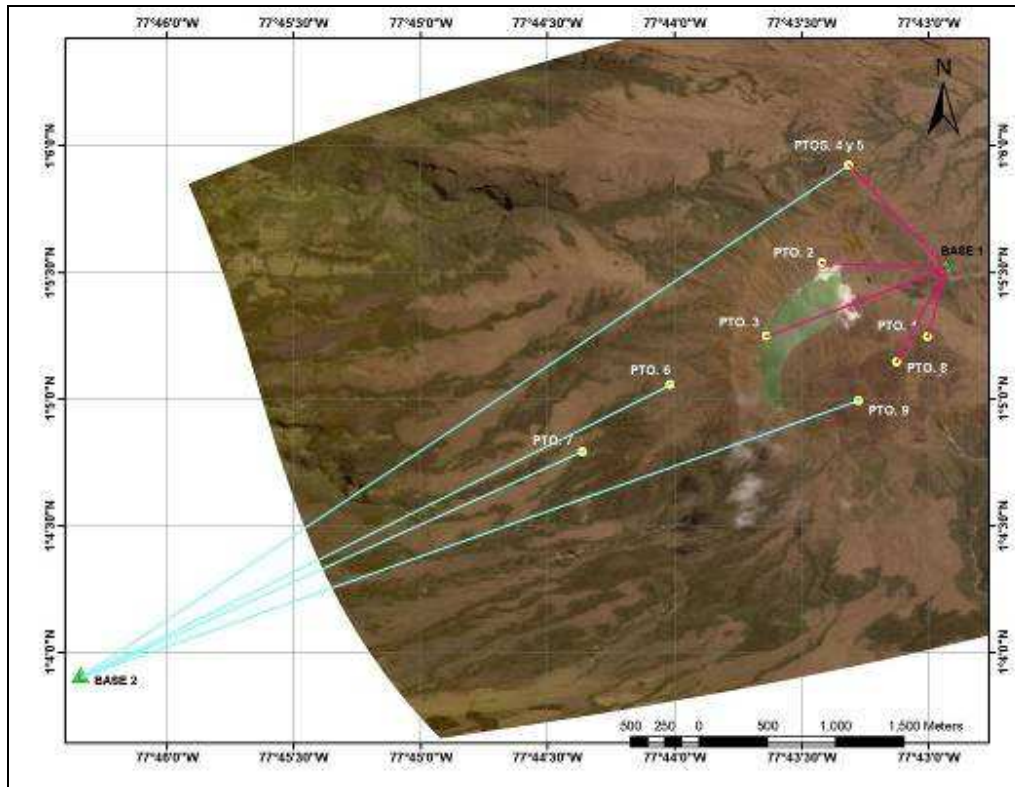


Figura 2.3.14. Mapa de localización de los puntos materializados para mediciones EDM, en el volcán Azufral. Las figuras de color verde indican la ubicación de las Base 1 y 2, las figuras de color amarillo indican la ubicación de los prismas.

Las mediciones se programarán inicialmente cada 15 días hasta tener una línea base de información acerca de los procesos deformativos del edificio volcánico, posteriormente y de acuerdo con los cambios que se observen se verá la opción de aumentar o disminuir la frecuencia del muestreo.

2.3.4 Físicoquímica

2.3.4.1 Muestreo de aguas termales en la Laguna Verde del Volcán Azufral

A continuación destaremos los aspectos más relevantes que se desarrollaron en el Primer Semestre de 2010:

En el mes de Marzo, se realizó el muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos de aguas en la Laguna Verde del Volcán Azufraal (Figura 2.3.15), en donde se tomaron tres muestras en 3 puntos diferentes de la laguna. Así mismo se realizó el muestreo en la fuente termal Malaver.



Figura 2.3.15. Imagen del muestreo de aguas ejecutado en la Laguna Verde del volcán Azufraal.

2.3.4.1.1 Medición de Parámetros Fisicoquímicos

Se realizó la medición de parámetros fisicoquímicos como temperatura y pH. Si la temperatura es menor a 30°C, se hace la medición de conductividad. En la tabla 2.3.3 se indican los parámetros medidos *in situ* en el mes de abril de 2010 y mediciones de los mismos parámetros medidos en años anteriores.

Tabla 2.3.3. Datos de mediciones *in situ* realizadas en Laguna Verde del volcán Azufraal.

LUGAR	FECHA	TEMP. (°C)	pH		ORP (mV)	COND. ELEC. (mS/cm)
			In situ	Lab		
Laguna Verde, No. 1	09/Dic/2009		4.3	2.8	570	1.8
	24/Mar/2010	64.0	3.0	4.3	393	0.7
Laguna Verde, No. 2	09/Dic/2009		4.4	2.6	557	3.0
	24/Mar/2010	57.3	2.4	2.3	575	2.8
Laguna Verde, No. 3	09/Dic/2009		3.0	2.6	584	2.8
	24/Mar/2010					
Laguna Verde, No. 4	09/Dic/2009		2.2	2.6	583	2.9
	24/Mar/2010	65.3	2.3	2.3	590	2.8

En la comisión realizada en el mes de Marzo de 2010, no se logró medir ninguna de las variables de la tabla 2.3.3, en el punto No.3 de Laguna Verde, porque el nivel del agua había bajado con respecto



Libertad y Orden

al observado en el mes de Diciembre de 2009 y esta zona de burbujeo y de relativa alta transferencia de calor y de masa en la interfase Playa – Laguna, desapareció.

En las figuras 2.3.16 y 2.3.17, se resumen los datos más altos de las temperaturas y potenciales de hidrógeno en Laguna Verde, registrados durante el desarrollo de los proyectos institucionales como: 1) "Estudio Geoquímico de los Volcanes del SW Colombiano" entre 1996 y 1997; 2) "Geotermia del volcán Azufra" en 2005; y 3) "Monitoreo e Investigación de la actividad volcánica del territorio colombiano" en 2009 y 2010.

Los datos indicados corresponden a diferentes meses del año (Marzo, Abril, Julio, Agosto y Diciembre) donde se esperarían observar diferencias tomando en consideración posibles influencias en las variaciones de las precipitaciones por lluvias.

La figura 2.3.16 muestra que las temperaturas en los sitios de muestreos denominados "punto 1" y "punto 4", son quizá los que mayores cambios han mostrado. Los puntos 1 y 2, han sido los sitios de mayor muestreo de aguas y gases desde 1996, dadas las manifestaciones de mayor transferencia de calor; aunque no se han registrado importantes conductividades eléctricas (sólo 2.8 mS/cm, Tabla 2.3.3) y los potenciales redox han resultado con alta influencia meteórica (Tabla 2.3.3).

Después del evento eruptivo de Julio de 2009, se han hallado los puntos 3 y 4 con temperaturas de mayor interés para el monitoreo y la investigación, indicando nuevas zonas con significativa transferencia de calor y de masa. Para el caso del punto 4 se puede pensar en un posible fracturamiento en el domo, el cual está facilitando la mayor transferencia de calor y de masa; sin embargo, en el punto 3, la transferencia de calor se observa más claramente cuando el nivel del agua sube y permite el contacto entre la laguna y una fractura en la zona de la Playa, pues cuando el nivel del agua está bajo, esta transferencia no es tan fácilmente observable.

En la figura 2.3.16, también se muestran los datos de las temperaturas medidas desde 1996, en la mofeta del domo más activo (indicado con color rojo). De acuerdo con estos cinco valores, se puede considerar que la temperatura ha sido estable, con una tendencia promedio de 87°C y una variación de $\pm 3.1^\circ\text{C}$.

En la figura 2.3.17 se muestran los valores de los potenciales de Hidrógeno medidos en diversas campañas, en los sitios 1, 2 y 4 del domo activo, y en el punto 3 localizado en el sector de la Playa. Los cuatro sitios, localizados en las interfases Laguna-Domo y Laguna-Playa, son zonas de alta producción protónica, típico de un ambiente de alta influencia magmática y/o hidrotermal. En las campañas de 2009 y 2010 se ha observado mayor acidez en las aguas de los sitios 2 y 4 del sector SW del domo activo, lo cual ayuda a sustentar la hipótesis del posible nuevo fracturamiento en el sitio 4 del domo, el cual se anotó arriba con base en las nuevas temperaturas medidas.

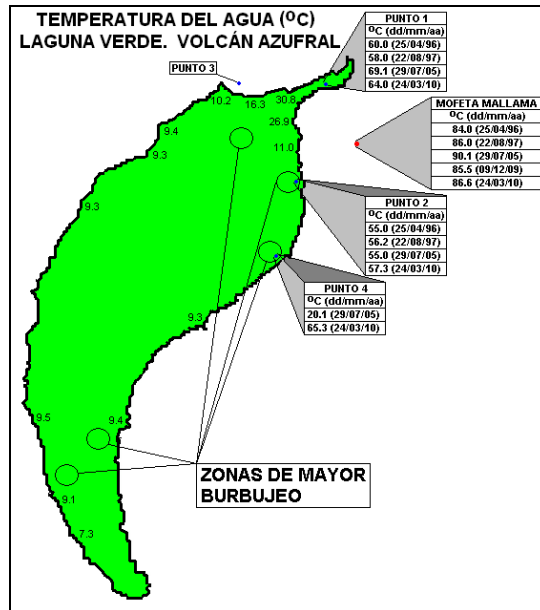


Figura 2.3.16. Temperaturas del agua en Laguna Verde y mofeta del volcán Azufral².

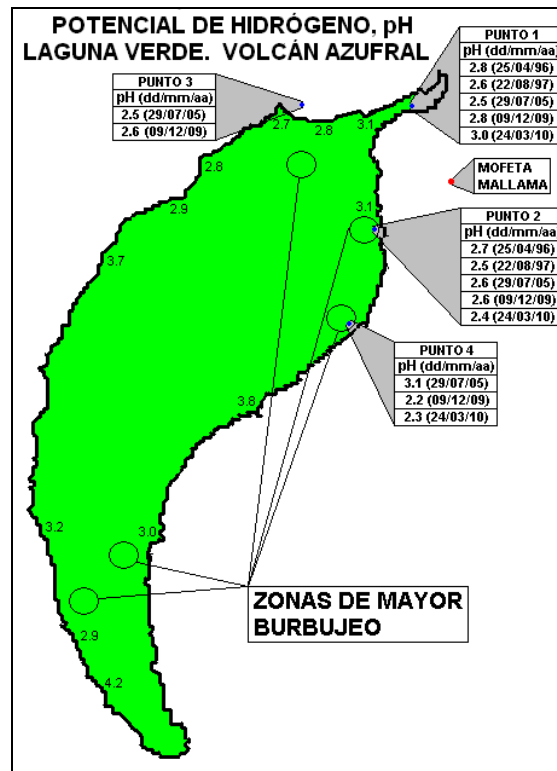


Figura 2.3.17. Potenciales de Hidrógeno del agua en Laguna Verde del volcán Azufral².

² GARZON, G. Informe de visita técnica: Estudio fisicoquímico en el cráter del volcán Azufral. INGEOMINAS, Informe Interno, Proyecto AME09-42 Monitoreo e Investigación de la actividad Volcánica del Territorio Colombiano. Santiago de Cali. Abril 19 de 2010. pp 13-14.

2.3.4.1.2 Análisis de Cloruros y Sulfatos en la Laguna Verde

Se realizó el análisis de cloruros y sulfatos en los diferentes puntos de la Laguna Verde del volcán Azufra, para determinar su relación con la actividad volcánica y determinar su clasificación con otros iones. Estos análisis se realizan mediante métodos volumétricos en los cuales se hace reaccionar cuantitativamente una solución de una sustancia cuya concentración se busca, con un reactivo en solución cuya concentración y forma de reaccionar se conocen. Los resultados de estos análisis se expresan en la tabla 2.3.4.

Tabla 2.3.4. Concentraciones de cloruros y sulfatos en aguas de la Laguna Verde del volcán Azufra.

MUESTRA	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Punto 1	69.48	236.46
Punto 2	96.42	855.21
Punto 3	61.68	564.79

Los diagramas desarrollados por Giggenbach presentan las reacciones químicas que pueden explicar la asociación mineral comúnmente encontrada en sistemas hidrotermales volcánicos.

Para realizar el análisis de las muestras tomadas en la Laguna Verde del volcán Azufra, se utilizó el diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, presentado en la figura 2.3.18. Las aguas se clasifican de acuerdo al anión dominante como aguas sulfatadas, bicarbonatadas o cloruradas.

De acuerdo con los resultados de los análisis de cloruros y sulfatos se puede ilustrar que las diferentes muestras de agua de la Laguna Verde, presentan mayor contenido de sulfatos que de cloruros, esto podría asociarse a la condensación de gases volcánicos cerca de la superficie con aguas meteóricas.

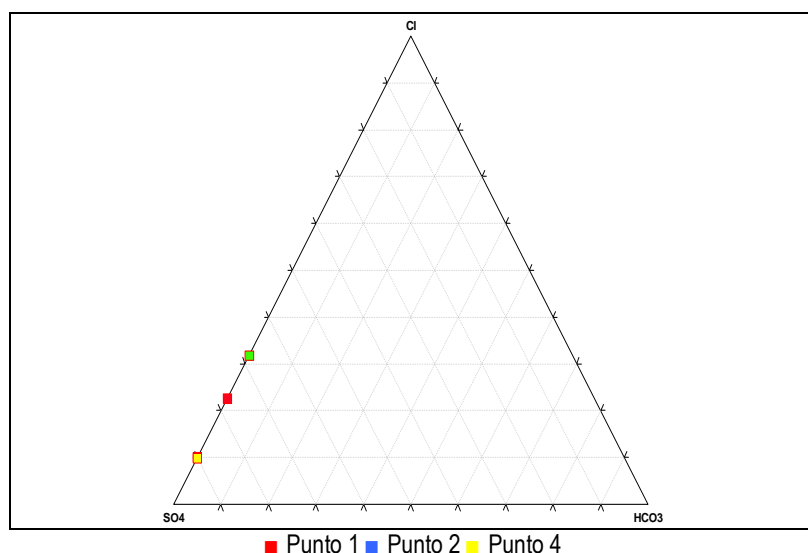


Figura 2.3.18. Diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, de las muestras tomadas en la Laguna Verde del volcán Azufra.

2.3.4.1.3 Análisis de cationes en la Laguna Verde del Volcán Azufra

Se realizó el análisis de los cationes: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), litio (Li), estroncio (Sr), hierro (Fe), Manganeseo (Mn), aluminio (Al) y silicio (Si); de las muestras de agua que se tomaron en diferentes puntos de la Laguna Verde. En la tabla 2.3.5, se expresan las concentraciones en mg/L de los diferentes cationes.

Tabla 2.3.5. Concentraciones de cationes en aguas de la Laguna Verde del volcán Azufra.

MUESTRA	Ca	Mg	Na	K	Li	Sr	Fe	Mn	Zn	Al	Si
Punto 1	44.6	22.7	42.2	6.7	0.2	<0.1	4.9	0.42	<0.1	5.9	66.1
Punto 2	146	212	1097	69.3	1.2	0.56	2.5	0.44	<0.1	<5	59.2
Punto 3	36.2	18.6	46.0	10.7	0.2	<0.1	4.8	0.49	<0.1	8.4	74.5

En la tabla, se puede apreciar que las concentraciones de estroncio y zinc no son significativas, así como manganeso y aluminio, lo que indica que no hay interacción de las aguas con rocas por ataque ácido. Por el contrario, las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio y silicio son considerables, en comparación con la de los otros iones, que podría ser por el contenido de cloruros que circulan a profundidad y salen a la superficie con temperaturas altas.

2.3.4.2 Muestreo de las fuentes termales del Volcán Azufra

2.3.4.2.1 Ubicación de las fuentes termales

Se inició el muestreo de las fuentes termales del volcán Azufra: El Salado de Malaver, La Cabaña, Quebrada Blanca y San Ramón, siguiendo los lineamientos que se tienen para la vigilancia volcánica en Colombia.

Los sitios seleccionados se encuentran dentro del área de influencia del fenómeno volcánico, lo cual implica un conocimiento de la zona y de las fuentes presentes en ella. La elección de una fuente para ser muestreada y monitoreada fue tomada por el programa tras la evaluación de su representatividad y localización.

Se estableció las coordenadas geográficas y la altitud de los puntos de muestreo mediante GPS. A continuación se describe la ubicación de las fuentes termales.

2.3.4.2.1.1 Fuente Termal: El Salado de Malaver

A la fuente Malaver se llega por la vía Túquerres - El Espino - La Comunidad Uribe - Malaver - Sapuyes. Antes de llegar a Sapuyes, se bordea el Cerro de Sapuyes por la única vía transitable que hay. Esta vía llega hasta la fuente que queda al lado del río Sapuyes (Figura 2.3.19). Como característica es lejana influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 1° 2' 16" Latitud Norte y 77° 38' 21.1" Longitud Occidental y se encuentra a 2908 msnm.



Figura 2.3.19. Fotografía de la Fuente Termal el Salado de Malaver, del volcán Azufral.

2.3.4.2.1.2 Fuente Termal: La Cabaña

Desde el municipio de Túquerres (Nariño), se viaja hasta El Espino. Desde El Espino se sigue la vía hacia la Inspección de Policía La Comunidad Uribe. Después de pasar el puente del río Sapuyes, se desvía hacia la derecha en el cruce que queda antes de llegar a La Comunidad. Se avanzan 3.0 km, y se llega a otro cruce donde se debe cruzar hacia la derecha. A 0.8 km, se halla la Hacienda La Cabaña, de propiedad del Señor Medardo Mena, donde se halla la fuente (Figura 2.3.20). Como característica es de mediana influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 1° 00' 1.7" Latitud Norte y 77° 40' 18" Longitud Occidental y se encuentra a 3052 msnm.



Figura 2.3.20. Fotografía de la Fuente Termal La Cabaña, del volcán Azufral.

2.3.4.2.1.3. Fuente Termal: Quebrada Blanca (Chimangual)

Desde el municipio de Túquerres (Nariño), se sigue la vía El Espino - Panamal - San Roque - Hacienda El Triunfo de propiedad de la Señora Gloria Meneses. Dentro de la Hacienda se debe caminar por hora y media hasta la quebrada del mismo nombre, donde se halla la fuente termal (Figura 2.3.21). Como característica es de alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 1° 4' 9.6" Latitud Norte y 77° 44' 15.9" Longitud Occidental y se encuentra a 3370 msnm.



Figura 2.3.21. Fotografía de la Fuente Termal Quebrada Blanca (Chimangual), del volcán Azufral.

2.3.4.2.1.4 Fuente Termal: San Ramón

Desde el municipio de Ipiales (Nariño), se sigue la vía hacia Guachucal (Nariño). Luego se debe tomar la vía Guachucal - Cementerio - Hacienda San Carlos. En esta Hacienda se deja el carro y se camina 0.3 km, por un único sendero hasta el nacimiento de la quebrada Guirriones, donde se halla la fuente termal (Figura 2.3.22). Como característica es de lejana influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 0° 59' 0.6" Latitud Norte y 77° 41' 48" Longitud Occidental y se encuentra a 3037 msnm.



Figura 2.3.22. Fotografía de la Fuente Termal San Ramón, del volcán Azufral.

2.3.4.2.2 Toma de la muestra

Haciendo uso de los vasos de precipitado plásticos de 200 ml y teniendo en cuenta las precauciones de seguridad se realizó la toma de 4 muestras de cada una de las fuentes termales del Volcán Azufral, una para aniones, cationes, Redox y CO₂.

Utilizando el equipo de filtración, se filtró el agua para llenar el recipiente de aniones, cationes y CO₂ respectivamente (Figura 2.3.23).



Figura 2.3.23. Fotografía de la toma de muestra de aguas de la fuentes termales del Volcán Azufral.



Para la toma de la muestra para cationes, si el pH de la fuente presenta un valor mayor a 3, se debe acidular con HNO₃ (ácido Nítrico) 1:1 hasta alcanzar un pH de 2, esto se realiza con el fin de mantener los iones estables, hasta la realización de sus respectivos análisis en el laboratorio de la ciudad de Bogotá.

2.3.4.2.3 Mediciones de Parámetros Físicoquímicos

Se realizó la medición de parámetros físicoquímicos como Temperatura y pH. Si la temperatura es menor a 30°C, se hace la medición de conductividad. En la tabla 2.3.6 se indican los parámetros medidos in situ.

Tabla 2.3.6. Parámetros físicoquímicos medidos en las fuentes termales del Volcán Azufral.

FUENTE TERMAL	pH	Temperatura	Conductividad
El Salado de Malaver	6.9	28.7°C	5.15 x10 ⁻³ μS /cm
La Cabaña	7.8	23.2°C	203 μS/cm
Quebrada Blanca (Chimangual)	6.4	48.6°C	-
San Ramón	7.4	28.6°C	2.68 x10 ⁻³ μS /cm

Según los resultados se puede apreciar que la temperatura de las diferentes fuentes termales del Volcán Azufral, se encuentran entre 23 y 29°C, con excepción de la fuente termal Quebrada Blanca, la cual su temperatura supera los 30°C, por lo cual no se realizó la medición de conductividad eléctrica. En cuanto al pH se puede afirmar que las fuentes termales muestreadas son ligeramente neutras, ya que los valores se encuentran alrededor de 7, valor que indica neutralidad de una solución.

Los valores de conductividad eléctrica indican que para la fuente termal La cabaña, las aguas se ionizan en forma más completa, que las de las fuentes termales el Salado de Malaver y San Ramón, y por lo mismo, conducen mejor la corriente, lo que indica que hay una buena conductividad y por lo tanto, hay mayor cantidad de sales disueltas.

2.3.4.2.4 Análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos

De acuerdo con los resultados de los análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos, se puede determinar la clasificación de las fuentes termales, según el ion dominante utilizando el diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, (Figura 2.3.24) los resultados de los análisis y la clasificación se describe en la tabla 2.3.7.

Tabla 2.3.7. Concentraciones de los aniones y clasificación de las fuentes termales del Volcán Azufral.

FUENTE TERMAL	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Clasificación
El Salado de Malaver	2105.73	206.50	2299.7	Aguas Cloruro- Bicarbonatadas
La Cabaña	10.64	122.35	158.6	Aguas Bicarbonato-sulfatadas
Quebrada Blanca	786.99	144.06	1116.3	Aguas Cloruradas
San Ramón	549.48	43.65	366	Aguas Cloruro- Bicarbonatadas

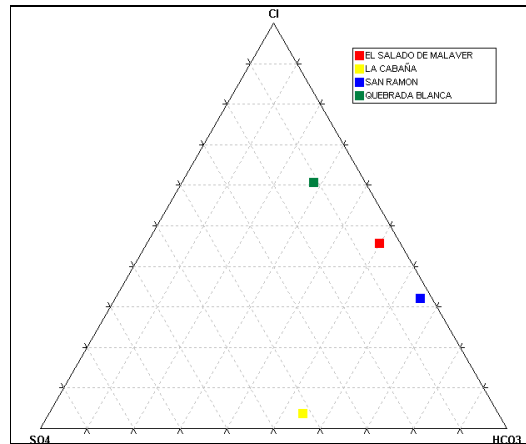


Figura 2.3.24. Diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻ para las fuentes termales del Volcán Azufra.

2.3.4.2.5 Análisis de Cationes

Se realizó el análisis para cationes como: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), litio (Li), estroncio (Sr), hierro (Fe), Manganeseo (Mn), aluminio (Al) y silicio (Si). En la tabla 2.3.8, se expresan las concentraciones en mg/L de los diferentes cationes. Y su análisis se realizó utilizando el geoindicador Na-K-Mg, basado en los geotermómetros de Na/K y K/Mg (Figura 2.3.25).

Tabla 2.3.8. Concentraciones de los aniones presentes en las fuentes termales del Volcán Azufra.

MUESTRA	Ca	Mg	Na	K	Li	Sr	Fe	Mn	Zn	Al	Si
El Salado de Malaver	98.51	304.9	1495	148.3	<0,1	0.88	0.23	0.52	<0,1	<1	52.40
La Cabaña	10.35	8.9	36.41	1.84	0.66	0.69	<0,2	<0,1	<0,1	<1	41.35
Quebrada Blanca	58.88	36.21	416.9	31.88	0.24	0.73	<0,2	1.19	<0,1	<1	64.92
San Ramón	30.97	121.6	508.9	46.11	0.1	0.78	<0,2	0.1	<0,1	<1	58.78

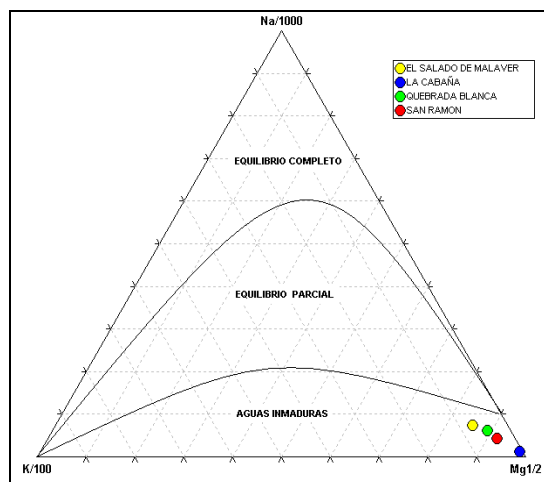


Figura 2.3.25. Diagrama triangular Na⁺- K⁺- Mg⁺, para las fuentes termales del Volcán Azufra.

En las fuentes termales, que se registra contribución del fluido geotérmico (el Salado de Malaver, La Cabaña, Quebrada Blanca y San Ramón), existe un enriquecimiento en las especies químicas normalmente incorporadas por aguas someras, particularmente en magnesio. Este enriquecimiento, es común en la periferia de los sistemas geotérmicos y ocurre por dos razones principales: La contribución de bicarbonatos (El Salado de Malaver: 2299.7mg/L, La Cabaña 158.6 mg/L, Quebrada Blanca: 1116.3 mg/L y San Ramón: 366 mg/L)³ por parte de las aguas subterráneas someras y la disolución de minerales que contienen magnesio, causada por la disminución de temperatura a lo largo del flujo lateral del fluido geotérmico y reforzado por la dilución con aguas frías someras. La contribución de magnesio y bicarbonato, así como de calcio, podrían tener origen en un depósito, que contengan estos minerales, el cual puede estar siendo lavado por el agua en su ascenso a la superficie.

Las concentraciones de los cationes: litio, aluminio, zinc, estroncio, manganeso y hierro, para las fuentes termales del volcán Azufral, tiene valores bajos, los cuales indican que no hay interacción de las aguas con rocas por ataque ácido.

2.3.4.3 Muestreo de gases de origen volcánico

El muestreo de gases ácidos se realizó en la fumarola Mallama mediante la botella de Giggenbach, también se midió la temperatura directamente en la fumarola obteniendo una temperatura de 86.6°C, la cual, fue la temperatura más alta registrada en las diferentes fumarolas del volcán Azufral (Figura 2.3.26). El muestro se realizó con un tiempo de exposición de 25 minutos sobre la fumarola. Los gases condensados no se recolectaron, debido a que la fumarola es muy pequeña y no hay suficiente presión para recolectar dicha muestra.



Figura 2.3.26. Imágenes de la toma de muestra de gases en la fumarola Mallama del Volcán Azufral.

Los gases son liberados de un magma que contiene volátiles, al disminuir la presión confinante, esta disminución puede ser resultado de la apertura de fracturas o de un movimiento ascensional del

³ Informe mensual de Geoquímica de los Volcanes Galeras, Azufral y Cumbal, Mayo de 2010. San Juan de Pasto, Junio de 2010.



Libertad y Orden

magma. La fumarola Mallama del volcán Azufra, registró una baja temperatura y una baja presión, la cual podría favorecerse una liberación de componentes menos volátiles.

Los datos disponibles de las composiciones químicas de los gases fumarólicos de diferentes sistemas permiten obtener unas reglas generales. Los óxidos de carbono, representan la componente más importante de los gases secos. La contribución del metaforismo térmico, del material carbonático de la corteza a los gases volcánicos, es muy probable, salvo algunas excepciones de sistemas hidrotermales. La intrusión de un cuerpo magmático en la corteza, también provoca reacciones entre el magma y la roca encajante, en las que también interviene el agua. De acuerdo a estudios teóricos previos, el azufre y el hidrogeno aparecen como los principales productos gaseosos de tales procesos, si el agua salada participa en las reacciones, puede producirse también ácido clorhídrico.

Los resultados de los análisis que se realizaron para la muestra gases ácidos en la fumarola Mallama, mediante la botella de Giggenbach, se indican en la tabla 2.3.9.

Tabla 2.3.9. Concentraciones de los gases CO₂ Y HCl medidos en la fumarola Mallama, del volcán Azufra.

MUESTRA	CO₂ % Molar en Base seca	HCl % Molar en Base seca
Fumarola Mallama	90.77	0.179

De acuerdo a los resultados la concentración de CO₂ en porcentaje Molar es de 90.77, la cual es moderadamente alta en comparación con otras fumarolas de otros volcanes, este valor de carbono siempre es intensificada a bajas temperaturas, lo que coincide, con la temperatura registrada en la fumarola. Esta concentración de CO₂ puede darse como resultado de una contribución magmática menor o por la absorción de elementos más ácidos por acuíferos someros y superficiales.⁴ En cuanto a la concentración de HCl, es considerada como un valor bajo que podría deberse, por las reacciones que ocurren en la corteza con la participación de agua.

2.3.4.4 Mediciones de gas Radón

Se realizó la instalación de dos estaciones de gas Radón en la Laguna Verde del Volcán Azufra. Una de ellas en el suelo y otra en el agua, las características de las dos instalaciones se describen a continuación.

2.3.4.4.1 Instalación de la estación de gas Radón en suelo

En primera instancia se realizó la búsqueda de sitio para la instalación del sistema de Radón, el cual está ubicado dentro del edificio volcánico de Azufra, en el sector de la zona de colapsamiento, relacionada con el fenómeno eruptivo del mes de julio de 2009. Geográficamente se encuentra a 1° 05' 30" Latitud Norte y 77° 43' 23.8" Longitud Occidental y se encuentra a 3805 msnm.

⁴ M. Martini. Gases volcánicos y eventos eruptivos. Departamento de ciencia en la tierra. Universidad de Florencia. Vía la Pira, 4. 50121 Florencia Italia.

Una vez ubicado el sitio se procedió a realizar una perforación o hueco de 1.2 m, de profundo aproximadamente y diámetro de unos 10-12 cm, con ayuda de un sacabocado. Luego, se enterró el tubo de PVC a una profundidad promedio de 1.2 m, y se recubre bien con el material extraído, procurando que quede lo más firme posible (Figura 2.3.27); luego se enterró el tubo de aluminio, el cual está conectado con el sistema de venoclisis dentro del tubo de PVC, a unos 10 cm del tubo de PVC. Posteriormente se insertó la cámara de iones con el electret acoplado dentro del tubo de PVC, sobre el soporte previamente instalado. Se anotó el nombre de la estación, fecha y hora de inserción del electret y el voltaje de entrada del mismo (Tabla 2.3.10). La estación se cerró lo mejor posible, evitando que se filtre agua o cualquier otro elemento extraño en la misma, sellando la tapa con silicona. La estación se dejó durante 27 horas y 6 minutos.



Figura 2.3.27. Fotografía de la instalación de la estación de gas Radón en el Volcán Azufral.

Se realizan los cálculos de la concentración de radón teniendo en cuenta las características de instalación y mediciones como, la cámara que es de tipo L, configuración LLT (Little = 58mL) y radiación gamma de 0.12 pCi/L (Tabla 2.3.10).

Tabla 2.3.10. Características de instalación y medición de las dos estaciones de Gas Radón, instaladas en la Laguna Verde del Volcán Azufral.

Estación	Electret	Fecha Inicial	Hora Inicial	Fecha Final	Hora Final	Voltaje Inicial	Voltaje Final	Concentración de Radón
El Hueco	LM5923	12/5/10	11:25	13/5/10	14:31	721	719	91pCi/L
El Mojado	LM1190	12/5/10	11:40	13/5/10	12:14	727	658	418pCi/L

2.3.4.4.2 Instalación de la estación de gas Radón en el agua

Para realizar la medición de fugacidad de gas Radón en aguas de la Laguna Verde, se determinó el sitio adecuado para la instalación, la cual se encuentra cerca de la estación de Radón en suelo, es

decir, en las orillas de la zona de la Playita. Una vez ubicado el sitio se procedió a realizar la instalación, colocando el electret en la cámara de tipo S (Standard). El sistema cámara – electret se sujeta con una cuerda la cual se amarró a una roca y se sumergió en el agua de la Laguna Verde (Figura 2.3.28). Se anotó el nombre de la estación, fecha y hora de inserción del electret y el voltaje de entrada del electret. La estación se dejó durante 24 horas y 34 minutos.

Se realizan los cálculos de la concentración de Radón teniendo en cuenta las características de instalación y mediciones como, tipo de cámara, tipo S, configuración SLT (Standard = 210mL) y radiación gamma de 0.12 pCi/L (Tabla 2.3.10).



Figura 2.3.28. Fotografía de la instalación de la estación de gas Radón en el agua, de la Laguna Verde del Volcán Azufreal.

Los datos obtenidos de las concentraciones de gas Radón para las dos estaciones, tanto, en el suelo (zona de colapso) y en agua (contacto depósito-laguna) son 91 pCi/L y 418 pCi/L respectivamente. Lo que indica que para un periodo tan corto de exposición, los valores son relativamente altos, sobre todo para la estación el Mojado.

2.3.4.5 Mediciones de dióxido de azufre

En las comisiones de campo realizadas en Diciembre de 2009 y Marzo de 2010, se llevaron a cabo mediciones de dióxido de azufre presente en la tropósfera del cráter del volcán Azufreal, caminando alrededor de: 1) la Laguna Verde, 2) la caldera y 3) el cráter del domo activo.

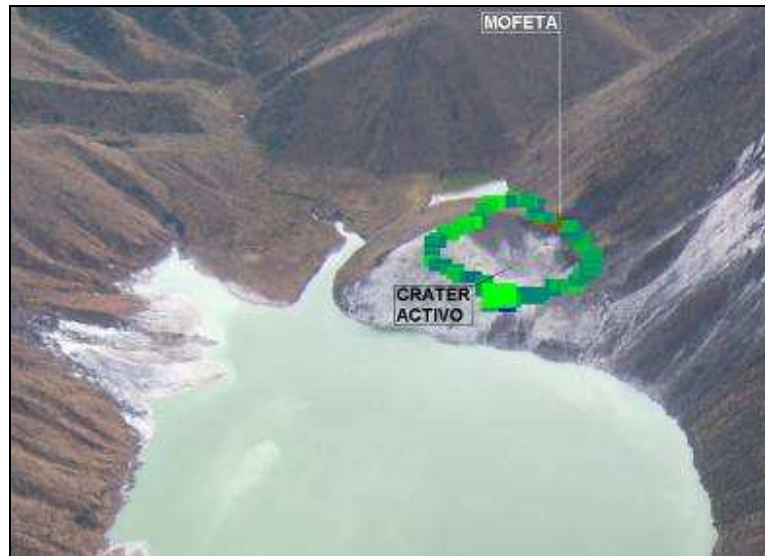


Figura 2.3.29. Ruta de medición registrada con el GPS del MovilDOAS de NOVAC, en el domo activo del Volcán Azufral.

En la figura 2.3.29 se muestra la ruta seguida en la medición realizada alrededor del cráter del domo activo, donde se indica en color rojo el valor máximo de 21 ppm-m de SO₂, detectado sobre la mofeta *Mallama* de 86.6°C. En esta medición realizada con un MovilDOAS de NOVAC, se registraron 184 espectros con un flujo total de 0.003 Kg/s equivalentes a 0.28 toneladas diarias de dióxido de azufre, tal como se observa en la figura 2.3.30. La concentración y el flujo total del dióxido de azufre, nos indica muy pobre aporte del sistema magmático, lo cual ayuda a sustentar que el fenómeno observado a mediados del año 2009, tiene un carácter hidrotermal, donde el flujo de calor y de masa por las fracturas en la zona de la Playita está facilitando el metasomatismo por deposición de minerales de avanzada alteración argílica. No se debe descartar la presurización desde el interior del cráter, causado por el movimiento de un cuerpo a superficie, lo cual podrá ser corroborado con el periódico monitoreo de la profundidad de las tres lagunas localizadas en el interior del cráter del volcán Azufral.

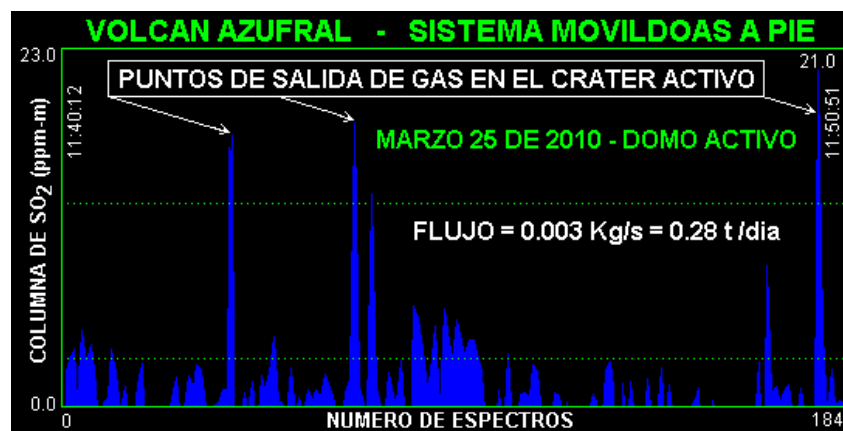


Figura 2.3.30. Espectro de la medición con MovilDOAS, caminando alrededor del domo activo del Volcán Azufral, el día 25 de Marzo de 2010.

2.3.4.6 Aspectos geométricos

Desde el año 2005 se están realizando mediciones de posicionamiento global con satélites - GPS y batimétricas en Laguna Verde del volcán Azufral. En las figuras 2.3.31, 2.3.32 y 2.3.33 se resumen algunos resultados de mediciones a nivel de la Laguna Verde⁵.

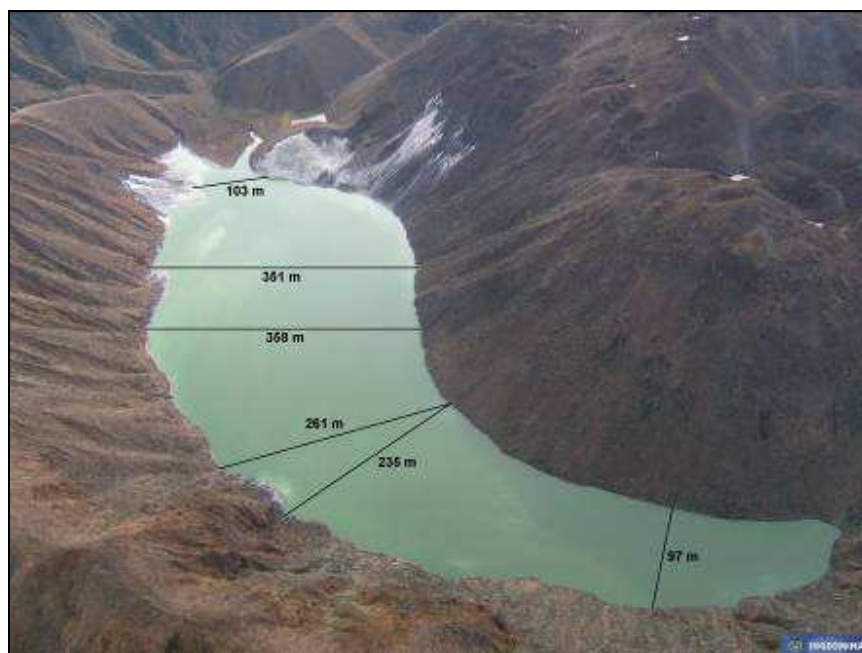


Figura 2.3.31. Distancias a lo ancho en la Laguna Verde del Volcán Azufral.

El litoral W, SW y S de Laguna Verde está limitado por la parte interna de la caldera del volcán Azufral, mientras que las orillas opuestas están limitadas por los domos cratéricos. El litoral de Laguna Verde tiene una longitud de 3431 m, con un área en su superficie de 245100 m², alcanzando una longitud máxima de 1111 m y un ancho máximo de 358 m.

El volumen total de la laguna aún no ha sido calculado, pues hasta la fecha se han logrado realizar solamente algunas mediciones de profundidades en la zona más cercana al sector del domo activo y de la Playita, donde las profundidades alcanzan valores hasta de 12,8 m. En el sector más ancho de la Laguna no se han logrado realizar mediciones exactas, pues los sistemas de mediciones que se han construido no han logrado alcanzar el lecho, siendo este superior a los 20 m.

⁵ GARZON, G. Informe de visita técnica: Estudio fisicoquímico en el cráter del volcán Azufral. INGEOMINAS, Informe Interno, Proyecto AME09-42 Monitoreo e Investigación de la actividad Volcánica del Territorio Colombiano. Santiago de Cali. Abril 19 de 2010. pp 16-18.

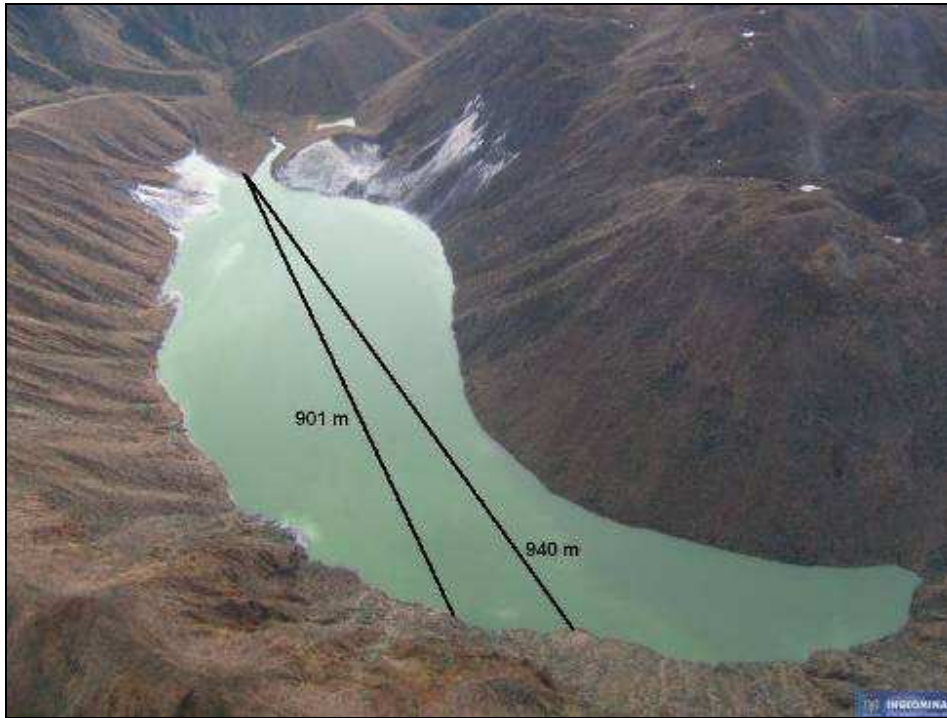


Figura 2.3.32. Distancias a lo largo en la Laguna Verde del Volcán Azufral.

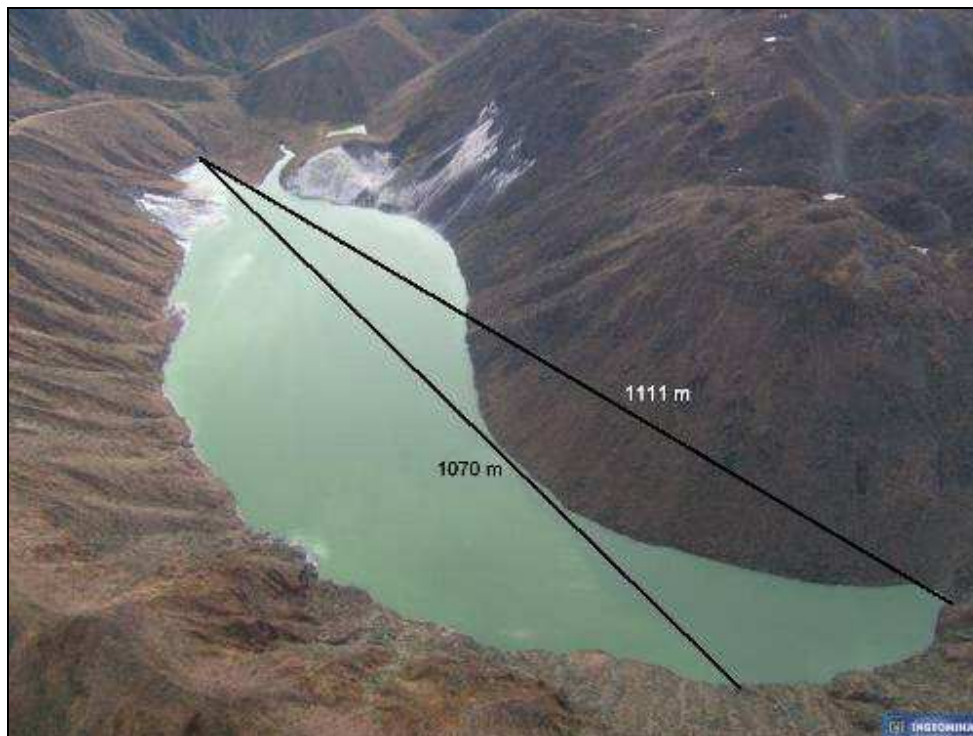


Figura 2.3.33. Distancias máximas en la Laguna Verde del Volcán Azufral.

2.3.5. Actividad superficial

La actividad superficial de Azufral se documentó a partir de reportes de sobrevuelos y de visitas al lugar por parte de personal del INGEOMINAS. En el Primer Semestre de 2010, se realizaron dos sobrevuelos, los días 15 de febrero y 2 de mayo, en uno de ellos (2 de mayo) se tomaron imágenes térmicas que permitieron observar la variación de la temperatura del material dentro del cráter del volcán. En la mayoría de visitas de reconocimiento, se realizó un seguimiento de la actividad superficial.

Para los meses de enero, marzo, abril y junio, no se tuvieron reportes relacionados con actividad superficial en el volcán Azufral.

A continuación se presentan las observaciones de mayor relevancia y algunas imágenes que complementan la descripción:

El 15 de febrero, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana, se realizó sobrevuelo sobre el volcán Azufral, y no se tuvo reportes relacionados con actividad superficial en el volcán (Figura 2.3.34).



Figura 2.3.34. Registros fotográficos tomados durante el sobrevuelo a la cima del volcán Azufral, el cual se realizó en horas de la mañana del 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

En sobrevuelo efectuado en la mañana del 2 de mayo de 2010, se observó salida de gas en poca cantidad desde el campo fumarólico del domo pequeño y se percibió bastante olor a gases azufrados (Figuras 2.3.35). Las imágenes térmicas mostraron temperaturas máximas de 37°C en la base del domo pequeño en contacto con la Laguna Verde, en el campo fumarólico del domo pequeño la temperatura de la roca es de 29°C y en la zona del depósito formado en julio de 2009, la temperatura es de 24°C (Figura 2.3.36).



Figura 2.3.35. Imagen de Azufral capturada en sobrevuelo el 2 de mayo de 2010, a las 7:12:52 a.m. En la fotografía se observa emisión de gas desde el campo fumarólico del domo pequeño.

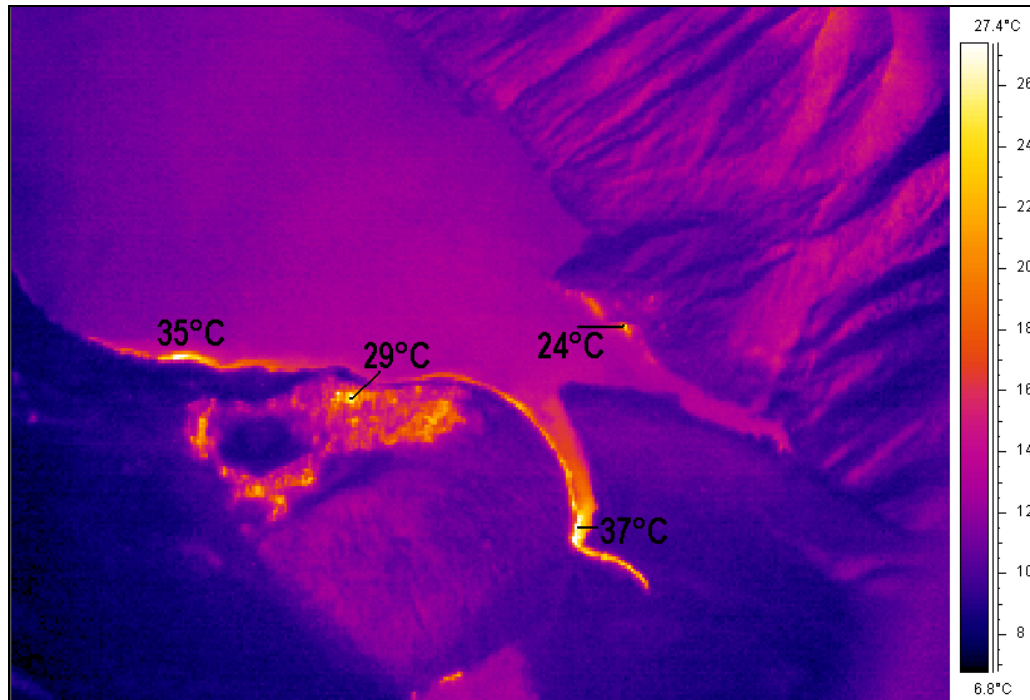


Figura 2.3.36. Imagen térmica de Azufral, tomada en sobrevuelo de mayo 2 de 2010. En la fotografía, resaltan los lugares donde se presentaron las anomalías térmicas más importantes.

Además, dada la frecuente observación de cambios en el nivel del agua en Laguna Verde, el día 09 de diciembre de 2009, se instaló una torre en la orilla con marcas visibles a cierta distancia (Figura 2.3.37). Mediante seguimiento fotográfico y filmico será posible continuar con la observación y monitoreo a los cambios tanto del nivel del agua, como del color de fondo en las tres lagunas del cráter del volcán Azufra.



Figura 2.3.37. Instalación de torre en la orilla de la Laguna Verde del Volcán Azufra.

En la figura 2.3.38, se muestra la variación que ha tenido el nivel del agua de Laguna Verde del volcán Azufra, comparando el estado como estaba en diciembre de 2009, cuando se instaló una torre de referencia, con respecto al nivel del agua en marzo de 2010. Con base en esta figura, se calcula que el nivel del agua bajó aproximadamente 56 cm.

Por otro lado, comparando fotografías tomadas en distintas comisiones realizadas, se observa un cambio en el color de la Laguna Barrosa del volcán Azufra, el cual tiende a asemejarse al de la Laguna Verde. En la figura 2.3.39, se muestra un retablo con varias fotografías donde se puede apreciar la variación en los colores superficiales, aspecto que debe ser investigado en más detalle en las tres lagunas, pues esta propiedad física podría ser un indicativo de los cambios internos del volcán Azufra.



Figura 2.3.38. Comparación de la variación de nivel del agua en Laguna Verde del volcán Azufra.



Figura 2.3.39. Comparación del color del agua de Laguna Barrosa del volcán Azufra.

Adicionalmente, en visita hasta la Laguna Verde realizada el 2 de mayo, se notó un descenso en el nivel del agua, principalmente en el sector aledaño a la Playita, en donde se pudo notar nuevamente la morfología de este sector, fue posible caminar por la parte baja de la zona, por la ausencia de agua (Figura 2.3.40).



Figura 2.3.40. Imagen de un sector de la Laguna Verde- Azufral. En la fotografía, se resalta el descenso en el nivel del agua, además, se instaló dos medidores artesanales de nivel, con el fin de realizar un seguimiento de este.

En la Laguna La Barrosa, hay burbujeo constante que se intensifica por momentos, llegando a escuchar el sonido que producen. El color de la Laguna La Barrosa cada vez tiende a asemejarse al de la Laguna Verde.

En visita realizada por personal de INGEOMINAS entre el 11 y el 15 de mayo de 2010, se reportó los siguientes aspectos importantes:

Se notó un incremento del nivel del agua, esto gracias a los medidores artesanales instalados (Figuras 2.3.41 y 2.3.42).



Figura 2.3.41. Comparación de nivel del agua de la Laguna de Azufral, con medidores artesanales. A) 2 de mayo de 2010; B) 13 de mayo de 2010.

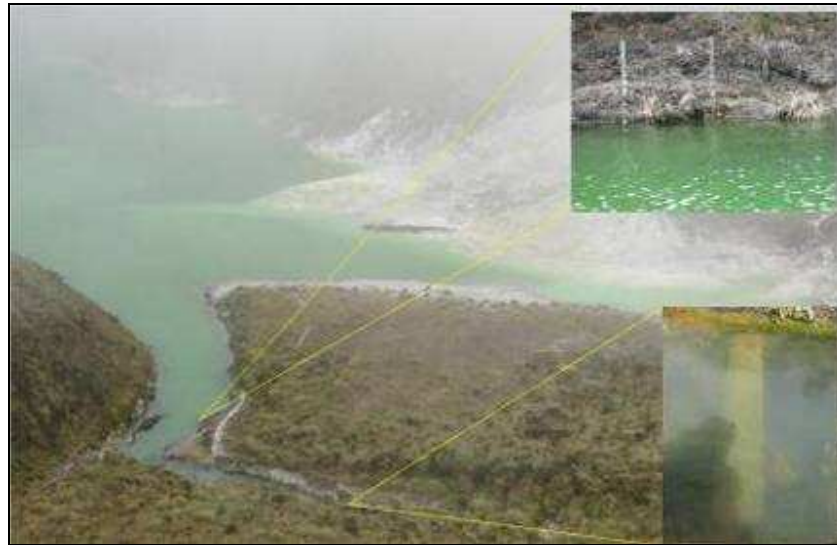


Figura 2.3.42. Imagen de la Laguna de Azufral, en la cual se aprecia la ubicación de los medidores artesanales de nivel de agua y una tabla que el 2 de mayo de 2010 fue utilizada como puente.

Además, se observó en dos sectores diferentes una línea de color blanco que atraviesa la Laguna (Figuras 2.3.43, 2.3.44, óvalo rojo), este fenómeno también fue observado en julio de 2009. Por otra parte en el lado oriental y bordeando un sector amplio de la Laguna se pudo observar un cambio de textura en la superficie, de color oscuro que permaneció de igual manera durante el tiempo de la visita a la zona (Figura 2.3.45, óvalo amarillo).

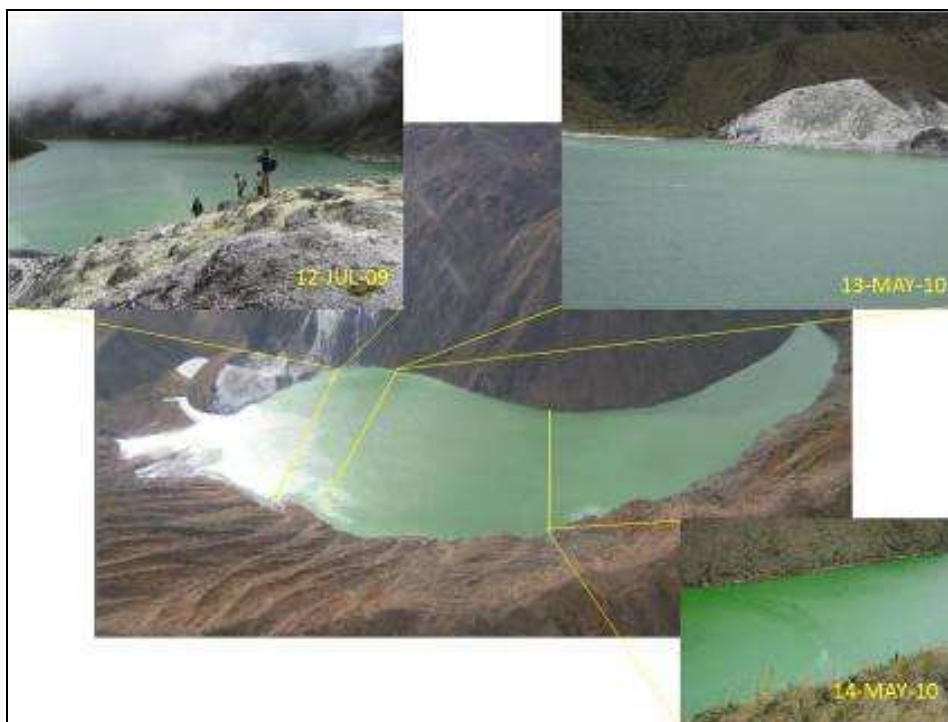


Figura 2.3.43. Imagen de la Laguna Verde, en la cual se observa la ubicación de las líneas blancas en la superficie de la Laguna.



Figura 2.3.44. Imágenes de la Laguna Verde, capturadas entre el 13 y 14 de mayo de 2010, en las fotografías se observa una de las líneas blancas que atraviesa la superficie de la Laguna.



Figura 2.3.45. Imágenes de la Laguna Verde, capturadas entre el 13 y 14 de mayo de 2010, en las fotografías se observa el cambio de textura en la superficie de la Laguna.

Adicionalmente, el 13 de mayo de 2010, se observó salida de gas en poca cantidad desde el campo fumarólico del domo pequeño y se percibió bastante olor a gases azufrados (Figura 2.3.46).



Figura 2.3.46. Imágenes de Azufral capturadas el 13 de mayo de 2010. En las fotografías se observa emisión de gas desde el campo fumarólico del domo pequeño.



2.3.6. Conclusiones

- Es necesario mantener un seguimiento regular de la actividad superficial del volcán Azufral que permita evidenciar variaciones en el estado actual del mismo, independientemente de que las manifestaciones observadas hasta ahora sean de tipo hidrotermal o magmática. Este seguimiento debe involucrar en lo posible, diferentes áreas.
- Teniendo en cuenta que la Laguna Verde del Volcán Azufral es regularmente frecuentada por turistas, es necesario que conozcan de la ocurrencia de este tipo de fenómenos y que se evite en lo posible acercarse a estas zonas, máxime si se detectan otro tipo de manifestaciones que resulten anómalas. En tal sentido, se considera apropiado y prudente señalar la zona de anomalía geotérmica preexistente y evitar el ingreso de turistas cuando se presenten este tipo de fenómenos.
- Las diferentes mediciones efectuadas durante las visitas de campo, más que como datos absolutos, deben tomarse como un marco de referencia para comparar con mediciones anteriores o aquellas que se hagan en las siguientes visitas de control. Es así, como pese a que en el mes de mayo, se observó un leve incremento en el nivel del agua de la Laguna Verde, de acuerdo al seguimiento realizado, se observa que hasta el momento, este tiende a descender.
- La evaluación de los parámetros monitoreados durante el Primer Semestre de 2010, han mostrado que existe actividad volcánica con un comportamiento relativamente estable, lo que permite establecer el **NIVEL (IV) VERDE ●**: “**Volcán activo y comportamiento estable**”.

2.4 VOLCÁN CUMBAL

El Complejo volcánico de Cumbal está conformado por dos estrato-volcanes andesíticos activos, conocidos como Mundo Nuevo y Plazuelas, y al menos tres pequeños cráteres adventicios. El complejo volcánico es activo, se localiza en la Cordillera Occidental, al suroriente del Departamento de Nariño (Figura 2.4.1), Plazuelas en las coordenadas de latitud norte: $0^{\circ}57'21,31''$, longitud occidente: $77^{\circ}53'13,49''$ y altura máxima de 4764 m sobre el nivel del mar y, Mundo Nuevo en las coordenadas de latitud norte: $0^{\circ}57'3,52''$, longitud occidente: $77^{\circ}53'50,12''$ y altura de 4700 m sobre el nivel del mar.



Figura 2.4.1. Imagen del complejo volcánico Cumbal.

El Cumbal se ubica en los dominios del municipio del mismo nombre a 12 km., al NW de la cabecera municipal de Cumbal. Sus depósitos son flujos de lava superpuestos, escóreas en bloques y masivos, flujos piroclásticos (de ceniza y escoria, de ceniza y pómez, de ceniza) y flujos de escombros y piroclastos de caída que recubren toda el área.

2.4.1 Red de vigilancia

Durante el Primer Semestre de 2010, la red de vigilancia del volcán Cumbal estuvo conformada por:

- Una estación sísmica telemétrica: de corto período de componente vertical (Tabla 2.4.1, Figura 2.4.2). La estación La Mesa presentó problemas en el radio, desde su instalación se han realizado diferentes pruebas de telemetría y la información no ha podido ser capturada por los discriminadores en el observatorio. La recepción de la información que detecta esta estación en la sede del OVSP, se realiza a través de una red telemétrica tipo punto a punto con una repetidora instalada en el cerro Cruz de Amarillo (Figura 2.4.3).
- Un inclinómetro electrónico telemétrico La Mesa (Tabla 2.4.1, Figura 2.4.2). La transmisión de los datos se realiza usando una red telemétrica tipo punto-multipunto configurada para los inclinómetros instalados en el Departamento de Nariño.

En este semestre, las estaciones de la red instalada para el monitoreo del volcán Cumbal tuvieron un funcionamiento total del 49% (Figura 2.4.4). La estación La Mesa no funcionó este periodo y el inclinómetro presentó un porcentaje de funcionamiento del 98%.

Tabla 2.4.1. Características de las estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del volcán Cumbal, durante el Primer Semestre de 2010.

NOMBRE ESTACION	DISTANCIA A MUNDO NUEVO	DIRECCION	TIPO
La Mesa	2,0 km	ESE	Inclinómetro Electrónico
La Mesa	2,0 km	ESE	Sismómetro Triaxial Corto Periodo

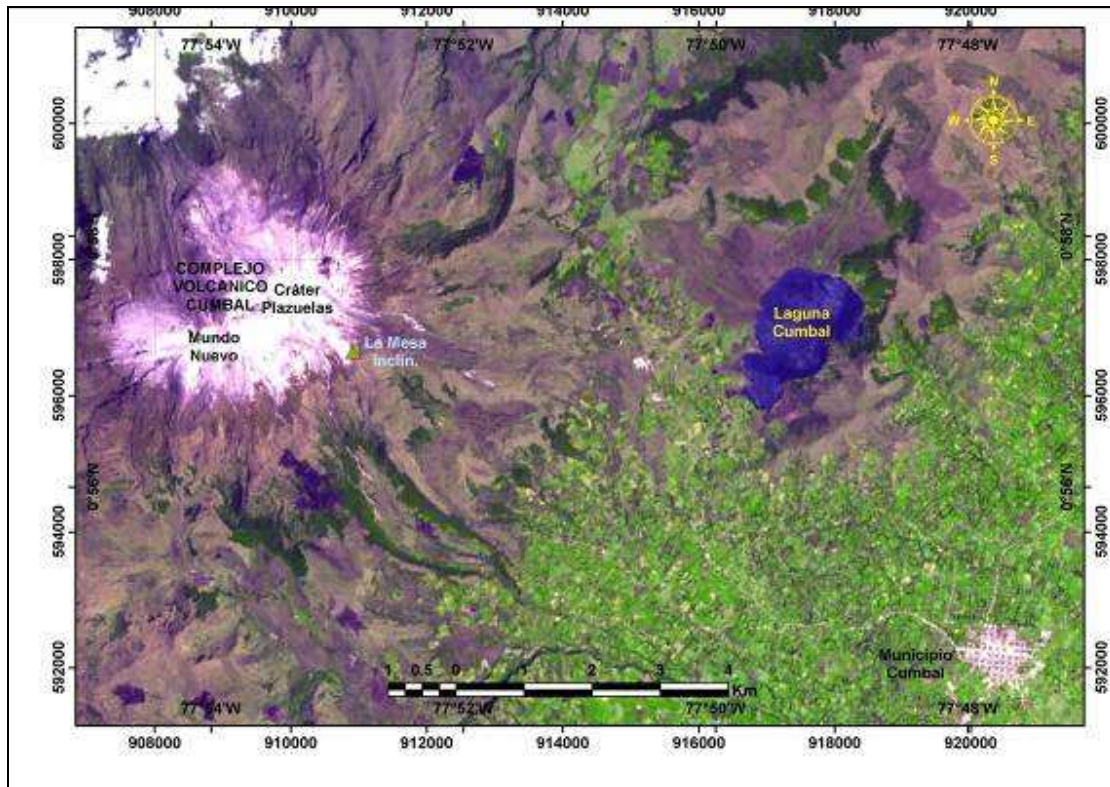


Figura 2.4.2. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal, durante el Primer Semestre de 2010.

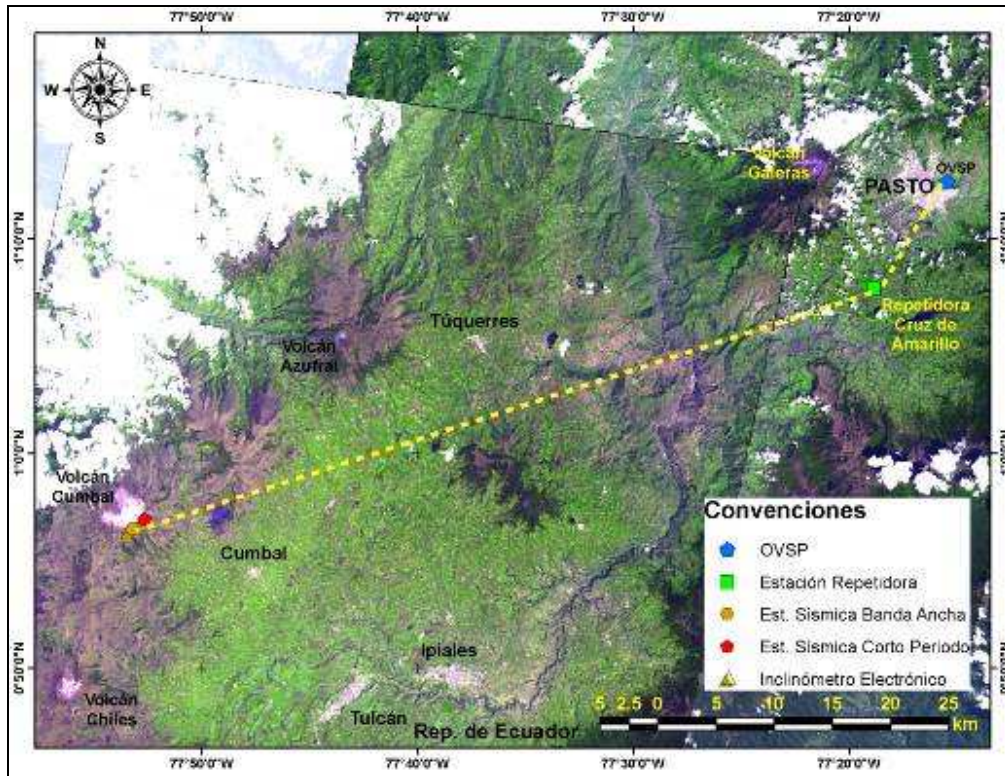


Figura 2.4.3. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal, durante el Primer Semestre de 2010. Las líneas punteadas muestran los diferentes enlaces telemétricos utilizados para la transmisión de los datos.

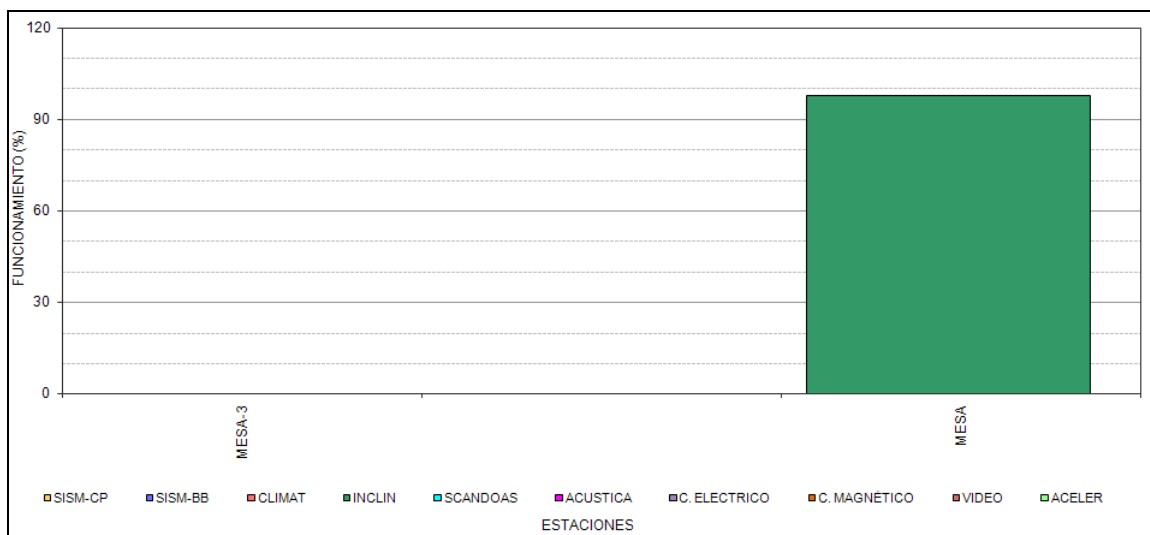


Figura 2.4.4. Histograma del porcentaje de funcionamiento, durante el Primer Semestre de 2010, de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Cumbal.

2.4.2 Sismología

Hasta el mes de diciembre de 2009 la red de monitoreo instalada en el volcán Cumbal permitió registrar sismicidad de origen volcánico, la cual en su mayoría correspondió a eventos relacionados a la dinámica de fluido de fuente transitoria (LP). Entre los meses de enero a junio de 2010, no fue posible registrar instrumentalmente actividad volcánica en Cumbal, debido a problemas de radio-enlace de la estación la Mesa y a la falta de la estación Limones la cual fue hurtada a finales del mes de diciembre de 2009.

2.4.3 Deformación

En cuanto a la información suministrada por el inclinómetro electrónico La Mesa (ubicado a 2,5 km al este-sureste del cráter Mundo Nuevo, 4270 msnm), a partir de mediados de enero de 2010 y hasta junio de 2010, mostró en sus componentes X (radial al cráter Mundo Nuevo) y, Y (tangencial al cráter Mundo Nuevo) una tendencia estable con variaciones poco significativas (Figura 2.4.5).

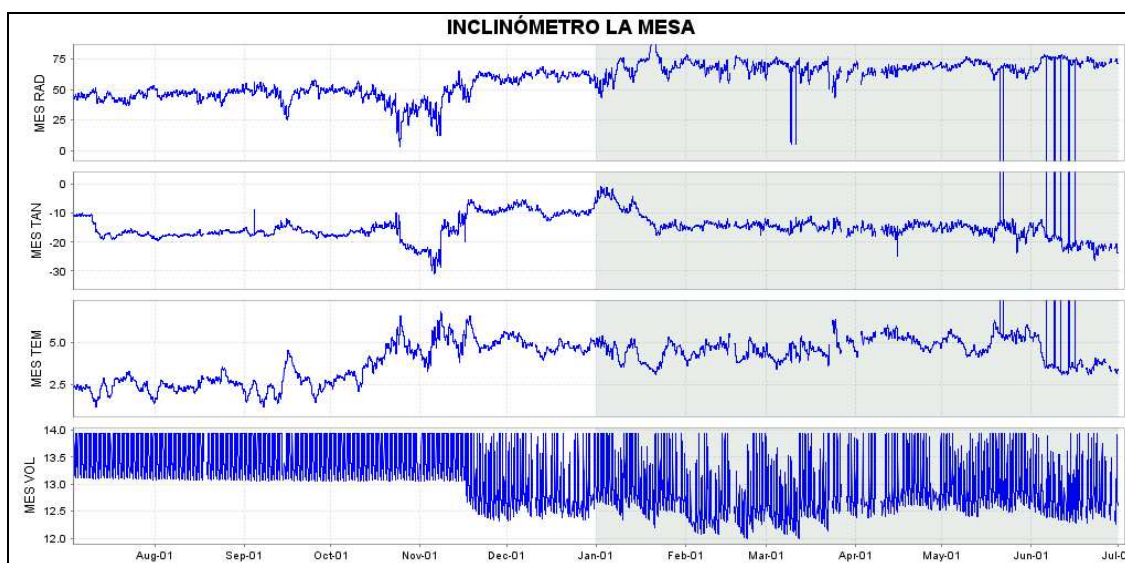


Figura 2.4.5. Componentes de inclinación radial y tangencial, junto con los datos de los canales de temperatura y voltaje del inclinómetro La Mesa, instalado en el complejo volcánico Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de julio de 2009 y el 30 de junio de 2010.

2.4.4 Físicoquímica

2.4.4.1 Muestreo de aguas termales en el complejo volcánico de Cumbal

2.4.4.1.1 Ubicación de las fuentes termales

Se inicio el muestreo de las fuentes termales del volcán Cumbal: El Salado, El Zapatero, Cuetial y Hueco Grande; siguiendo los lineamientos que se tienen para la vigilancia volcánica en Colombia. Los sitios seleccionados se encuentran dentro del área de influencia del fenómeno volcánico.

Se estableció las coordenadas geográficas y la altitud de los puntos de muestreo mediante GPS. A continuación se describe la ubicación de las fuentes termales.

2.4.4.1.1.1 Fuente Termal: El Salado

Desde el municipio de Túquerres (Nariño) se viaja por la vía Guachucal - Cumbal. Desde el Barrio Pueblo Viejo del municipio de Cumbal, se sigue hacia la vereda Cuetial, 0,2 Km antes del puente por donde pasa la Quebrada Blanca, (Figura 2.4.6). Como característica, es de alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 0° 53' 39.7" Latitud Norte y 77° 48' 42" Longitud Occidental y se encuentra a 3184 msnm.



Figura 2.4.6. Fotografía de la Fuente Termal El Salado, del Complejo volcánico de Cumbal.

2.4.4.1.1.2 Fuente Termal: El Zapatero

Desde el municipio de Túquerres (Nariño) se viaja por la vía Guachucal - Cumbal. Desde el Barrio Pueblo Viejo del municipio de Cumbal se sigue hacia Cuetial. 0,5 Km después del puente por donde pasa la Quebrada Blanca, en la margen derecha, donde se unen la Quebrada Negra con la Quebrada Blanca, se halla la fuente. (Figura 2.4.7). Como característica, es de alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 0° 54' 1.6" Latitud Norte y 77° 49' 18.7" Longitud Occidental y se encuentra a 3224 msnm.



Figura 2.4.7. Fotografía de la Fuente Termal El Zapatero, del Complejo volcánico de Cumbal.

2.4.4.1.1.3 Fuente Termal: El Cuetial

Desde el municipio de Túquerres (Nariño) se viaja por la vía Guachucal - Cumbal. Desde el Barrio Pueblo Viejo del municipio de Cumbal se sigue hacia la vereda Cuetial. 0,3 Km después del puente por donde pasa la Quebrada Blanca, se halla la fuente en la Hacienda del Señor Nicanor Alpalá (Figura 2.4.8). Como característica, es de alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre $0^{\circ} 53' 54.6''$ Latitud Norte y $77^{\circ} 49' 6.5''$ Longitud Occidental y se encuentra a 3208 msnm.



Figura 2.4.8. Fotografía de la Fuente Termal Cuetial, del Complejo volcánico de Cumbal.

2.4.4.1.1.4 Fuente Termal: Hueco Grande

Desde el municipio de Tuquerres (Nariño) se viaja por la vía Guachucal - Cumbal. Luego se sigue la vía Cumbal-San Martín, desviándose hacia la izquierda a los 3.5 Km, contados desde el parque principal del municipio de Cumbal. Desde este cruce se viaja por carreteable, recorriendo 4.0 Km hasta la Escuela Nueva de la Vereda La Ortiga. Desde allí se debe seguir a pie por tres horas y media, buscando la quebrada El Corral, al margen de la cual se encuentra esta fuente termal, (Figura 2.4.9). Como característica, es de alta influencia magmática. Geográficamente se sitúa entre 0° 55' 32" Latitud Norte y 77° 53' 35" Longitud Occidental y se encuentra a 2947 msnm.



Figura 2.4.9. Fotografía de la Fuente Termal Hueco Grande, del Complejo volcánico de Cumbal.

2.4.4.1.2 Mediciones de Parámetros Físicoquímicos en las fuentes termales del Volcán Cumbal

Se realizó la medición de parámetros físicoquímicos como Temperatura y pH en las fuentes termales del Volcán Cumbal: El Salado, El Zapatero, Cuetial y Hueco Grande (Figura 2.4.10). Si la temperatura es menor a 30°C, se hace la medición de conductividad. En la tabla 2.4.2 se indican los parámetros medidos in situ.



Figura 2.4.10. Fotografía de la medición de pH en la Fuente termal el Salado, del Volcán Cumbal.

Tabla 2.4.2. Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales del Volcán Cumbal.

FUENTE TERMAL	pH	Temperatura	Conductividad
El Salado	6.4	26.8°C	2.73 x10 ⁻³ μS /cm
El Zapatero	6.4	30.2°C	2.79 μS/cm
Cuetial	6.3	34.4°C	-
Hueco Grande	7.0	29.0°C	1781 μS/cm

Según los resultados se puede apreciar que la temperatura de las diferentes fuentes termales del Volcán Cumbal se encuentra entre 26 y 35°C. Para la fuente termal Cuetial, no se realizó medición de conductividad ya que su temperatura es superior a los 30°C. En cuanto al pH se puede afirmar que las fuentes termales muestreadas son ligeramente neutras con la excepción de la fuente termal Hueco Grande que presenta neutralidad total.

Los valores de conductividad eléctrica indican que la fuente termal Hueco Grande, las aguas se ionizan en forma más completa que las otras fuentes, lo que quiere decir, que hay mayor presencia de sales disueltas que las aguas termales del Zapatero y aún más, el Salado.

2.4.4.1.3 Análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos

De acuerdo con los resultados de los análisis de cloruros, sulfatos y bicarbonatos, es posible determinar la clasificación de las fuentes termales, según el ión dominante utilizando el diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻, (Figura 2.4.11) los resultados de los análisis y la clasificación se describen en la tabla 2.4.3.

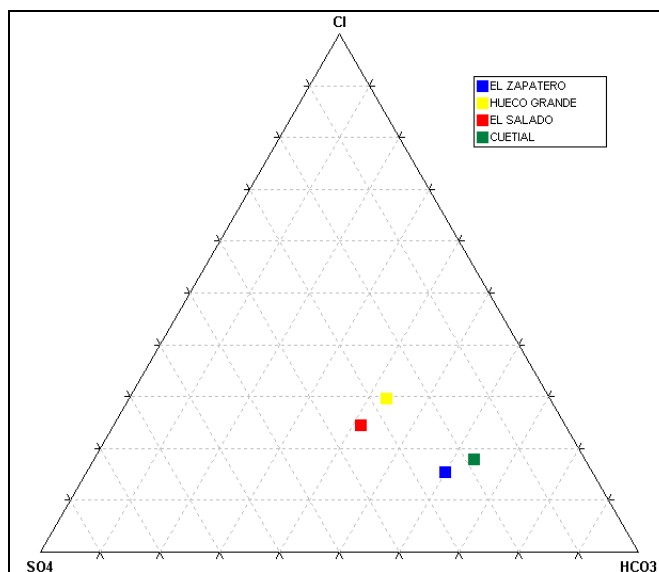


Figura 2.4.11. Diagrama triangular Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻ para las fuentes termales del Volcán Cumbal.

Tabla 2.4.3. Concentraciones de los aniones y clasificación de las fuentes termales del Volcán Cumbal.

FUENTE TERMAL	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Clasificación
El Zapatero	273.67	440	1067.5	Aguas Bicarbonatadas
Hueco Grande	289.98	266.25	420.9	Aguas Bicarbonato-cloruradas
El Salado	450.22	632.71	762.5	Aguas Bicarbonato – Sulfatadas
Cuetial	239.64	250.12	854	Aguas Bicarbonatadas

Según los resultados las fuentes termales del volcán Cumbal, en general, son aguas bicarbonatadas ya que los iones HCO₃⁻ se presentan a pH comprendidos entre 6 y 8, lo que coincide con los valores medidos, además la presencia de bicarbonatos indican que en estas aguas hay una baja tasa de mineralización.

2.4.4.1.4 Análisis de Cationes

En la tabla 2.4.4 se encuentra registrado las concentraciones de los diferentes cationes medidos en las fuentes termales del Volcán Cumbal. Utilizando el geoindicador Na-K-Mg, basado en los geotermómetros de Na/K y K/Mg (Figura 2.4.12), se puede decir que, al igual que las aguas termales del Volcán Azufra, existe un enriquecimiento en las especies químicas, normalmente incorporadas por aguas someras, particularmente en Magnesio, lo cual, es común en la periferia de los sistemas geotérmicos debido a la contribución de bicarbonatos por parte de las aguas subterráneas someras, ya que todas estas fuentes termales se clasificaron como aguas bicarbonatadas, con pH comprendidos entre 6 y 8.⁶ Además, la presencia de bicarbonatos indica que en estas aguas hay

⁶MIER, P. Informe mensual de Geoquímica de los Volcanes Galeras, Azufra y Cumbal, Mayo de 2010. San Juan de Pasto, Junio de 2010.

una baja mineralización, con respecto a los iones, litio, aluminio, zinc, estroncio y manganeso, tal como se muestra en la tabla 2.4.4.

Tabla 2.4.4. Concentraciones de los aniones presentes en las fuentes termales del Volcán Cumbal.

MUESTRA	Ca	Mg	Na	K	Li	Sr	Fe	Mn	Zn	Al	Si
El Salado	209.2	164.6	324.5	17.56	0.16	0.8	8.49	1.25	<0,1	<1	51.38
El Zapatero	179	130.4	321.2	16.17	<0,1	0.8	12.35	0.36	<0,1	<1	60.44
Cuetial	120.4	85.33	294.8	10.61	<0,1	0.73	15.61	0.59	<0,1	<1	62.97
Hueco Grande	107.9	88.42	183.1	16.82	0.86	0.8	<0,2	0.76	<0,1	<1	61.45

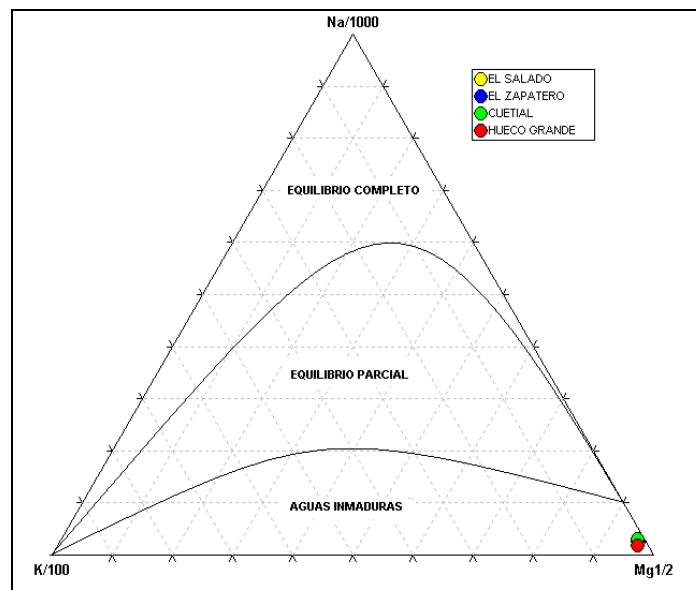


Figura 2.4.12. Diagrama triangular Na⁺- K⁺- Mg⁺, para las fuentes termales del Volcán Cumbal.

2.4.5 Actividad superficial

La actividad superficial del Complejo volcánico de Cumbal, se documentó a partir de reportes del sobrevuelo realizado a mediados del mes de febrero, con el apoyo de la Fuerza Aérea de Colombia y personal del INGEOMINAS.

El 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana (Helicóptero Huey II) se realizó un sobrevuelo donde fue posible capturar imágenes de la cima del Volcán Cumbal, en ellas se observó salida de gases, desde la fumarola El Verde, en bastante cantidad y de color blanco, mientras que, desde la fumarola Humeros la salida de gases era mínima (Figura 2.4.13). Durante el sobrevuelo no se percibió olores a gases azufrados.



Figura 2.4.13. Registros fotográficos capturados durante el sobrevuelo a la zona de influencia del volcán Cumbal, el cual se realizó en horas de la mañana del 15 de febrero de 2010, con el apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana.

Para los meses de enero, marzo, abril, mayo y junio, no se tuvieron reportes relacionados con actividad superficial en el complejo volcánico Cumbal.

2.4.6. Conclusiones

- Los registros del inclinómetro electrónico de La Mesa no muestran variaciones considerables, además, debido a problemas de radio enlace de la estación sismológica La Mesa en el Primer Semestre de 2010 no fue posible tener un registro instrumental de la actividad sísmica. Se recuerda que este volcán tiene la presencia de varios campos fumarólicos que presentan fluctuaciones en las tasas de emisión y que se han evidenciado desde el año 1988.
- Con la información que se tiene del complejo volcánico Cumbal, no es posible realizar la evaluación de la actividad volcánica.



2.5 BIBLIOGRAFÍA

Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. Reportes Mensuales de Actividad del Volcán Galeras. Meses de enero a junio de 2010. Varios autores. Informes inéditos. Pasto. 2010.

Información complementaria puede ser consultada en la página web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto en: <http://intranet.ingeominas.gov.co/pasto/>

2.6 PERSONAL PARTICIPANTE

A continuación se hace referencia al personal del grupo técnico que han participado de diferente manera en el análisis, procesamiento e interpretación de la información que se genera a partir de los diferentes parámetros de monitoreo volcánico en el Primer Semestre del 2010.

Personal INGEOMINAS Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto	
Diego Mauricio Gómez Martínez	Adriana Micaela Ortega Estupiñán
Oscar Ernesto Cadena	Anita Patricia Ponce Villarreal
Roberto Armando Torres Corredor	Betty Silva Parra
John Meneses	Edgar Muñoz Hidalgo
Richard Andrés Mier	Darío Arcos Guerrero
Lourdes Narváez Medina	Jorge Edison Mora Arroyo
Jairo Ortiz Valencia	Paola Mier Portilla
Grupo de Estudiantes monitores de la Universidad de Nariño en el OVSP	